

## Aplicações da Inteligência Artificial em estruturas metálicas no contexto da construção 4.0: uma Revisão Sistemática da Literatura

Yonara Patrícia M. Silva<sup>1</sup>, Gabriela Alves T. de Morais<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Graduanda em Engenharia Civil, Centro Universitário Brasileiro, Brasil.

<sup>2</sup>Doutoranda em Engenharia Civil, Centro Universitário Brasileiro, Brasil (\*Autor correspondente: gabriela.alves@grupounibra.com).

*Histórico do Artigo:* Submetido em: 22/02/2025 – Revisado em: 23/07/2025 – Aceito em: 10/08/2025

### RESUMO

Mesmo com os avanços proporcionados pelas tecnologias associadas à Construção 4.0, a indústria da construção civil ainda enfrenta desafios para sua plena adoção, especialmente no que se refere às estruturas metálicas. A incorporação de tecnologias digitais, como a Inteligência Artificial (IA), ao ciclo de vida das edificações em aço pode minimizar falhas, aumentar a previsibilidade de desempenho, otimizar o uso de recursos e ampliar a vida útil das estruturas. No entanto, existe uma lacuna no conhecimento acerca do estado da arte da Construção 4.0 aplicada às estruturas metálicas, com ênfase no papel da IA. Diante desse cenário, esta pesquisa objetiva investigar o impacto da IA no ciclo de vida de estruturas metálicas dentro da perspectiva da Construção 4.0. Para isso, foi conduzida uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL), com base no protocolo PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*), com o intuito de identificar e analisar os principais estudos que abordam a aplicação da IA na construção metálica. A base de dados utilizada foi o Google Acadêmico, empregando-se as palavras-chave “Steel Structures” e “Artificial Intelligence”, combinadas pelo operador booleano “AND”. A amostra inicial totalizou 61 artigos, dos quais apenas dois atenderam integralmente aos critérios de inclusão. A fim de ampliar a análise, foram incorporadas 10 fontes externas adicionais, resultando em um total de nove estudos selecionados para a síntese da revisão. Os resultados indicam que as principais aplicações da IA em estruturas metálicas concentram-se nas áreas de inspeção, monitoramento e manutenção, por meio de técnicas de detecção automatizada de corrosão, trincas e falhas estruturais; na gestão e otimização de projetos, com o uso de algoritmos para planejamento e racionalização de recursos; e na sustentabilidade, com propostas para reutilização de elementos metálicos apoiadas em sistemas inteligentes. Constatou-se, entretanto, que a maioria dos estudos permanece restrita a ambientes experimentais ou simulações computacionais, com pouca validação prática em campo. Conclui-se, portanto, que a inteligência artificial representa uma ferramenta estratégica para a transformação digital da construção civil, especialmente no contexto das estruturas metálicas. Contudo, seu potencial ainda depende de maior maturidade tecnológica, testes aplicados e integração efetiva aos processos de projeto, execução e manutenção.

**Palavras-Chaves:** Estruturas metálicas, Construção 4.0, Inteligência Artificial, Inovação; Tecnologias emergentes, Sustentabilidade.

## Artificial Intelligence Applications in Steel Structures in the Context of Construction 4.0: A Systematic Literature Review

### ABSTRACT

Despite the advances brought by technologies associated with Construction 4.0, the construction industry still faces challenges in fully adopting these innovations, especially with regard to steel structures. The incorporation of digital technologies such as Artificial Intelligence (AI) into the life cycle of steel buildings has the potential to minimize failures, enhance performance predictability, optimize resource use, and extend the service life of structures. However, there remains a significant knowledge gap concerning the state of the art of Construction 4.0 applied to steel structures, particularly regarding the role of AI. In this context, the present study aims to investigate the impact of AI on the life cycle of steel structures from the perspective of Construction 4.0. To achieve this, a Systematic Literature Review (SLR) was conducted, based on the PRISMA protocol (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses), with the objective of identifying and analyzing key studies addressing the application of AI in steel construction. The database used was Google Scholar, with the keywords “Steel Structures” and “Artificial Intelligence” combined using the boolean operator “AND”. The initial sample comprised 61 articles, of which only two fully met the inclusion criteria. To broaden the scope of analysis, ten additional external sources were incorporated, resulting in a total of nine studies selected for the review synthesis. The results indicate that the main applications of AI in steel structures are concentrated in the areas of inspection, monitoring, and maintenance, through automated techniques for detecting corrosion, cracks, and structural failures; in project

Silva YPM, Morais GAT. Aplicações da Inteligência Artificial em Estruturas Metálicas no Contexto da Construção 4.0: uma Revisão Sistemática da Literatura. Revista Universitária Brasileira. 2025; v.3, n.4, 19-29.



management and optimization, through algorithms for planning and resource rationalization; and in sustainability, through proposals for the reuse of steel components supported by intelligent systems. It was also observed that most of the studies remain limited to experimental settings or computational simulations, with little practical validation in real-world scenarios. It is concluded that artificial intelligence represents a strategic tool for the digital transformation of the construction industry, particularly in the field of steel structures. However, its full potential still relies on greater technological maturity, applied testing, and effective integration into the design, execution, and maintenance processes.

**Keywords:** Steel structures, Construction 4.0, Artificial Intelligence, Innovation; Emerging technologies, Sustainability.

## 1. Introdução

A durabilidade das estruturas metálicas está diretamente relacionada à sua capacidade de resistir a processos de degradação, como corrosão, fadiga e fissuras superficiais. No entanto, os métodos atualmente utilizados para o monitoramento dessas estruturas ainda são lentos e, em sua maioria, baseados em procedimentos manuais, fortemente dependentes da intervenção humana. Essa limitação compromete a detecção precoce de falhas e, conseqüentemente, eleva os riscos operacionais<sup>1</sup>.

Por outro lado, o conceito de Construção 4.0 engloba um conjunto de tecnologias emergentes, tais como sensores inteligentes, *laser scanning*, Internet das Coisas (IoT), *Big Data*, inteligência artificial (IA), computação em nuvem, realidade aumentada, drones, robótica, automação, *Building Information Models* (BIM), *Digital Twin* e impressão 3D, entre outras<sup>2-4</sup>. Todas essas tecnologias vêm sendo gradativamente incorporadas ao setor da construção civil, com o objetivo principal de ampliar a eficiência e a produtividade dos projetos<sup>5</sup>.

Entre essas tecnologias, a inteligência artificial tem se destacado por suas múltiplas aplicações, especialmente por sua capacidade de processar grandes volumes de dados e oferecer suporte preditivo e automatizado nas diferentes etapas do ciclo de vida das estruturas. Dentre as aplicações da IA na construção civil, observa-se o uso de redes neurais artificiais<sup>6</sup>, modelos multimodais para detecção de trincas superficiais<sup>7</sup> classificação hierárquica de imagens *B-scan*<sup>8</sup> e o suporte ao design estrutural<sup>9</sup>.

Entretanto, a literatura existente evidencia uma fragmentação temática e a ausência de uma visão consolidada sobre os impactos, limitações e oportunidades da aplicação da IA aplicada especificamente em estruturas metálicas. Diante dessa lacuna, o presente estudo tem como objetivo investigar o impacto da IA no ciclo de vida de estruturas metálicas dentro da perspectiva da Construção 4.0. Nesse contexto, a presente pesquisa apresenta uma análise crítica das principais abordagens de inteligência artificial voltadas ao monitoramento, projeto e manutenção de estruturas metálicas, incluindo, ainda, aspectos relacionados à sustentabilidade e planejamento.

## 2. Material e Métodos

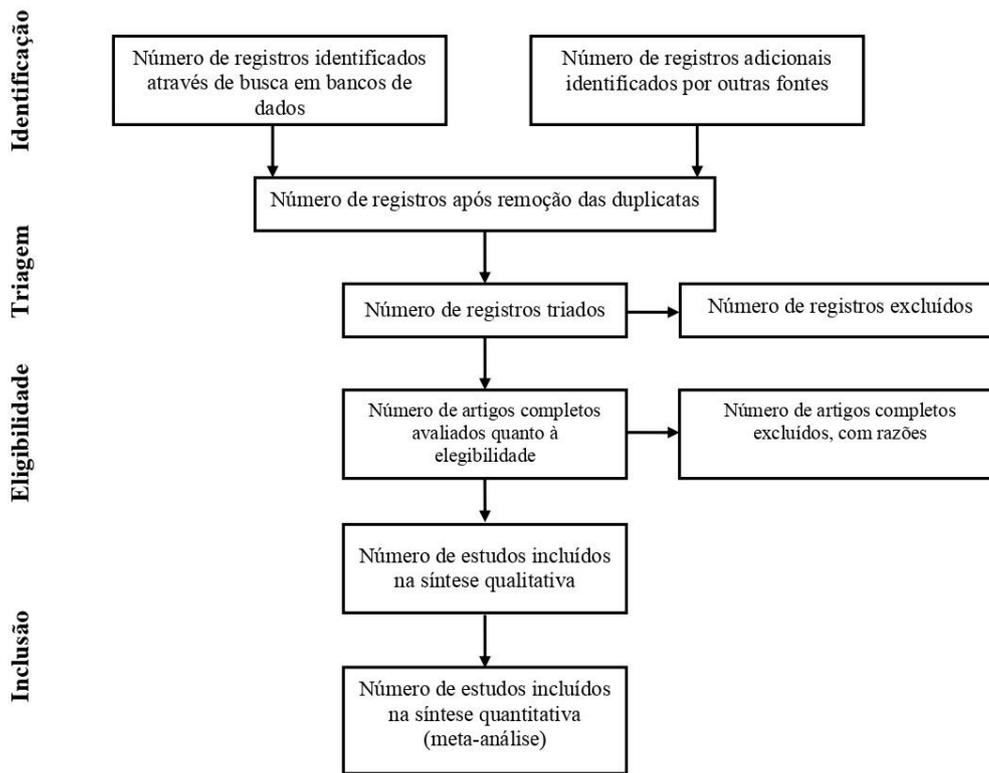
Para determinar as fronteiras do conhecimento sobre o emprego da IA no projeto de estruturas metálicas, foi realizada uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL), conduzida segundo o protocolo PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic reviews and Meta-Analyses*)<sup>10</sup>. O PRISMA consiste em uma lista de verificação com 27 itens e um fluxograma composto por quatro fases (Figura 1), os quais orientam de forma estruturada o processo de revisão da literatura.

A RSL teve como objetivo responder às questões de pesquisa propostas, identificar lacunas no conhecimento existente e apontar direções para futuras investigações. A formulação das questões norteadoras

foi realizada a partir da combinação de palavras-chave com o uso de operadores booleanos, resultando em uma estratégia de busca alinhada aos objetivos da pesquisa.

Inicialmente, foram definidos a base de dados e os idiomas a serem utilizados. Optou-se pelo *Google Acadêmico (Google Scholar)* devido ao seu amplo acervo e à facilidade de acesso aos documentos. Quanto aos idiomas, foram selecionados o inglês, por ser a língua predominante na produção científica internacional, e o português, por ser a língua materna dos autores. Os critérios de inclusão e exclusão foram: idiomas - inglês e português; ano de publicação - 2025, e; tipo de publicação - restrito a artigos de revisão. Optou-se por restringir a busca ao ano de 2025 devido ao curto prazo disponível para o desenvolvimento da pesquisa, que contou com um período total de apenas quatro meses. A delimitação temporal adotada visou garantir a viabilidade do trabalho dentro do cronograma previsto, sem comprometer a qualidade da análise.

**Figura 1 – Protocolo PRISMA**  
Figure 1 – PRISMA Protocol



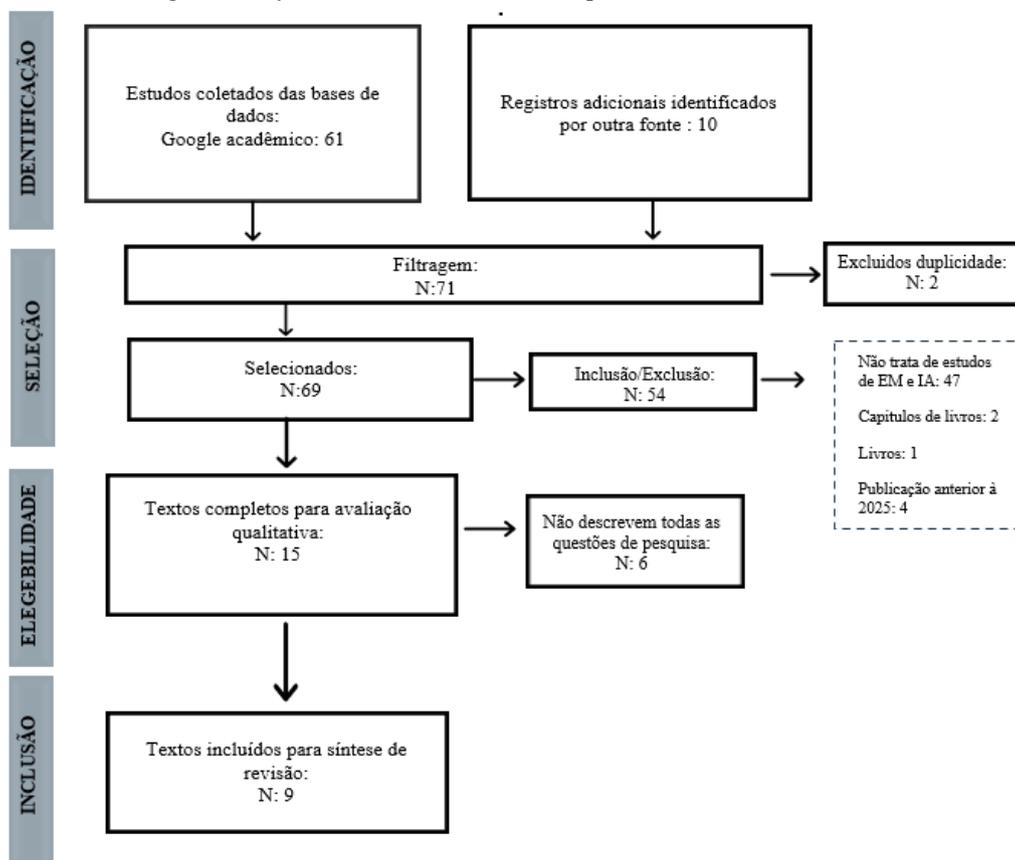
**Fonte:** Adaptado de Moher *et al.*<sup>10</sup>.  
Source: Adapted from Moher *et al.*<sup>10</sup>.

Após a aplicação dos filtros e a análise criteriosa dos artigos pré-selecionados para a síntese da revisão, verificou-se a necessidade de ampliar o escopo dos estudos incluídos, em virtude do número reduzido de publicações que atendiam integralmente aos critérios de inclusão e exclusão previamente estabelecidos. Para contornar essa limitação, recorreu-se a fontes externas complementares, de acesso aberto por meio do *Google*, priorizando a aderência temática. Nessas buscas adicionais, mantiveram-se os idiomas inglês e português como critérios linguísticos de seleção, a fim de assegurar consistência metodológica.

### 3. Desenvolvimento

No *Google Acadêmico*, foi realizada uma busca por tópico utilizando a seguinte combinação de palavras-chave e operadores booleanos: “Steel Structures” AND “Artificial Intelligence”. A amostra inicial compreendeu 61 artigos, já filtrados pelos seguintes critérios de idioma (inglês e português), ano de publicação (2025) e tipo de publicação (restrito a artigos de revisão). Adicionalmente, foram identificados 10 registros provenientes de outras fontes externas, totalizando 71 artigos considerados para a etapa de triagem, conforme detalhado na Figura 2.

**Figura 2** - Protocolo de RSL baseado no PRISMA  
 Figure 2 – Systematic Literature Review protocol based on PRISMA



Fonte: autores (2025).  
 Source: authors (2025).

Desses 71 registros, dois foram excluídos por duplicidade, resultando em 69 artigos selecionados para análise. Em seguida, foram aplicados os critérios de inclusão e exclusão, o que levou à desconsideração de 54 documentos, sobretudo por não tratarem simultaneamente dos temas estruturas metálicas e inteligência artificial, ou por se tratarem de livros, capítulos de livros ou publicações anteriores a 2025.

Após essa triagem, 15 artigos foram avaliados na íntegra quanto à elegibilidade. Dentre eles, 6 foram excluídos por não abordarem de forma completa as questões de pesquisa propostas. Assim, ao final do processo, foram incluídos 9 artigos na síntese da revisão sistemática. Destes, 2 originaram-se da busca inicial no Google Acadêmico e 7 das fontes complementares consultadas.

A ampliação da busca em fontes externas foi necessária diante da constatação de que apenas dois artigos da base principal atendiam integralmente aos critérios estabelecidos. Essa limitação está associada, em parte, ao acesso restrito a bases de dados mais consolidadas na área, como *Scopus* e *Web of Science*. Por isso, optou-se pela incorporação de fontes externas de acesso aberto, priorizando-se a aderência temática à pesquisa.

Na sequência, realizou-se uma análise detalhada do conteúdo dos artigos selecionados (Quadro 1), com foco na temática central de cada publicação, nas principais diferenças e similaridades entre os estudos, nas sugestões dos autores para futuras pesquisas, além de uma avaliação crítica do estado da arte sobre o tema.

**Quadro 1 – Análise dos artigos selecionados (Continua...)**

Table 1 – Analysis of Selected Articles

<b>Categoria</b>	<b>Referência</b>	<b>Objetivos</b>	<b>Tipo de IA</b>	<b>Softwares</b>	<b>Resultados</b>
Inspeção, monitoramento e manutenção	Khayatazad <i>et al.</i> <sup>1</sup>	Desenvolver um algoritmo baseado em inteligência artificial capaz de reconhecer danos por corrosão em séries de imagens fotográficas	Algoritmo baseado em IA	Matlab	O sistema demonstrou alta precisão, em condições ideais, evidenciando seu desempenho promissor para inspeções automatizadas de corrosão
Inspeção, monitoramento e manutenção	Chen <i>et al.</i> <sup>7</sup>	Identificar trincas superficiais em estruturas de aço por meio de inteligência artificial, visando solucionar o problema da detecção tardia e, conseqüentemente, contribuir para a segurança estrutural	Redes neurais	Pytorch	Os resultados indicaram que os três modelos de rede neural empregados (YOLOv5, VGG16 e C-Alex) apresentaram alta precisão na identificação de trincas. O YOLOv5 destacou-se no treinamento com grandes volumes de dados; o VGG16 na extração detalhada de características da imagem e na redução de ruído; e o C-Alex na extração rápida de recursos com pequenos conjuntos de dado
Inspeção, monitoramento e manutenção	Hu <i>et al.</i> <sup>8</sup>	Desenvolver uma solução baseada em inteligência artificial para a detecção automática de falhas em trilhos ferroviários, utilizando sensores de ultrassom e superando as limitações dos métodos tradicionais de inspeção	Aprendizado de máquina	PyTorch	O modelo proposto alcançou uma precisão de 88,56% na detecção de falhas ferroviárias. Além disso, demonstrou elevada eficiência no processamento, com capacidade de analisar uma única imagem de ultrassom em apenas 0,45 segundos. A abordagem, que integra sensores de ultrassom e classificação hierárquica, mostrou-se promissora para detecção automatizada, rápida e confiável de falhas em trilhos
Inspeção, monitoramento e manutenção	Paral <i>et al.</i> <sup>6</sup>	Desenvolver um sistema de avaliação estrutural não destrutivo para identificar e quantificar o estado de degradação de juntas semirrígidas em estruturas de aço, utilizando sinais de vibração global processados por inteligência	CNN (Rede Neural Convolutacional),	SAP2000 e Python	O modelo CNN, treinado com novas amostras de um modelo de elementos finitos (FE) atualizado, foi capaz de localizar os danos e quantificar a perda de rigidez nas juntas viga-pilar danificadas. Os resultados demonstraram a adequada sensibilidade do modelo FE desenvolvido, validando sua aplicação para avaliações de danos em múltiplos níveis. Além disso, a

		artificial, com foco na rigidez rotacional das conexões			estrutura baseada em <i>deep learning</i> (DL) reduziu significativamente o esforço computacional no monitoramento da saúde estrutural (SHM)
--	--	---	--	--	--

Fonte: autores (2025).

Source: authors (2025).

**Quadro 1 – Análise dos artigos selecionados (Continua...)**

Table 1 – Analysis of Selected Articles

<b>Categoria</b>	<b>Referência</b>	<b>Objetivos</b>	<b>Tipo de IA</b>	<b>Softwares</b>	<b>Resultados</b>
Inspeção, monitoramento e manutenção	Abbas <i>et al.</i> <sup>11</sup>	Apresentar estratégias de gestão de manutenção para prevenir a corrosão de estruturas de aço em ambientes marinhos extremos	Rede Bayesiana, aprendizado de máquina	Não se aplica	O estudo destacou o uso de redes bayesianas e modelos probabilísticos inteligentes como ferramentas promissoras para avaliar incertezas e adaptar dinamicamente os planos de manutenção, com base nas condições reais da estrutura. Constatou-se que a corrosão é a principal causa de falhas em estruturas de aço em ambientes marinhos. Entre os principais resultados, ressaltou-se a superioridade das abordagens modernas, como a manutenção baseada em condição (CBM), que utiliza sensores e técnicas de monitoramento da saúde estrutural (SHM) para prever falhas antes que ocorram
Inspeção, monitoramento e manutenção	Dalmora <i>et al.</i> <sup>12</sup>	Revisar os métodos de prevenção da corrosão em estruturas de aço submetidas a ambientes marinhos, apresentando uma visão geral das tecnologias e estratégias disponíveis para mitigar esse problema	Não se aplica	Não se aplica	Entre os artigos analisados na revisão, apenas um abordou o uso da inteligência artificial para prever a taxa de corrosão, evidenciando seu potencial como ferramenta de apoio ao gerenciamento da corrosão em ambientes aquáticos tropicais
Gestão e Otimização de Projetos	Wei <sup>5</sup>	Demonstrar a aplicação da modelagem da informação da construção (BIM) combinada com algoritmos genéticos (GA) na gestão de obras, visando a redução de custos, economia de materiais e mão de obra, além de otimizar o gerenciamento geral do projeto	Algoritmo Genético (GA);	Navisworks	Os principais resultados apontaram a redução do desperdício de materiais, diminuição das despesas com mão de obra, automatização do programa de controle de instrumentos e redução do tempo de execução das atividades de soldagem. De forma geral, o estudo demonstrou economia significativa de recursos financeiros, de tempo e de força de trabalho. Destacam-se os seguintes pontos: (1) a construção de um galpão de aço em forma de grade exigiu quatro especificações de barras de aço, e, independentemente da especificação, o esquema de otimização com BIM e GA apresentou a maior taxa de utilização de matéria-prima; (2) em termos de benefícios econômicos, o esquema BIM

					combinado com GA economizou 9.589 yuans e reduziu o prazo da obra em 30 dias, quando comparado ao método tradicional, superando inclusive o desempenho obtido com o esquema de otimização baseado em PSO ( <i>Particle Swarm Optimization</i> )
--	--	--	--	--	---

Fonte: autores (2025).

Source: authors (2025).

**Quadro 1 – Análise dos artigos selecionados (Continuação)**

Table 1 – Analysis of Selected Articles

<b>Categoria</b>	<b>Referência</b>	<b>Objetivos</b>	<b>Tipo de IA</b>	<b>Softwares</b>	<b>Resultados</b>
Gestão e Otimização de Projetos	Sarfarazi <i>et al.</i> <sup>9</sup>	Apresentar uma visão geral do uso do aprendizado de máquina (ML) em estruturas de aço, destacando como essas tecnologias estão aprimorando a previsão de desempenho estrutural, a seleção de materiais, a estimativa de capacidade de carga e a avaliação de falhas. O artigo também aborda o funcionamento do aprendizado de máquina inverso (IML), suas aplicações no design estrutural e a importância da inteligência artificial explicável (XAI)	Aprendizado de máquina, aprendizado de máquina inverso (IML), inteligência artificial explicável (XAI)	Não se aplica	O estudo evidencia como a IA e o ML estão transformando o processo de projeto e análise de estruturas de aço. O aprendizado de máquina inverso (IML) é destacado como um diferencial no design estrutural. Além disso, o trabalho reforça a essencialidade da inteligência artificial explicável (XAI) para garantir a confiança e a aceitação das soluções baseadas em IA
Sustentabilidade	Kanyilmaz <i>et al.</i> <sup>13</sup>	Propor práticas de reutilização de aço com o objetivo de reduzir o impacto ambiental das construções metálicas	Redes neurais, perceptrons multicamadas, Revit	Não se aplica	Trata-se de uma revisão de literatura com análise exploratória e estudo de casos práticos. O artigo destaca a preocupação com a sustentabilidade no setor da construção, enfatizando que a reutilização do aço pode gerar impactos significativos na redução das emissões de carbono e no consumo de recursos naturais

Fonte: autores (2025).

Source: authors (2025).

Com base na análise do Quadro 1, foram definidos três tópicos principais para o aprofundamento do estudo: (1) Inspeção, Monitoramento e Manutenção, tema fundamental por sua relação direta com a segurança, a economia e a durabilidade das estruturas; (2) Gestão e Otimização de Projetos, aspecto essencial para a entrega de processos mais ágeis e eficazes, e; (3) Sustentabilidade, cuja abordagem envolve impactos sociais, econômicos e ambientais, alinhando-se à crescente demanda por práticas ambientalmente responsáveis.

Em relação à *Inspeção, Monitoramento e Manutenção de estruturas metálicas*, no que diz respeito ao diagnóstico automatizado de falhas, trincas e corrosão, observa-se que a corrosão em estruturas de aço é um mecanismo de falha frequente em componentes e elementos estruturais de aço. Vários métodos são empregados para estudar maneiras de detectar a corrosão em estruturas de aço. Khayatazad *et al.*<sup>1</sup>, por exemplo, estudaram a aplicação de um método automatizado para a avaliação de danos por corrosão por meio do processamento de imagens digitais. Um dos principais objetivos, além de utilizar um algoritmo baseado em

IA que possa reconhecer danos por corrosão através de imagens, foi empregar essa abordagem em substituição à inspeção visual feita por pessoas, que demanda tempo. O método propôs a extração de características morfológicas. O algoritmo quantificou e combinou dois aspectos visuais, rugosidade e cor, para determinar a área corroída em uma determinada imagem. Foram investigadas 31 imagens. Os resultados mostraram que o algoritmo é uma ferramenta promissora para detecção automatizada de corrosão por análise de imagens digitais. Todavia, ainda não oferece um desempenho de 100% em termos de *recall* e precisão. Além disso, imagens com iluminação não uniforme e contendo objetos enganosos representam um desafio. Essas são questões que os autores pretendem trabalhar futuramente para aprimorar a precisão e a robustez do algoritmo.

A inspeção de trincas em estruturas metálicas ferroviárias é importante para garantir a integridade e segurança estrutural e operacional do sistema. No estudo de Chen *et al.*<sup>7</sup>, foi proposto o uso de rede neural. O modelo de rede neural da inteligência artificial é semelhante à rede neural do cérebro. Na visão de uma rede neural, as informações apresentadas na imagem são mapeadas em conjuntos de parâmetros na forma de valores em tons de cinza ou RGB, e o modelo é treinado de acordo com os conjuntos de parâmetros fornecidos por muitas imagens, a fim de concluir o trabalho de classificação relevante. Quatro métricas principais serviram como base para a avaliação do desempenho dos modelos. A precisão de todos os três modelos no conjunto de teste foi superior a 97%, ou seja, todos apresentaram boa capacidade para detecção de trincas em aço. Embora tenha demonstrado resultados positivos, a pesquisa apresentou algumas limitações, como a ocorrência de detecções com erros. Para pesquisas futuras, o método de reconhecimento por inteligência artificial com detecção composta de múltiplos modelos será adotado, em combinação com as características do modelo, para realizar melhorias conforme a necessidade, tanto em termos de detecção de erros quanto de faltas, além de aprimorar a velocidade de reconhecimento.

Complementando o estudo de detecção de falhas ferroviárias, Hu *et al.*<sup>8</sup> propuseram uma solução que utiliza a inteligência artificial para identificar automaticamente falhas ferroviárias, empregando sensores de ultrassom para substituir os métodos convencionais, que envolviam avaliação humana, muitas vezes demorada e sujeita a erros. Diversas arquiteturas de redes neurais profundas foram comparadas, incluindo EfficientNet-B7, ResNet, Conformer e Swin Transformer, com destaque para a EfficientNet-B7, que alcançou 88,56% de precisão e tempo médio de inferência de 0,45s por imagem. Porém, assim como os outros modelos, também apresenta restrições. O desempenho do modelo foi influenciado pela disponibilidade e qualidade do conjunto de dados. Há a necessidade de equilibrar o tamanho do modelo com as emissões de carbono para garantir a sustentabilidade ambiental. O desempenho dos modelos pode ser afetado pelas características da infraestrutura ferroviária (formato, tamanho e orientação dos defeitos) e por variações ambientais (temperatura, umidade, iluminação). É importante destacar que o modelo proposto demonstra ser promissor para a detecção automatizada.

Ainda na categoria de *Inspeção, Monitoramento e Manutenção* de estruturas metálicas, a análise do comportamento estrutural com aprendizado profundo foi outro tópico analisado. A integridade das juntas semirrígidas em estruturas metálicas tem impacto direto no desempenho global da edificação, sendo especialmente vulneráveis a degradações causadas por fadiga, afrouxamento e corrosão. O estudo de Paral *et al.*<sup>6</sup> propõe uma abordagem baseada em aprendizagem profunda para avaliar a condição de juntas semirrígidas em estruturas de aço, visando identificar danos de forma não destrutiva. Utilizando redes neurais convolucionais (CNN) e a transformada wavelet contínua (CWT), o sistema analisou sinais de vibração convertidos em imagens (escalogramas) para prever a rigidez rotacional das conexões estruturais, combinando dados experimentais obtidos de uma estrutura metálica. A rede foi capaz de identificar alterações na rigidez das juntas. Esta investigação ofereceu uma nova técnica baseada em reconhecimento de imagem para avaliação das condições de conexões estruturais em estruturas de aço, utilizando o algoritmo DL. Uma das limitações do estudo foi a consideração de que o dano está apenas na conexão estrutural.

As estratégias de manutenção e prevenção em ambientes agressivos também foram um tópico de pesquisa estudado na categoria de *Inspeção, Monitoramento e Manutenção*. As estruturas de aço em ambientes

marinhos estão sujeitas a sofrer corrosão de modo mais intenso, o que exige estratégias de manutenção mais eficazes e tecnológicas. A pesquisa de Abbas *et al.*<sup>11</sup> apresentou uma análise abrangente sobre as principais abordagens adotadas para monitorar, prever e mitigar os efeitos da corrosão, considerando desde métodos tradicionais até soluções baseadas em tecnologias avançadas. Um dos principais destaques do estudo foi o papel crescente da inteligência artificial (IA) no setor. A IA tem sido aplicada para análise preditiva, detecção precoce de falhas e estimativa da vida útil remanescente das estruturas. Ferramentas como redes bayesianas, aprendizado de máquina e sistemas computacionais de manutenção (CMMS) possibilitam decisões baseadas em dados, adaptando o plano de manutenção em tempo real conforme o desempenho estrutural.

A durabilidade e a segurança das estruturas em ambientes marinhos apresentam um desafio crítico. Levando isso em consideração, em seu artigo de revisão de literatura, Dalmora *et al.*<sup>12</sup> apresentaram formas de prevenir e mitigar a corrosão do aço, considerando diversos fatores como cloretos, microrganismos, variação de temperatura e pH. São diversos métodos avaliados, como revestimentos metálicos e orgânicos, compósitos cimentícios, superfícies hidrofóbicas impregnadas com óleo e, o principal para o estudo, a inteligência artificial, utilizada para prever as taxas de corrosão, identificar padrões em grandes volumes de dados e personalizar estratégias de proteção. As principais limitações do estudo referiram-se principalmente às tecnologias mencionadas, que ainda estão em fase laboratorial.

Na categoria de *Gestão e Otimização de Projetos*, observou-se que a eficiência e a velocidade na gestão da construção civil têm sido cada vez mais impulsionadas por tecnologias digitais. Nesse sentido, o estudo de Wei<sup>5</sup> abordou a utilização de BIM e de inteligência artificial, por meio do algoritmo genético, no processo de otimização de corte e uso de matérias-primas em obras com estruturas de aço. O foco maior da pesquisa de Wei<sup>5</sup> foi otimizar o layout do corte de barras de aço. Foi utilizado como estudo de caso, um galpão metálico em forma de grade, com vários cenários BIM+PSO e BIM+GA. O melhor resultado foi obtido utilizando o algoritmo genético, que melhorou o desempenho em todos os aspectos, com taxas de utilização de matérias-primas quase chegando a 100%, além da redução de cronograma e, conseqüentemente, de custos financeiros. Uma das principais limitações do estudo é a restrição da análise a um único tipo de estrutura.

Ainda sobre *Gestão e Otimização de Projetos*, observa-se que engenharia necessita de constante atualização. Nesse contexto, o artigo de Sarfarazi *et al.*<sup>9</sup> realizaram uma revisão sistemática, empregando inteligência artificial, aprendizado de máquina, aprendizado de máquina inverso e IA explicável, todos aplicados ao projeto e à análise de estruturas metálicas. Os resultados indicam que a IA apresenta excelente capacidade preditiva em comparação aos métodos tradicionais, sendo eficaz na otimização de seções, na previsão da resistência, da flambagem e do comportamento sísmico, além de contribuir para verificações preventivas de segurança. Uma das principais limitações do estudo foi a escassez de um grande volume de dados rotulados.

Por fim, na categoria de *Sustentabilidade*, verificou-se que, atualmente, na busca para reduzir as emissões de carbono e o consumo de recursos naturais, a engenharia civil enfrenta a necessidade de se atualizar e encontrar formas construtivas que sejam menos agressivas ao meio ambiente, principalmente no uso do aço. Kanyilmaz *et al.*<sup>13</sup> mostraram alguns desafios e oportunidades na reutilização do aço. Sua reaplicação enfrenta cinco barreiras centrais: (1) disponibilidade limitada de elementos recuperados; (2) ausência de normas claras e protocolos de certificação; (3) custos iniciais elevados para desmontagem e requalificação; (4) negligência ao impacto ambiental da demolição; e (5) falta de envolvimento coordenado entre os agentes da cadeia produtiva. Para melhorar ou solucionar esses problemas, podem ser integradas a inteligência artificial e o passaporte de materiais, para rastrear o aço de forma mecânica e química. Foram apresentados casos em que a adoção dessas estratégias permitiu a reutilização de 100% das seções de aço. Uma das principais limitações do estudo foi a ausência de uma padronização internacional que regule a reutilização desse material. Além disso, o uso de aço previamente utilizado ainda enfrenta certa resistência, uma vez que a ideia de empregar materiais usados não é amplamente aceita por todos os profissionais do setor.

#### 4. Considerações Finais

A presente pesquisa destacou as transformações impulsionadas pela inteligência artificial no contexto da Construção 4.0, com ênfase nas áreas de Inspeção, Monitoramento e Manutenção, Gestão e Otimização de Projetos e Sustentabilidade de estruturas metálicas. Foi evidenciada a diversidade de aplicações da IA, como a detecção automatizada de corrosão, a identificação de falhas internas, o monitoramento de trincas e a avaliação de juntas semirrígidas. A integração da modelagem BIM com algoritmos baseados em IA também demonstrou potencial de acelerar ainda mais o desenvolvimento da construção civil. Neste contexto, o uso da IA contribuiu para aumentar a confiabilidade dos processos e otimizar as atividades no setor da construção civil. No entanto, apesar de os artigos analisados representarem uma fonte relevante de pesquisa, a maioria ainda se limita a contextos experimentais ou simulações computacionais, com baixa ou nenhuma validação prática em campo.

Diante do exposto, conclui-se que a inteligência artificial marca uma transição para uma nova era na construção civil, promovendo uma ruptura paradigmática em seus processos. Sua aplicação tem inovado a execução de serviços em estruturas metálicas, proporcionando maior agilidade na tomada de decisões baseadas em dados, além de otimizar diagnósticos e ações automatizadas. Dessa forma, esta pesquisa ofereceu uma compreensão crítica e sistemática sobre o potencial da IA nas estruturas metálicas, evidenciando a necessidade de novas investigações aplicadas e o contínuo desenvolvimento da inteligência artificial na engenharia estrutural.

Para futuras investigações, recomenda-se a utilização de bases indexadas internacionalmente, como *Scopus* e *Web of Science*, de forma a ampliar a representatividade dos resultados. Além disso, ressalta-se a importância de expandir o intervalo temporal da busca para incluir estudos publicados em anos anteriores à 2025, o que permitiria uma visão mais abrangente sobre a aplicação da inteligência artificial em estruturas metálicas e contribuiria significativamente para a generalização dos achados.

#### 5. Agradecimentos

Os autores agradecem ao Programa Institucional de Projeto de Iniciação Científica do Centro Universitário Brasileiro – UNIBRA (PIIC-UNIBRA), conforme Edital PIIC UNIBRA 2025.1, pelo apoio institucional e pelo fomento concedido ao desenvolvimento deste trabalho, fundamentais para o fortalecimento da integração entre ensino e pesquisa no âmbito do curso de Engenharia Civil.

#### 6. Referências

1. Khayatazad M, De Pue L, De Waele W. Detection of corrosion on steel structures using automated image processing. *Developments in the Built Environment* [Internet]. agosto de 2020;3:100022. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2666165920300181>
2. Abu-Aridah D, Henn RL. Construction 4.0 in Refugee Camps: Facilitating Socio-Spatial Adaptation Patterns in Jordan's Zaatari Camp. *Buildings* [Internet]. 16 de setembro de 2024;14(9):2927. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2075-5309/14/9/2927>
3. Alaloul WS, Liew MS, Zawawi NAWA, Kennedy IB. Industrial Revolution 4.0 in the construction industry: Challenges and opportunities for stakeholders. *Ain Shams Engineering Journal* [Internet]. março de 2020;11(1):225–30. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2090447919301157>
4. Kozlovska M, Klosova D, Strukova Z. Impact of Industry 4.0 Platform on the Formation of

- Construction 4.0 Concept: A Literature Review. Sustainability [Internet]. 2 de março de 2021;13(5):2683. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/5/2683>
5. Wei G. Application of BIM technology combined with artificial intelligence in construction management. *Stavební obzor - Civil Engineering Journal* [Internet]. 28 de julho de 2021;30(2). Disponível em: <https://ojs.cvut.cz/ojs/index.php/cej/article/view/7230>
  6. Paral A, Singha Roy DKr, Samanta AK. A deep learning-based approach for condition assessment of semi-rigid joint of steel frame. *Journal of Building Engineering* [Internet]. fevereiro de 2021;34:101946. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2352710220335786>
  7. Chen K, Huang Z, Chen C, Cheng Y, Shang Y, Zhu P, et al. Surface Crack Detection of Steel Structures in Railroad Industry Based on Multi-Model Training Comparison Technique. *Processes* [Internet]. 14 de abril de 2023;11(4):1208. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2227-9717/11/4/1208>
  8. Hu G, Li J, Jing G, Aela P. Rail Flaw B-Scan Image Analysis Using a Hierarchical Classification Model. *International Journal of Steel Structures* [Internet]. 2024;25(2):389–401. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s13296-024-00927-3>
  9. Sarfarazi S, Mascolo I, Modano M, Guarracino F. Application of Artificial Intelligence to Support Design and Analysis of Steel Structures. *Metals (Basel)* [Internet]. 4 de abril de 2025;15(4):408. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2075-4701/15/4/408>
  10. Moher D, Liberati A, Tetzlaff J, Altman DG. Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses: The PRISMA Statement. *J Clin Epidemiol* [Internet]. outubro de 2009;62(10):1006–12. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0895435609001796>
  11. Abbas M, Shafiee M. An overview of maintenance management strategies for corroded steel structures in extreme marine environments. *Marine Structures* [Internet]. maio de 2020;71:102718. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0951833920300125>
  12. Dalmora GPV, Borges Filho EP, Maraschin Conterato AA, Roso WS, Pereira CE, Dettmer A. Methods of corrosion prevention for steel in marine environments: A review. *Results in Surfaces and Interfaces* [Internet]. janeiro de 2025;18:100430. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2666845925000170>
  13. Kanyilmaz A, Birhane M, Fishwick R, del Castillo C. Reuse of Steel in the Construction Industry: Challenges and Opportunities. *International Journal of Steel Structures* [Internet]. 2023;23(5):1399–416. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s13296-023-00778-4>