Uma revisão sistemática da literatura sobre Inteligência Artificial na área de estruturas da Engenharia Civil

Ana Kelly Nobre Costa[1], Débora Fernandes Costa[1], Náthalee Cavalcanti de Almeida Lima[1,2], Adla Kellen Dionisio Sousa[1,2], Gabriel Caldas Barros e Sá[1,2]

[1]Universidade Federal Rural do Semi-Árido - UFERSA, Pau dos Ferros - RN, Brasil (ana.costa03379@alunos.ufersa.edu.br)
[2]Departamento de Engenharias e Tecnologias - UFERSA, Pau dos Ferros-RN, Brasil

Resumo: Este estudo trata-se de uma revisão sistemática de 252 artigos sobre a aplicação da inteligência artificial na engenharia civil, com foco na otimização de projetos estruturais, manutenção preditiva e automação construtiva. Técnicas de aprendizado de máquina aprimoram o monitoramento estrutural, a detecção precoce de falhas e a previsão do comportamento de materiais e edificações, elevando a segurança, reduzindo custos e aumentando a eficiência dos processos.

Palavras-chave: Inteligência Artificial; Engenharia Civil; Manutenção Preditiva; Modelagem Estrutural; Aprendizado de Máquina.

INTRODUÇÃO

A Inteligência Artificial (IA) tem grande potencial de resolver problemas da sociedade, visto que a IA pode ser entendida como o estudo de agentes capazes de perceber o ambiente e agir de forma autônoma em busca de objetivos, desempenhando tarefas que demandam inteligência humana Russell e Norvig (2021). De acordo com Silva e Pereira (2023), a IA tem a habilidade de processar e examinar grandes volumes de dados de forma rápida, reconhecendo padrões complexos e tomando decisões fundamentadas em dados precisos. Segundo Russell e Norvig (2010), destaca que a IA já desempenha um papel essencial em diversas áreas, proporcionando soluções eficientes e escaláveis para problemas complexos. Um dos principais benefícios de usar a IA em engenharia civil é a capacidade de aprimorar a tomada de decisões, automatizar tarefas e reduzir custos no processo de construção Abdulfattah et al. (2023). À medida que a tecnologia avança, e as aplicações de IA se tornam ainda melhores, contribuindo para um futuro em que decisões mais informadas e soluções inovadoras estejam ao alcance de todos.

Estruturas em engenharia civil

A estrutura na engenharia civil é uma parte fundamental na construção, pois refere-se aos elementos projetados, como vigas, pilares e lajes, para sustentar cargas e garantir a estabilidade e segurança das construções. A análise estrutural serve para garantir que a estrutura possa resistir a essas forças sem falhar, e é essencial para simular processos de construção, garantindo a segurança e a estabilidade da estrutura durante a execução Wang et al. (2022). Além disso, a sustentabilidade é uma preocupação crescente, levando profissionais a considerar o uso de materiais recicláveis e técnicas de construção ecoeficientes Silva e Pereira (2023). A inovação em software de modelagem, como o BIM (Modelagem da Informação da Construção) também transforma a forma como as estruturas são projetadas, pois abrangem a criação, gerenciamento e o compartilhamento de informações permitindo simulações complexas e otimização dos processos construtivos. E como disseram Roodman e Lenssen (1995: "A engenharia civil deve integrar técnicas inovadoras e práticas sustentáveis para enfrentar os desafios das construções modernas".

Inteligência artificial e Estruturas de engenharia civil

A engenharia civil desempenha um papel importante no desenvolvimento e manutenção de estruturas essenciais para a sociedade. No entanto, o envelhecimento das estruturas, e a necessidade de construções mais complexas e seguras exigem novos métodos de monitoramento, manutenção e análise. A IA e o aprendizado de máquina (ML) são ferramentas poderosas para enfrentar esses desafios, proporcionando soluções inovadoras para a coleta, análise e interpretação de grandes volumes de dados de diversas fontes diferentes.

Os avanços em inteligência artificial (IA) têm aprimorado significativamente o desempenho da previsão paramétrica em sistemas estruturais complexos, evoluindo de métodos baseados em

regressão para modelos generativos, o que possibilita previsões mais precisas e versáteis do comportamento estrutural Spencer et al. (2025). Essas tecnologias melhoram a segurança e a durabilidade das construções, permitindo a detecção precoce de falhas, otimizando os processos de manutenção e prevendo comportamentos estruturais complexos Wang et al. (2022).

No entanto, o uso eficaz da inteligência artificial em engenharia civil enfrenta desafios relacionados à complexidade e heterogeneidade dos dados, à necessidade de grandes volumes de dados de alta qualidade, à integração de múltiplas fontes e à robustez dos modelos frente a valores discrepantes. Além disso, a capacidade de generalização dos modelos continua sendo um desafio devido à variabilidade e incertezas das condições estruturais Demertzis et al. (2023).

O objetivo deste estudo é realizar uma revisão sistemática da literatura (RSL) sobre a aplicação de IA nas estruturas da engenharia civil, identificando as técnicas mais usadas, os avanços e os problemas enfrentados. A partir da análise de 252 artigos publicados nos últimos cinco anos, este trabalho busca fornecer uma visão abrangente e crítica do estado da arte do uso da inteligência artificial em estruturas de engenharia civil, além de contribuir para o avanço do conhecimento na área, destacando oportunidades e desafios e incentivando o desenvolvimento de soluções inovadoras que possam melhorar a segurança, a eficiência, a sustentabilidade e a qualidade das estruturas civis.

Este trabalho está estruturado da seguinte maneira: a Seção 2 apresenta a metodologia utilizada, incluindo as questões de pesquisa, as strings de busca, os critérios de inclusão e exclusão, e os critérios de qualidade. Na Seção 3, são discutidos os resultados e as principais descobertas, abordando desafios e limitações, bem como as métricas de avaliação. Por fim, a Seção 4 conclui o artigo, resumindo as implicações e as contribuições do estudo.

MATERIAIS E MÉTODOS

O objetivo deste estudo é realizar uma RSL sobre o uso das técnicas de IA na área de estruturas da engenharia civil. O protocolo segue as diretrizes de Kitchenham (2007), que são reconhecidas para garantir uma abordagem objetiva e relevante nas respostas e questões de pesquisa. A metodologia adotada envolveu várias etapas, detalhadas a seguir.

O processo de seleção de artigos para a revisão sistemática foi meticuloso, utilizando bases de dados renomadas e critérios rigorosos para assegurar a relevância e a qualidade dos estudos incluídos. Foram consultadas quatro bases de dados principais: Scopus, Science Direct, Web of Science e Compendex. A busca foi conduzida utilizando strings específicas que combinam termos relacionados à IA e ML com engenharia civil e estruturas. Essa estratégia de busca resultou em um número significativo de artigos em cada base de dados: 54.102 na Scopus, 18.141 na Science Direct, 15.425 na Web of Science e 13.295 na Compendex.

Os critérios foram rigorosamente aplicados durante a análise dos títulos e resumos dos estudos selecionados. Estudos que não atendiam a um ou mais desses critérios foram excluídos, garantindo que apenas aqueles relevantes e alinhados com o tema fossem considerados.

Os critérios de inclusão foram definidos com o objetivo de garantir a relevância e a qualidade dos estudos analisados. Foram considerados apenas artigos publicados entre os anos de 2018 e 2023, assegurando a atualidade das evidências. Além disso, os estudos deveriam conter os termos da string de busca no título, resumo ou palavras-chave. Apenas artigos completos e revisados por pares foram incluídos, garantindo a credibilidade científica. Também foi estabelecido que os trabalhos deveriam estar escritos em inglês e abordar especificamente o uso de aprendizado de máquina, inteligência artificial ou redes neurais aplicados a estruturas de engenharia civil.

Em contrapartida, foram definidos critérios de exclusão para eliminar estudos que não se adequavam ao escopo da pesquisa. Foram excluídos artigos publicados antes de 2018, aqueles que não continham os termos da string de busca nas seções especificadas, bem como livros, capítulos de livros e outras formas de literatura cinza. Revisões e estudos secundários também foram desconsiderados, priorizando evidências primárias. Adicionalmente, artigos duplicados foram removidos, e estudos incompletos, resumidos ou inacessíveis foram excluídos, a fim de manter a qualidade da análise.

Inicialmente, foram identificados 331 artigos relevantes ao tema do estudo após a aplicação dos critérios de inclusão, considerando publicações dos últimos cinco anos. Em seguida, foram aplicados os critérios de exclusão, com o objetivo de garantir a relevância e a qualidade dos estudos selecionados. Após essa etapa de triagem, restaram 252 artigos considerados válidos para análise.

Esse processo de seleção resultou em uma coleção de estudos que proporcionam uma base sólida para analisar o impacto da IA e do ML em estruturas de engenharia civil. A Figura 1 sintetiza as etapas e critérios envolvidos na seleção dos artigos, destacando a meticulosidade e a robustez da metodologia adotada.

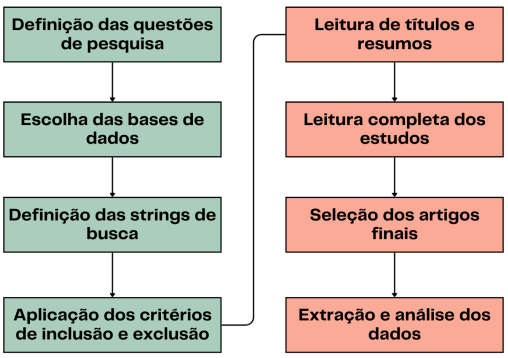


Figura 1: Processo de desenvolvimento da Revisão Sistemática

Questões de pesquisa

Esta RSL tem como objetivo investigar o uso da IA na área de estruturas da engenharia civil. O foco é analisar como a IA tem sido aplicada, incluindo, mas não se limitando à otimização de projetos estruturais, à manutenção preditiva, à automação de processos de construção e ao aumento da segurança. Além disso, a revisão busca identificar as técnicas de IA mais empregadas, as características analisadas, as limitações enfrentadas e as métricas utilizadas para avaliar a eficácia dessas técnicas. Com base nisso, foram formuladas as questões de pesquisa apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1: Questões de pesquisa da RSL

Questões de pesquisa
QP01 - Como a IA tem sido aplicada na área?
QP02 - Quais características da área de estruturas da engenharia civil são consideradas nas aplicações de IA?
QP03 - Quais técnicas de IA são utilizadas?
QP04 - Quais as limitações encontradas?
QP05 - Quais métricas de avaliação são utilizadas?
QP06 - Quais bancos de dados são utilizados?

Strings de busca

Definidas as questões de pesquisa, foram elaboradas strings de busca utilizando palavras-chave derivadas dessas questões. As strings foram aplicadas para uma busca automática nas bases de dados Scopus, Science Direct, Web of Science e Compendex (mostradas na Tabela 2).

Tabela 2: Strings de busca

Base de dados	**Strings**
Scopus	("machine learning" OR "artificial intelligence") AND ("civil engineering" AND "structures" OR "structural engineering")
Science Direct	("machine learning" OR "artificial intelligence") AND ("civil engineering" AND "structures" OR "structural engineering")
Web of Science	("machine learning" OR "artificial intelligence") AND ("civil engineering structures" OR "structural engineering")
Compendex	("machine learning" OR "artificial intelligence") AND ("civil engineering structures" OR "structural engineering")

Foram desenvolvidas strings de busca principais, acompanhadas de variações específicas para abranger estudos contextualizados. Além da formulação das strings, critérios foram aplicados para filtrar os artigos relevantes, garantindo uma busca abrangente e meticulosa na literatura especializada. Este método permitiu a identificação e análise de artigos significativos que estão na vanguarda do uso de inteligência artificial e aprendizado de máquina em engenharia civil, contribuindo substancialmente para o avanço do conhecimento nesta área.

Critérios de inclusão e exclusão

Após a seleção inicial dos trabalhos com base nas strings de busca previamente definidas, procedeu-se à aplicação dos critérios de inclusão e exclusão. Essa etapa teve como principal objetivo avaliar a relevância e a aderência dos estudos primários às questões de pesquisa estabelecidas no protocolo da revisão. Dessa forma, buscou-se garantir que apenas estudos capazes de fornecer evidências consistentes e diretamente relacionadas aos objetivos da pesquisa fossem considerados para as etapas subsequentes da análise. Para isso, foram utilizados cinco critérios de inclusão e exclusão, elaborados de acordo com as questões de pesquisa e com o escopo do estudo, permitindo uma seleção mais criteriosa, sistemática e confiável dos trabalhos analisados. Os critérios adotados encontram-se detalhados na **Tabela 3.**

Tabela 3: Critérios de inclusão e exclusão

Critérios de inclusão	Critérios de exclusão
CI1 - Ano de publicação: 2018 até os dias atuais	CE1 - Ano de publicação anterior a 2018 (5 anos de intervalo)
CI2 - Possuir os termos da string de busca no abstract (resumo), título ou palavras-chave	CE2 - Não possuir os termos da string de busca no abstract (resumo), título ou palavras-chave
CI3 - Artigos completos revisados por pares	CE3 - Livros ou outras formas de literatura cinza (literatura não revisada por pares)
CI4 - Tratar do uso de Machine Learning e/ou IA e/ou Neural Network em Estruturas	CE4 - Estudos secundários (revisões)
CI5 - Somente artigos em inglês	CE5 - Artigo duplicado, resumido, incompleto ou inacessível

.

Critérios de qualidade

A avaliação da qualidade de artigos científicos é crucial para garantir a precisão e a relevância das pesquisas publicadas. Foi definido um conjunto de perguntas específicas, conforme apresentado na Tabela 4..

Os critérios de inclusão e exclusão foram estabelecidos com base nas orientações de Kitchenham (2007). Para aplicar esses critérios, foi realizada uma leitura completa dos trabalhos selecionados após a aplicação dos critérios de inclusão e exclusão. Cada pergunta foi avaliada com base em critérios de qualidade que variam de 0 a 1, onde 1 indica que o critério foi "Atendido", 0,5 indica "Atendido Parcialmente", e 0 indica "Não Atendido". Para o critério CQ9, a pontuação pode ser 1 ou 0, dependendo se a plataforma ou ferramenta foi validada em um cenário real ou não. O valor mínimo da média de pontuação que um estudo pode alcançar para ser qualificado como "aprovado", após a aplicação dos critérios de qualidade, é 7.

Tabela 4: Critérios de qualidade

Critérios de qualidade
CQ1 - Os objetivos ou motivações são apresentados de forma clara?
CQ2 - As metodologias foram apresentadas de forma clara?
CQ3 - As entradas de dados utilizados na IA (atributos) foram bem definidas?
CQ4 - A base de dados foi disponibilizada no trabalho?
CQ5 - Está claro quais as técnicas de IA foram utilizadas no estudo?
CQ6 - Fica claro quais as métricas utilizadas para validar a técnica de IA?
CQ7 - Há discussão dos resultados no estudo?
CQ8 - As limitações do estudo foram expostas?
CQ9 - A plataforma ou ferramenta foi validada em um cenário real?

Após a avaliação, foi constatado que, dos 331 artigos analisados, 105 foram aprovados e 226 foram reprovados. A análise detalhada de cada pergunta revelou que os artigos aprovados tendem a ser mais claros na apresentação dos objetivos e metodologias, na definição das entradas de dados, e na descrição das técnicas de IA utilizadas. Além disso, a disponibilização das bases de dados e a clareza sobre as métricas de validação foram aspectos decisivos para a aprovação dos artigos.

Em contraste, os artigos que não atenderam satisfatoriamente a esses critérios foram reprovados, evidenciando a importância de uma documentação completa e transparente na pesquisa em IA. Os resultados mostram que a clareza na apresentação dos objetivos, metodologias e entradas de dados, além da disponibilização das bases de dados, são elementos essenciais para a aprovação dos artigos. A análise evidencia áreas críticas que os autores devem aprimorar para aumentar as chances de aceitação de seus trabalhos. A transparência e a precisão em todas as etapas da pesquisa são fundamentais para a aceitação e validação pelos pares, garantindo que a pesquisa tenha um impacto significativo no campo da engenharia civil.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esta seção apresenta os resultados da revisão sistemática, organizados de acordo com as questões de pesquisa definidas na Seção 2.1. Na etapa inicial desta revisão sistemática, foram obtidos um total de 100.963 artigos ao juntar as bases da Scopus, Science Direct, Web of Science e Compendex. Após a aplicação dos critérios de inclusão e exclusão,

restaram 252 artigos para serem avaliados de acordo com os critérios de qualidade estabelecidos.

Com o objetivo de caracterizar o panorama de aplicação da IA na área (QP01), a distribuição dos artigos analisados revela uma variedade significativa de origens geográficas. Dos 252 artigos revisados, a maior parte não especificou a localização (164), seguido pela China com 28 artigos, e os Estados Unidos com 8. Outros países como Itália (9), Vietnã (8), Japão e Coreia do Sul (ambos com 3 cada) também contribuíram para o corpo de pesquisa revisado. Além disso, observou-se a presença de artigos originários de vários outros países, incluindo Brasil, Portugal, e diversos países europeus, como Suécia, Suíça, Espanha e França, entre outros. Esta diversidade geográfica reflete a abrangência internacional das contribuições científicas examinadas neste estudo. Segue a Figura 2.

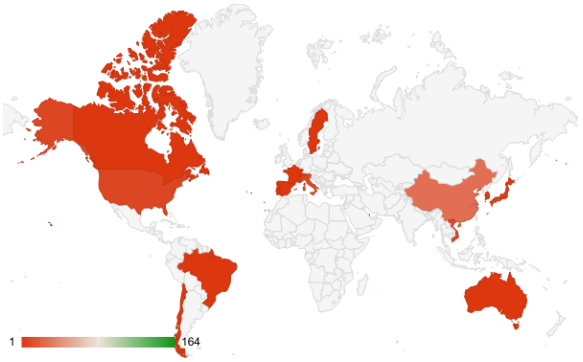


Figura 2. Distribuição geográfica dos artigos analisados.

No que se refere às fontes de dados utilizadas nos estudos (QP06), a análise da quantidade de artigos provenientes de diferentes bases de dados revela que a SCOPUS foi a principal fonte, contribuindo com 220 dos 252 artigos revisados. Em contraste, a COMPENDEX e a WEB OF SCIENCE apresentaram números mais modestos, com 7 e 11 artigos respectivamente. A plataforma SCIENCE DIRECT também teve uma contribuição significativa, com 14 artigos incluídos na revisão. Essa distribuição reflete não apenas a prevalência da SCOPUS como fonte preferida, mas também a diversidade de plataformas utilizadas para disseminar pesquisas no campo da inteligência artificial e aprendizado de máquina em estruturas de engenharia civil. Além disso, observa-se que a utilização de múltiplas bases de dados contribuiu para ampliar a cobertura da revisão, permitindo identificar estudos relevantes publicados em diferentes veículos científicos e contextos de pesquisa. Esse aspecto fortalece a confiabilidade dos resultados obtidos, uma vez que reduz possíveis limitações associadas à dependência de uma única fonte de indexação. Conforme apresentado na **Figura 3**.

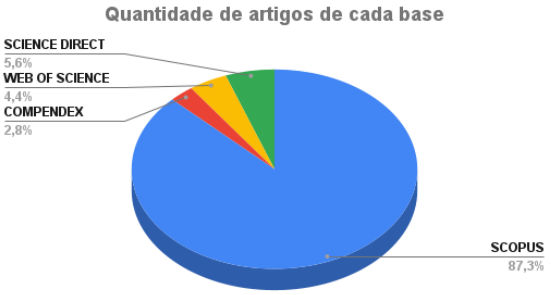


Figura 3. Quantidade de artigos de cada base

Em relação à evolução temporal das pesquisas na área (QP01), ao analisar a quantidade total de artigos considerados, com base nos 252 estudos selecionados após a aplicação dos critérios de inclusão e exclusão, observou-se uma distribuição variada ao longo dos anos, conforme apresentado na Figura 4. Em 2018, não foram encontrados artigos relevantes para inclusão nesta revisão. Em 2019, foram identificados 12 artigos, enquanto em 2020 esse número cresceu para 59. O ano de 2021 apresentou o maior número de contribuições, com 71 artigos. Em 2022, esse número se manteve elevado, com 77 estudos, indicando uma tendência de crescimento contínuo na produção científica. Por fim, em 2023, foram analisados 33 artigos, refletindo uma estabilidade após o pico observado em 2022. Essa distribuição ao longo dos anos revela um panorama dinâmico da produção acadêmica no campo da inteligência artificial e do aprendizado de máquina aplicados a estruturas de engenharia civil, destacando períodos de maior e menor atividade de pesquisa.

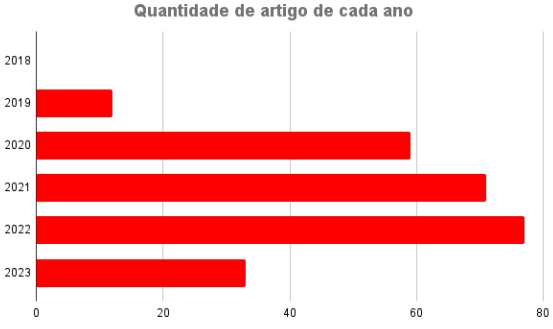


Figura 4. Quantidade de artigos de cada ano.

No que diz respeito às técnicas de IA empregadas nas pesquisas (QP03), a análise dos termos de IA e ML mais utilizados nos 252 artigos revisados revela uma ampla variedade de abordagens aplicadas às

estruturas de engenharia civil. Entre as técnicas mais frequentemente empregadas, mostradas na Figura 5, incluem o Support Vector Machine (SVM), K-Nearest Neighbors (KNN), Convolutional Neural Networks (CNN), redes neurais em geral, Machine Learning e Deep Learning. Além disso, técnicas específicas como Long Short-Term Memory (LSTM), Redes Adversariais Generativas (GANs), Redes Neurais Convolucionais Profundas (DCNN), e algoritmos como Random Forest e Naive Bayes foram amplamente explorados.

Técnicas avançadas e especializadas, como Redes Neurais de Cápsulas (CapsNets), Equações Diferenciais Neurais (EDOs Neurais), e métodos adaptativos como Aprendizagem por Transferência, também foram identificadas. Essa diversidade e sofisticação demonstram o esforço contínuo para aplicar e desenvolver soluções inovadoras em IA e ML para resolver desafios complexos em estruturas de engenharia civil, promovendo avanços significativos neste campo crucial.

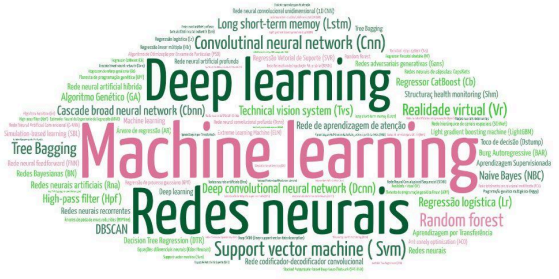


Figura 5. Termos e técnicas de Inteligência Artificial.

Métricas de avaliação

A avaliação criteriosa de modelos em estudos científicos que utilizam IA na engenharia civil depende de métricas específicas para medir diferentes aspectos do desempenho e da validade dos modelos propostos. Foram analisados 252 artigos, a partir dos quais foram identificadas diversas métricas relacionadas ao tema. Para facilitar a análise, essas métricas foram organizadas em 13 categorias conceituais, que permitem compreender como os resultados foram avaliados e interpretados nos estudos. As categorias identificadas incluem: validação, comparação de modelos, métricas de erro, acurácia, precisão, sensibilidade, especificidade, desempenho, eficiência, robustez, generalização, testes e experimentação, representando dimensões fundamentais consideradas pelos pesquisadores na avaliação de modelos de IA.

A validação, por exemplo, é crucial para garantir que o modelo seja capaz de fazer previsões precisas em novos dados não utilizados durante o treinamento, assegurando sua capacidade de generalização. A comparação envolve a análise criteriosa de diferentes modelos para determinar o mais adequado a uma aplicação específica, enquanto a precisão mede quão próximas as previsões do modelo estão dos valores reais.

Além disso, métricas quantitativas como erro médio, sensibilidade e especificidade são utilizadas para avaliar aspectos específicos do modelo, fornecendo medidas objetivas de seu desempenho. A capacidade do modelo de manter sua eficácia em diferentes condições e cenários está relacionada ao seu desempenho, sendo essencial para garantir robustez e eficiência ao longo do tempo. A generalização refere-se à capacidade do modelo de manter um bom desempenho ao ser aplicado a dados novos e não vistos, sem se ajustar excessivamente aos dados de treinamento. Por sua vez, testes sistemáticos são empregados para avaliar a performance do modelo antes de sua implementação prática, contribuindo para a verificação de sua confiabilidade.

Experimentos estruturados são conduzidos para validar hipóteses, comparar abordagens e redefinir modelos existentes, impulsionando avanços na engenharia civil por meio da IA.

Essas metodologias de avaliação são cruciais para análise e interpretação de resultados, mas também orientam o desenvolvimento e implementação de modelos de IA em aplicações práticas. O entendimento profundo desses conceitos é importante para impulsionar inovações e aumentar a eficácia das soluções tecnológicas modernas na engenharia civil.

Desafios e limitações

A aplicação de técnicas de inteligência artificial (IA) na engenharia civil tem demonstrado grande potencial, especialmente na análise, monitoramento e previsão do comportamento de estruturas. Apesar dos avanços, a adoção dessas abordagens ainda enfrenta desafios significativos que impactam sua confiabilidade, escalabilidade e aplicabilidade em cenários reais.

Um dos principais entraves está relacionado aos dados. Estruturas civis geram grandes volumes de informações provenientes de diferentes fontes, como sensores, imagens e registros históricos. Esses dados frequentemente apresentam heterogeneidade, ruídos e inconsistências, além de distribuição desigual, o que dificulta sua integração e o treinamento de modelos robustos. A necessidade de técnicas eficientes de pré-processamento e fusão de dados torna-se, portanto, um aspecto crítico.

Outro desafio relevante diz respeito às limitações técnicas. Modelos de IA, especialmente os mais complexos, demandam elevado poder computacional,

o que pode restringir sua aplicação em ambientes com infraestrutura limitada. Além disso, questões relacionadas à eficiência dos algoritmos, à capacidade de processamento em tempo real e à robustez frente a dados anômalos ainda representam obstáculos importantes.

A complexidade dos modelos e dos próprios sistemas estruturais também deve ser considerada. Modelos mais sofisticados tendem a oferecer melhores desempenhos, porém são mais difíceis de interpretar, validar e implementar em condições reais, o que pode comprometer a transparência e a confiabilidade das soluções.

Adicionalmente, a capacidade de generalização dos modelos permanece como um desafio central. Modelos treinados em conjuntos de dados específicos podem não apresentar o mesmo desempenho quando expostos a novas condições operacionais, devido à variabilidade inerente aos sistemas de engenharia civil. Esse problema é agravado pela presença de dados limitados ou desbalanceados.

A precisão das previsões é outro fator determinante. Em aplicações de engenharia civil, pequenas imprecisões podem resultar em consequências significativas, afetando tanto a segurança quanto a eficiência das estruturas. Dessa forma, garantir altos níveis de acurácia é essencial para a adoção confiável dessas tecnologias.

Por fim, a implementação prática de soluções baseadas em IA envolve desafios adicionais, como a necessidade de validação em campo, adaptação a diferentes contextos de projeto, custos de desenvolvimento e manutenção, além da exigência de interpretabilidade e confiabilidade em condições operacionais adversas.

Entre as principais categorias de desafios e limitações identificadas na literatura, destacam-se:

- **Dados:** A qualidade, quantidade e heterogeneidade dos dados impactam diretamente o desempenho dos modelos. Dados provenientes de múltiplas fontes podem apresentar ruídos, inconsistências e dificuldades de integração, exigindo etapas robustas de pré-processamento.
- **Limitações técnicas:** Restrições relacionadas a hardware, software e algoritmos podem comprometer a implementação de soluções de IA, especialmente em aplicações que demandam alto desempenho computacional.
- **Complexidade:** Tanto os dados quanto os modelos utilizados apresentam elevada complexidade, o que aumenta o custo computacional e dificulta a interpretação e validação dos resultados em cenários reais.
- **Distribuição dos dados:** A presença de dados desbalanceados ou não representativos pode introduzir vieses nos modelos, reduzindo sua eficácia e confiabilidade.
- **Generalização:** A capacidade dos modelos de IA de se adaptarem a novas condições ainda é limitada, podendo resultar em queda de desempenho quando aplicados fora do ambiente de treinamento.
- **Precisão:** A necessidade de alta precisão é crítica em engenharia civil, e limitações nesse aspecto podem comprometer a confiabilidade das análises e a segurança das estruturas.

Vale destacar que, dos 252 artigos analisados, 76 não apresentaram de forma clara seus desafios e limitações, evidenciando uma lacuna relevante na literatura e reforçando a necessidade de abordagens mais sistemáticas e transparentes nesse contexto.

CONCLUSÃO

Este artigo mostrou uma visão sobre o uso de IA em estruturas de engenharia civil, através de uma RSL de 252 artigos publicados nos últimos cinco anos. A análise expôs o crescimento contínuo e o interesse no uso de técnicas de IA para melhorar a eficiência, precisão e segurança das estruturas civis. Diversas técnicas de IA e algoritmos avançados tem sido exploradas, mostrando promissoras capacidades de detectar falhas, otimizar processos de manutenção e prever comportamentos estruturais complexos. A diversidade dessas técnicas aplicadas e a sofisticação das abordagens refletem o esforço contínuo da comunidade científica em desenvolver soluções inovadoras para os desafios na engenharia civil visando principalmente a parte estrutural, que é fundamental.

Apesar de avanços significativos, estudos apontam diversos desafios e limitações. A complexidade e heterogeneidade dos dados, a necessidade de grandes volumes de dados de alta qualidade para treinamento, a robustez dos modelos em relação a valores discrepantes e anomalias, e a capacidade dos modelos de generalizar para novos dados e condições operacionais são aspectos críticos que precisam ser abordados. Além disso, limitações técnicas, como a demanda por recursos computacionais significativos e a dificuldade na interpretação de modelos complexos, representam barreiras para a aplicação prática em larga escala. A revisão também mostra a importância de uma documentação clara e detalhada das metodologias, entradas de dados, técnicas de IA utilizadas, e métricas de validação.

O estudo também destacou a distribuição geográfica diversa dos artigos revisados, com uma predominância de contribuições da China e dos Estados Unidos nas pesquisas em IA aplicada à engenharia civil.

De forma geral, a aplicação de IA em estruturas de engenharia civil apresenta oportunidades promissoras para melhorias significativas em segurança, eficiência e sustentabilidade. No entanto, para maximizar o potencial dessas tecnologias, é crucial abordar os desafios e limitações identificados, garantir a qualidade e a representatividade dos dados, e promover a transparência e precisão na documentação das pesquisas.

AGRADECIMENTOS

Os autores expressam seus agradecimentos ao Programa de Iniciação Científica e Inovação (PICI) da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA) pelo apoio financeiro concedido por meio da bolsa de iniciação científica, cuja contribuição foi essencial para o desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS

Abdulfattah, B. S.; Abdelsalam, H. A.; Abdelsalam, M.; Bolpagni, M.; Thurairajah, N.; Perez, L. F.; Butt, T. E. Predicting implications of design changes in BIM-based construction projects through machine learning. *Automation in Construction*, v. 153, p. 104944, 2023.

Demertzis, K.; Demertzis, S.; Iliadis, L. A selective survey review of computational intelligence applications in the primary subdomains of civil engineering specializations. *MDPI*, 2023.

Kitchenham, B. *Procedures for Performing Systematic Reviews*. 2007.

Roodman, D. M.; Lenssen, N. *A Building Revolution: How Ecology and Health Concerns are Transforming Construction*. Worldwatch Institute, Washington, DC, 1995.

Russell, S. J.; Norvig, P. *Artificial Intelligence: A Modern Approach*. 3. ed. Prentice Hall, Upper Saddle River, 2010.

Russell, S. J.; Norvig, P. *Artificial Intelligence: A Modern Approach*. 4. ed. Pearson, Hoboken, 2021.

Silva, J.; Pereira, M. Transformação da engenharia civil através da IA: um novo horizonte de inovação. *Revista de Engenharia e Inovação*, v. 15, n. 2, p. 45–60, 2023.

Spencer, B. F.; Sim, S.-H.; Kim, R. E.; Yoon, H. Advances in artificial intelligence for structural health monitoring: A comprehensive review. *KSCE Journal of Civil Engineering*, v. 29, n. 3, p. 100203, 2025.

Wang, C.; Song, L. H.; Fan, J. S. End-to-end structural analysis in civil engineering based on deep structural nonlinear analysis. *Automation in Construction*, v. 138, p. 104255, 2022.