

15º Congresso de Inovação, Ciência e Tecnologia do IFSP - 2024

Panorama dos Sensores com aplicações de Monitoramento Inteligente de Corrosão por Cloretos em Estruturas de Pontes e Viadutos.

PEDRO F. CARVALHO¹, JOSÉ AMÉRICO ALVES SALVADOR FILHO²

¹Bacharelado em Engenharia Civil, Bolsista CNPq, IFSP, Câmpus Caraguatatuba, fernandes.carvalho@aluno.ifsp.edu.br.

²Professor Doutor, Departamento de Construção Civil, IFSP Campus Caraguatatuba, jasalvador@ifsp.edu.br.

Área de conhecimento (Tabela CNPq): 3.01.02.01-4 Engenharia Civil.

RESUMO: O presente trabalho tem como objetivo revisar as tecnologias emergentes para o monitoramento da corrosão por cloretos em estruturas de concreto armado, dada a crescente preocupação com a durabilidade e segurança das infraestruturas urbanas. A corrosão induzida por cloretos é um dos principais fatores de degradação que compromete a integridade de pontes e viadutos, exigindo métodos eficazes de monitoramento. A pesquisa foi realizada por meio de uma revisão bibliográfica em plataformas como Web of Science e Periódicos CAPES, focando em estudos dos últimos cinco anos. Os resultados revelaram uma predominância de publicações em países como China, Índia e Estados Unidos, enquanto o Brasil apresenta uma contribuição limitada. A análise bibliométrica identificou 17 estudos relevantes sobre sensores para corrosão, destacando tecnologias como indução eletromagnética, resistência elétrica e eletroquímicas. As conclusões indicam a necessidade de desenvolvimento de soluções inovadoras para o monitoramento da corrosão, visando garantir a segurança e a durabilidade das estruturas de concreto, além de reduzir custos com manutenção. Este trabalho contribui para o entendimento do panorama atual das pesquisas na área, reforçando a importância da inovação no setor da engenharia civil.

PALAVRAS-CHAVE: corrosão; cloretos; concreto armado; monitoramento em tempo real; Infraestrutura.

Overview of Sensors for Intelligent Monitoring of Chloride-Induced Corrosion in Bridge and Viaduct Structures.

ABSTRACT: The present work aims to review emerging technologies for monitoring chloride corrosion in reinforced concrete structures, given the growing concern about the durability and safety of urban infrastructures. Chloride-induced corrosion is one of the main degradation factors that compromise the integrity of bridges and viaducts, requiring effective monitoring methods. The research was carried out through a bibliographic review on platforms such as Web of Science and CAPES Periodicals, focusing on studies from the last five years. The results revealed a predominance of publications in countries such as China, India and the United States, while Brazil makes a limited contribution. The bibliometric analysis identified 17 relevant studies on corrosion sensors, highlighting technologies such as electromagnetic induction, electrical resistance and electrochemicals. The conclusions indicate the need to develop innovative solutions for monitoring corrosion, aiming to

guarantee the safety and durability of concrete structures, in addition to reducing maintenance costs. This work contributes to the understanding of the current panorama of research in the area, reinforcing the importance of innovation in the civil engineering sector.

KEYWORDS: corrosion; chlorides; reinforced concrete; real-time monitoring; Infrastructure..

INTRODUÇÃO

A associação entre concreto e aço é essencial para garantir a segurança e a durabilidade das infraestruturas urbanas, como pontes e edifícios. No entanto, a corrosão representa um risco significativo para a longevidade dessas estruturas (CARDOSO, 2016). A corrosão induzida por cloretos, proveniente de fontes externas como a água do mar e a maresia, compromete a durabilidade do concreto armado ao permitir a penetração de íons cloreto, que danificam as armaduras. Isso resulta em fissuras e perda de aderência, reduzindo a capacidade estrutural e encurtando a vida útil das obras, além de gerar altos custos de manutenção (SKRZYPCZAK et al., 2023).

A necessidade de um monitoramento eficaz da corrosão por cloretos é, portanto, vital para a preservação dessas estruturas. Embora métodos convencionais ofereçam alguma avaliação, eles são limitados em eficiência e custo. Com a crescente demanda por infraestrutura segura, a pesquisa por tecnologias avançadas de monitoramento tem se intensificado. Sensores inovadores para monitoramento contínuo e em tempo real da corrosão têm sido propostos (LUZ, 2019).

Este trabalho visa revisar as tecnologias emergentes para o monitoramento da corrosão por cloretos em concreto armado, abordando tanto as inovações quanto os desafios enfrentados. A pesquisa considera fatores que influenciam a corrosão, como a profundidade de cobrimento e a concentração de cloretos. A revisão busca esclarecer oportunidades e limitações, contribuindo para o desenvolvimento de métodos mais eficazes e adaptados às condições reais de uso.

MATERIAIS E MÉTODOS

O presente estudo se baseia em uma revisão bibliográfica cujo objetivo é compreender o panorama global e o desenvolvimento recente de sensores para o monitoramento da corrosão por cloretos em estruturas de concreto armado. Para a coleta de dados, foram consultadas as plataformas Web of Science e Periódicos CAPES, utilizando grupos de palavras-chave como “sensor”, “corrosion”, “concrete” e “chloride”. A busca foi limitada aos últimos cinco anos, e os resultados foram analisados e organizados por meio do software VOSviewer, que facilitou a visualização de tendências e colaborações entre autores.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Através do Web Of Science com dois grupos de palavras-chave, I. “sensor”; “corrosion”; “concrete” e II. “sensor”; “chloride”; “concrete” e filtrando os resultados dos últimos 5 anos, mostrou que o primeiro grupo, com 361 resultados, é mais amplo, pois engloba publicações que tratam de sensores para corrosão e concreto. O segundo grupo, com 104 resultados, é mais específico, pois trata de sensores para cloretos e concreto. Além disso, os resultados mostraram que países como China, Índia e Estados Unidos, estão liderando o desenvolvimento de tecnologias neste seguimento, enquanto o Brasil não se apresenta como um autor relevante na área.

Os resultados do segundo grupo de palavras-chave foram selecionados e reduzidos de 104 para 17, sendo esses, pesquisas que falavam sobre o uso, teste ou fabricação de algum tipo de sensor para corrosão por cloretos.

Dos 17 selecionados, foram sendo fichados conforme as características de cada sensor, como o seu funcionamento (princípio químico/físico) e tipo de sensor. A Tabela 1 resume os resultados dessa análise, destacando a diversidade de abordagens e tecnologias empregadas na detecção de corrosão em estruturas de concreto.

Tabela 1: Análise bibliométrica dos trabalhos publicados nos últimos 5 anos, classificados por funcionamento e tipo de sensor.

Ref.	Ano	Funcionamento	Tipo
(MAMUN et al., 2019)	2019	Indução Eletromagnética	Bobina de cobre
(BADR et al., 2019)	2019	Resistência elétrica	Placa PCB
(KIM et al., 2020)	2020	Resistência elétrica	Eletrodos
(TIAN et al., 2020)	2020	Eletroquímico e Eletrônico	Eletrodos Ag/AgCl e MnO ₂ e sensor de luz e umidade
(JIN et al., 2020)	2020	Eletroquímico	
(BANSAL; TALAKOKULA, 2021)	2020	Piezoelétricidade	Impedância eletromecânica
(BIONDI et al., 2020)	2020	Geopolimerização	Fabricação do sensor geopolimérico
(RAMANI; KUANG, 2020)	2021	Indução Eletromagnética	Sensor piezoelétrico
(BOUZAFFOUR et al., 2021)	2021	Eletrônico	Chip UHF-RFID
(COLOZZA et al., 2021)	2021	Eletroquímico	Papel de fluxo vertical
(SOURIOU et al., 2022)	2022	Magnético	Material Magnético Funcional
(DU et al., 2022)	2022	Artigo de revisão	
(FAN; SHI, 2022)	2022	Artigo de revisão	
(MARTINEZ-IBERNON et al., 2023)	2023	Eletroquímico	Eletrodos de Níquel
(WANG et al., 2023)	2023	Eletroquímico	Análise de pH por eletrodos
(FUSHIMI et al., 2023)	2023	Eletroquímico	Análise de pH por eletrodos
(HUANG et al., 2023)	2023	Geopolimerização	Sensor de Cloreto

A classificação por funcionamento facilita a compreensão das tecnologias e suas aplicações no monitoramento da corrosão, com cada tipo de sensor oferecendo diferentes vantagens de precisão e aplicabilidade, sendo eles:

1. **Indução Eletromagnética:** Sensores de indução eletromagnética operam com bobinas de cobre que, ao serem energizadas, criam campos magnéticos que detectam a presença de íons cloreto por meio de alterações eletromagnéticas. Esses sensores são eficazes para monitoramento de longo prazo da corrosão em concreto armado, como descrito por (MAMUN et al., 2019) e (RAMANI; KUANG, 2020).
2. **Resistência Elétrica:** Sensores de resistência elétrica monitoram a corrosão medindo as mudanças na resistência do material ao longo do tempo. A corrosão modifica a seção transversal dos eletrodos, alterando a resistência elétrica, o que permite a detecção da progressão do processo corrosivo. Este método é aplicado em sensores como os de (BADR et al., 2019) e (KIM et al., 2020).
3. **Eletroquímico:** Os sensores eletroquímicos utilizam reações eletroquímicas entre os eletrodos e os íons cloreto para detectar a presença e concentração de cloretos em concretos expostos. Este método é sensível a mudanças iniciais de corrosão, como nos estudos de (TIAN et al., 2020), (JIN et al., 2020), (MARTINEZ-IBERNON et al., 2023), (WANG et al., 2023), e (FUSHIMI et al., 2023).
4. **Piezoelétricidade:** Sensores piezoelétricos operam gerando um sinal elétrico proporcional às vibrações e estresses estruturais causados pela corrosão. Eles são indicados para ambientes com movimentação ou carga cíclica, conforme ilustrado por (BANSAL; TALAKOKULA, 2021).
5. **Geopolimerização:** Sensores baseados em geopolímeros utilizam materiais com propriedades semelhantes ao concreto e reagem à presença de cloretos. Esses sensores têm um papel duplo de monitoramento e substituição de materiais convencionais, sendo destacados por (BIONDI et al., 2020) e (HUANG et al., 2023).

6. **Tecnologia UHF-RFID:** A tecnologia de sensores UHF-RFID (Radio-Frequency Identification) utiliza chips para monitorar alterações causadas pela corrosão, podendo ser monitorada remotamente. Esses sensores são aplicados em ambientes expostos e de difícil acesso, como mencionado em (BOUZAFFOUR et al., 2021).
7. **Magnético:** Sensores magnéticos detectam a corrosão pela mudança nas propriedades magnéticas dos materiais afetados pela presença de cloretos, como em (SOURIOU et al., 2022).
8. **Análise de pH:** Sensores de análise de pH monitoram as variações no pH local que indicam a corrosão em ambientes com cloretos. Quando o pH diminui, o processo de corrosão é acelerado, como demonstrado em (WANG et al., 2023) e (FUSHIMI et al., 2023).

CONCLUSÕES

Conforme demonstrado por esta revisão sobre sensores para monitoramento da corrosão por cloretos em concreto armado, a pesquisa nessa área apresenta uma evolução constante, refletindo o crescente interesse por tecnologias cada vez mais precisas e inovadoras. Observa-se que a limitação de estudos sobre sensores amplamente aplicáveis representa uma oportunidade para que a academia e a indústria da construção civil desenvolvam soluções que atendam a uma demanda crescente por técnicas de monitoramento robustas e integradas. O avanço de sensores eficazes contribuirá significativamente para a segurança e durabilidade das estruturas de concreto armado, além de proporcionar economias importantes em manutenção e reparo. Desta forma, o progresso na pesquisa de sensores para corrosão é fundamental para garantir a sustentabilidade e a resiliência das infraestruturas, alinhando-se ao compromisso com a inovação e a excelência técnica no setor da engenharia civil.

CONTRIBUIÇÕES DOS AUTORES

Carvalho P. F. contribuiu com a revisão bibliográfica sistemática, avaliação dos diversos sensores estudados, análise da montagem de cada sensor e redação do artigo. Salvador Filho, J. A. A. contribuiu com a elaboração do plano de trabalho da investigação, com a definição do escopo, métodos e orientação da investigação, e revisão do trabalho.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo pelo apoio institucional. Este projeto foi financiado pelo CNPq.

REFERÊNCIAS

- BADR, J. et al. Design and validation of a multi-electrode embedded sensor to monitor resistivity profiles over depth in concrete. *Construction and Building Materials*, v. 223, p. 310–321, oct 2019.
- BANSAL, T.; TALAKOKULA, V. D. Deterioration of structural parameters due to corrosion in prestressed concrete identified by smart probe-based piezo sensor. *Engineering Research Express*, v. 3, n. 1, mar 2021.
- BIONDI, L. et al. Geopolymer-based moisture sensors for reinforced concrete health monitoring. *Sensors and Actuators B-Chemical*, v. 309, p. 127775, apr 2020.
- BOUZAFFOUR, K. et al. Development of an embedded uhf-rfid corrosion sensor for monitoring corrosion of steel in concrete. *IEEE Sensors Journal*, v. 21, n. 10, p. 12306–12312, may 2021.

- CARDOSO, M. A. R. Alerta poÁ– um sistema de comunicaÇÃo apoiado em redes de sensores sem fio para monitoraÇÃo do cÓrrego itaim. 2016.
- COLOZZA, N. et al. Vertical-flow paper sensor for on-site and prompt evaluation of chloride contamination in concrete structures. *Analytical Chemistry*, v. 93, n. 43, p. 14369–14374, nov 2021.
- DU, Z. et al. All-solid-state chloride sensor for in-situ monitoring of chloride penetration in concrete. *Construction and Building Materials*, v. 357, p. 129345, nov 2022.
- FAN, L.; SHI, X. Techniques of corrosion monitoring of steel rebar in reinforced concrete structures: A review. *Structural Health Monitoring-An International Journal*, v. 21, n. 4, p. 1879–1905, jul 2022.
- FUSHIMI, K. et al. Miniature ph detection probe for in-situ monitoring of cement paste inside. *Electrochimica Acta*, v. 441, p. 141776, feb 2023.
- HUANG, B. et al. Hybrid cement composite-based sensor for in-situ chloride monitoring in concrete structures. *Sensors and Actuators B-Chemical*, v. 385, p. 133638, jun 2023.
- JIN, M. et al. Developing a multi-element sensor to non-destructively monitor several fundamental parameters related to concrete durability. *Sensors*, v. 20, n. 19, p. 5607, oct 2020.
- KIM, S. et al. Facial fabrication and characterization of novel ag/agcl chloride ion sensor based on gel-type electrolyte. *Frontiers in Chemistry*, v. 8, p. 574986, nov 2020.
- LUZ, I. V. D. UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE CENTRO DE TECNOLOGIA DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS. 2019.
- MAMUN, K. A. et al. A prototype of an electromagnetic induction sensor for non-destructive estimation of the presence of corrosive chemicals ensuing concrete corrosion. *Sensors*, v. 19, n. 9, p. 1959, may 2019.
- MARTINEZ-IBERNON, A. et al. Development of a new ni voltammetric sensor for hardened concrete conditions estimate. *Sensors and Actuators Reports*, v. 5, p. 100155, jun 2023.
- RAMANI, V.; KUANG, K. S. C. Monitoring chloride ingress in concrete using an imaging probe sensor with sacrificial metal foil. *Automation in Construction*, v. 117, p. 103260, sep 2020.
- SKRZYPCZAK, I. et al. Modeling of chloride-induced corrosion in concrete bridge using the simplified and full probabilistic methods. *Inżynieria Bezpieczeństwa Obiektów Antropogenicznych*, p. 35–45, dez 2023.
- SOURIOU, D. et al. Experimental parametric study of a functional-magnetic material designed for the monitoring of corrosion in reinforced concrete structures. *Remote Sensing*, v. 14, n. 15, p. 3623, aug 2022.
- TIAN, Y. et al. Application of ag/agcl sensor for chloride monitoring of mortar under dry-wet cycles. *Sensors*, v. 20, n. 5, p. 1394, mar 2020.
- WANG, Y. et al. In-situ monitoring of ph and cl- concentration and rebar corrosion at the rebar/mortar interface. *Construction and Building Materials*, v. 400, p. 132712, oct 2023.