

Uso da Inteligência Artificial em Estruturas Metálicas: uma análise Cientométrica das inovações na construção 4.0

Yonara Patrícia M. Silva^{1*}, Gabriela Alves T. de Moraes², Carolina de Lima França³

¹Graduanda em Engenharia Civil, Centro Universitário Brasileiro, Brasil. (*Autor correspondente: yonrapatricia24@hotmail.com)

²Doutoranda em Engenharia Civil, Centro Universitário Brasileiro, Brasil

³Doutora em Engenharia de Água e Solos, Centro Universitário Brasileiro, Brasil

Histórico do Artigo: Submetido em: 12/03/2026 – Revisado em: 01/04/2026 – Aceito em: 23/05/2026

RESUMO

No âmbito da construção civil, as estruturas metálicas se destacam na engenharia pelo desempenho mecânico e versatilidade. Porém, o modelo tradicional de detecção de falhas nessas estruturas é lento e geralmente tardio, baseando-se em inspeções visuais ou ensaios manuais aplicados por profissionais da área. Nesse cenário, a aplicação da IA em estruturas metálicas mostra-se promissora. Diante do exposto, este trabalho tem como objetivo geral realizar uma análise cientométrica da produção científica sobre as aplicações da Inteligência Artificial em estruturas metálicas. Para alcançar os objetivos propostos, a pesquisa adotou um método de revisão cientométrica, com a finalidade de quantificar e visualizar a produção científica sobre o uso de inteligência artificial aplicada as estruturas metálicas. A pesquisa foi desenvolvida utilizando a base de dados Scopus e a ferramenta de análise VOSviewer, considerando o período de 2020 a 2025. O estudo identificou crescimento significativo no número de publicações relacionadas ao uso da IA na engenharia estrutural, destacando periódicos relevantes como *Engineering Structures*, *Structures* e *Buildings*. Os resultados evidenciaram que os principais temas pesquisados envolvem monitoramento estrutural inteligente, otimização estrutural, detecção de danos, especialmente corrosão, aplicações no setor eólico e uso em situações emergenciais. Observou-se, ainda, baixa conectividade entre autores e pouca colaboração nas redes de coautoria e cocitação. Como limitações, destacam-se o uso de apenas uma base de dados e o recorte temporal restrito. Conclui-se que a IA possui papel crescente e promissor na engenharia estrutural, ampliando possibilidades de inovação, eficiência e segurança, além de abrir caminhos para novas pesquisas no campo

Palavras-Chaves: Inteligência Artificial, Estruturas Metálicas, Construção 4.0, Aprendizado de Máquina.

The Use of Artificial Intelligence in Metal Structures: A Scientometric Analysis of Innovations in Construction 4.0

ABSTRACT

In the field of civil construction, steel structures stand out in engineering due to their mechanical performance and versatility. However, the traditional model for detecting failures in these structures is slow and often insufficiently timely, relying primarily on visual inspections or manual testing performed by specialized professionals. In this context, the application of Artificial Intelligence (AI) to steel structures has emerged as a promising alternative. Given this scenario, the present study aims to conduct a scientometric analysis of the scientific production on the applications of Artificial Intelligence in steel structures. To achieve this goal, the research adopted a scientometric review method to quantify and visualize the body of scientific literature concerning the use of AI in metallic structures. The study was conducted using the Scopus database and VOSviewer, covering the period from 2020 to 2025. The findings indicate a significant increase in the number of publications related to AI in structural engineering, highlighting relevant journals such as *Engineering Structures*, *Structures*, and *Buildings*. The results show that the main research themes include intelligent structural monitoring, structural optimization, damage detection, particularly corrosion, applications in the wind energy sector, and implementations in emergency scenarios. The analysis also revealed low connectivity among authors and limited collaboration in co-authorship and co-citation networks. The study's limitations include the use of a single database and a narrow temporal scope. In conclusion, AI plays an increasingly relevant and promising role in structural engineering, expanding opportunities for innovation, efficiency, and safety, while also opening pathways for future research in the field.

Keywords: Artificial Intelligence, Steel Structures, Construction 4.0, Machine Learning

Silva, Y. P. M., Moraes, G. A. T. de, & França, C. de L. (2026). Uso da inteligência artificial em estruturas metálicas: Uma análise cientométrica das inovações na construção 4.0. *Revista Universitária Brasileira*, 4(3), 30–52.

A Revista Universitária Brasileira utiliza a *Creative Commons* (CC BY 4.0)

1. Introdução

A Construção 4.0 impulsionou o emprego de diversas tecnologias digitais para diversificar e maximizar os processos da construção civil, tornando-os mais eficientes, sustentáveis, economicamente viáveis e interligados. Nesse contexto, a inteligência artificial (IA) pode ser utilizada como uma ferramenta de automação estratégica. A IA tem ganhado cada vez mais força, transformando a forma como os profissionais atuam no mercado, projetam, constroem e monitoram estruturas. A transformação digital, causada pela inteligência artificial tem promovido mudanças significativas na atuação dos profissionais da área, principalmente engenheiros, impactando não apenas os processos construtivos, mas também as competências profissionais exigidas pelo mercado¹.

Estudos recentes demonstram que a IA vem sendo aplicada de forma crescente em atividades relacionadas à automação de tarefas, análises de dados, além de oferecer apoio a tomada de decisões de forma assertiva. Tecnologias como aprendizado de máquina (*Machine Learning*), aprendizagem profunda (*Deep Learning*) e outras variações, tem se consolidado como ferramentas estratégicas para modernização do setor, promovendo uma dinâmica diferente para o cenário da construção civil¹. Além dos ganhos técnicos, a adoção da inteligência artificial na engenharia civil traz implicações diretas para a formação dos profissionais. A literatura aponta que a automação de tarefas repetitivas ajuda os engenheiros a tornarem seu trabalho mais ágil e focar em serviços ou setores de maior demanda intelectual, além ajudar na análise crítica de projetos e na tomada de decisões. Todavia, com as novidades tecnologias surgem desafios como a necessidade de atualização constante e aquisição de novas habilidades, bem como a adaptação a um ambiente de trabalho cada vez mais digital e interconectado¹.

As estruturas metálicas se destacam pelo desempenho mecânico e versatilidade. Contudo, o desempenho dessas estruturas requer monitoramento contínuo, uma vez que a corrosão permanece como um dos principais desafios ao emprego do aço. Nesse sentido, o modelo tradicional de detecção da corrosão é lento e geralmente tardio, baseando-se em inspeções visuais ou ensaios manuais aplicados por profissionais da área². Nesse cenário, a aplicação da IA em estruturas metálicas mostra-se promissora. Modelos preditivos baseados em inteligência artificial permitem avaliar dados ambientais e prever a corrosão com alta precisão, superando a limitação dos métodos tradicionais, sobretudo na fase inicial do processo. As redes neurais convolucionais (CNNs), por exemplo, analisam imagens de alta resolução e identificam microfissuras ou discretas descolorações, sinais precoces de corrosão que não seriam detectados por técnicas convencionais². Técnicas como análise de previsão de comportamento estrutural sobre diferentes condições de carregamento e exposição ambiental ajudam na previsibilidade das estruturas. Dessa forma, a IA consegue contribuir para a otimização do dimensionamento de elementos estruturais de aço, reduzindo incertezas e promovendo soluções mais seguras e economicamente eficientes².

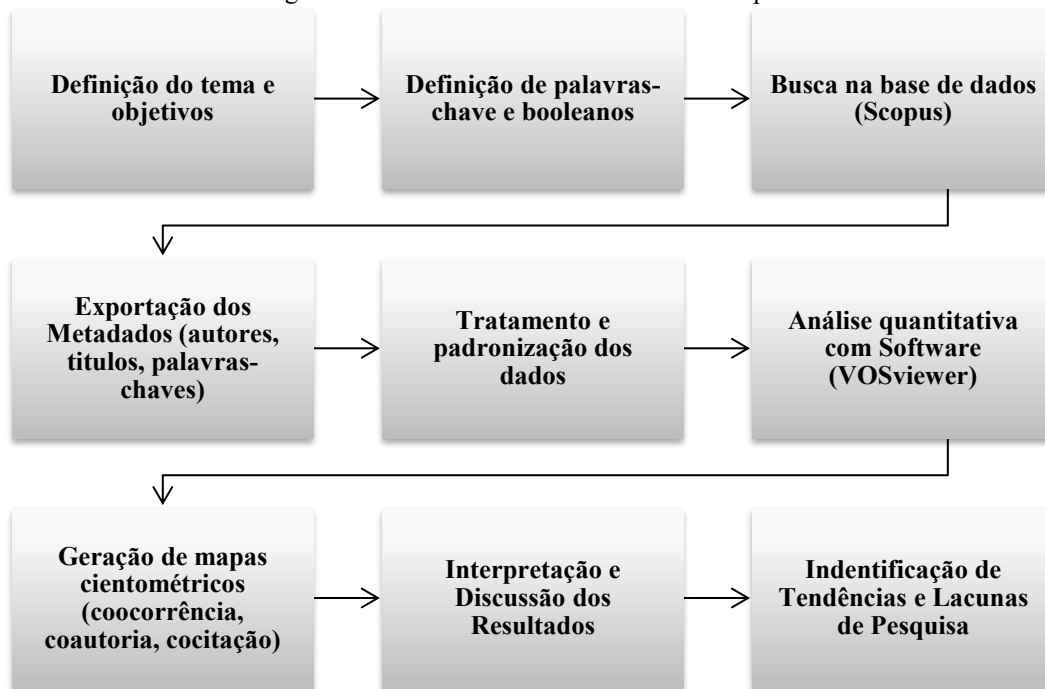
A literatura evidencia o potencial da inteligência artificial para aprimorar os processos já consolidados na engenharia civil. Diversos estudos comprovam sua eficiência e demonstram que essa tecnologia pode ser incorporada desde a fase conceitual do projeto até sua execução e o suporte pós-obra, por meio do monitoramento das estruturas, etapa especialmente relevante em ambientes sujeitos a altos níveis de corrosão. Entretanto, observa-se que essas aplicações ainda ocorrem de forma pontual e não sistematizada. Essa lacuna indica que há um vasto campo a ser explorado, no sentido de integrar a inteligência artificial de maneira abrangente e contínua em todas as etapas do processo construtivo.

2. Metodologia da Pesquisa

Para alcançar os objetivos propostos, a presente pesquisa adotou um método de revisão cientométrica (Figura 1), com a finalidade de quantificar e visualizar a produção científica sobre o uso de inteligência artificial aplicada as estruturas metálicas. Essa abordagem é um método quantitativo que mapeia o conhecimento e sua evolução, além de mapear conexões entre autores, temas e instituições, tendo em vista uma base de dados científicos, permitindo uma visão abrangente dos padrões e tendências no setor da pesquisa^{3,4,5}.

A revisão cientométrica é um processo de análise quantitativa do progresso científico, que examina o impacto das pesquisas por meio de indicadores bibliométricas. Para essa finalidade, foi utilizado o VOSviewer, software projetado para gerar mapas visuais de redes científicas^{3,4,5}, visando identificar palavras-chaves recorrentes, colaborações entre pesquisadores, interações entre países, relações de citação. Em relação a representação visual, quanto maior o círculo, maior a relevância do item, a cor indica o grupo, e a distância entre as rotulas expressão o nível da conexão^{3,4,5}.

Figura 1 – Etapas do protocolo de Revisão Cientométrica
Figure 1 – Scientometric Review Protocol Steps



Fonte: Adaptado de Martínez, Al-Hussein e Ahmad; Van Eck e Waltman^{5,6}.
Source: Adapted by de Martínez, Al-Hussein e Ahmad; Van Eck e Waltman^{5,6}.

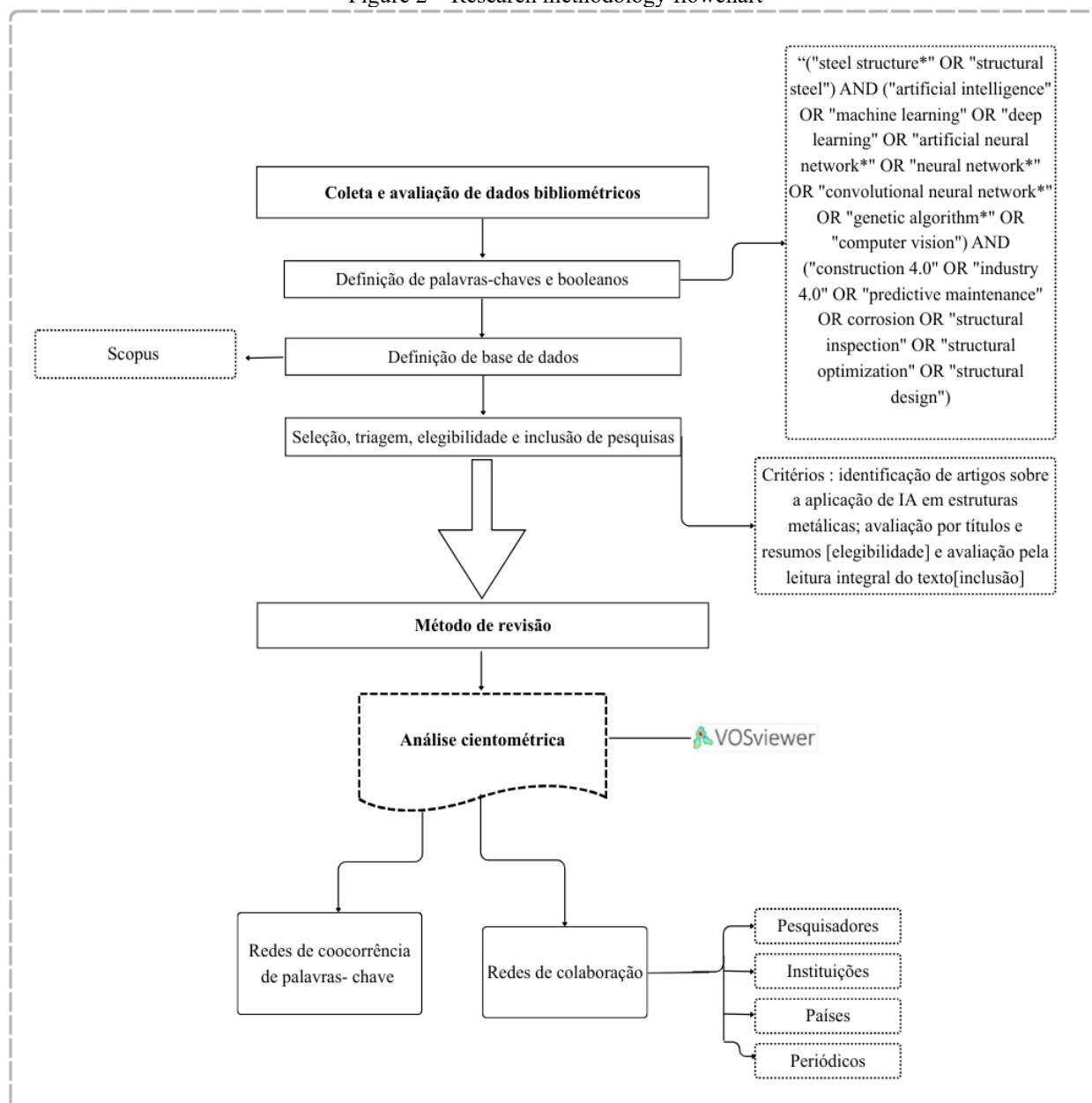
O estudo foi feito com base em metadados de artigos científicos indexados permitindo a observação de estruturas e como se relacionam com a inteligência artificial e as tendências de pesquisa nesse contexto. Após a análise, os resultados foram interpretados de modo comparativo, buscando convergências e lacunas no campo científico^{3,4,5}. O procedimento adotado englobou as seguintes etapas:

1. Busca sistemática em bases científicas para identificar estudos sobre IA e estruturas metálicas;
2. Triagem e refinamento dos artigos, mantendo apenas os alinhados ao escopo da pesquisa;
3. Organização dos dados (autores, título, ano, país, palavras-chave e citações);
4. Geração de mapas de coocorrência, coautoria e cocitação no VOSviewer;
5. Análise e discussão dos resultados, destacando as tendências e perspectivas futuras do tema.

A Figura 2 apresenta o fluxograma das etapas empregadas para o desenvolvimento da revisão cientométrica desenvolvida no presente trabalho. Os dados da literatura foram obtidos através da base de dados Scopus, por meio da busca por “título/resumo/palavras-chaves”. Esse tipo de busca seleciona os documentos de forma mais abrangente, visto que seleciona os documentos que contêm as palavras-chaves selecionadas no título, resumo ou nas palavras-chaves, o que permite uma maior área de coleta de informações. A escolha da Scopus como base de dados, ocorreu em razão da mesma ser considerada uma ferramenta robusta e amplamente precisa em fornecimento de dados bibliométricos de alta qualidade. Além disso, a Scopus oferece dispositivos de filtros avançados para mapeamento bibliométrico e permite a utilização do VOSviewer, ferramenta que será utilizada nesta revisão cientométrica, para a criação de redes científicas e análise de relações entre autores, temas e instituições⁵. A Scopus também é considerada uma ferramenta de ampla cobertura multidisciplinar, sendo considerada uma das fontes que mais obtém capacidade de gerar indicadores quantitativos confiáveis⁶.

Para uma coleta estruturada, são identificados um conjunto de dados: o conjunto de dados principais que foi extraído da base de dados Scopus. O conjunto de dados principal é composto por artigos diretamente relacionados ao uso de inteligência artificial em estruturas metálicas. A seleção desses artigos está diretamente relacionada a sua relevância com o tema. As redes de colaboração e cocitação estão compreendidas no conjunto de dados principal⁵.

Figura 2 – Fluxograma da metodologia da pesquisa
 Figure 2 – Research methodology flowchart



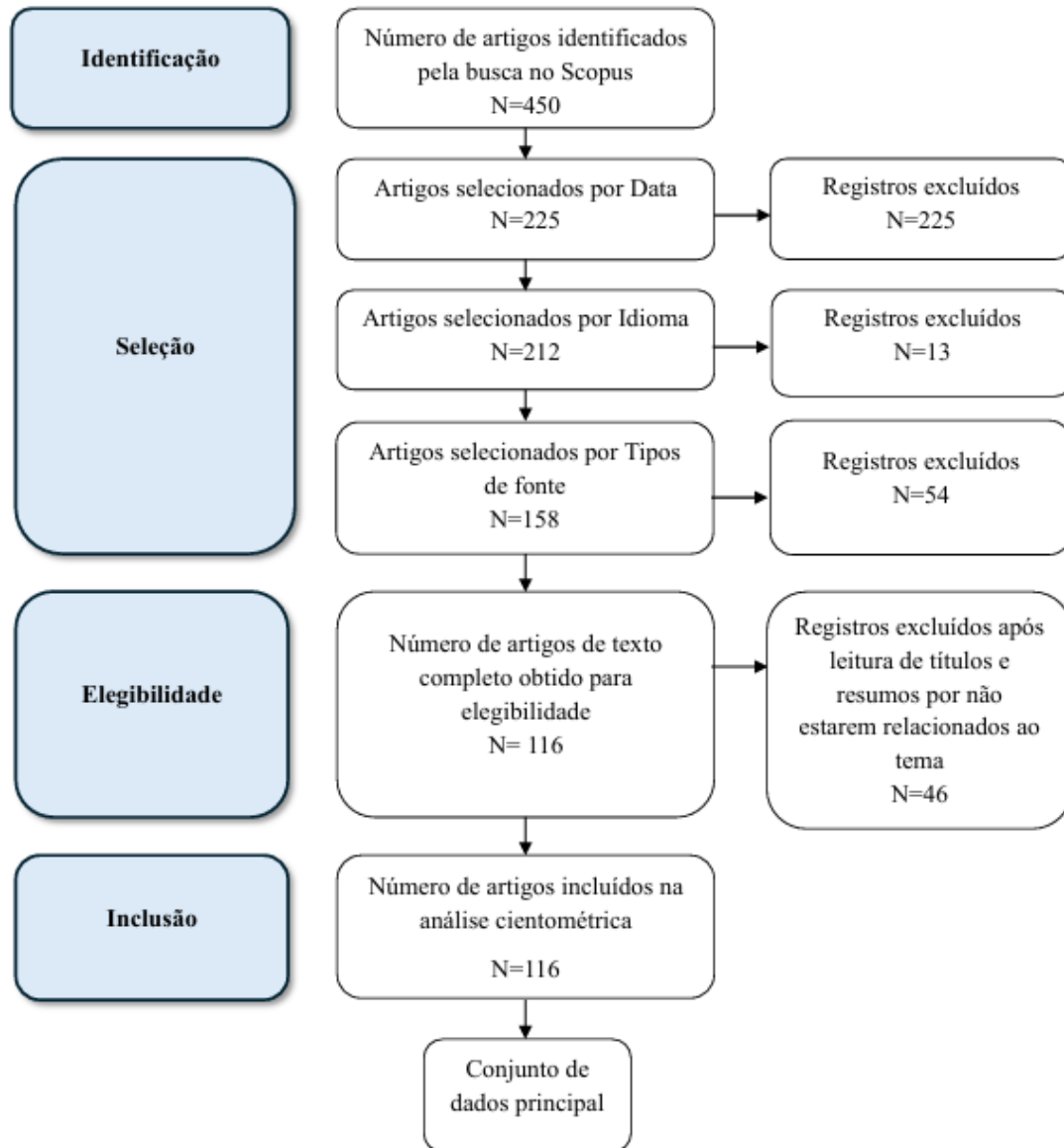
Fonte: Elaborado pelas autoras (2025).
 Source: the author (2025).

Para identificação dos trabalhos publicados na base de dados da Scopus, foi utilizado a seguinte combinação de palavras-chaves e operadores booleanos : (“*steel structure**” OR “*structural steel*”) AND (“*artificial intelligence*” OR “*machine learning*” OR “*deep learning*” OR “*artificial neural network**” OR “*neural network**” OR “*convolutional neural network**” OR “*genetic algorithm**” OR “*computer vision*”) AND (“*construction 4.0*” OR “*industry 4.0*” OR “*predictive maintenance*” OR *corrosion* OR “*structural inspection*” OR “*structural optimization*” OR “*structural design*”). A busca foi realizada utilizando palavras-chave em língua inglesa, visando ampliar o alcance dos resultados, uma vez que o inglês é o idioma predominante na produção científica.

A busca foi realizada em 22 de outubro de 2025, resultando inicialmente na identificação de 450 artigos a partir da pesquisa por título, resumo e palavras-chave. Como nenhum critério de exclusão havia sido aplicado nessa etapa, procedeu-se à triagem dos estudos com o objetivo de refinar os resultados. Foram adotados como

critérios de seleção: publicações redigidas em inglês ou português, período de publicação entre 2020 e 2026, a fim de contemplar temas mais atuais no contexto da construção civil, e artigos publicados em periódicos. Dessa forma, foram excluídos artigos de conferências, capítulos de livros e revisões. Além disso, realizou-se uma revisão manual para remover estudos que não abordassem diretamente o tema central. Após a aplicação de todos os critérios de elegibilidade, o conjunto inicial de 450 artigos foi reduzido a 116 publicações, selecionadas para análise. A Figura 3 apresenta o processo de coleta e filtragem dos dados.

Figura 3 – Fluxograma da coleta e filtragem de dados
 Figure 3 – Data collection and filtering flowchart



Fonte: Elaborado pelas autoras (2025).
 Source: the author (2025).

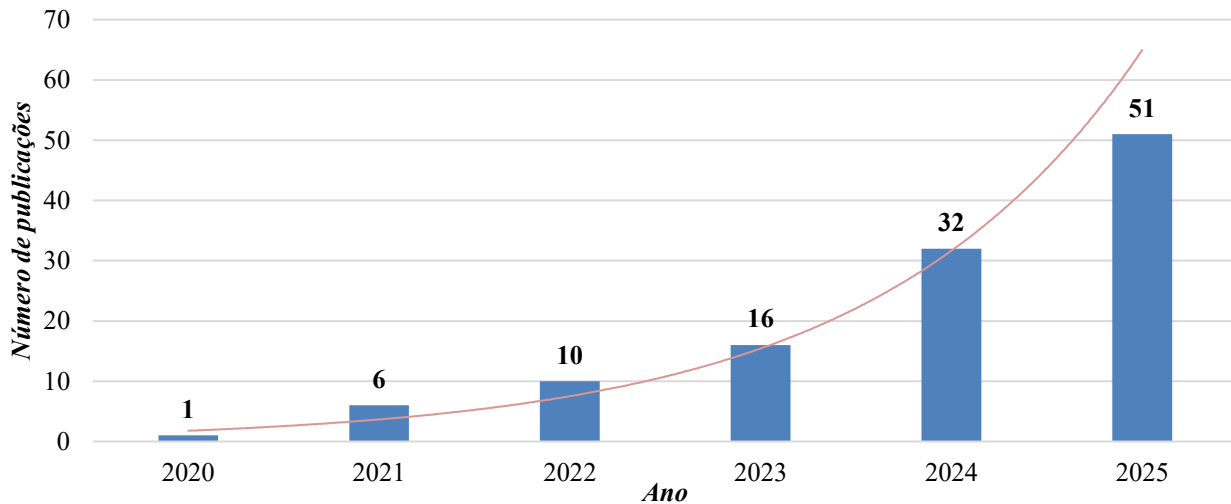
3. Resultados e Discussões

O presente tópico, inicialmente, apresenta uma visão geral da produção científica, considerando a distribuição anual das publicações, os principais periódicos e os artigos mais citados. Em seguida, são detalhadas as análises de coocorrência de palavras-chave, coautoria entre autores e países, cocitação de autores e documentos, acoplamento bibliográfico e agrupamento por meio da formação de clusters, além da detecção de *bursts* de citações. Após a apresentação dos resultados referentes ao conjunto principal de dados, são expostas as análises realizadas sobre o conjunto de dados expandido.

3.1 Visão geral da produção científica

A Figura 4 apresenta a evolução da produção científica relacionada ao uso de inteligência artificial em estruturas metálicas/aço. Observa-se que, no intervalo analisado (2020–2025), houve um crescimento significativo no número de estudos publicados sobre o tema. O ano de 2025 apresentou o maior volume de publicações, evidenciando o aumento do interesse acadêmico e científico pela aplicação da IA nesse campo.

Figura 4 – Evolução da produção científica no período de 2020 a 2025
 Figure 4 – Evolution of scientific production from 2020 to 2025



Fonte: Elaborado pelas autoras (2025).
 Source: the author (2025).

A Tabela 1 apresenta os principais periódicos relacionados a este campo de pesquisa. A identificação dessas fontes é relevante, pois pode orientar futuras investigações, indicando onde há maior concentração de estudos sobre o tema. Nesta análise, destacaram-se os periódicos *Engineering Structures* (12 artigos), *Structures* (11 artigos) e *Buildings* (7 artigos). Os demais periódicos listados na Tabela 1 apresentaram três artigos cada. Embora diversos periódicos tenham sido identificados ao longo da pesquisa, são apresentados aqui apenas aqueles com maior representatividade no conjunto analisado.

Tabela 1 – Lista de periódicos que mais publicaram artigos referente ao tema
 Table 1 - List of journals that have published the most articles on the topic

Periódico	Nº de artigos
Engineering Structures	12
Structures	11
Buildings	7
Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering	3
Materials	3
Ocean Engineering	3
Applied Sciences (Switzerland)	3

Fonte: Elaborado pelas autoras (2025).
 Source: the author (2025).

3.2 Coocorrência de palavras chaves

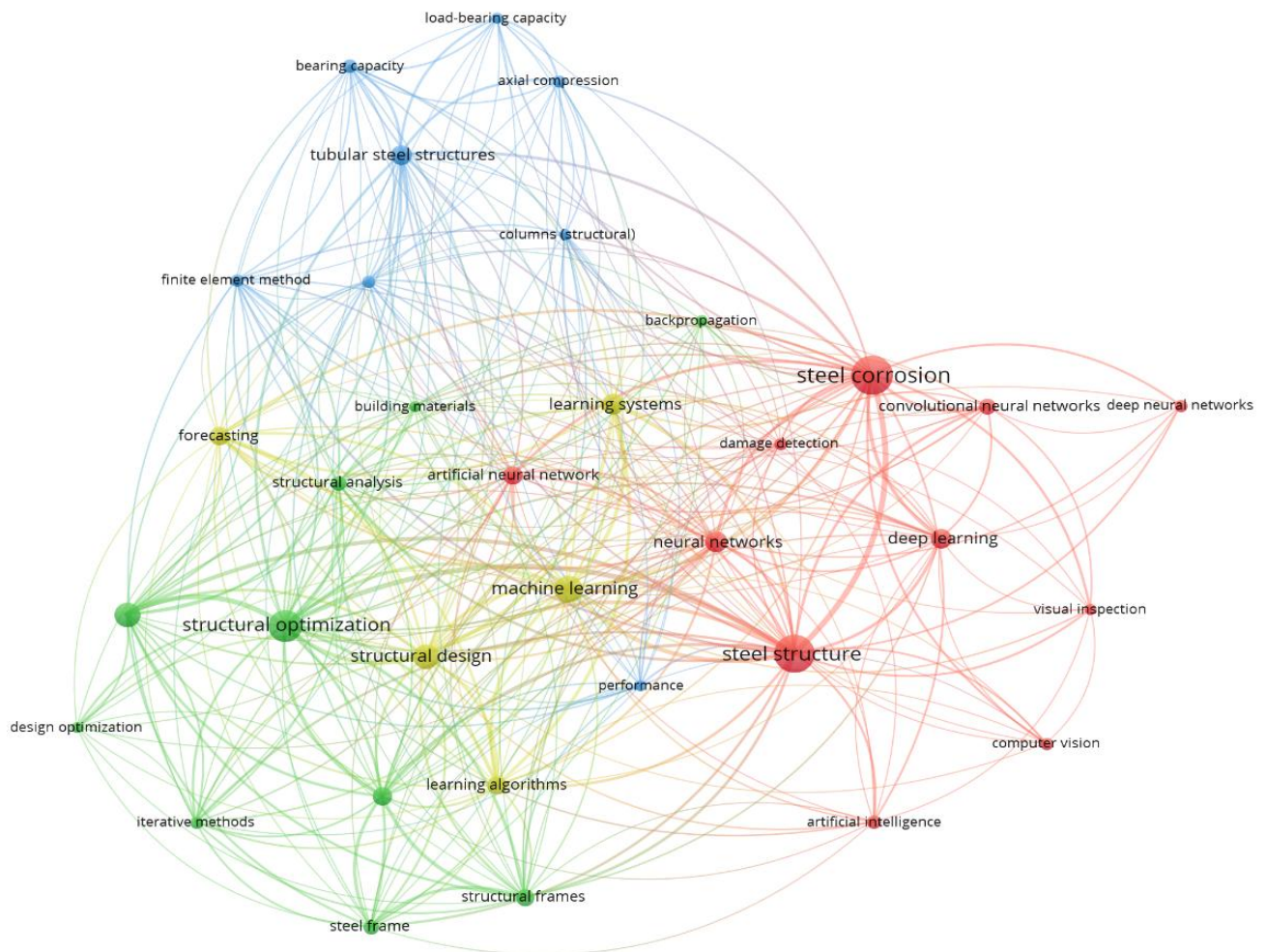
O software *VOSviewer* foi utilizado para visualizar as relações entre palavras-chave e identificar os principais tópicos abordados na literatura analisada. A técnica de coocorrência consiste em verificar a frequência com que determinados termos aparecem conjuntamente nos documentos, permitindo identificar conexões temáticas e áreas de concentração de pesquisa. Quando palavras surgem de forma recorrente no mesmo conjunto de estudos, presume-se que compartilham alguma relação conceitual ou metodológica.

Para compreender o cenário do uso de inteligência artificial na engenharia e, especificamente, em estruturas metálicas, realizou-se uma análise de coocorrência de palavras-chave. O *VOSviewer* gera mapas de

relações por meio de um processo computacional que considera a proximidade visual entre os termos, produzindo um mapa baseado em distâncias, no qual é possível observar a força das conexões entre as palavras. As palavras-chave representam o conteúdo central dos artigos e, portanto, funcionam como indicadores relevantes das áreas de pesquisa mais recorrentes⁵. Os agrupamentos identificados no *VOSviewer*, chamados de *clusters*, são representados por diferentes cores, e o tamanho do rótulo de cada termo está relacionado ao número de publicações em que a palavra-chave aparece. Assim, rótulos maiores indicam maior frequência de ocorrência na literatura.

Na Figura 5, observa-se o mapa de coocorrência, que indica em quantos artigos cada palavra-chave apareceu, seja no título, no resumo ou nas próprias palavras-chave fornecidas pelos autores. A contagem utilizada foi completa, considerando todos os termos presentes no conjunto analisado. Como critério, definiu-se um número mínimo de cinco ocorrências para que uma palavra fosse incluída no mapa.

Figura 5 – Redes de coocorrência de palavras chaves
Figure 5 - Keyword co-occurrence networks



Fonte: Elaborado pelas autoras (2025).
Source: the author (2025).

Os dados foram extraídos da base *Scopus* em formato CSV e inseridos no *VOSviewer*. Na primeira geração do mapa, identificaram-se diversas redundâncias, o que levou à utilização de um arquivo de thesaurus (formato *.txt*) para padronização e agrupamento de sinônimos ou termos equivalentes. Após os ajustes, o mapa final foi obtido (Figura 5).

O resultado revela a presença de quatro clusters principais, distinguíveis pelas cores. Os maiores rótulos correspondem às palavras-chave “*Steel corrosion*”, “*Steel structure*” e “*Structural optimization*”, sendo que duas delas pertencem ao mesmo *cluster*. Em seguida, destacam-se termos de tamanho intermediário, como “*Machine learning*” e “*Structural design*”.

A Tabela 2 apresenta informações complementares referentes às ocorrências de cada palavra-chave, indicando sua frequência na literatura existente e contribuindo para a identificação das áreas de maior relevância dentro do campo estudado.

Tabela 2 – Detalhamento de coocorrência de palavras chaves
Table 2 - Detailed analysis of keyword co-occurrence

Palavra-chave	Ocorrências	Força do link
<i>Steel corrosion (Corrosão do aço)</i>	54	144
<i>Steel structure (Estrutura de aço)</i>	51	191
<i>Structural optimization (Otimização estrutural)</i>	38	161
<i>Machine learning (Aprendizado de máquina)</i>	27	119
<i>Genetic algorithms (Algoritmos genéticos)</i>	23	97
<i>Structural design (Projeto estrutural)</i>	23	115
<i>Learning systems (Sistemas de aprendizagem)</i>	16	83
<i>Neural networks (Redes neurais)</i>	16	66
<i>Deep learning (Aprendizado profundo)</i>	15	51
<i>Tubular steel structures (Estruturas tubulares de aço)</i>	15	66
<i>Forecasting (Previsão)</i>	13	63
<i>Learning algorithms (Algoritmos de aprendizagem)</i>	13	76
<i>Artificial neural network (Rede neural artificial)</i>	12	50
<i>Steel construction (Construção em aço)</i>	12	78
<i>Structural frames (Estruturas)</i>	11	68
<i>Convolutional neural networks (Redes neurais convolucionais)</i>	9	32
<i>Steel frame (Aço leve)</i>	8	54
<i>Structural analysis (Análise estrutural)</i>	8	50
<i>Artificial intelligence (Inteligência artificial)</i>	7	22
<i>Bearing capacity (Capacidade de carga)</i>	7	36
<i>Axial compression (Compressão axial)</i>	6	27
<i>Computer vision (Visão computacional)</i>	6	15
<i>Damage detection (Detecção de danos)</i>	6	25
<i>Deep neural networks (Redes neurais profundas)</i>	6	12
<i>Finite element method (Métodos de elementos finitos)</i>	6	42
<i>Iterative methods (Métodos iterativos)</i>	6	46
<i>Regression analysis (Análise de regressão)</i>	6	40
<i>Backpropagation (Retropropagação)</i>	5	17
<i>Building materials (Materiais de construção)</i>	5	22
<i>Columns structural (Colunas estruturais)</i>	5	24
<i>Design optimization (Otimização de projeto)</i>	5	21
<i>Load-bearing capacity (Capacidade de carga)</i>	5	25
<i>Performance (Performance)</i>	5	31
<i>Visual inspection (Inspeção visual)</i>	5	19

Fonte: Elaborado pelas autoras (2025).

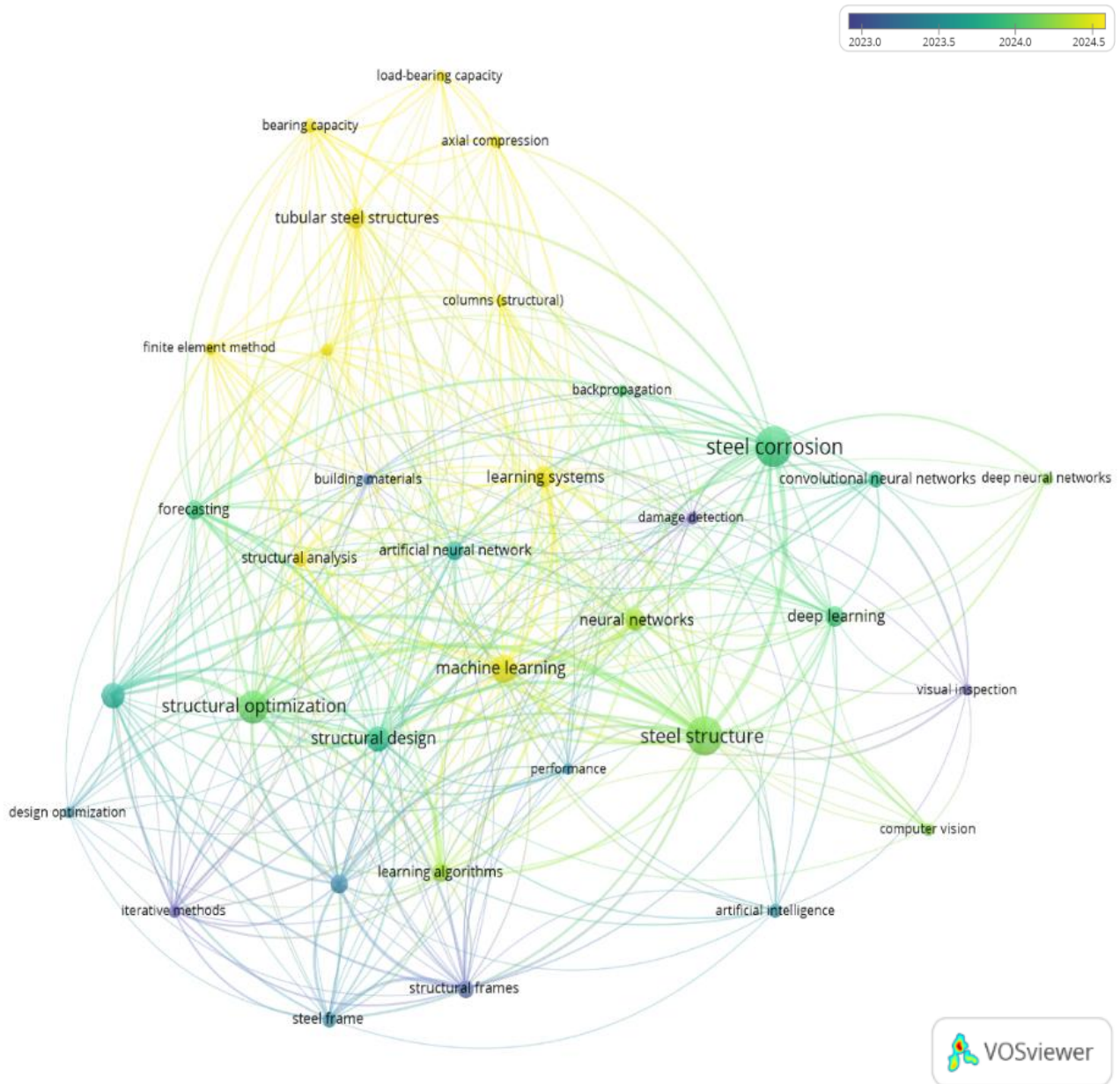
Source: the author (2025).

Na interpretação das informações apresentadas pelo *VOSviewer*, os indicadores mais relevantes são força de link e ocorrências. A ocorrência representa o número de vezes que uma palavra-chave aparece no conjunto de documentos analisados. Já a força de link mede a intensidade da conexão entre dois itens da rede, considerando quantas vezes eles aparecem conjuntamente, seja por coocorrência de palavras-chave, cocitação ou outras formas de relação. Embora o *VOSviewer* apresente as informações graficamente em forma de rede, a Tabela 2 complementa essa visualização com a contagem exata das ocorrências. Observa-se que a palavra-chave “*Corrosão do aço*” (*steel corrosion*) apresenta 54 ocorrências, indicando sua forte presença na literatura analisada. Em seguida, destaca-se “*Estrutura de aço*” (*steel structure*), com 51 ocorrências, sendo esta última o termo com maior força de link (191), o que evidencia seu papel central nas interconexões temáticas

O *VOSviewer* também permite análises temporais, como a apresentada na Figura 6, que mostra a evolução das palavras-chave ao longo do tempo. Esse tipo de análise é fundamental para compreender a dinâmica da literatura e o surgimento de novas tendências de pesquisa. Na Figura 6, observa-se que, entre 2024 e 2025, termos como “*Steel corrosion*”, “*Steel structure*” e “*Structural optimization*” apresentaram maior destaque, indicando que, nesse período, o foco das pesquisas esteve diretamente associado ao estudo do aço e suas aplicações. Nota-se, inclusive, que o termo “*Steel*” aparece de forma recorrente nas palavras-chave mais recentes. Além disso, termos evidenciados em amarelo, como “*machine learning*”, “*learning systems*” e

“*tubular steel structures*”, ganharam maior visibilidade a partir de 2025, podendo ser interpretados como tendências emergentes desse período. Já termos como “*design optimization*”, “*iterative methods*”, “*structural frames*” e “*steel frame*”, refletem um predomínio das pesquisas voltadas ao aço e à otimização estrutural em 2023. A partir da análise da Figura 6, percebe-se um movimento de transição temática entre 2023 e 2025, com crescente ênfase em métodos baseados na evolução da inteligência artificial e em suas aplicações mais avançadas no campo das estruturas metálicas.

Figura 6 – Redes de coocorrência de palavras chaves (análise temporal)
 Figure 6 - Keyword co-occurrence networks (temporal analysis)



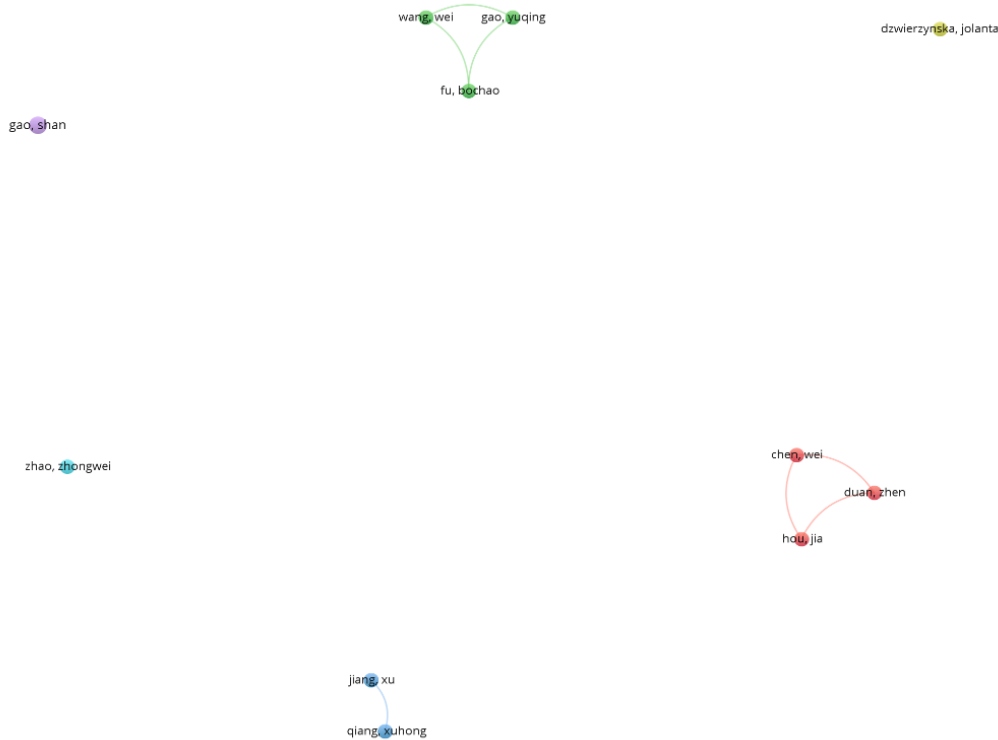
Fonte: Elaborado pelas autoras (2025).
 Source: the author (2025).

3.3 Coautoria de autores

A análise de coautoria, uma das técnicas mais utilizadas no contexto cientométrico, permite identificar as estruturas das redes de colaboração científica e compreender como o conhecimento está sendo produzido e disseminado em determinado campo de pesquisa. A presença de coautoria indica possíveis vínculos entre pesquisadores, o que possibilita também a identificação de relações entre instituições e países envolvidos na mesma base de dados⁷.

Na análise de coautoria realizada no *VOSviewer*, foram identificados 457 autores no conjunto de dados. Entretanto, apenas 11 autores atenderam ao critério mínimo definido para inclusão no mapa, que foi a publicação de pelo menos três documentos, sem exigência de número mínimo de citações por autor. Com esses autores, foi gerada uma rede composta por onze rótulos distribuídos em seis clusters de colaboração, conforme apresentado na Figura 7.

Figura 7 – Redes de coautoria de autores
Figure 7 – Author co-authorship networks



Fonte: Elaborado pelas autoras (2025).
 Source: the author (2025).

O tamanho dos rótulos no mapa indica a quantidade de documentos associados a cada autor. Observa-se que os tamanhos são bastante semelhantes, o que evidencia que, de maneira geral, os autores possuem produção próxima, variando entre três e quatro publicações, como detalhado na Tabela 3. Identifica-se ainda a presença de apenas três clusters que apresentam mais de um autor, indicando que há grupos restritos com algum nível de colaboração entre pesquisadores.

Tabela 3– Detalhamento de coautoria de autores
Table 3 – Details regarding co-authorship of authors

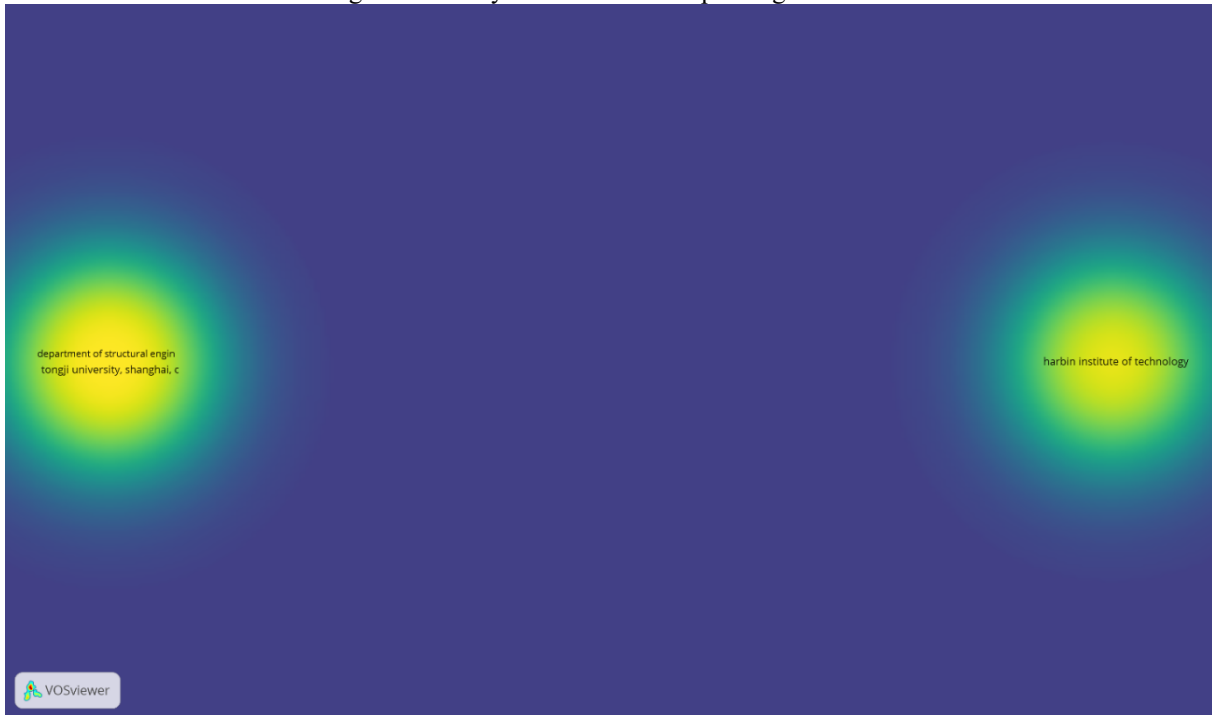
Autores	Documentos	Citações	Força do link
Chen, Wei	3	4	6
Duan, Zhen	3	4	6
Dzwierzynska, Jolanta	3	13	0
Fu, Bochao	3	15	6
Gao, Shan	4	18	0
Gao, Yuqing	3	15	6
Hou, Jia	3	4	6
Jiang, Xu	3	17	3
Qiang, Xuhong	3	17	3
Wang, Wei	3	15	6
Zhao, Zhongwei	3	42	0

Fonte: Elaborado pelas autoras (2025).
 Source: the author (2025).

3.4 Coautoria de organizações

Como complemento às análises anteriores, também foi gerada uma rede de coautoria entre organizações. Das 257 organizações identificadas no conjunto de dados, apenas 5 atenderam ao critério mínimo estabelecido de quatro documentos por instituição. A partir dessas organizações, foi possível formar dois clusters de colaboração, conforme mostrado na Figura 8.

Figura 8 – Análise de coautoria de organizações
Figure 8 - Analysis of co-authorship of organizations

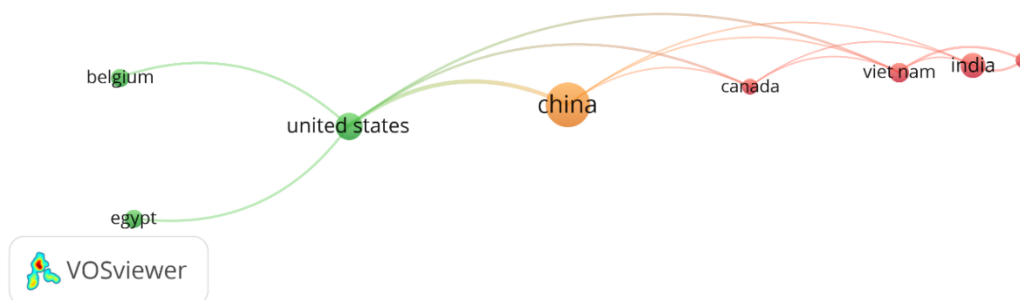


Fonte: Elaborado pelas autoras (2025).
Source: the author (2025).

3.5 Coautoria entre países e regiões

De forma análoga às redes anteriores, foi elaborada uma rede baseada nas contribuições entre países e regiões, com o objetivo de compreender melhor a distribuição geográfica dos artigos relacionados ao uso da inteligência artificial em estruturas metálicas (Figura 9).

Figura 9 – Coautoria de países
Figure 9- Co-authorship of countries



Fonte: Elaborado pelas autoras (2025).
Source: the author (2025).

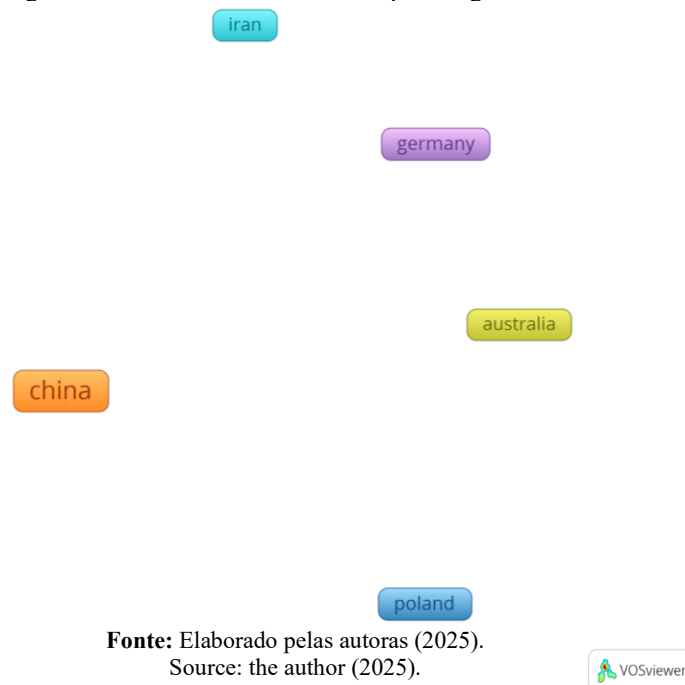
Os dados foram inseridos no *VOSviewer* e selecionou-se o tipo de análise “coautoria”, com unidade de análise “países”. O método de contagem adotado foi o fracionado. Inicialmente, definiu-se como critério mínimo a publicação de cinco documentos por país; entretanto, como apenas 5 dos 41 países presentes no

conjunto atendiam a esse requisito, o valor foi redefinido para três documentos, o que ampliou o número de países incluídos na análise. Assim, dos 41 países, 13 atenderam ao critério mínimo, e destes, 8 apresentaram conexões entre si, conforme destacado no recorte ampliado apresentado na Figura 9. A rede resultante pode ser considerada composta por sete *clusters*.

A Figura 9 evidencia que China (57 artigos), Estados Unidos (13 artigos) e Índia (10 artigos) foram os países que mais contribuíram para esse campo de pesquisa, indicando forte atuação no desenvolvimento e aplicação de diferentes tipos de inteligência artificial em estruturas metálicas. Quanto maior o volume de publicações produzidas em determinado país, maior tende a ser o nível de desenvolvimento científico e tecnológico associado ao tema. No caso das inovações tecnológicas aplicadas à construção civil, destaca-se que a China possui posição de liderança e *expertise* reconhecida.

A Figura 10 contempla todos os países identificados. Como as conexões com a China não eram claramente visíveis no mapa completo, optou-se por apresentar a Figura 13 como um recorte ampliado das relações mais densas. Na Figura 10, observa-se a presença de países relativamente “isolados”, como Irã, Alemanha, Austrália e Polônia, os quais apresentam menor integração científica com os demais participantes da rede.

Figura 10 – Coautoria maximizada de países
Figure 10 - Maximized co-authorship among countries



Outro ponto a ser destacado é que o Brasil não apareceu entre os países conectados no mapa de coautoria, o que pode indicar um nível ainda reduzido de produção científica nacional sobre o uso da IA aplicada a estruturas metálicas. Entretanto, é importante considerar que o período analisado (2020–2025) contempla apenas as publicações mais recentes sobre o tema, o que pode influenciar essa representatividade.

3.6 Cocitação de autores

A cocitação é uma técnica amplamente utilizada em análises bibliométricas e permite identificar conexões conceituais entre autores ou artigos. Essa relação ocorre quando dois pesquisadores ou documentos são citados conjuntamente por outros estudos dentro de um mesmo conjunto de publicações. A análise de cocitação possibilita visualizar redes de colaboração intelectual, revelar influências teóricas e identificar áreas emergentes dentro de um campo científico. Além disso, é fundamental para mapear conexões temáticas e compreender como autores e trabalhos se inter-relacionam ao longo da literatura⁸.

Na análise realizada, definiu-se no *VOSviewer* um número mínimo de três citações por autor. A partir dos 383 autores identificados inicialmente, apenas 12 atenderam ao critério estabelecido, resultando na formação de seis clusters. A Figura 11 apresenta uma visão geral da rede de cocitações.

Figura 11 – Rede de cocitação de autores
 Figure 11 -Author co-citation network



Fonte: Elaborado pelas autoras (2025).
 Source: the author (2025).

Observando a estrutura da rede, destacam-se os clusters vermelho, verde e azul, ambos formados por dois autores cada, sendo os grupos mais representativos em termos de conexões internas. A Tabela 4 apresenta a lista completa dos autores presentes na rede de cocitação. A análise da Tabela 4 evidencia que o número de citações é relativamente homogêneo entre os autores. Embora o volume de citações entre os autores seja bastante próximo, apenas os clusters vermelho, verde e azul apresentam ligações mais consistentes entre dois autores, indicando maior proximidade temática e densidade de cocitações dentro desses grupos.

Tabela 4 – Detalhamento de cocitação de autores
 Table 4 – Details regarding co-citation of authors

Autores	Citações	Força do link
Avci, O	6	0
Makarenko, VD	6	6
Narivskyi, OE	6	6
Niezgoda, S	4	6
Bruce R	3	5
Chen	3	0
Ellingwood, B	3	5
Nikolay, P	3	6
White	3	0

Fonte: Elaborado pelas autoras (2025).
 Source: the author (2025).

3.7 Análise de cocitação de documentos

A análise de cocitação de documentos permite identificar relações temáticas entre publicações científicas, bem como observar a frequência com que determinadas referências são citadas. Esse tipo de análise evidencia a estrutura conceitual de um campo de estudo e aponta quais trabalhos exercem maior influência na literatura. A análise foi realizada no software *VOSviewer*, utilizando o método de *cocitação* e definindo como

unidade de análise as referências citadas (Figura 12). A partir desses parâmetros, obteve-se um conjunto inicial de 1.019 referências, das quais apenas sete atenderam ao critério mínimo estabelecido: pelo menos três citações por referência. Com base nesses dados, foram identificados quatro clusters: o cluster vermelho, composto por três documentos, e o cluster verde, composto por dois documentos, enquanto os demais apresentaram apenas um documento cada. A baixa presença de conexões entre os documentos evidencia uma conectividade reduzida na rede, indicando que as referências não estabelecem relações fortes entre si.

Figura 12 – Rede de cocitação de documentos

Figure 12 - Document co-citation network

gao, shan, axial behavior of c

liao, wenjie, automated struct

cha, young jin, deep learning-

khayatazad, mojtaba, detection



Fonte: Elaborado pelas autoras (2025).

Source: the author (2025).

A Tabela 5 apresenta as referências mais citadas na rede de cocitação. Observa-se que o artigo que ocupa a primeira posição possui um total de quatro citações, destacando-se como o documento de maior influência dentro do conjunto analisado. Esse número, embora relativamente baixo, indica que o estudo tem despertado maior interesse em comparação com os demais trabalhos identificados.

Tabela 5 – Referências mais citadas na rede de cocitação

Table 5 – Most cited references in the co-citation network

Referências	Título	Citações	Força do link
Cha, Choi e Büyüköztürk ⁹	<i>Deep learning-based crack damage detection using convolutional neural networks</i>	3	2
Aliofkhazraei ⁸	<i>Developments in corrosion protection</i>	3	1
Gao et al ¹⁰	<i>Axial behavior of circular steel tube with localized penetrating corrosion simulated by artificial notch</i>	3	0
Hou et al ¹¹	<i>The cost of corrosion in China</i>	3	1
Khayatazad, De Pue e De Waele ¹²	<i>Detection of corrosion on steel structures using automated image processing, developments in the built environment</i>	4	1
Liao e Lee ¹³	<i>Detection of rust defects on steel bridge coatings via digital image recognition</i>	3	1
Liao et al ¹⁴	<i>Automated structural design of shear wall residential buildings using generative adversarial networks</i>	3	0

Fonte: Elaborado pelas autoras (2025).

Source: the author (2025).

4.8 Acoplamento bibliográfico

O acoplamento bibliográfico é uma técnica de análise bibliométrica que identifica relações entre documentos a partir das referências que eles compartilham. Ou seja, quanto maior o número de referências em comum entre dois artigos, mais forte é o vínculo estabelecido entre eles. Essa abordagem é amplamente reconhecida no mapeamento baseado em citações e constitui uma ferramenta eficaz para identificar tendências emergentes, grupos de pesquisa e frentes de investigação dentro de um domínio científico⁷. No contexto da inteligência artificial aplicada a estruturas metálicas, o acoplamento bibliográfico permite compreender como diferentes abordagens de IA se conectam por meio de referências compartilhadas, revelando interações, interdisciplinaridade e conexões que nem sempre são perceptíveis por meio de citações diretas.

Assim como nas análises anteriores, os dados foram inseridos no *VOSviewer* para gerar a rede de acoplamento bibliográfico. Nessa visualização, o tamanho dos nós representa a frequência de citações dos documentos, enquanto a distância entre eles indica a intensidade da relação ou o grau de associação⁵. Para esta análise, foi definido como critério mínimo 20 citações por documento. Do total de 116 publicações, apenas 10 atenderam ao requisito. A rede resultante apresentou 10 clusters, porém, conforme ilustrado na Figura 13, muitos documentos não apresentam ligações entre si, sendo que o maior número de artigos dentro de um mesmo cluster foi apenas um. Esse comportamento evidencia baixa conectividade entre os estudos mais citados na área.

Figura 13 – Acoplamento bibliográfico de documentos
Figure 13 - Bibliographic coupling of documents



Fonte: Elaborado pelas autoras (2025).
Source: the author (2025).

Com o objetivo de aprimorar a interpretação dos dados, a Tabela 6 destaca os artigos de maior frequência dentro de cada cluster. Entre eles, identifica-se o documento mais citado, com 131 citações. A partir da análise dos clusters, observa-se que os principais temas de interesse na área incluem:

- Diferentes aplicações da inteligência artificial na otimização de estruturas;
- Monitoramento estrutural;
- Detecção de danos, especialmente relacionados à corrosão;
- Uso de IA em sistemas de energia, como a energia eólica;
- Estudos voltados para situações emergenciais.

Tabela 6 – Artigos com maior frequência de cada cluster
Table 6 - Most frequently occurring articles in each cluster

Referências	Títulos	Citações	Força do link
Chen et al ¹⁵	<i>Modular composite building in urgent emergency engineering projects: A case study of accelerated design and construction of Wuhan Thunder God Mountain/Leishenshan hospital to COVID-19 pandemic</i>	131	0
Khayatadz, De Pue e De Waele ¹²	<i>Detection of corrosion on steel structures using automated image processing</i>	117	0
Truong, Tangaramvong e Papazafeiropoulos ¹⁶	<i>An efficient LightGBM-based differential evolution method for nonlinear inelastic truss optimization</i>	49	0
Paral, Singha e Samanta ¹⁷	<i>A deep learning-based approach for condition assessment of semi-rigid joint of steel frame</i>	46	0
Bayat e Ziehl ¹⁸	<i>Localizing damage on stainless steel structures using acoustic emission signals and weighted ensemble regression-based convolutional neural network</i>	44	0
Han, Zhao e Xu ¹⁹	<i>Recognition and location of steel structure surface corrosion based on unmanned aerial vehicle images</i>	42	0
Cucuzza, Domaneschi e Marano ²⁰	<i>Sustainable and cost-effective optimal design of steel structures by minimizing cutting trim losses</i>	29	0
Shan, Liu e Zhou ²¹	<i>Integrated method for intelligent structural design of steel frames based on optimization and machine learning algorithm</i>	24	0
Anda et al ²²	<i>Towards optimal reliability-based design of wind turbines towers using artificial intelligence</i>	22	0
Momber et al ²³	<i>A data-based model for condition monitoring and maintenance planning for protective coating systems for wind tower structures</i>	20	0

Fonte: Elaborado pelas autoras (2025).
Source: the author (2025).

3.9 Principais tópicos da pesquisa

A partir das análises apresentadas, foi possível identificar os temas mais recorrentes no campo de estudo abordado no presente trabalho. Neste sentido, destacaram-se os seguintes eixos temáticos: otimização de estruturas, detecção de danos por corrosão, monitoramento estrutural, além de aplicações específicas envolvendo estruturas metálicas, como a construção de torres eólicas e de um hospital de emergência utilizando sistemas estruturais em aço. Com base nesse conjunto de evidências, foram selecionados os principais tópicos para discussão, os quais serão apresentados a seguir.

3.9.1 Detecção de danos relacionados à corrosão

Nos últimos anos, a utilização da inteligência artificial na engenharia civil tem se expandido significativamente, oferecendo soluções inovadoras. No contexto das estruturas de aço, um dos problemas mais recorrentes é a corrosão, que pode comprometer a saúde e integridade da edificação ao longo do tempo.

A corrosão pode ser considerada um dos principais fatores que levam desgastes as estruturas de aço, sendo frequentemente relacionadas a suas falhas. Essa manifestação pode ter interferência na capacidade de carga e na rigidez das estruturas, podendo exacerbar sua flambagem e fratura. Em suma a corrosão é uma ocorrência de desgaste ou falha de material induzida pela interação entre o material e o ambiente exposto, que inclui na maioria dos casos, ações eletroquímicas, químicas e físicas²⁴.

O uso de inteligência artificial tem se mostrado altamente eficaz na resolução de problemas relacionados à corrosão. A IA pode atuar em diferentes frentes, como monitoramento contínuo, análise de grandes volumes de dados, identificação precoce de anomalias e suporte a decisões preventivas. Situações que antes dependiam exclusivamente de inspeções visuais realizadas por profissionais especializados tornam-se mais acessíveis e precisas com o emprego de algoritmos inteligentes.

Durante muito tempo, buscou-se a possibilidade de mitigar a corrosão. Atualmente, com o uso da inteligência artificial, observa-se a oportunidade de empregar técnicas capazes de atenuar, melhorar e até prever a taxa de corrosão. Fatores como condições climáticas extremas (chuva, neblina, neve, luz intensa) deixam de ser um empecilho para a eficiência de modelos propostos para estimar a taxa de corrosão²⁵. Na análise de dados, observou-se que, na maior parte dos processos de resolução de problemas envolvendo corrosão, foram empregadas técnicas de aprendizado de máquina, aprendizado profundo, redes neurais convolucionais e redes neurais artificiais.

O aprendizado profundo (DL) impulsionou avanços significativos na engenharia estrutural. As capacidades de extração de informações e de ajuste de características não lineares das redes neurais profundas permitem diversas aplicações, como monitoramento de segurança, gerenciamento de projetos, monitoramento da integridade estrutural e manutenção de canteiros de obra. A eficiência desses modelos de detecção tornou-se uma necessidade diante da urgência em obter alta robustez em ambientes complexos. A maior parte dos modelos de aprendizado profundo integra a extração de múltiplas escalas, o que possibilita a adaptação a variadas condições ambientais²⁶. A maioria dos artigos analisados demonstrou que modelos baseados em aprendizado profundo apresentam alta precisão em sua capacidade de prever a corrosão.

As redes neurais artificiais também podem ser aplicadas de forma rápida e automática e, quando comparadas com algoritmos tradicionais de processamento de imagens, apresentam desempenho superior. Essas redes são capazes de lidar com grandes volumes de dados, como imagens e medições de corrosão, identificando sinais de falha que seriam imperceptíveis a olho nu ou por métodos convencionais²⁷.

No conjunto de artigos obtidos no contexto de integração da inteligência artificial com a detecção de danos por corrosão, prevaleceram quatro técnicas: aprendizado de máquina, aprendizado profundo, redes neurais artificiais e redes neurais convolucionais. Isso demonstra que esses métodos são os mais adequados para a análise da corrosão, principalmente devido à capacidade de processar grandes volumes de dados. Os modelos analisados apresentaram precisão impressionante na detecção de falhas precoces, possibilitando intervenções rápidas e eficientes antes que os danos comprometam a integridade estrutural do aço. A prevenção de falhas contribui significativamente para um planejamento de manutenção mais assertivo e para a redução de custos com reparos inesperados. Em suma, a IA permite otimizar processos de manutenção, automatizar inspeções, substituir etapas manuais e melhorar a eficiência na coleta de dados.

O uso da IA na identificação e resolução da corrosão em estruturas metálicas representa um marco para a engenharia civil e estrutural. Embora existam materiais mais resistentes no mercado atual, a deterioração por corrosão continua sendo uma ameaça persistente, comprometendo a segurança, a estabilidade e a vida útil dos componentes. Tradicionalmente, as inspeções visuais são demoradas, subjetivas e difíceis de realizar em áreas de difícil acesso. Com a IA, esses processos manuais continuam existindo, porém tornam-se mais rápidos, eficientes e capazes de analisar grandes quantidades de dados simultaneamente.

Em suma, a IA não apenas melhora a precisão e a velocidade das análises, mas também contribui para uma abordagem mais dinâmica, na qual danos podem ser identificados rapidamente e tratados precocemente, evitando problemas graves que podem colocar em risco a segurança das pessoas. Assim, promove-se uma gestão mais eficiente das estruturas e reduz-se o desperdício financeiro com manutenções emergenciais.

3.9.2 Otimização estrutural

A otimização estrutural é uma ferramenta de fundamental importância na engenharia civil, especialmente no desenvolvimento de *designs* de estruturas metálicas. Seu propósito é maximizar o desempenho estrutural, reduzir custos e aumentar a eficiência no uso de materiais. Com a expansão tecnológica e o avanço da inteligência artificial, métodos como redes neurais e aprendizado de máquina têm sido amplamente empregados. Essas técnicas avançadas permitem a otimização do *design* e do desempenho de estruturas de aço. Engenheiros estruturais precisam desenvolver projetos que atendam aos requisitos de desempenho e que apresentem elevada confiabilidade estrutural, mesmo diante de adversidades como eventos sísmicos.

As técnicas de inteligência artificial, especialmente as redes neurais, demonstram grande capacidade de simplificar problemas complexos, o que tem despertado forte interesse da comunidade científica. As redes neurais são ferramentas computacionais inspiradas na estrutura e nos processos dinâmicos do cérebro humano, capazes de aprender, generalizar e identificar características essenciais nos dados de entrada, mesmo quando tais dados contêm informações irrelevantes²⁸. Esses métodos avançados têm sido amplamente utilizados para otimizar o *design* e o desempenho das estruturas, proporcionando soluções mais sustentáveis e econômicas. A aplicação de tais algoritmos permite maximizar resultados, aumentando a eficiência e a precisão dos projetos.

A otimização estrutural pode ser utilizada de diversas formas, todas voltadas a encontrar a melhor configuração para uma estrutura, considerando seus objetivos finais e restrições. No caso de estruturas de aço, destacam-se o uso de algoritmos genéticos e de aprendizado de máquina. Neelamegam *et al.*²⁹ demonstraram que é possível otimizar o desempenho estrutural de colunas de aço preenchidas com concreto, evidenciando a eficácia dessa abordagem para melhorar a rigidez e a resistência das estruturas e apontando novas formas de otimização em diferentes tipos de sistemas estruturais. O que demonstra que estratégias inteligentes combinadas ao aprendizado de máquina podem aprimorar o enrijecimento, os efeitos de confinamento e a dissipação de energia.

No contexto da otimização de estruturas de aço, observa-se que a maior parte dos artigos analisados se concentra em aprimorar a resistência estrutural. Em grande parte dessas pesquisas, foram utilizadas técnicas de inteligência artificial, aprendizado de máquina e redes neurais. A otimização dos projetos, visando aumentar a eficiência e reduzir perdas, também se mostra uma alternativa economicamente viável e sustentável. No entanto, embora tais técnicas ofereçam benefícios expressivos, sua implementação prática pode ser desafiadora, exigindo domínio da alta complexidade computacional envolvida.

Assim, é possível compreender que a otimização estrutural tem evoluído consideravelmente com a inserção de tecnologias de IA. As pesquisas analisadas mostram que o uso dessas ferramentas aumenta significativamente a eficiência dos projetos e reduz o tempo necessário para processamento e análise dos dados. Portanto, o uso dessas técnicas representa um avanço significativo na área. É essencial que futuras pesquisas continuem buscando aprimorar esses processos, tornando-os cada vez mais ágeis e acessíveis.

3.9.3 Monitoramentos de estruturas

O monitoramento de estruturas metálicas é um dos pontos cruciais na engenharia civil. É por meio desse acompanhamento que se pode detectar falhas e desgastes críticos para a saúde estrutural. Assim, o monitoramento se torna essencial para garantir a segurança e a durabilidade das estruturas. A verificação periódica da integridade estrutural é fundamental para assegurar a continuidade da qualidade e do desempenho ideal da construção³⁰. A integridade das estruturas está constantemente sujeita a danos, como corrosão, fadiga, desgaste e esforços repetitivos, problemas que podem desencadear falhas severas se não forem identificados e corrigidos a tempo.

Silva, Y. P. M., Morais, G. A. T. de, & França, C. de L. (2026). Uso da inteligência artificial em estruturas metálicas: Uma análise cientométrica das inovações na construção 4.0. *Revista Universitária Brasileira*, 4(3), 30–52.

A Revista Universitária Brasileira utiliza a *Creative Commons* (CC BY 4.0)

No modelo tradicional, essa avaliação era realizada por meio de inspeções manuais, observações visuais e análise por profissionais habilitados. Embora eficaz em muitos casos, esse método pode resultar em relatórios incompletos ou imprecisos por diversos motivos: falta de mão de obra especializada, erros humanos e dificuldade de acesso a determinadas áreas da estrutura. Para superar esses desafios, estudos recentes têm explorado o uso de inteligência artificial para auxiliar na detecção e resolução desses problemas, por meio de redes neurais, aprendizado de máquina, aprendizado profundo e técnicas correlatas³⁰.

Ferramentas baseadas em BIM, como o *Scan-vs-BIM*, representam uma inovação importante. Esse instrumento, fundamentado em aprendizado profundo, visa examinar a integridade estrutural comparando o estado real da obra com o modelo BIM planejado. A aprendizagem profunda tem sido aplicada para resolver questões complexas da construção civil, embora processos de extração de dados possam apresentar erros. Ainda assim, o uso desses sistemas tem se mostrado promissor para inspeções automatizadas de estruturas metálicas³⁰.

A maioria dos estudos sobre esse tema concentra-se nos anos de 2024 e 2025, indicando que se trata de uma área em grande expansão e com pesquisas recentes. Nesse contexto, vêm surgindo técnicas baseadas em inteligência artificial que permitem um monitoramento mais eficiente, preciso e menos suscetível a erros, com ênfase especial na detecção de danos em tempo real³¹.

O monitoramento de estruturas metálicas tem como foco a coleta de dados sobre o estado das superfícies e a avaliação da criticidade dos danos identificados. O uso de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) permite automatizar esse processo: o equipamento realiza o voo, coleta imagens e envia os dados para processamento com técnicas de IA, otimizando a análise e reduzindo o tempo necessário para avaliação⁵⁵.

A combinação entre aprendizagem profunda e o modelo *Scan-vs-BIM* possibilita uma avaliação estrutural automática, identificando danos como corrosão, trincas e demais anomalias que, a curto, médio ou longo prazo, podem comprometer a vida útil das estruturas de aço³⁰.

Apesar das vantagens, o aprendizado profundo ainda apresenta limitações quando empregado para monitoramento estrutural, especialmente ao integrar dados de múltiplas fontes, o que pode gerar inconsistências. Para aplicações em tempo real, é necessária uma automação mais sofisticada, garantindo que os sistemas funcionem de maneira efetivamente autônoma.

O monitoramento de estruturas metálicas é essencial para o avanço da engenharia civil, pois permite identificar falhas e desgastes que podem comprometer a segurança e a durabilidade das construções. A evolução tecnológica, sobretudo com o uso da inteligência artificial, representa um avanço significativo na melhoria dos processos já existentes. Embora as abordagens tradicionais apresentem limitações, a IA surge como uma ferramenta poderosa ao permitir a análise simultânea de grandes volumes de dados e a detecção ágil de problemas estruturais. Contudo, seu desenvolvimento ainda é passível de aperfeiçoamentos, pois, apesar de dinâmica e capaz de aprender com erros, não alcança total autonomia.

Assim, o futuro do monitoramento estrutural está diretamente ligado ao avanço de tecnologias inteligentes, que visam melhorar a eficiência, a precisão e a segurança dos processos atuais. Com o contínuo desenvolvimento dessas ferramentas, espera-se que, em breve, sua aplicação se torne ainda mais acessível e eficaz.

3.9.4 Outras aplicações

O uso da IA mostra-se indispensável em diversas áreas da engenharia civil. No contexto de projetos emergenciais, sua capacidade de processar grandes volumes de dados e otimizar procedimentos pode ser crucial para a execução eficiente dos serviços¹⁵.

Um exemplo é o estudo relacionado ao Hospital *Leishenshan*, em Wuhan na China. Construído durante a pandemia de COVID-19, o hospital foi erguido com forte suporte de tecnologias de IA, com o objetivo de atender pacientes diagnosticados com o coronavírus. Diante da urgência da situação, era necessária a redução

da carga de trabalho e do tempo de construção de um empreendimento desse porte. A utilização de ferramentas inteligentes possibilitou a otimização do *design*, da logística construtiva, do uso de materiais e da rapidez na montagem, entre outros aspectos¹⁵. A construção integrou tecnologias como BIM, *big data*, IA, drones e 5G, permitindo alcançar máxima eficiência construtiva. Além da aplicação na obra em si, a IA demonstrou grande habilidade no gerenciamento da crise sanitária, auxiliando na organização, coordenação e execução das atividades. Observou-se também que o uso de aço leve para a construção modular contribuiu para acelerar o processo. A adoção dessas tecnologias permitiu monitorar todas as etapas da construção, aumentando a produtividade e possibilitando a execução simultânea de diversas tarefas¹⁵.

Outra aplicação relevante da IA é seu uso no *design* de torres eólicas, alinhado ao objetivo de aprimorar processos e melhorar a confiabilidade e a eficiência dessas estruturas. A capacidade de processar grandes volumes de dados e modelar diferentes cenários permite visualizar diversas possibilidades, positivas e negativas, e, a partir disso, prever o melhor caminho a ser seguido²².

Esses dois exemplos, somados às aplicações discutidas nos tópicos anteriores, demonstram a versatilidade da inteligência artificial, evidenciando sua utilidade em diferentes contextos e envolvendo distintos materiais. Em todos os casos, a IA apresenta resultados positivos, promovendo eficiência, sustentabilidade e inovação.

4. Conclusões

Com base no levantamento realizado, foi possível verificar um crescimento exponencial do interesse científico nas inovações e aplicações da inteligência artificial em estruturas metálicas, esses dados expuseram que entre o período de 2020 a 2025, tem-se um elevado número de publicações relacionadas à IA na engenharia estrutural. Esse aumento reflete na crescente integração da IA com a construção 4.0 de forma geral, trazendo à tona que a busca por soluções melhores, eficientes e inovadoras é crescente, principalmente focando na maximização de resultados dos processos dentro da engenharia civil. Tal tendência demonstra o potencial da IA para transformação de todo um setor. Em suma, mostrando que, a integração da IA pode melhorar a otimização, monitoramento e manutenção das estruturas de forma contínua, automatizada e rápida.

A presente pesquisa permitiu identificar os principais autores, periódicos e redes de colaboração, compondo um panorama atualizado do desenvolvimento científico sobre o tema. Periódicos como *Engineering Structures*, *Structures e Buildings*, destacaram-se como os mais relevantes para a área de estudo. Por outro lado, observou-se baixa cooperação entre autores e uma rede bibliográfica pouco conectada, tanto nas análises de coautoria quanto nas de cocitação, indicando certa fragmentação das pesquisas desenvolvidas até o momento.

Os agrupamentos temáticos revelaram que as principais linhas de investigação envolvem: otimização estrutural; monitoramento estrutural; detecção de danos por corrosão; uso de IA no setor eólico, e; aplicações em situações emergenciais. Esses resultados demonstram a versatilidade da IA e reforçam o seu potencial como ferramenta na engenharia civil. Apesar das aplicações ainda estarem em desenvolvimento, verificam-se avanços significativos.

Como limitações deste estudo, destaca-se o uso de apenas uma base de dados, a Scopus, e o recorte temporal limitado ao período de 2020 a 2025, o que pode ter restringido a abrangência histórica e a identificação de estudos anteriores que também contribuíram para o desenvolvimento da área. Para pesquisas futuras, recomenda-se ampliar o intervalo temporal e utilizar múltiplas bases de dados, a fim de enriquecer a análise, aumentar a robustez dos resultados e possibilitar comparações mais amplas entre diferentes contextos científicos.

Por fim, destaca-se que a análise cientométrica realizada contribuiu para ampliar a compreensão sobre o avanço da inteligência artificial na engenharia estrutural, revelando as fronteiras atuais do conhecimento e

oferecendo subsídios importantes para o desenvolvimento de novas pesquisas, aplicações e soluções inovadoras no campo da Construção 4.0.

5. Referências

1. Santos Matos L, Leite Ribeiro K, Dourado Sisnando A. A avaliação do impacto da inteligência artificial na engenharia. 2025 v. 10, n. 4, p. 91-110. Português. doi.org/10.5281/zenodo.15044714
2. Jamaludin, Shahrizan, Imran, Md Mahadi. Practical Application of Artificial Intelligence in Steel Corrosion Analysis. *Corrosion Management*. [Internet] (2024). [citado em 31 de ago.2025] 181. 38-41. Disponível em: <https://www.icorr.org>
3. Alves G, Teixeira A, Perez R. BIM para gerenciamento, operação e manutenção de instalações: revisão cientométrica e sistemática. *Ambiente Construído*. 2023v.24; e131575. Português. dx.doi.org/10.1590/s1678-86212024000100712
4. Martinez P, Al-Hussein M, Ahmad R. A scientometric analysis and critical review of computer vision applications for construction. *Automat Constr*. 2019. v.107:102947. doi.org/10.1016/j.autcon.2019.102947
5. Van Eck NJ, Waltman L. Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. *Scientometrics*. 2010. v.84(n.2):523–38. doi.org/10.1007/s11192-009-0146-3
6. Harzing AW, Alakangas S. Google Scholar, Scopus and the Web of Science: a longitudinal and cross-disciplinary comparison. *Scientometrics*. 2016.v.106(n.2):787–804. doi.org/10.1007/s11192-015-1798-9
7. Van Eck NJ, Waltman L. Visualizing bibliometric networks. Leiden:(CWTS), *Leiden University*; 2014.pp.285-320. dx.doi.org/10.1007/978-3-319-10377-8_13
8. Aliofkhaezai M. Developments in Corrosion Protection. *InTech*; 2014. P.710. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5772/57010>
9. Cha YJ, Choi W, Büyüköztürk O. Deep Learning-Based Crack Damage Detection Using Convolutional Neural Networks. *Comput Aided Civil Infrastruct Eng*. 2017.v.32(n.5):361–378. doi.org/10.1111/mice.12263
10. Gao S, Wang Y, Guo L, Xu Y, Jun Iyama. Axial behavior of circular steel tube with localized penetrating corrosion simulated by artificial notch. *Thin-Walled Struct*. 2022.v.172:108944–4 doi.org/10.1016/j.tws.2022.108944.
11. Hou B, Li X, Ma X, et al. The cost of corrosion in China. *npj Mater Degrad*. 2017; v.1(p.1):1–10. Disponível em: doi.org/10.1038/s41529-017-0005-2
12. Khayatazad M, De Pue L, De Waele W. Detection of corrosion on steel structures using automated image processing. *Developments in the Built Environ*. 2020.v3.100022. Disponível em: doi.org/10.1016/j.dibe.2020.100022

13. Liao KW, Lee YT. Detection of rust defects on steel bridge coatings via digital image recognition. *Automat Constr.* 2016.v.71:294–306.doi.org/10.1016/j.autcon.2016.08.008
14. Liao W, Lu X, Huang Y, Zheng Z, Lin Y. Automated structural design of shear wall residential buildings using generative adversarial networks. *Automat Constr.* 2021.v.132:103931. doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103931
15. Chen LK, Yuan RP, Ji XJ , et al. Modular composite building in urgent emergency engineering projects: A case study of accelerated design and construction of Wuhan Leishenshan/Leishenshan hospital to COVID-19 pandemic. *Automat Constr.* 2021.v.124:103555. doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103555
16. Truong VH, Tangaramvong S, Papazafeiropoulos G. An efficient LightGBM-based differential evolution method for nonlinear inelastic truss optimization. *Expert Syst Appl.* 2023.v.237:121530–0. doi.org/10.1016/j.eswa.2023.121530
17. Paral A, Singha Roy DKr, Samanta AK. A deep learning-based approach for condition assessment of semi-rigid joint of steel frame. *J Build Eng.* 2020; v.34.101946.doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101946
18. Ai L, Bayat M, Ziehl P. Localizing damage on stainless steel structures using acoustic emission signals and weighted ensemble regression-based convolutional neural network. *Measurement.* 2023; v.211:112659.doi.org/10.1016/j.measurement.2023.112659
19. Han, Q., Zhao, N. & Xu, J. Recognition and localization of corrosion on steel structures based on unmanned aerial vehicle images.. *J Civil Struct Health Monit.*2021. v.11, 1375–1392.doi.org/10.1007/s13349-021-00515-7
20. Cucuzza R, Rad MM, Domaneschi M, Marano GC. Sustainable and cost-effective optimal design of steel structures by minimizing cutting trim losses. *Automat Constr.* 2024.v.167.n.12:105724–4. doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105724
21. Shan W, Liu J, Zhou J. Integrated method for intelligent structural design of steel frames based on optimization and machine learning algorithm. *Eng struct.* 2023. V.284:115980–0. doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.115980
22. Anda JD, Ruiz SE, Edén Bojórquez, Inzunza-Aragon I. Towards optimal reliability-based design of wind turbines towers using artificial intelligence. *Eng Struct.* 2023.v.294:116778–8. doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.116778
23. Momber AW, Tim Wilhelm Nattkemper, Langenkämper D, et al. A data-based model for condition monitoring and maintenance planning for protective coating systems for wind tower structures. *Eng Struct.* 2022.v.186:957–973.doi.org/10.1016/j.renene.2022.01.022
24. Cai, L. Interpretable Machine Learning-Based Corrosion Prediction of Steels Exposed to Marine Environment. *J Inst Eng India Ser C.* 2025.doi.org/10.1007/s40032-025-01232-6

25. Hou J, Chen W, Duan Z, Li H, Yu M. Research on lightweight network for real-time detection of steel structure corrosion based on knowledge distillation. *Eng Appl Artif Intel.* 2025. v.162:112356-6. doi.org/10.1016/j.engappai.2025.112356
26. Yu Y, Jiang S, Wang Y, Zhu S. SAFE-Net: Multi-head attention enhanced framework for defect detection in anti-corrosion coatings on steel structures. *Eng Appl Artif Intell.* 2025. v.156:111278-8. doi.org/10.1016/j.engappai.2025.111278
27. Khayatizad M, Honhon M, De Waele W. Detection of Corrosion on Steel Structures Using an Artificial Neural Network. *Struct Infrastruct Eng.* 2022. v.19. n.12. p.1860-1871. doi.org/10.1080/15732479.2022.2069272
28. Mehdizadeh, H., Gholizadeh, S. Seismic Design Optimization of Steel Moment Frames by Neural Networks. *Int J Eng.* 2025. v.38. n.12. p.2929-2939. doi.org/10.5829/ije.2025.38.12c.11
29. Neelamegam P, Stalin Jose Y, Sivasankar S, Allwin D. Optimizing Structural Performance of Short Concrete-Filled Steel Tube Columns with Stiffening Methods Using LEA-HGCNN Technique. *Int J Comput Methods.* 2025. v.22. n.08. doi.org/10.1142/S0219876225500112
30. Kim B, Jo I, Ham N, Kim J. Simplified Scan-vs-BIM Frameworks for Automated Structural Inspection of Steel Structures. *Appl Sci.* 2024. v.14, n.23. p.11383-3. doi.org/10.3390/app142311383
31. Momber Aw, Langenkamper D, Moller T, Nattkemper KW. The exploration and annotation of large amounts of visual inspection data for protective coating systems on stationary marine steel structures. *Ocean Eng.* 2023. v.278. p.114337-7. doi.org/10.1016/j.ocean