



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO PIAUÍ
CAMPUS TERESINA ZONA SUL
BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL**

ANTONIO LUIS DE SOUSA NETO

**A INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL NA ENGENHARIA CIVIL: IMPACTOS,
APLICAÇÕES E DESAFIOS ÉTICOS NO PRESENTE E FUTURO**

TERESINA

2026

ANTONIO LUIS DE SOUSA NETO

A INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL NA ENGENHARIA CIVIL: IMPACTOS, APLICAÇÕES
E DESAFIOS ÉTICOS NO PRESENTE E FUTURO

Trabalho de Conclusão de Curso (monografia)
apresentado como exigência parcial para obtenção
do diploma do Curso de Bacharelado em
Engenharia Civil do Instituto Federal de Educação,
Ciência e Tecnologia do Piauí, Campus Teresina
Zona Sul

Orientador: Prof. Dr. Ailton Soares Freire

TERESINA

2026

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD

Sousa Neto, Antonio Luis de

N469i A inteligência artificial na engenharia civil : impactos, aplicações e desafios
éticos no presente e futuro / Antonio Luis de Sousa Neto. - 2026.
44 f.: il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) -
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí, Campus
Teresina Zona Sul, 2026.

Orientador : Prof Dr. Ailton Soares Freire.

1. inteligência artificial. 2. engenharia civil. 3. análise bibliométrica. I.Título.

CDD - 624

Elaborado por Rudney do Carmo Paz CRB 3/1117

ANTONIO LUIS DE SOUSA NETO

A INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL NA ENGENHARIA CIVIL: IMPACTOS, APLICAÇÕES
E DESAFIOS ÉTICOS NO PRESENTE E FUTURO

Trabalho de Conclusão de Curso (monografia)
apresentado como exigência parcial para obtenção
do diploma do Curso de Bacharelado em
Engenharia Civil do Instituto Federal de Educação,
Ciência e Tecnologia do Piauí, Campus Teresina
Zona Sul

Aprovada em: 14 / 01 / 2026.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Ailton Soares Freire (Orientador)
Instituto Federal do Piauí (IFPI)

Prof. Esp. Antônio José Silva Lopes
Instituto Federal do Piauí (IFPI)

Prof. Esp. Márcia Costa Santos
Instituto Federal do Piauí (IFPI)

Aos meus pais por todo o suporte e
todo apoio ao decorrer desses anos.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho é a representação de um ciclo muito bonito que está se encerrando, com isso, primeiramente, quero agradecer a Deus que sempre me deu forças para enfrentar todas as batalhas e conseguir chegar nesse momento.

Também quero agradecer aos meus pais, Valdecir e Regiane que me deram base, segurança e sempre fizeram o melhor para que eu pudesse realizar os meus sonhos, também agradecer ao meu irmão Marcos Felipe que também me ajudou muito, me dava conselhos e sempre fez o possível para o meu bem.

Além disso, quero agradecer uma pessoa muito especial, o professor Ailton Freire, eu o considero como um pai, sempre esteve presente perguntando sobre como eu estava, se precisava de algo e pra mim é extremamente gratificante o mesmo ser meu orientador nesse momento.

Ademais, agradecer a todos os amigos que fizeram parte da jornada na engenharia, sendo eles Tiago, Ismara, Luiz Fernando, July e muitos outros que são extremamente importantes na chegada a esse momento de conclusão, sem vocês, dificilmente eu chegaria até aqui, vocês fizeram essa jornada ser muito melhor.

Também, quero agradecer a todos os meus amigos, parentes e clientes dos meus pais, sem vocês esse momento não seria possível.

“Mude suas opiniões, mantenha seus princípios.
Troque suas folhas, mantenha suas raízes.”

Victor Hugo

RESUMO

A Inteligência Artificial (IA) apresenta-se como uma tecnologia estratégica no contexto da Indústria 4.0, com transformações significativas na engenharia civil. Este trabalho tem como objetivo analisar, com base na literatura científica, as aplicações da inteligência artificial na engenharia civil, seus impactos nos processos construtivos, bem como os desafios éticos associados ao seu uso no contexto atual e nas perspectivas futuras do setor. Para tanto, foi realizada uma análise bibliométrica baseada em documentos indexados na base de dados Scopus, no período de 2000 a 2025, totalizando 832 artigos após a aplicação dos critérios de filtragem. Os resultados evidenciam um crescimento expressivo das publicações nos últimos anos, com predominância das áreas de Engenharia e Ciência da Computação, além de forte concentração de estudos em países como China, Estados Unidos e Índia. As principais aplicações identificadas envolvem modelagem preditiva, monitoramento estrutural, otimização de projetos, gestão da construção e apoio à tomada de decisão. Apesar dos benefícios observados, destacam-se desafios éticos relacionados à confiabilidade dos algoritmos, à proteção de dados e à necessidade de requalificação profissional. Conclui-se que a IA apresenta elevado potencial de transformação da engenharia civil, desde que sua implementação ocorra de forma responsável, ética e plenamente conduzida pelo engenheiro.

Palavras-chave: inteligência artificial; engenharia civil; análise bibliométrica.

ABSTRACT

Artificial Intelligence (AI) has emerged as a strategic technology within the context of Industry 4.0, promoting significant transformations in civil engineering. This study aims to analyze, based on the scientific literature, the applications of artificial intelligence in civil engineering, its impacts on construction processes, as well as the ethical challenges associated with its use in the current context and future perspectives of the sector. To this end, a bibliometric analysis was conducted using documents indexed in the Scopus database, covering the period from 2000 to 2025, resulting in a total of 832 articles after the application of filtering criteria. The results indicate a significant growth in publications in recent years, with a predominance of studies in the fields of Engineering and Computer Science, as well as a strong concentration of research in countries such as China, the United States, and India. The main applications identified include predictive modeling, structural monitoring, project optimization, construction management, and decision-making support. Despite the observed benefits, ethical challenges related to algorithm reliability, data protection, and the need for professional reskilling are highlighted. It is concluded that AI presents a high potential for transforming civil engineering, provided that its implementation occurs in a responsible and ethical manner, under the full supervision of the engineer.

Keywords: artificial intelligence; civil engineering; bibliometric analysis.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Imagem 1 - Estrutura do trabalho.....	17
Imagem 2 - Fluxograma dos métodos utilizados.....	31
Imagem 3 - Triagem dos artigos analisados.....	32
Imagem 4 - Evolução temporal das publicações (2000-2025).....	33
Imagem 5 - Áreas temáticas das publicações analisadas.....	35
Imagem 6 - Principais autores com publicações entre as analisadas.....	36
Imagem 7 - Países com maior número de artigos publicados.....	37
Imagem 8 - Rede de coocorrência de palavras chave no software VOSviewer.....	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Conceitos sobre Inteligência Artificial (IA).....	18
Tabela 2 - Tecnologias utilizadas na construção 4.0.....	23

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AEC	Arquitetura, Engenharia e Construção
BIM	Building Information Modeling
CBIC	Câmara Brasileira da Indústria da Construção
CPS	Cyber Physical Systems
EUA	Estados Unidos da América
IA	Inteligência Artificial
IoT	Internet of Things
PIB	Produto Interno Bruto
ML	Machine Learning
RA	Realidade Aumentada
RV	Realidade Virtual

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	14
1.1 CONTEXTO E RELEVÂNCIA DO TEMA.....	14
1.2 JUSTIFICATIVA.....	15
1.3 DELIMITAÇÃO DO TEMA.....	16
1.4 OBJETIVO GERAL.....	16
1.5 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	16
1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	17
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	18
2.1 CONCEITOS FUNDAMENTAIS DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL.....	18
2.1.1 Definição de Inteligência Artificial.....	18
2.1.2 Machine Learning.....	20
2.1.3 Deep Learning.....	21
2.2 INDÚSTRIA 4.0 E A CONSTRUÇÃO CIVIL.....	22
2.2.1 Características da Indústria 4.0.....	22
2.2.2 Construção 4.0.....	23
2.3 APLICAÇÕES DA IA NA ENGENHARIA CIVIL.....	24
2.3.1 Otimização de Projetos.....	24
2.3.2 Gerenciamento de Projetos.....	25
2.3.3 Manutenção e Inspeção de Infraestruturas.....	26
2.4 IMPACTOS DA IA NA ENGENHARIA CIVIL.....	27
2.5 DESAFIOS ÉTICOS E LIMITAÇÕES DA IA NA ENGENHARIA CIVIL.....	28
2.6 PERSPECTIVAS FUTURAS DA IA NA ENGENHARIA CIVIL.....	29
3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	31
4 ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA.....	32
4.1 SELEÇÃO E FILTRAGEM DOS TRABALHOS ANALISADOS.....	32
4.2 EVOLUÇÃO TEMPORAL DAS PUBLICAÇÕES.....	33
4.3 ÁREAS TEMÁTICAS DAS PUBLICAÇÕES.....	34
4.4 AUTORES COM MAIOR PRODUÇÃO CIENTÍFICA.....	35

4.5 DISTRIBUIÇÃO GEOGRÁFICA DAS PUBLICAÇÕES.....	36
4.6 ANÁLISE DE PALAVRAS-CHAVE E CLUSTERS.....	37
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	40
REFERÊNCIAS.....	41

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTO E RELEVÂNCIA DO TEMA

A construção civil é uma atividade fundamental para o desenvolvimento da sociedade atual. No entanto, a relação entre a engenharia e a evolução da espécie humana é característica desde os primórdios da civilização, período de materialização de soluções simples consideradas complicadas na época e de gestão de tarefas vitais para a produção de ferramentas essenciais (Bazzo; Pereira, 2006).

Na era paleolítica, a engenharia desenvolveu-se através da criação de instrumentos para auxiliar a busca do alimento diário, bem como da utilização de cavernas para habitação e proteção contra sol e chuva. Posteriormente, na Idade do Bronze, foram realizadas outras conquistas, a exemplo do uso do metal e da criação de novos equipamentos como arpões, lanças, arcos e flechas, os quais são elementos essenciais para a caça de animais (Jenske; Tambara Júnior, 2021).

Com o surgimento da engenharia moderna, os conhecimentos científicos tornaram-se fundamentais para a resolução de problemas diários, período onde práticas de acerto e erro foram substituídas por teorias mais estruturadas e processos bem definidos (Bazzo; Pereira, 2006).

Esse avanço intensificou-se durante a Revolução Industrial, com sua primeira fase no século XVIII, onde a utilização do carvão como fonte de energia e o desenvolvimento da indústria do ferro, material de grande relevância para a construção civil, foram acontecimentos marcantes para essa era. No século XIX, a segunda fase da Industrialização caracterizou-se pela implantação da energia elétrica e pelo desenvolvimento do aço, que passou a substituir o ferro em diversas aplicações, como ferrovias, armamentos e construção naval (Alaloul et al., 2020; Dathein, 2003).

A partir de 1960, surge a terceira fase, caracterizada pelo desenvolvimento da computação e da internet (Schwab, 2016). Nesse ciclo, houve a inserção da computação e robótica nos processos estratégicos da construção civil, bem como iniciou a prática de industrialização de materiais e métodos construtivos (Ribeiro, 2019). Atualmente, a sociedade vivencia a quarta fase, ou indústria 4.0, marcada pela integração entre várias tecnologias nos aspectos físicos, digitais e biológicos, assim possibilitando informações amplas e rápidas (Schwab, 2016).

Nesse panorama, a engenharia civil necessita adaptar seus procedimentos a essa nova realidade tecnológica, tendo como principais objetivos maior agilidade, precisão e competitividade, sobretudo em obras de grande porte. Tal necessidade é evidenciada, ainda, pelo valor econômico desse setor no contexto nacional, prova disso é que o Produto Interno Bruto (PIB) de 2024 atingiu, aproximadamente, 360 bilhões de reais, sendo o terceiro setor com maior crescimento (CBIC, 2024).

De acordo com Barducco e Constância (2019), diversas tecnologias advindas da Indústria 4.0 podem ser implementadas na construção civil para melhorar as técnicas construtivas. Dentre elas, destaca-se a inteligência artificial (IA), que possibilita o processamento e a análise de grandes volumes de dados por meio de técnicas como o *Machine Learning*, focada em compreender novos textos, e o *Deep Learning*, que simula o aprendizado do ser humano.

Nesse cenário, o uso da Inteligência Artificial na engenharia civil traz efeitos significativos, como a automação de tarefas repetitivas, diminuição de falhas humanas e aumento da produtividade. No entanto, também surgem questões morais importantes, como a substituição do trabalho humano por robôs, a responsabilidade técnica em relação a decisões automatizadas e a proteção das informações armazenadas. Nesse sentido, é fundamental entender como a Inteligência Artificial está sendo implementada na construção civil, bem como analisar suas aplicações, impactos e questões éticas no presente e no futuro.

1.2 JUSTIFICATIVA

Entender os avanços das novas tecnologias na indústria 4.0 e o contexto delas na engenharia civil faz-se relevante diante da intensa difusão de informações e do avanço acelerado das ciências. As descobertas crescentes de tecnologias permitem aumentar eficiência de processos, diminuir retrabalhos, bem como ajudar em tarefas consideradas repetitivas, favorecendo a produtividade do setor.

Atualmente, a construção civil já introduz algumas dessas tecnologias em seu cotidiano, como o *Building Information Modeling* (BIM), que automatiza vários processos. Todavia, tais avanços podem ser ampliados com a implementação da Inteligência Artificial em seus sistemas, ampliando a capacidade de análise de dados e o suporte à tomada de decisões.

Além dos benefícios técnicos da IA, é pertinente expandir o conhecimento acerca dessa nova tecnologia, com a compreensão plena de seu funcionamento, seus impactos, bem como os aspectos éticos e suas limitações. Dessa forma, estudar a aplicação da IA na engenharia civil de maneira responsável e estratégica torna-se essencial para promover a otimização dos processos construtivos, a inovação tecnológica e a geração de valor para o setor.

1.3 DELIMITAÇÃO DO TEMA

O presente trabalho delimita-se ao estudo conceitual da Inteligência Artificial no contexto da engenharia civil, com ênfase em suas principais aplicações nos processos de planejamento, projetos, execução de obras, entre outros. A pesquisa será desenvolvida por meio de revisão bibliográfica, com base em livros, artigos científicos, normas técnicas e publicações sobre o tema.

Serão discutidos os benefícios da adoção da IA, incluindo o aprimoramento da eficiência na produção, a diminuição de retrabalhos, a melhoria nos processos de decisão e a automação de tarefas repetitivas. Também serão abordados os dilemas éticos que surgem com seu uso, como as questões ligadas à responsabilidade profissional, à proteção de dados, à confiabilidade das tecnologias e as possíveis consequências sociais da substituição de trabalhadores.

Destaca-se que esta pesquisa não visa a criação de algoritmos, programas ou sistemas de Inteligência Artificial, nem a investigação detalhada de elementos de programação ou robótica avançada, limitando-se à análise teórica da IA como um recurso de suporte à engenharia civil.

1.4 OBJETIVO GERAL

Analisar, através da literatura científica, a aplicação da Inteligência Artificial na engenharia civil, seus impactos nos processos construtivos, bem como os desafios éticos associados ao seu uso no contexto atual e nas perspectivas futuras do setor.

1.5 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

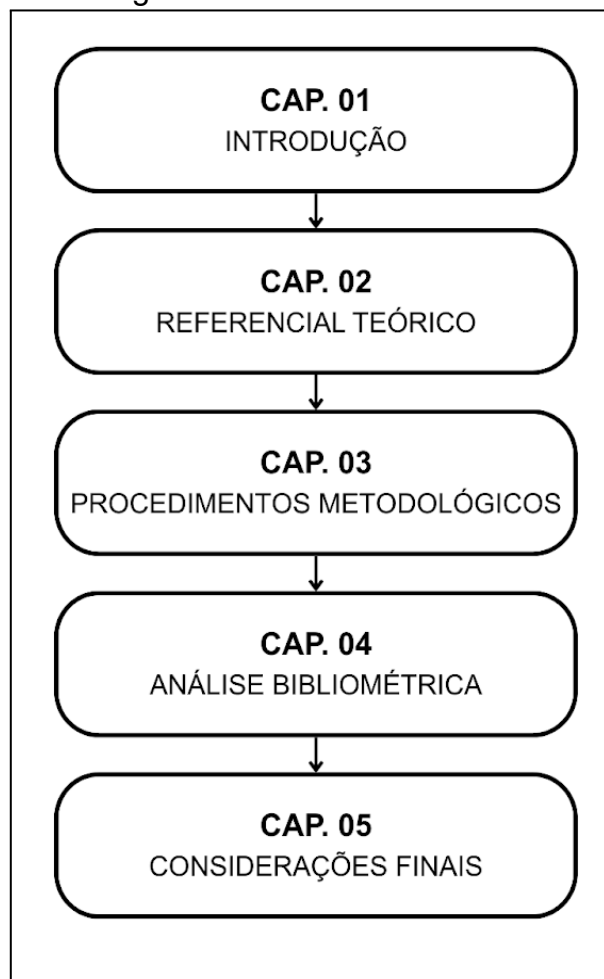
- Apresentar os conceitos fundamentais de Inteligência Artificial (IA);

- Identificar, a partir de trabalhos acadêmicos, as principais aplicações da IA na engenharia civil;
- Analisar os impactos da IA nos processos da construção civil, com base em estudos publicados.
- Investigar os benefícios da implementação da IA na engenharia civil;
- Discutir os desafios éticos relacionados ao uso da IA na engenharia civil;
- Avaliar as perspectivas futuras da IA no setor da construção civil, de acordo com produções científicas.

1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

Essa pesquisa se divide da seguinte maneira para a melhor compreensão do assunto abordado, assim como mostra na imagem 1.

Imagem 1 - Estrutura do trabalho



Fonte: Elaborado pelo autor.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 CONCEITOS FUNDAMENTAIS DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

2.1.1 Definição de Inteligência Artificial

Para compreender plenamente o conceito de inteligência artificial, é necessário, inicialmente, entender os termos individualmente. Legg e Hutter (2007) definem “inteligência” como a habilidade de interagir, aprender, adotar e recorrer a informações provenientes de experiências, bem como lidar com o incerto. Além disso, de acordo com o Cambridge Dictionary (2020), a noção de "artificial" refere-se à ideia de algo feito por humanos, que é uma cópia ou réplica de algo natural.

A partir desses dois conceitos, direciona-se para o entendimento completo do que é, de fato, a inteligência artificial. Nesse sentido, Mikalef e Gupta (2021), em sua tese, sumarizam conceitos de vários autores sobre a IA apresentados no quadro 01.

Tabela 1 - Conceitos sobre Inteligência Artificial (IA)

Autor(es)	Conceito
Knowles (2006)	A teoria e o desenvolvimento de sistemas computacionais capazes de executar tarefas que normalmente exigem inteligência humana, como percepção visual, reconhecimento de fala, tomada de decisões e tradução entre idiomas
McCarthy (2007)	A ciência e a engenharia de criar máquinas inteligentes, especialmente programas de computador inteligentes
Poole, Mackworth (2010)	Agentes computacionais que agem de forma inteligente e percebem seus ambientes para tomar ações que maximizem as chances de sucesso
Russel; Norvig (2010)	Sistemas que imitam funções cognitivas geralmente associadas a atributos humanos como aprendizagem, fala e resolução de problemas

Autor(es)	Conceito
Kaplan; Haenlein (2019)	A capacidade de um sistema de interpretar corretamente dados externos, de aprender com esses dados e de usar esse aprendizado para atingir metas e tarefas específicas por meio de adaptação flexível
Dwivedi et al. (2019)	A crescente capacidade das máquinas de desempenhar funções e tarefas específicas atualmente realizadas por humanos no ambiente de trabalho e na sociedade em geral

Fonte: Mikalef e Gupta (2021), adaptado pelo autor.

Nos meados dos anos 2000, os autores entendiam a IA como uma imitação da inteligência humana, com uma visão de que ela era uma tentativa de fazer as máquinas pensarem como humanos. Knowles (2006) enfatiza isso, ao colocar a inteligência para exercer atividades tipicamente humanas, como percepção visual e tomadas de decisões, enquanto McCarthy (2007) entende como um sistema que cria máquinas que solucionam problemas que o ser humano tinha dificuldades por meio de programas de software.

Em 2010, a IA é compreendida pelos autores como um sistema racional de maneira consolidada, agora, com um comportamento inteligente observável, sem a necessidade de pensar como um humano. Poole e Mackworth (2010) introduzem essa ideia de agente inteligente, que percebem o ambiente a qual estão inseridos e focam em maximizar o sucesso dos resultados. Nesse sentido, Russell e Norvig (2010) reforçam a ideia da IA atuar focada em desempenho e racionalidade.

Atualmente, a inteligência artificial é entendida como um sistema que aprende e adapta-se com os dados que lhe são fornecidos de maneira dinâmica. Kaplan e Haenlein (2019) destacam a capacidade dela de interpretar informações externas de maneira inteligente para atingir objetivos com o aprendizado adquirido, Dwivedi et. al. (2019) também exemplificam isso na prática, como um fenômeno social.

Acerca desse cenário, a inteligência artificial classifica-se em “fraca” e “forte”, divisão baseada na capacidade do sistema de realizar tarefas específicas e generalizadas (Dias; Santos; Diniz, 2023). A IA fraca executa atividades particulares sem autonomia além das funções designadas, enquanto a IA forte almeja replicação completa da inteligência humana para resolver qualquer problema (Lee, 2019).

2.1.2 Machine Learning

O aprendizado de máquina (*machine learning*) é uma tecnologia essencial nos dias modernos, sendo destaque como uma inovação significativa. ML permite que as máquinas melhorem seu desempenho de maneira contínua sem que haja instruções humanas claras. Atualmente, essa tecnologia evoluiu possibilitando a criação de sistemas que aprendem e realizam tarefas de forma independente (Brynjolfsson; McAfee, 2017).

O principal objetivo do ML é criar algoritmos que sejam capazes de aprender a partir de um banco de dados cheio de informações, e posteriormente classificar e premeditar futuras situações a partir da atualização dessa base com novos dados (Mueller *et al.*, 2016). Nesse sentido, Vakharia e Gujar (2019) complementam afirmando que as técnicas de ML estão relacionadas com o reconhecimento de padrões e análises estatísticas computacionais.

Os sistemas de ML podem ser classificados de acordo com a quantidade e o tipo de supervisão que recebem durante o treinamento. Existem quatro categorias principais: aprendizado supervisionado, aprendizado não supervisionado, aprendizado semissupervisionado e aprendizado por reforço.

Primeiramente, o aprendizado supervisionado é uma abordagem do ML em que um modelo é treinado a partir de dados rotulados, com uma relação entre entrada e saída conhecidas. Nesse método, o conjunto de dados é geralmente dividido em conjuntos de treinamento e teste, permitindo que o algoritmo aprenda padrões a partir dos exemplos fornecidos. Após o treinamento, o modelo aplica esses padrões aos dados de teste com o objetivo de realizar previsões ou classificações (Mahesh, 2020).

Nessa perspectiva, o aprendizado não supervisionado é uma abordagem do machine learning na qual não há dados rotulados, nem respostas pré-definidas. Os algoritmos identificam padrões e estruturas presentes nos dados, aprendendo características relevantes sem intervenção externa. Essa técnica é amplamente utilizada em tarefas de agrupamento de dados e redução de dimensionalidade (Mahesh, 2020).

Ademais, o aprendizado semissupervisionado combina características do aprendizado supervisionado e não supervisionado, com a utilização de conjuntos de

dados rotulados e não rotulados simultaneamente. Essa abordagem é útil em aplicações de ML e mineração de dados nas quais a rotulagem manual das informações é um processo complexo. Dessa forma, o modelo aprende a partir de uma quantidade limitada de dados rotulados e de volumes de dados não rotulados (Mahesh, 2020).

Por fim, o aprendizado por reforço é uma área do ML que concentra-se em como *softwares* devem tomar decisões em um certo ambiente com o objetivo de maximizar uma recompensa cumulativa. Nesse paradigma, o aprendizado ocorre por meio da interação entre o agente e o ambiente, com base nas consequências das ações executadas (Mahesh, 2020).

2.1.3 Deep Learning

A principal diferença entre o aprendizado de máquina e a aprendizagem profunda está na maneira como o *deep learning* lida com grandes volumes de dados, aprimorando continuamente suas previsões à medida que mais informações são incorporadas. Em contrapartida, esse desempenho superior demanda elevados recursos computacionais e infraestruturas de processamento avançadas (Brynjolfsson; McAfee, 2017).

Atualmente, avanços do *deep learning* possibilitam a implantação do aprendizado intermodal, um processamento simultâneo de diferentes tipos de dados. Isso é útil em aplicações como comércio eletrônico, onde produtos são representados por imagens, descrições e metadados. Após aprender essas representações, o sistema pode melhorar tarefas como recuperação de informações, recomendações e detecção de fraudes (Bastan *et al.*, 2020).

A palavra “*deep*” refere-se ao fato de serem construídas com o emprego de um maior número de camadas em relação às redes neurais tradicionais. Estas camadas adicionais são responsáveis por extrair ou representar a informação a partir de diferentes graus de abstração (Voinigescu, 2017).

Segundo Brownlee (2016), tal abordagem trouxe grandes avanços no campo da IA, com aplicações relevantes na sociedade como: colorização artificial de filmes em preto e branco, reconhecimento de linguagem natural, classificação de objetos em fotografias e geração automática de escrita manual.

2.2 INDÚSTRIA 4.0 E A CONSTRUÇÃO CIVIL

2.2.1 Características da Indústria 4.0

A Quarta Revolução Industrial, ou Indústria 4.0, caracteriza-se por sua velocidade e amplitude nas mudanças que provoca. Diferente das três primeiras fases, suas mudanças acontecem de maneira acelerada, com uma exigência de que indivíduos e organizações se reinventem rapidamente. Ademais, essa revolução impacta não apenas setores econômicos específicos, mas também transforma a forma como as pessoas se relacionam, modificando as dinâmicas sociais significativamente (Rickardo; Meiriele, 2023).

Esse modelo de indústria resume-se no desenvolvimento da manufatura através da digitalização, por meio do aumento do volume de dados, da capacidade computacional, da conectividade e da análise de dados por setores de inteligência, das novas formas de interação entre o homem e a máquina, bem como da melhoria na transferência de comandos digitais para o meio físico (Baur; Wee, 2015).

A Indústria 4.0 é caracterizada pelo uso conjunto de diversas tecnologias avançadas que permitem a criação de ambientes produtivos inteligentes. Exemplo disso são os Cyber Physical Systems (CPS), os quais integram o mundo virtual com o físico, através da computação, da internet, de redes e processos físicos. Eles são sistemas que possibilitam a troca de informações através de computadores embarcados e redes, gerando um controle dos processos físicos, comunicação automatizada e respostas instantâneas (Firjan, 2016).

Outra tecnologia a ser destacada é a Internet of Things (IoT), a qual por meio da internet, conecta máquinas e objetos com sensores inteligentes e softwares. Ela é uma rede de objetos físicos, sistemas, plataformas e aplicativos com tecnologia embarcada para comunicar, sentir e interagir com ambientes internos e externos, também possibilita que um grande volume de dados sejam gerados e processados com a interação entre o físico e o virtual, com ações de comando e controle de objetos (Firjan, 2016).

Para suprir a necessidade de coletar, transmitir, processar e analisar os dados gerados pela IoT, o Big Data foi criado. Ele consiste em softwares que gerenciam e analisam um grande volume de dados em alta velocidade. Outro conceito da IoT é a computação em nuvem, a qual se baseia em armazenar e processar dados na rede,

sem necessitar de um meio físico e com acesso em qualquer lugar do mundo em tempo real através da internet (Silva, 2018).

2.2.2 Construção 4.0

A construção civil, considerada como um setor complexo, é caracterizada por altos investimentos de capital, longos ciclos de produção, altos riscos e incertezas. Nikmehr *et al.* (2021) apontam que a digitalização no local de trabalho e das atividades focadas na construção civil pode melhorar desempenhos em resultados de negócios.

Oesterreich e Teuteberg (2016), em seu artigo, caracterizam as principais tecnologias dispostas no contexto da construção 4.0, como mostra a tabela 2.

Tabela 2 - Tecnologias utilizadas na construção 4.0

Grupo	Tecnologias
Fábrica Inteligente (Smart Factory)	Sistemas Ciberfísicos / Sistemas Embarcados
	Internet das Coisas (IoT) / Internet de Serviços
	Automação
	Modularização / Pré-fabricação
	Manufatura Aditiva (Impressão 3D)
	Gestão do Ciclo de Vida do Produto
	Robótica
	Interação Humano-Computador
Simulação e Modelagem	Ferramentas de Simulação / Modelos de Simulação
	Modelagem da Informação da Construção (BIM)
	Realidade Aumentada (RA) / Realidade Virtual (RV)
Digitalização e Virtualização	Computação em Nuvem
	Big Data
	Computação Móvel
	Mídias Sociais
	Digitalização

Fonte: Oesterreich e Teuteberg (2016), adaptado pelo autor.

Dentre os conceitos acima, o BIM ganha maior protagonismo na Construção 4.0. Isso ocorre porque o BIM proporciona a interação de políticas, processos e tecnologias, sendo uma metodologia que facilita o gerenciamento de projetos ao longo do ciclo de vida da edificação (Succar, 2009).

O BIM é um processo inteligente e em constante evolução, por isso apresenta diferentes fases de maturidade que são denominadas dimensões “nD”. Atualmente, de acordo com Smith (2014), existem sete dimensões: 2D (projeto), 3D (modelo do objeto), 4D (tempo), 5D (custo), 6D (operação), 7D (sustentabilidade) e 8D (segurança).

2.3 APLICAÇÕES DA IA NA ENGENHARIA CIVIL

As aplicações práticas da inteligência artificial (IA) na engenharia civil representam uma revolução significativa, transformando fundamentalmente a maneira como projetamos, construímos e gerenciamos infraestruturas (Dias; Santos; Diniz, 2023). Com isso, a integração da IA na engenharia civil não apenas otimiza processos, mas redefine o setor, promovendo avanços significativos em eficiência, sustentabilidade e segurança (Huang et al., 2019).

2.3.1 Otimização de Projetos

A integração da IA na engenharia civil marca uma revolução significativa na forma como projetos e designs são concebidos, com otimização de processos, aumento da eficiência e avanços impressionantes na construção civil. A aplicação prática da IA nesse campo específico redefine os padrões tradicionais, com soluções inovadoras e sustentáveis (Dias; Santos; Diniz, 2023).

A inteligência artificial tem papel fundamental na otimização de projetos estruturais, com a garantia de maior eficiência e segurança. Por meio de algoritmos de ML, são analisadas variáveis como materiais e requisitos do projeto. Com esses dados, a IA propõe ajustes nos desenhos estruturais, os quais aumentam a resistência das estruturas e reduzem o desperdício de materiais. Assim, garante-se um melhor desempenho sem comprometer a segurança (Dias; Santos; Diniz, 2023).

Nesse sentido, a IA, também, possibilita o uso de técnicas de design generativo, onde algoritmos são alimentados com parâmetros de projeto e

restrições, com a automação de opções de design. Essa abordagem permite que engenheiros explorem soluções mais eficientes e inovadoras. Diante disso, a IA acelera o processo criativo, com resultados na arquitetura e na estrutura, que seriam difíceis de alcançar apenas com métodos convencionais (Dias; Santos; Diniz, 2023).

Na era sustentável, a inteligência artificial é um aliado na busca por projetos que promovam eficiência energética. Para isso, algoritmos analisam padrões de consumo, condições climáticas e características arquitetônicas para otimizar o uso de recursos, resultando em edifícios eficientes (Dias; Santos; Diniz, 2023).

Maciel *et al.* (2019) analisam o uso da inteligência artificial na otimização de projetos arquitetônicos. O estudo demonstra que a IA permite uma avaliação completa de fatores como eficiência energética, conforto térmico e iluminação natural, aplicados em um estudo de caso de uma escola infantil. Os resultados indicam melhoria no desempenho do edifício, auxiliando arquitetos na tomada de decisões durante o projeto.

2.3.2 Gerenciamento de Projetos

A incorporação da inteligência artificial no gerenciamento de projetos da engenharia civil configura um avanço significativo em termos de eficiência, precisão e qualidade na execução dos empreendimentos. Por meio da otimização de processos e da geração de análises estratégicas, a IA contribui de forma decisiva para a melhoria da tomada de decisões. Dessa maneira, essa tecnologia vem transformando o gerenciamento de projetos na construção civil, promovendo um futuro mais inovador e eficaz no setor (Lhama, 2021).

Nesse contexto, a IA destaca-se pela capacidade de analisar grandes volumes de dados, aspecto essencial no gerenciamento de projetos complexos. Por meio de algoritmos de ML, é possível processar informações variadas, como dados geotécnicos e históricos de empreendimentos semelhantes. Essa análise contribui para decisões mais embasadas, bem como possibilita a identificação de padrões, riscos e oportunidades de otimização (Dias; Santos; Diniz, 2023).

Além disso, outro ponto crucial para o sucesso de um projeto de engenharia é a alocação eficiente de recursos. A IA pode ser automatizada, considerando diversos fatores, como a disponibilidade de mão de obra, equipamentos e prazos, bem como podem adaptar rapidamente a programação em tempo real, lidando com

imprevistos de forma ágil e eficaz (Dias; Santos; Diniz, 2023).

Acerca desse cenário, Liu *et al.* (2018) discutem a tendência atual no planejamento e programação de projetos de construção utilizando inteligência artificial. O artigo destaca que a digitalização da indústria de arquitetura, engenharia e construção (AEC) leva ao desenvolvimento de tecnologias de IA que ajudam os profissionais a realizar um trabalho mais eficiente.

Por fim, outro desafio na engenharia civil que pode ser sanado com o uso da IA é a previsão de custos e orçamento. A inteligência artificial, por meio de análises prediais, pode estimar custos futuros baseado em histórico financeiro, variações no mercado e prováveis imprevistos. Isso proporciona uma gestão financeira mais precisa, com redução de riscos de estouro orçamentário e com uma visão clara da viabilidade econômica do projeto (Dias; Santos; Diniz, 2023).

2.3.3 Manutenção e Inspeção de Infraestruturas

A integração da inteligência artificial na engenharia civil transforma radicalmente a forma como as edificações são mantidas e inspecionadas. Essa revolução tecnológica traz consigo uma abordagem inovadora e eficiente, com benefícios substanciais em termos de custos, tempo e segurança (Dias; Santos; Diniz, 2023).

Nesse sentido, a IA tem a capacidade de realizar inspeções visuais autônomas em infraestruturas, visto que é equipada com algoritmos avançados de visão computacional. Drones e câmeras instaladas em locais estratégicos podem capturar imagens em alta resolução, que são analisadas em tempo real por algoritmos de aprendizado de máquina. Essa abordagem proporciona uma visão abrangente do estado da infraestrutura e, assim, identifica potenciais problemas estruturais, desgastes e anomalias (Dias; Santos; Diniz, 2023).

Outra tecnologia relevante são os sensores inteligentes, alimentados por IA, os quais são fundamentais para o monitoramento contínuo das condições de estruturas como pontes e viadutos. Esses sensores captam dados em tempo real, como vibrações, temperatura e deslocamento, permitindo uma análise em tempo real das condições estruturais. Com isso, é possível antecipar problemas, realizar intervenções preventivas e prolongar a vida útil das infraestruturas (Dias; Santos; Diniz, 2023).

O diagnóstico predial, também, é uma área que aumenta as demandas com o passar dos anos, e algoritmos de IA podem ser grandes aliados para tanto, identificando padrões que indicam possíveis falhas futuras em estruturas. Nesse panorama, Vladimir *et al.* (2021) apresentam uma pesquisa que propõe um modelo de avaliação de imóveis baseado em inspeção de engenharia civil e lógica fuzzy. O modelo é capaz de lidar com a incerteza inerente à avaliação de imóveis e pode ser aplicado em diferentes tipos de imóveis.

2.4 IMPACTOS DA IA NA ENGENHARIA CIVIL

A incorporação da Inteligência Artificial (IA) na engenharia civil promove transformações significativas nos aspectos técnicos, econômicos e sociais do setor. Ao possibilitar o processamento de grandes volumes de dados, a automação de tarefas complexas e o apoio à tomada de decisão, a IA contribui para a modernização dos processos construtivos e para o aumento da eficiência ao longo do ciclo de vida das edificações (Zhang *et al.*, 2021).

No âmbito técnico, a aplicação da IA tem avanços relevantes em termos de qualidade, precisão e confiabilidade dos processos de engenharia. Algoritmos de aprendizado de máquina e de aprendizagem profunda permitem a análise de dados complexos, resultando em modelos mais precisos para previsão de desempenho estrutural, comportamento de materiais e identificação de falhas (Zhang *et al.*, 2021).

De acordo com Oesterreich e Teuteberg (2016), a digitalização e a automação associadas à Indústria 4.0 aumentam a eficiência operacional das empresas da construção civil, tornando-as mais competitivas. Nesse contexto, a adoção de soluções baseadas em IA configura-se como um diferencial estratégico, contribuindo para maior controle de prazos, custos e desempenho produtivo.

A introdução da Inteligência Artificial na engenharia civil também provoca mudanças significativas no perfil profissional do engenheiro e nas relações de trabalho. Segundo Schwab (2016), as tecnologias da Quarta Revolução Industrial exigem novas competências, especialmente relacionadas à análise de dados, ao uso de sistemas inteligentes e à integração entre tecnologia digital e conhecimento técnico tradicional.

2.5 DESAFIOS ÉTICOS E LIMITAÇÕES DA IA NA ENGENHARIA CIVIL

A crescente adoção da inteligência artificial (IA) na engenharia civil oferece inúmeros benefícios, porém também impõe desafios e reflexões éticas relevantes. Embora a IA promova avanços nos processos, na otimização de projetos e no aumento da eficiência, torna-se indispensável garantir sua aplicação de forma responsável e sustentável (Sichman, 2021).

Nesse contexto, é fundamental considerar aspectos éticos que envolvem seu uso. Entre os principais desafios destacam-se o viés algorítmico, a responsabilidade na tomada de decisões, a privacidade e a segurança dos dados, bem como os impactos socioeconômicos decorrentes de sua aplicação (Sichman, 2021).

A eficácia dos algoritmos de inteligência artificial depende diretamente da qualidade e da imparcialidade dos dados utilizados em seu treinamento. Quando esses conjuntos de dados apresentam vieses, os modelos podem reproduzir e até intensificar tais distorções (Vicari, 2021). Na engenharia civil, essa questão torna-se especialmente crítica, tendo em vista a representatividade dos dados é essencial para assegurar a segurança e a confiabilidade dos projetos.

Com o aumento da autonomia da inteligência artificial no gerenciamento de projetos e nos processos decisórios, emergem questionamentos sobre a atribuição de responsabilidade em casos de falhas. Definir critérios claros de responsabilização e assegurar uma supervisão humana efetiva configuram desafios éticos relevantes. Nesse contexto, é essencial que os engenheiros mantenham o controle e compreendam as decisões geradas pelos algoritmos. Essa postura é fundamental para garantir a segurança e o atendimento aos princípios éticos estabelecidos (Peixoto, 2020).

A coleta ampla de dados é essencial para o desempenho eficiente dos sistemas de inteligência artificial. Contudo, a privacidade e a segurança dessas informações configuram preocupações éticas relevantes. Torna-se necessário assegurar a proteção dos dados de clientes e demais partes interessadas. Além disso, evitar o uso indevido dessas informações representa um desafio contínuo na aplicação de soluções de IA na engenharia civil (Ribeiro, 2023).

A automação promovida pela inteligência artificial pode gerar impactos socioeconômicos relevantes, incluindo a possível substituição de postos de trabalho tradicionais. Nesse contexto, as questões éticas envolvem o equilíbrio entre os

ganhos de eficiência proporcionados pela IA e a preservação do emprego, bem como a promoção da inclusão social. Enfrentar esses desafios é fundamental para assegurar que os benefícios da IA sejam amplamente distribuídos na sociedade (Hortmann, 2020).

Por fim, a falta de transparência dos algoritmos de inteligência artificial configura um importante desafio ético. A compreensão dos critérios utilizados pelos modelos na tomada de decisões é fundamental para garantir a confiança e a aceitação por parte dos profissionais e da sociedade. Nesse sentido, tornar os sistemas de IA mais transparentes e interpretáveis é uma exigência ética relevante. Essa prática contribui para o uso responsável da tecnologia (Lopes, 2021).

2.6 PERSPECTIVAS FUTURAS DA IA NA ENGENHARIA CIVIL

O futuro da Engenharia Civil está sendo transformado pela incorporação da Inteligência Artificial (IA), que introduz soluções inovadoras para enfrentar desafios cada vez mais complexos. Apesar desses avanços, questões éticas exigem uma adoção responsável, com transparência e atenção aos impactos sociais. Nesse cenário, a cooperação entre engenheiros e sistemas de IA torna-se essencial para redefinir limites e promover construções mais seguras e inteligentes (Pan; Zhang, 2021).

À medida que o futuro da engenharia civil avança, é difícil ignorar o papel que a IA desempenha nesse cenário. Com avanços tecnológicos, diversas tendências emergentes e inovações promissoras que moldam o panorama da engenharia civil para um futuro marcado pela eficiência, sustentabilidade e segurança (Xu, 2022).

A inteligência artificial tende a transformar significativamente os processos de manutenção em estruturas. Por meio de sistemas de monitoramento aliados a algoritmos de ML, torna-se possível identificar antecipadamente anomalias e possíveis falhas. Essa abordagem preditiva permite intervir antes que os problemas se manifestem. Como resultado, há redução expressiva de custos e aumento da durabilidade das estruturas (Baduge *et al.*, 2022).

Ademais, a automação na construção civil intensifica-se com o avanço da IA. Equipamentos robóticos e sistemas autônomos são capazes de executar atividades construtivas complexas com elevado nível de precisão e eficiência. Tecnologias como a impressão 3D de estruturas e a operação autônoma de máquinas pesadas

estão modificando a dinâmica dos canteiros de obras. Esses avanços contribuem para o aumento da produtividade e para a redução dos riscos ocupacionais aos trabalhadores (Mohammadpour *et al.*, 2019).

A inteligência artificial tende a fortalecer a análise de riscos em projetos de engenharia civil. Por meio de algoritmos avançados, será possível prever potenciais desafios, estimar a probabilidade de ocorrências adversas e gerar informações estratégicas para a mitigação de riscos. Essa capacidade contribui para o desenvolvimento de projetos mais resilientes. Além disso, favorece a elaboração de estratégias de contingência mais eficientes e amplia a confiabilidade quanto à segurança das infraestruturas (Howard, 2019).

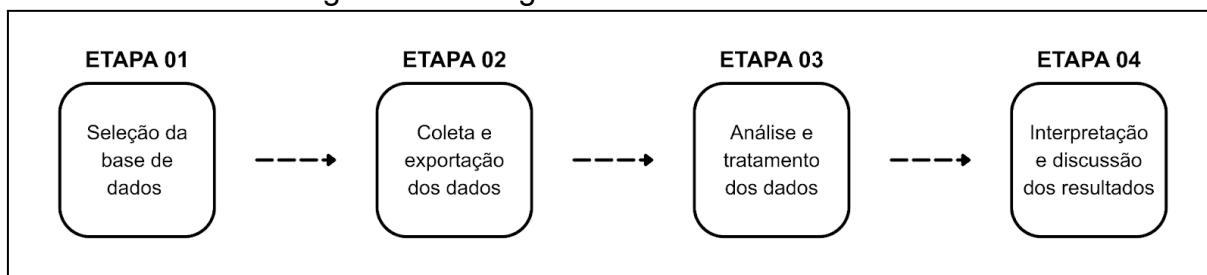
Entretanto, a atuação humana continuará sendo essencial na definição de diretrizes éticas e no acompanhamento das decisões geradas por algoritmos. Embora a IA seja capaz de analisar dados e produzir informações relevantes, a avaliação ética desses resultados e a consideração do contexto permanecem sob responsabilidade dos profissionais. Decisões mais sensíveis, sobretudo em cenários incertos, demandam julgamento humano, com isso a experiência e a sensibilidade ética dos especialistas são indispensáveis (Liang *et al.*, 2023).

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O presente trabalho caracteriza-se como exploratória e descritiva, com abordagem quantitativa e qualitativa, tendo como principal método a análise bibliométrica da produção científica relacionada à aplicação da Inteligência Artificial na engenharia civil. A bibliometria possibilita a observação do estado da ciência e tecnologia por meio de toda a produção científica registrada em um repositório de dados, bem como pode auxiliar na identificação de tendências de crescimento do conhecimento em determinada disciplina (Soares *et. al.*, 2016).

As etapas da análise bibliométrica são as seguintes dispostas na imagem 2.

Imagem 2 - Fluxograma dos métodos utilizados



Fonte: Elaborado pelo autor.

A base de dados selecionada para a coleta dos artigos foi a Scopus, por se tratar de uma das maiores e mais relevantes bases científicas multidisciplinares, amplamente reconhecida pela qualidade, abrangência e confiabilidade de seus registros, especialmente nas áreas de engenharia e tecnologia.

A busca foi realizada utilizando palavras-chave em língua inglesa, tendo em vista a predominância desse idioma na literatura científica internacional. Para tanto, foram utilizados operadores booleanos para refinar os resultados, conforme as seguintes expressões de busca: “*artificial intelligence*” and “*civil engineering*”.

Após a aplicação dos filtros, os registros obtidos foram exportados das bases de pesquisa nos formatos CSV e RIS, contendo informações como título, autores, ano de publicação, palavras-chave, número de citações e países.

Os dados exportados foram analisados por meio do software *VOSviewer*, ferramenta amplamente utilizada em estudos bibliométricos, responsável pela geração de mapas de redes. Paralelamente, o software *Microsoft Excel* foi utilizado para organização dos dados e elaboração de gráficos estatísticos complementares.

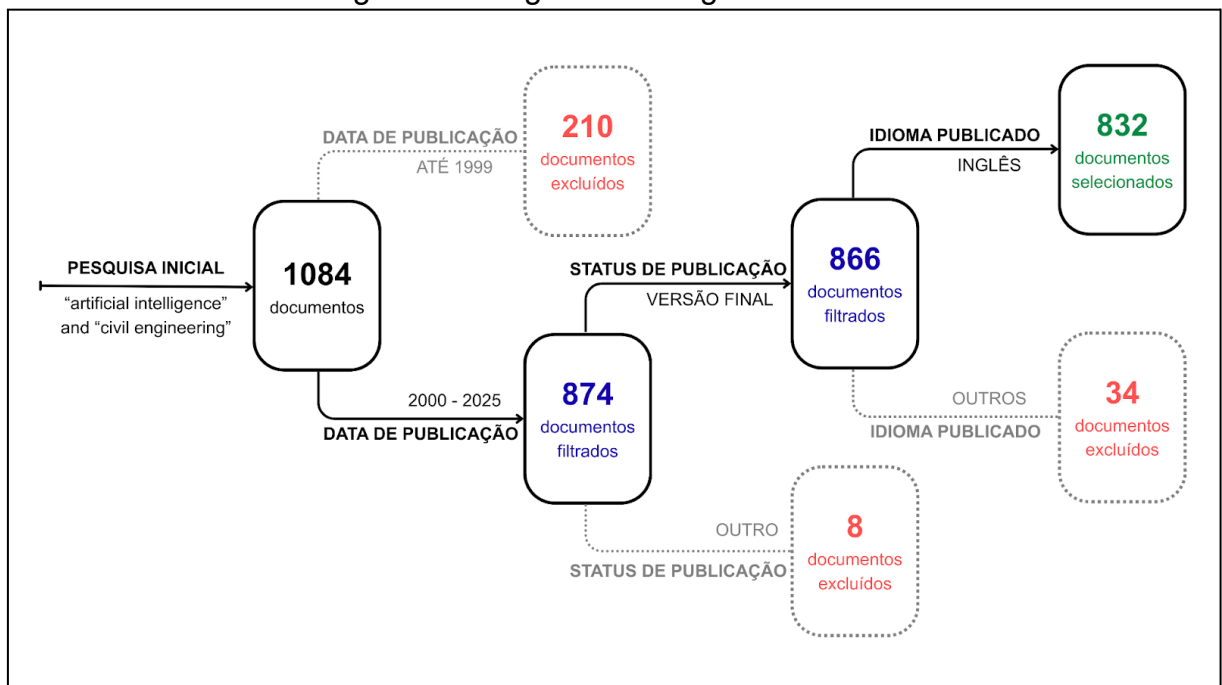
4 ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA

Esse capítulo apresenta os resultados obtidos a partir da análise bibliométrica do trabalho sobre inteligência artificial (IA) no âmbito da engenharia civil. O principal objetivo dessa pesquisa é identificar a evolução temporal das publicações, os principais autores com publicações sobre essa temática, bem como as principais palavras chaves desses trabalhos.

4.1 SELEÇÃO E FILTRAGEM DOS TRABALHOS ANALISADOS

Inicialmente, foi realizada uma busca na base de dados Scopus utilizando os descritores “artificial intelligence” e “civil engineering”, que resultaram em um total de 1.084 documentos, como evidencia a imagem 3. Essa etapa teve como finalidade garantir uma ampla cobertura da produção científica relacionada ao tema.

Imagem 3 - Triagem dos artigos analisados



Fonte: Elaborado pelo autor.

Em seguida, aplicou-se o primeiro critério de filtragem referente à data de publicação, sendo escolhidos artigos entre os anos de 2000 e 2025, tendo em vista a intensificação do uso de tecnologias digitais, principalmente a IA, a partir do início do século XXI. Com isso, os documentos publicados até 1999 foram excluídos.

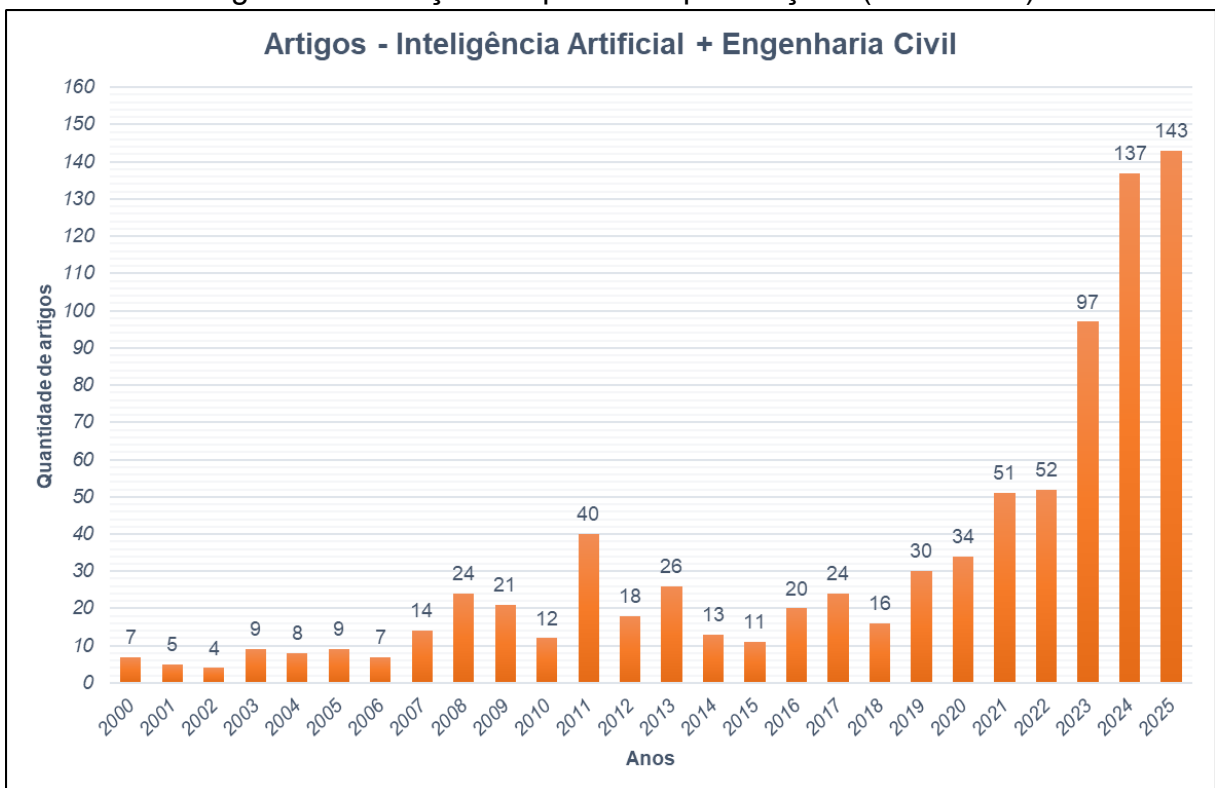
Na sequência, realizou-se a filtragem quanto ao status de publicação, sendo considerados apenas documentos em versão final, de modo a assegurar a análise de estudos consolidados e revisados. Desse modo, mais oito documentos foram excluídos da análise final.

Posteriormente, foi aplicado o critério referente ao idioma de publicação, onde os trabalhos escolhidos são de língua inglesa, para garantir maior padronização e abrangência dos estudos analisados. Diante disso, após todas as filtragens, 832 documentos foram os selecionados para realizar a análise bibliométrica.

4.2 EVOLUÇÃO TEMPORAL DAS PUBLICAÇÕES

A busca realizada na base Scopus resultou em um conjunto significativo de artigos científicos publicados entre os anos 2000 e 2025, com o objetivo de evidenciar como a perspectiva da IA na engenharia civil mudou ao decorrer do século. Nessa perspectiva, a imagem 4 demonstra a evolução dos artigos científicos sobre “inteligência artificial” e “engenharia civil” ao decorrer dos anos.

Imagem 4 - Evolução temporal das publicações (2000-2025)



Fonte: Scopus, adaptado pelo autor.

Observa-se que nos primeiros anos do período analisado, de 2000 a 2006, o número de publicações é reduzido, indicando que o tema ainda encontrava-se em estágio inicial de investigação científica. A partir de 2007, constata-se um gradual crescimento no volume de artigos publicados, refletindo o aumento do interesse acadêmico pela aplicação da IA para resolução de problemas na construção civil.

Esse crescimento torna-se mais expressivo a partir de 2011, onde houve um pico expressivo na quantidade de trabalhos, cujo foco foram atividades em que a IA apoia e suporta processos construtivos da engenharia civil, sejam eles novos, que ainda necessitam ser estruturados para sua implantação, sejam eles antigos, que já possuem métodos muito claros, porém ser melhorados com automação das etapas.

Entretanto, entre 2012 e 2018, o volume de publicações apresenta oscilações evidentes, com períodos de crescimento moderado intercalados por quedas pontuais, isso sugere uma fase de maturação do tema, na qual as pesquisas passam a se concentrar em aplicações mais específicas e validações práticas.

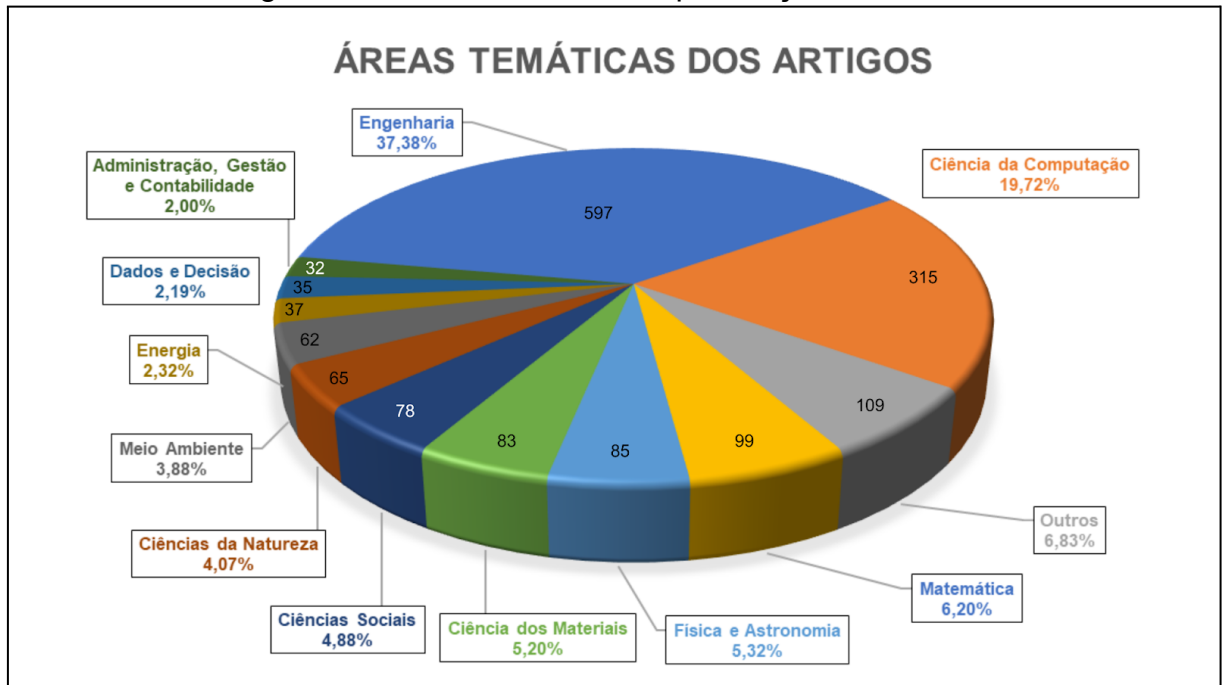
A partir de 2019, observa-se um crescimento contínuo nas publicações, com valores superiores aos períodos anteriores. Esse aumento intensifica-se a partir de 2023, ano em que supera noventa artigos publicados, o qual indica a consolidação da IA como ferramenta estratégica na engenharia civil.

4.3 ÁREAS TEMÁTICAS DAS PUBLICAÇÕES

A distribuição das áreas temáticas dos artigos selecionados evidencia o caráter multidisciplinar da aplicação da inteligência artificial na engenharia civil. Conforme apresentado na figura 5, observa-se que a maior concentração de estudos refere-se a Engenharia, sendo 37,38% do total. Esse notável percentual indica que a IA vem sendo amplamente explorada como ferramenta de apoio ao planejamento, projeto, execução, controle e manutenção de obras.

A segunda área com maior representatividade é a Ciência da Computação com 19,72% das publicações. Tal participação expressiva reforça a natureza tecnológica das soluções baseadas em IA, uma vez que grande parte dos estudos se concentra no desenvolvimento de algoritmos, modelos computacionais, técnicas de *machine learning* e *deep learning* aplicáveis aos desafios da construção civil.

Imagem 5 - Áreas temáticas das publicações analisadas



Fonte: Scopus, adaptado pelo autor.

Na sequência, as áreas das Ciências Exatas (Física e Matemática) e Ciência dos Materiais também tiveram uma participação relevante na amostra analisada, esses trabalhos contemplam temas como modelagens estatísticas, otimização de processos, validação de modelos de IA, análise estrutural e desempenho de sistemas construtivos.

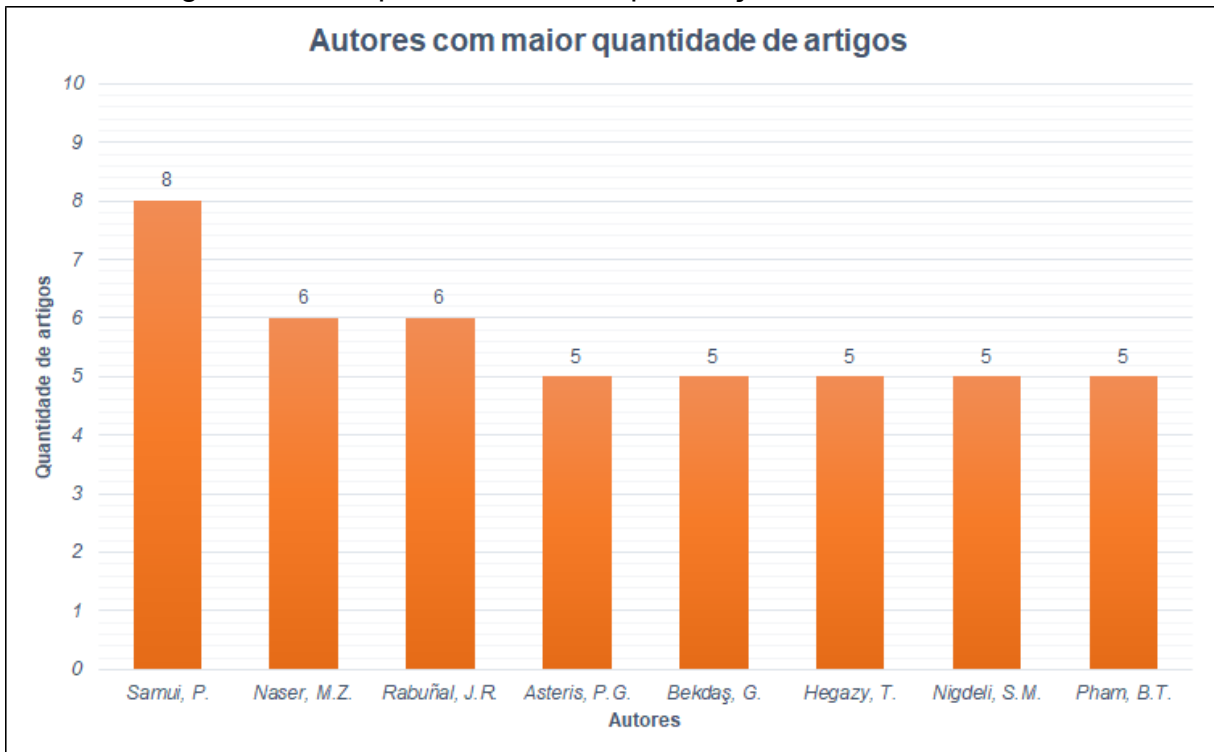
Por fim, temas sociais, ambientais e analíticos tiveram menor participação em relação ao todo, porém revelam tendências de uso da IA para evolução da construção civil com práticas inteligentes e sustentáveis. Essa diversidade temática reforça o potencial da IA em promover ganhos de eficiência, inovação e sustentabilidade no setor.

4.4 AUTORES COM MAIOR PRODUÇÃO CIENTÍFICA

A identificação dos autores com maior número de publicações permite compreender como a produção científica sobre a aplicação da inteligência artificial na engenharia civil está distribuída entre os pesquisadores, isso é sumarizado, a seguir, na figura 6. O autor com maior número de trabalhos publicados é Samui P., com oito artigos no total. Sua principal linha de pesquisa é utilização de técnicas de machine learning para resolução de problemas na engenharia civil, principalmente

em estudos de predição da resistência à compressão do concreto.

Imagem 6 - Principais autores com publicações entre as analisadas



Fonte: Scopus, adaptado pelo autor.

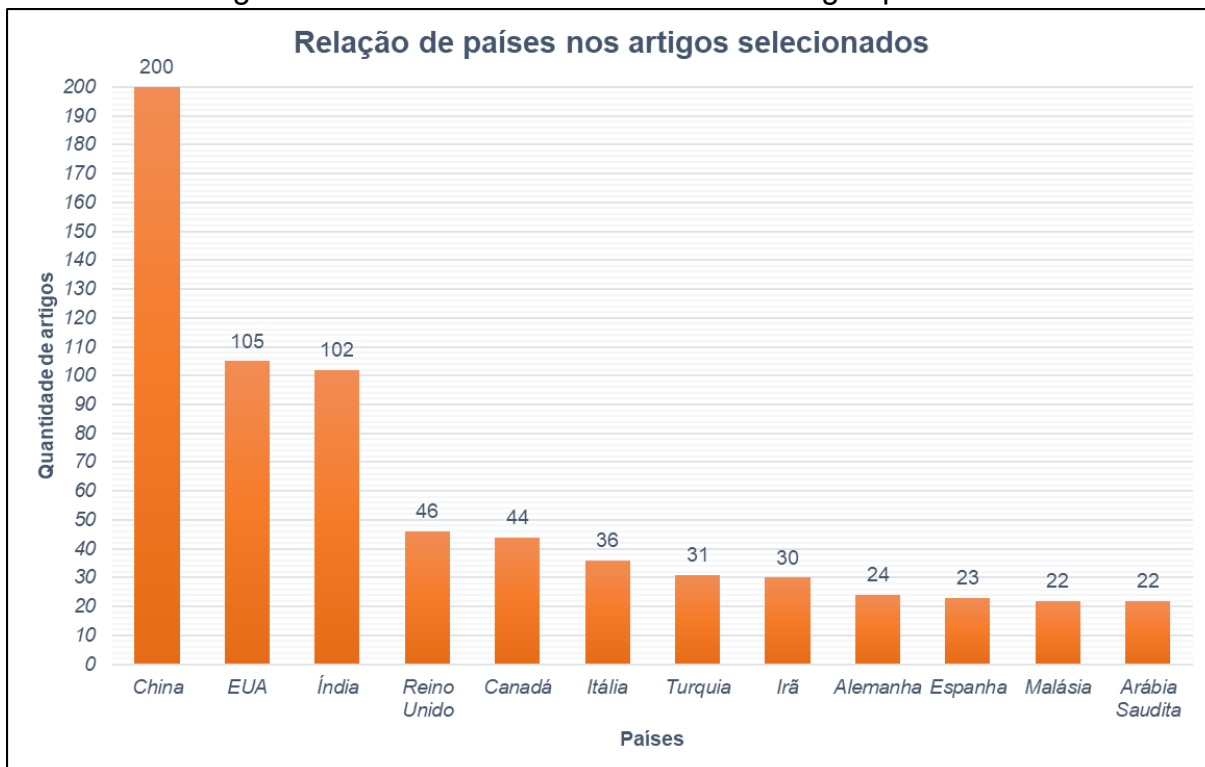
Na sequência, os autores Naser, M.Z. e Rabuñal, J.R. apresentam 6 publicações cada, indicando participação relevante e recorrente na produção científica do tema. Esses pesquisadores contribuem para a consolidação do campo em áreas diferentes, enquanto Naser foca em análises conceituais sobre a aplicação da IA na engenharia civil, Rabuñal escreve trabalhos focados na área de ciência da computação, especificamente em redes neurais artificiais.

Outros autores, como Asteris, Bekdaş, Hegazy, Nigdeli e Pham, aparecem com cinco publicações cada, isso demonstra uma distribuição equilibrada da produção científica entre diferentes pesquisadores sobre IA na engenharia civil.

4.5 DISTRIBUIÇÃO GEOGRÁFICA DAS PUBLICAÇÕES

A análise da distribuição geográfica dos artigos selecionados permite identificar os países que mais contribuem para a produção científica analisada. Conforme apresentado na figura 7, observa-se uma concentração de publicações em países com elevado investimento em pesquisa e desenvolvimento tecnológico.

Imagem 7 - Países com maior número de artigos publicados



Fonte: Scopus, adaptado pelo autor.

A China destaca-se como o país com o maior número de artigos publicados, totalizando 200 estudos, visto que é um país focado em novas tecnologias, como automação, inteligência artificial e construção inteligente. Em seguida, aparecem os Estados Unidos, com 105 publicações, e a Índia, com 102 artigos. A expressiva participação dos EUA reflete sua tradição em pesquisa científica e aplicação de soluções digitais. Já a Índia apresenta crescimento relevante, associado à expansão do setor da construção e à adoção de tecnologias de baixo custo.

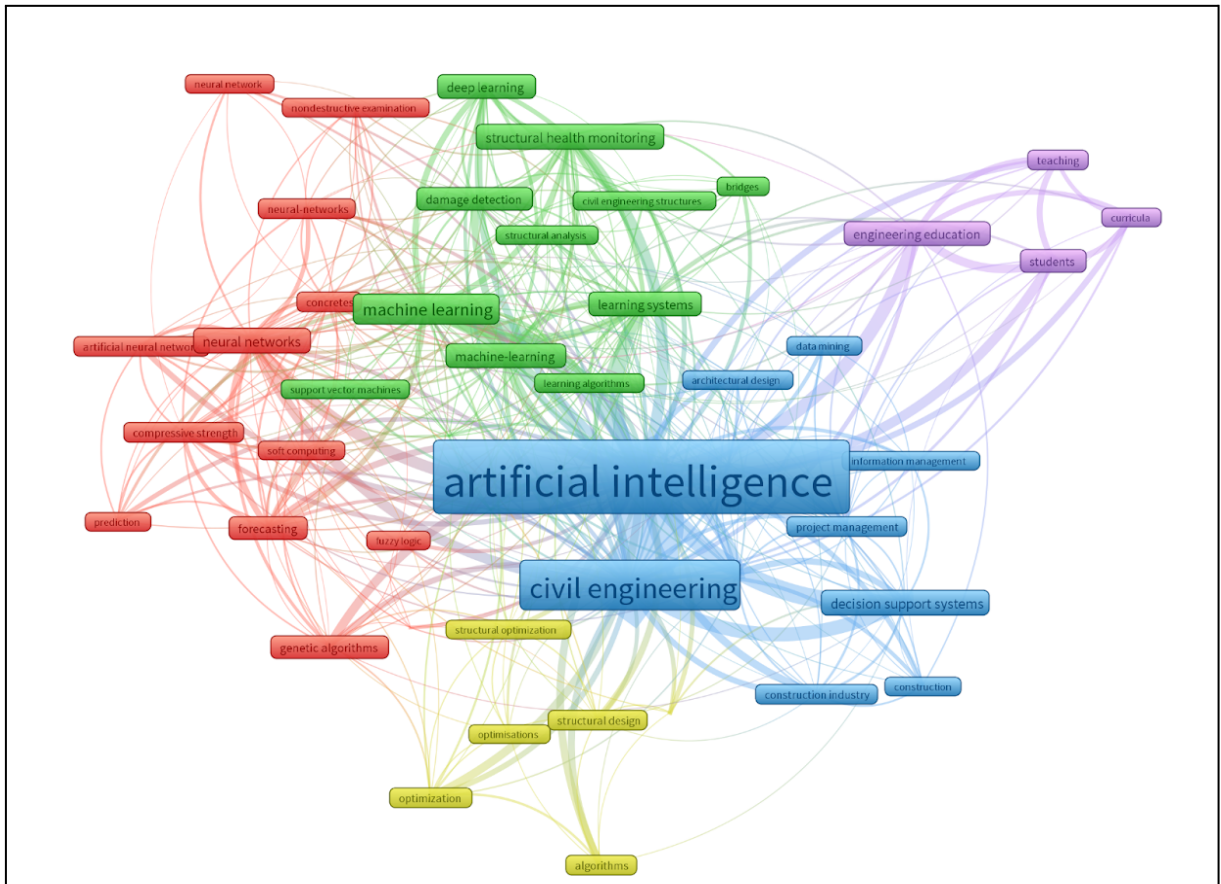
Além disso, houveram cerca de 85 outros países com artigos publicados sobre inteligência artificial aplicada na engenharia civil. Isso demonstra que essa temática está distribuída globalmente, envolvendo tanto economias desenvolvidas quanto países em desenvolvimento.

4.6 ANÁLISE DE PALAVRAS-CHAVE E CLUSTERS

A análise de palavras-chave, realizada por meio do software VOSviewer, teve como objetivo identificar os principais eixos temáticos e as relações conceituais

presentes na literatura científica sobre a aplicação da IA na engenharia civil. A partir do mapeamento de simultaneidade das palavras-chave em pelo menos 20 artigos dos analisados, foram identificados cinco grupos temáticos (*clusters*), os quais representam diferentes áreas de concentração das pesquisas analisadas, assim como é evidenciado na imagem 8.

Imagem 8 - Rede de coocorrência de palavras chave no software VOSviewer



Fonte: Elaborado pelo autor.

O *cluster* 1, representado na cor vermelha, concentra-se principalmente na aplicação de técnicas de soft computing. Esse agrupamento evidencia o uso da IA para predição de propriedades mecânicas, análise de desempenho de materiais e estimativas de custos, além de aplicações em ensaios não destrutivos.

Nesse sentido, o *cluster* 2 (verde) apresenta termos fortemente ligados ao aprendizado de máquina e aprendizado profundo, conceitos associados principalmente em aplicações de monitoramento em análises estruturais, detecção precoce de danos e análise de desempenho de estruturas ao longo do tempo.

Em outra perspectiva, o *cluster* 3, destacado em azul, agrupa os dois termos

de enfoque amostral (IA e engenharia civil), bem como compõe outros termos generalistas, como construção, gestão de projetos, projetos arquitetônicos, bem como sistemas de suporte à decisão. Esse grupo evidencia a aplicação da IA em níveis gerenciais e estratégicos, indo além do escopo técnico-operacional.

Ademais, o *cluster* 4 (amarelo), relativamente menor que os outros, com apenas seis palavras-chaves, apresenta algoritmos, sistemas especialistas e técnicas de otimização associados a projetos estruturais. Esse agrupamento representa o uso da IA como ferramenta de apoio ao desenvolvimento de projetos, como foco na busca por soluções mais eficientes, econômicas e seguras.

Por fim, o *cluster* 5, representado pela cor roxa, relaciona-se ao uso da IA no contexto da educação em engenharia, destacado por apenas quatro palavras-chave como *engineering education*, *students*, *teaching* e *curricula*. Embora apresente menor número de termos em comparação aos outros, esse agrupamento indica uma tendência atual voltada à inserção da IA na educação e na formação de futuros engenheiros civis capacitados.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve como objetivo analisar, por meio de uma revisão bibliométrica da literatura científica, a aplicação da Inteligência Artificial (IA) na engenharia civil, bem como seus impactos, desafios éticos e perspectivas futuras. A partir da análise de 832 documentos indexados na base Scopus, foi possível compreender a evolução, a distribuição temática e geográfica, além das principais linhas de pesquisa relacionadas ao tema.

Os resultados evidenciam um crescimento expressivo das publicações a partir da última década, especialmente após 2019, o que demonstra a consolidação da IA como uma ferramenta estratégica na engenharia civil. Esse avanço reflete o amadurecimento das tecnologias digitais associadas à Indústria 4.0 e a necessidade de soluções eficientes, automatizadas e baseadas em dados na construção civil.

A análise das áreas temáticas em grupos (*clusters*) revelou a aplicação multidisciplinar da IA, com ênfase em Engenharia e em Ciência da Computação, isso indica que o desenvolvimento de algoritmos, modelos computacionais e técnicas de ML está diretamente ligado à solução de problemas práticos da construção civil. Além disso, a distribuição geográfica das publicações mostrou a liderança de países como China, Estados Unidos e Índia, evidenciando a relação entre investimentos em tecnologia, pesquisa científica e inovação no setor construtivo.

Quanto às aplicações, verificou-se que a IA é uma solução utilizada na otimização de projetos, no gerenciamento de obras, na manutenção e inspeção de infraestruturas, assim proporcionou melhorias em eficiência, segurança, redução de custos e apoio à tomada de decisão. Entretanto, o estudo também destacou desafios relevantes, sobretudo no que diz respeito às questões éticas, como a confiabilidade dos algoritmos, a proteção de dados, a transparência das decisões automatizadas e os impactos socioeconômicos decorrentes da automação.

Diante disso, conclui-se que a Inteligência Artificial representa um avanço irreversível para a engenharia civil, com elevado potencial de transformação dos processos construtivos. Contudo, sua adoção deve ocorrer de forma responsável, ética e estratégica, mantendo o engenheiro como agente central na validação e supervisão das decisões. Por fim, ressalta-se a importância de estudos futuros que aprofundem análises e aplicações práticas da IA em obras reais, a fim de contribuir para o desenvolvimento sustentável e inovador da construção civil.

REFERÊNCIAS

- ALALOUL, Wesam Salah *et al.* Industrial Revolution 4.0 in the construction industry: Challenges and opportunities for stakeholders. **Ain Shams Engineering Journal**, v. 11, n. 1, p. 225–230, 2020.
- ARTIFICIAL. *In*: Cambridge Advanced Learner's Dictionary & Thesaurus. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2020.
- BADUGE, Shanaka Kristombu *et al.* **Artificial intelligence and smart vision for building and construction 4.0: Machine and deep learning methods and applications**. Automation in Construction, v. 141, p. 104440, 2022.
- BAUR, C.; WEE, D. **Manufacturing's next act**. McKinsey and Company, 2015.
- BAZZO, Walter Antonio; PEREIRA, Luiz Teixeira do Vale. **Introdução à engenharia: conceitos, ferramentas e comportamentos**. Florianópolis: Editora da UFSC, 2006.
- BROWNLEE, J. What is Deep Learning. 2016. Disponível em: <<https://machinelearningmastery.com/what-is-deep-learning/>>. Acesso em 05 dez 2025.
- BRYNJOLFSSON, Erik; MCAFEE, ANDREW. Artificial intelligence, for real. **Harvard business review**, v. 1, p. 1-31, 2017.
- CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO. **Construção Civil cresce 4,3% em 2024 e impulsiona economia nacional**. Agência CBIC, 07 mar. 2025. Disponível em: <https://cbic.org.br/construcao-civil-cresce-43-em-2024-eimpulsiona-economia-nacional/>. Acesso em: 29 set. 2025.
- DATHEIN, Ricardo. **Inovação e Revoluções Industriais: uma apresentação das mudanças tecnológicas determinantes nos séculos XVIII e XIX**. Porto Alegre: DECON/UFRGS, 2003.
- DIAS, Aniel de Melo; SANTOS, Liliane Cruz Gomes de Souza; DINIZ, Hélio Augusto Goulart. A INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL NA ENGENHARIA CIVIL. *In*: **PESQUISAS EM TEMAS DE ENGENHARIAS - VOLUME 9**. RFB Editora, 2023
- DWIVEDI, Yogesh K. *et al.* Artificial Intelligence (AI): Multidisciplinary perspectives on emerging challenges, opportunities, and agenda for research, practice and policy. **International Journal of Information Management**, v. 57, n. 101994, p. 101994, 2021.
- FIRJAN. SISTEMA FIRJAN. **INDÚSTRIA 4.0**. Publicações Firjan Cadernos SENAI de inovação. 2016. Disponível em: <<https://www.firjan.com.br/publicacoes/publicacoes-de-inovacao/industria-4-0-1.htm>> Acesso em 06 dez. 2025.
- HORTMANN, Charize de O. **Inteligência Artificial no Mercado de Trabalho: ideias para a prevenção de impactos e implementação de políticas públicas**. Editora

Dialética, 2020.

HOWARD, John. **Artificial intelligence: Implications for the future of work.** American journal of industrial medicine, v. 62, n. 11, p. 917-926, 2019.

HUANG, Youqin; LI, Jiayong; FU, Jiyang. Review on application of artificial intelligence in civil engineering. **CMES-Computer Modeling in Engineering & Sciences**, v. 121, n. 3, 2019.

JENSKE, Grace; TAMBARA JÚNIOR, Luís Urbano Durlo. **Introdução à engenharia.** 2. ed. Indaial: Uniasselvi, 2021.

KAPLAN, Andreas; HAENLEIN, Michael. Siri, Siri, in my hand: Who's the fairest in the land? On the interpretations, illustrations, and implications of artificial intelligence. **Business Horizons**, v. 62, n. 1, p. 15–25, 2019.

KNOWLES, Elizabeth. **The oxford dictionary of phrase and fable.** London, England: Oxford University Press, 2006.

LEE, K. F. **Inteligência Artificial: como os robôs estão mudando o mundo, a forma como amamos, nos relacionamos, trabalhamos e vivemos.** Rio de Janeiro: Globo Livros, 2019.

LEGG, Shane; HUTTER, Marcus. **Universal intelligence: A definition of machine intelligence.** 2007.

LHAMA, Paula Gabriela. **Gerenciamento de projetos e inteligência artificial: uma perspectiva para o futuro a partir de uma revisão sistemática da literatura.** XII Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 2021.

LIANG, Ci-Jyun *et al.* **Ethics of Artificial Intelligence and Robotics in the Architecture, Engineering, and Construction Industry.** 2023.

LIU, Ning; KANG, Byung Gyoo; ZHENG, Yu. Current trend in planning and scheduling of construction project using artificial intelligence. *In: IET Doctoral Forum on Biomedical Engineering, Healthcare, Robotics and Artificial Intelligence 2018* (BRAIN 2018). IET, 2018. p. 1-6.

LOPES, Giovana F. Peluso. **Inteligência Artificial: Considerações sobre personalidade, agência e responsabilidade civil.** Editora Dialética, 2021.

MACIEL, Thalita dos Santos; RHEINGANTZ, Paulo Afonso; CUNHA, Eduardo Grala da. **Aplicação de inteligência artificial na análise do projeto de arquitetura: otimização multiobjetivo de uma EMEI para Zona Bioclimática 2.** 2019.

MAHESH, B. Machine learning algorithms-a review. **International Journal of Science and Research (IJSR)**, v. 9, p. 381-386, 2020.

MCCARTHY, John. **What is artificial intelligence?** Stanford, CA: Stanford University, 2007.

MIKALEF, Patrick; GUPTA, Manjul. Artificial intelligence capability: Conceptualization, measurement calibration, and empirical study on its impact on organizational creativity and firm performance. **Information & Management**, v. 58, n. 3, p. 103434, 2021.

MOHAMMADPOUR, Atefeh; KARAN, Ebrahim; ASADI, Somayeh. Artificial intelligence techniques to support design and construction. *In: ISARC. Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction*. IAARC Publications, p. 1282-1289. 2019.

MUELLER, T.; KUSNE, A. G.; RAMPRASAD, R. Machine Learning in Materials Science: Recent Progress and Emerging Applications. **Reviews in Computational Chemistry**, v. 29, n. i, p. 186–273, 2016.

NIKMEHR, Bahareh et al. Digitalization as a strategic means of achieving sustainable efficiencies in construction management: A critical review. **Sustainability**, v. 13, n. 9, p. 5040, 2021.

NYOKUM, Taba; TAMUT, Yamem. Artificial intelligence in civil engineering: emerging applications and opportunities. **Frontiers in Built Environment**, v. 11, 2025

OESTERREICH, Thuy Duong; TEUTEBERG, Frank. Understanding the implications of digitisation and automation in the context of Industry 4.0: A triangulation approach and elements of a research agenda for the construction industry. **Computers in Industry**, v. 83, p. 121–139, 2016.

PAN, Yue; ZHANG, Limao. **Roles of artificial intelligence in construction engineering and management: A critical review and future trends**. Automation in Construction, v. 122, p. 103517, 2021.

PEIXOTO, Fabiano Hartmann. **Inteligência artificial e direito: convergência ética e estratégica**. Alteridade Editora, 2020.

POOLE, David L.; MACKWORTH, Alan K. **Artificial intelligence: Foundations of computational agents**. Cambridge, England: Cambridge University Press, 2010.

RIBEIRO, Douglas Arthur. **Tecnologias advindas da Indústria 4.0 aplicada na construção civil: efeitos e desafios da implantação no Brasil**. 2019. 62 f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2019.

RIBEIRO, Márcio Vinicius Machado. **Inteligência artificial no Poder Judiciário: ética e eficiência em debate**. Editora CRV, 2023.

RICKARDO, Gomes; MEIRIELE, Santos. Artificial intelligence: Its impact on employability. **World Journal of Advanced Research and Reviews**, v. 18, n. 3, p. 198-203, 2023.

RUSSELL, Stuart; NORVIG, Peter. **Artificial intelligence: A modern approach**. 3.

ed. Upper Saddle River, NJ: Pearson, 2010.

SCHWAB, Klaus. **A quarta revolução industrial**. São Paulo: Edipro, 2016.

SICHMAN, Jaime Simão. **Inteligência Artificial e sociedade: avanços e riscos**. Estudos Avançados, v. 35, p. 37-50, 2021.

SILVA, A. D. D. **Impactos da Indústria 4.0 na Construção Civil**. Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia, 2018.

SMITH, P. **BIM & the 5D project cost manager**. Selected Papers From The 27th Ipma (International Project Management Association). 2014.

SOARES, Patrícia Bourguignon et al. Análise bibliométrica da produção científica brasileira sobre Tecnologia de Construção e Edificações na base de dados Web of Science. **Ambiente construído**, v. 16, n. 1, p. 175–185, 2016.

SUCCAR, B. Building information modelling framework: A research and delivery foundation for industry stakeholders. **Automation in construction**, 18(3), 357-375. 2009.

VAKHARIA, V.; GUJAR, R. Prediction of compressive strength and portland cement composition using cross-validation and feature ranking techniques. **Construction and Building Materials**, 225, 292–301, 2019.

VICARI, Rosa Maria. **Influências das Tecnologias da Inteligência Artificial no ensino**. Estudos Avançados, v. 35, p. 73-84, 2021.

VLADIMIR, Surgelas; IRINA, Arhipova; VIVITA, Pukite. **Engineering Inspection Associated Artificial Intelligence For Appraisal Of The Property In Niteroi, Rio De Janeiro, Brazil**. Journal Baltic Surveying, v. 14, 2021.

VOINIGESCU, E. **Les Neurones ont une Forme Propice à L'apprentissage Profond**. 2017. Disponível em: <<https://rpubs.com/alexvezeau/SCI1035-CH1>>. Acesso em 02 dez 2025.

XU, Yang et al. **Typical advances of artificial intelligence in civil engineering**. Advances in Structural Engineering, v. 25, n. 16, p. 3405-3424, 2022.

ZHANG, Limao *et al.* **Artificial intelligence in construction engineering and management**. 2021. ed. Singapore, Singapore: Springer, 2021.