



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL



Pedro Henrique Fernandes Rezende Cunha

Uso da inteligência artificial na construção civil

Uberlândia - MG

2024



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL



Pedro Henrique Fernandes Rezende Cunha

Uso da inteligência artificial na construção civil

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Civil, Campus Santa Mônica, da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Engenheiro Civil.

Orientadora: Prof^a Dra. Livia Borba Agostinho

Uberlândia - MG

2024

RESUMO

A inteligência artificial – IA, vem revolucionando diversos setores da economia, garantindo mais produtividade, menos erros, quebras e paradas, por meio de sistemas mais inteligentes e ágeis. A construção civil tem problemas que podem ser sanados por meio da implementação da IA, como a baixa produtividade, atrasos, falhas nos orçamentos, acidentes, baixa qualidade dos empreendimentos, dentre outros. Nesse sentido, essa pesquisa tem como objetivo investigar as aplicações da IA no setor da construção civil. A metodologia utilizada para tal fim é uma revisão sistemática da literatura por meio da técnica Teoria do Enfoque Meta-Analítico Consolidado - TEMAC 2.0. Assim, a IA pode potencializar os resultados no setor da construção civil, contribuindo para maior produtividade, cumprimento dos prazos e custos, levando o setor para um outro patamar. No entanto, apesar de todas as vantagens a IA ainda é pouco empregada no setor.

Palavras-chave: Algoritmo; Construção civil; Inteligência Artificial.

ABSTRACT

Artificial intelligence – AI, has been revolutionizing several sectors of the economy, ensuring more productivity, fewer errors, breakdowns and downtime, through more intelligent and agile systems. Civil construction has problems that can be resolved through the implementation of AI, such as low productivity, delays, budget failures, accidents, low quality of projects, among others. In this sense, this research aims to investigate the applications of AI in the construction sector. The methodology used for this purpose is a systematic review of the literature using the Consolidated Meta-Analytical Approach Theory - TEMAC 2.0 technique. Thus, AI can enhance results in the construction sector, contributing to greater productivity, meeting deadlines and costs, taking the sector to another level. However, despite all the advantages, AI is still little used in the sector.

Keywords: Algorithm; Civil construction; Artificial intelligence.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	5
2 OBJETIVO	7
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	8
4 METODOLOGIA	11
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	13
5.1 DESIGN GENERATIVO NA CONSTRUÇÃO CIVIL: UM ESTUDO DE CASO NO BRASIL – OSCAR et al. (2023)	21
5.3 UM MODELO DE GESTÃO DA INFORMAÇÃO PARA ATENDER RECLAMAÇÕES DE MORADORES POR MEIO DE TÉCNICAS DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL - BAZZAN et al. (2023).....	25
5.4 MODELO DE CARBONATAÇÃO PARA CONCRETO DE CINZA VOLANTE BASEADO EM REDE NEURAL ARTIFICIAL: DESENVOLVIMENTO E ANÁLISE PARAMÉTRICA - FÉLIX, CARRAZEDO e POSSAN (2021).....	26
5.5 CARACTERIZAÇÃO DO TEOR DE VAZIOS DE AR EM MATRIZES DE AGREGADOS MIÚDOS EM MISTURAS DE CONCRETO ASFÁLTICO - ENRÍQUEZ-LEÓN et al. (2021).....	26
6 CONCLUSÃO	28

1 INTRODUÇÃO

O mundo contemporâneo vive a era da informação, assim é possível experimentar soluções que, até alguns anos atrás, considerava-se impossível. A análise avançada de dados, a conectividade dos objetos e a Inteligência Artificial (IA) são realidade. Essas inovações ampliam os níveis de experiências e produtividade como nunca até então visto.

A IA vem transformando a cultura e o modo de operacionalizar a cadeia de produção. Desde o advento das máquinas a vapor, a industrialização evoluiu de modo rápido, até alcançar os patamares atuais. Conforme Santos et al. (2020) a IA é uma ferramenta empregada para resolução de problemas em diversas áreas. Está ligada a linguagem, inteligência, raciocínio lógico e aprendizagem para solucionar problemas, como expresso por Kaufman (2019). Além disso, engloba várias áreas do conhecimento, como a Matemática, Computação, Neurociência, Filosofia, Linguística, Cibernética, dentre outras, de acordo com Discher, Santos e Teles (2022).

Cupertino (2023) explica que a IA vem se desenvolvendo, em paralelo às demais tecnologias propostas pela Indústria 4.0 e assim, revolucionado todos os setores aos quais é implementada. Um estudo realizado pelo Instituto McKinsey & Company (2022) mostra que os pioneiros da Indústria 4.0 têm instalações bem encaminhadas para adotar a IA e outras tecnologias avançadas até 2025 e podem esperar uma mudança positiva de 122% no fluxo de caixa.

No caso da indústria da construção civil, apesar de ser uma das mais antigas e representar uma grande parcela da economia mundial, é uma das mais lentas no que tange o uso de novas tecnologias (TEIXEIRA, TEIXEIRA e ROCHA, 2020). Conforme o relatório publicado pelo McKinsey Global Institute (2017), *chamado de Reinventing construction: a Route to higher productivity* (reinventando a construção: uma rota para maior produtividade), o setor da construção civil emprega cerca de 7% da população ativa no mundo, com gastos anuais de mais de 10 trilhões de dólares em bens e serviços relacionados à atividade, no entanto, continua pouco desenvolvida e até mesmo atrasada no ponto de vista tecnológico em comparação a outros setores, resultando assim em um déficit de produtividade que só pode ser superado com a inserção de

novas tecnologias, como o uso da inteligência artificial. No entanto, mesmo com o baixo desenvolvimento tecnológico, já existem aplicações da IA no setor a mais de uma década, conforme constatado no estudo de Sarduy et al. (2013), que desenvolveu um algoritmo para determinar dosagens na produção de peças de concreto.

Contemporaneamente, a IA pode ser usada como recurso tecnológico a fim de otimizar gestão de recursos, apoiar tomadas de decisões com mais rapidez e eficiência, minimizar taxas de erros, otimizar processos repetitivos, além de aplicado na área de segurança do trabalho e sustentabilidade. Além disso, pode ser empregada para resolver problemas complexos nos processos de dimensionamento e análise de estruturas (TEXEIRA, TEXEIRA e ROCHA, 2020).

A Inteligência Artificial (IA) é, portanto, um ramo da ciência da computação que busca criar sistemas capazes de realizar tarefas que normalmente exigiriam inteligência humana. Essas tarefas podem incluir aprendizado, raciocínio, reconhecimento de padrões, resolução de problemas, processamento de linguagem natural, percepção visual e tomada de decisões.

2 OBJETIVO

Esta pesquisa tem como objetivo investigar as aplicações da Inteligência Artificial (IA) no setor da construção civil, por meio de uma análise do estado da arte e entender seus campos de aplicação e seus possíveis benefícios e ganhos.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

“*Can machines think?*” em português “as máquinas podem pensar?”. Essa foi uma questão apresentada por Alan Turing, na publicação de seu artigo *Computing Machinery and intelligence* em 1950. Com esse estudo, o matemático propôs uma discussão sobre se é possível chamar um computador de cérebro eletrônico e lançou bases para estudos do campo da inteligência artificial (TURING, 2009).

Hodges (2014) explica que Turing foi responsável pelo desenvolvimento da criptoanálise que derrotou a máquina da Alemanha nazista chamada Enigma. O estudioso, chamado de pai da computação, trabalhou em segredo nesse projeto inglês e, assim, foi precursor na ciência da computação e da inteligência artificial.

Em seus anos de desenvolvimento, a IA, sofreu influência de muitas disciplinas, como engenharia, biologia, teoria da comunicação, psicologia, teoria dos jogos, matemática e estatística, lógica, filosofia e linguística. As linhas de trabalho em ambas essas áreas deixaram marcas e ainda influenciam a IA contemporaneamente (FLORES, 2021).

Uma breve cronologia de compreensões *versus* expectativas sobre a inteligência artificial é apresentada por Li (2018):

- 1943 a 1955: gestação da IA;
- 1956: nascimento da IA;
- 1952 a 1969: entusiasmo precoce, grandes expectativas;
- De 1966 a 1973: uma dose de realidade;
- De 1969 a 1979: sistemas com base em conhecimentos – a chave do poder?;
- 1980 – presente: a IA se torna uma indústria;
- 1986 – presente: retorno das redes neurais;
- 1987 – presente: a IA adota o método científico;
- 1995 – presente: o desenvolvimento de agentes inteligentes;
- 2001 – presente: disponibilidade de bases de dados(*big data*).

Nota-se que, no histórico da IA, em 50 anos, foram disponibilizados dispositivos computacionais e linguagens de programação bons o suficiente para criar testes experimentais de ideias sobre a inteligência, sendo os estudos de Turing o ponto de partida para a história da IA (FLORES, 2021).

Assim, de acordo com Nascimento (2022), é complexo estabelecer uma conceituação clara do que é IA, já que essa área é muito influenciada por outras, mesmo assim, algumas definições existem e precisam ser esclarecidas para a discussão dessa pesquisa.

Conforme Pozzebon, Frigo e Bittencourt (2004) a IA é, sob uma perspectiva, uma ciência, que busca estudar e conhecer o fenômeno da inteligência, e, por outra, uma área da engenharia, na procura por criar instrumentos que apoiam a inteligência humana. Nesse estudo, interessa a segunda perspectiva, ou seja, a IA como uma ciência dentro da engenharia computacional que vem transformando a vida do homem.

Silva (2013) complementa que a IA é uma subárea dentro dos estudos da Ciência da Computação que trabalha na pesquisa e propostas para o desenvolvimento de dispositivos computacionais que possam simular aspectos do intelecto humano, ao modo da capacidade de raciocinar, perceber, tomar decisões e resolver problemas.

Atualmente, a IA possui diferentes vertentes e aplicações distintas e, assim, algoritmos e modelos matemáticos são dependentes da natureza do problema a ser resolvido computacionalmente (DOMINGOS, 2017; LI, 2018).

Assim, o funcionamento da IA se baseia no que foi chamado *machine learning* ou aprendizado da máquina. De maneira simplificada, o *machine learning* se trata do processo em que, a partir de determinados dados e padrões, os computadores conseguem gerar seu próprio conhecimento, ou seja, sem receber informações ou comandos explícitos por algum indivíduo, as máquinas são capazes de tomar decisões, resolver problemas, identificar falhas e tudo o mais que uma inteligência humana é capaz de fazer. Tudo isso usando somente padrões de dados e algoritmos. Com esses dados e algoritmos, a máquina é

capaz de produzir determinada informação ou realizar determinada ação de forma autônoma (TAVARES, MEIRA e AMARAL, 2020).

Importante explicar que algoritmo é um procedimento capaz de sanar uma determinada problemática, por meio de passos previamente elaborados (ASHLOCK, 2006).

Para Garcia (2020, p. 15) “a IA é uma área da computação voltada a desenvolver algoritmos e sistemas capazes de realizar tarefas que demandam habilidades associadas à inteligência humana”. A autora complementa que, as máquinas que fazem uso de IA precisam ser capazes de “planejar sequências de atividades para alcançar metas; raciocinar para resolver problemas complexos; e, é claro conseguir aprender a fazer tudo isso sozinha”.

4 METODOLOGIA

Esta pesquisa é do tipo exploratória com abordagem quantitativa. O método empregado foi uma Revisão Sistemática da Literatura (*Systematic Literature Review* – SLR):

“A Revisão Sistemática da Literatura é uma modalidade de pesquisa, que segue protocolos específicos, e que busca entender e dar alguma logicidade a um grande corpus documental, especialmente, verificando o que funciona e o que não funciona num dado contexto. Está focada no seu caráter de reprodutibilidade por outros pesquisadores, apresentando de forma explícita as bases de dados bibliográficos que foram consultadas, as estratégias de busca empregadas em cada base, o processo de seleção dos artigos científicos, os critérios de inclusão e exclusão dos artigos e o processo de análise de cada artigo” (GALVÃO e RICARTE, 2020, p. 58).

A priori foi definido o protocolo de pesquisa, em que foi estabelecido o conjunto de regras e parâmetros para executar o processo, definindo características conforme a necessidade. Assim, optou-se pela técnica Teoria do Enfoque Meta-Analítico Consolidado - TEMAC 2.0. De acordo com Mariano e Rocha (2017, p. 434), o objetivo da técnica TEMAC é “garantir que as características importantes para uma avaliação de qualidade de artigo sejam respeitadas”.

O TEMAC se divide em três etapas: a. preparação da pesquisa; b. apresentação e interrelação dos dados; c. detalhamento, modelo integrador e validação por evidências.

A primeira etapa foi estabelecida respondendo às questões sobre o termo de pesquisa, espaço temporal e base de dados. Foram empregados diversos termos de pesquisa que se associam a temática base. A plataforma de pesquisa permite o uso do “AND”, ou seja, fazer pesquisa de mais de uma palavra chave simultaneamente. Assim foram usados os seguintes termos: “*artificial intelligence*” e “*construction*” (inteligência artificial e construção). O espaço temporal definido foi entre 2018 e 2024. A base de dados escolhida foi “*Web of Science*”, pois é considerada, por Mariano et al. (2011) uma das mais completas e coerentes bases de dados. Para refinar e direcionar ainda mais as buscas, foi definida área de pesquisa: Tecnologia da construção e engenharia além da

categoria *Web of Science* como *Engineering Civil e Construction Building Technology*.

Na segunda etapa, com uso da plataforma *Web of Science*, foram realizadas as buscas quanto: revistas mais relevantes da área da construção civil; revistas que mais publicaram sobre o tema em estudo; evolução do tema ano a ano; documentos mais citados; autores que mais publicaram *versus* autores que mais foram citados; países que mais publicaram sobre o assunto; conferências que mais contribuíram; universidades que mais publicaram; agências que mais financiaram pesquisas; áreas que mais publicaram; frequência de palavras chaves.

Então, na terceira etapa, foi usado o software VOSViewr 1.6.20, a fim de desenvolver *clusters*¹ de aproximação dos dados. Foram empregadas análises de co-citações de todos os estudos indexados na base de dados e de ligação entre eles dos últimos três anos. A análise de co-citações visou apresentar as abordagens principais da pesquisa e a análise de interligação dos dados demonstrou as principais frentes de pesquisa. Concluídas as análises foram feitas as leituras dos principais estudos.

Por meio das buscas realizadas na plataforma *Web of Science* usando as combinações dos termos: “*artificial intelligence*” AND “*construction*” e os critérios já citados, foram encontrados 835 registros indexados na base de dados entre 2018 e 2024. Foram então selecionados os autores que mais citaram, e a análise de resultados será feita a partir da análise desses estudos

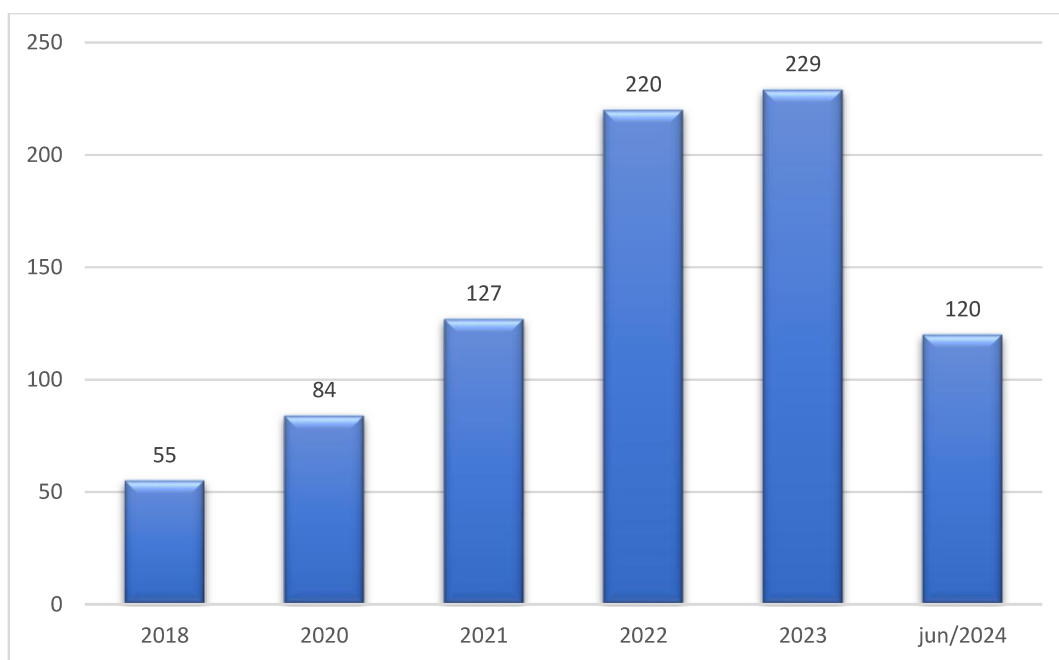
¹ Grupos de computadores interconectados que trabalham juntos para funcionar como um único sistema. Eles são usados para resolver problemas que requerem alto desempenho, alta disponibilidade ou processamento paralelo.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Analisando os registros, notou-se que o artigo mais antigo na plataforma *Web of Science* é um artigo “*Artificial-Intelligence Techniques For Generating Construction Project Plans*” publicado em 1988, por Levitt, Kantan e Kunz no *Journal of Construction Engineering and Management – ASCE*, o estudo discute sobre as técnicas de IA para criação de planos de projetos de construção. Desde então todos os anos foram publicados artigos sobre a temática, ou seja, entre 1988 e 2024, há registros de publicações na plataforma *Web of Science*. Porém só observa-se relevância nos estudos a partir do período analisado.

Após essa análise mais abrangente, foi determinado um espaço temporal para essa pesquisa, entre 2018 e 2024, e a quantidade de artigos por ano é ilustrada no gráfico (Figura 1).

Figura 1 - Evolução nas publicações ao longo dos anos



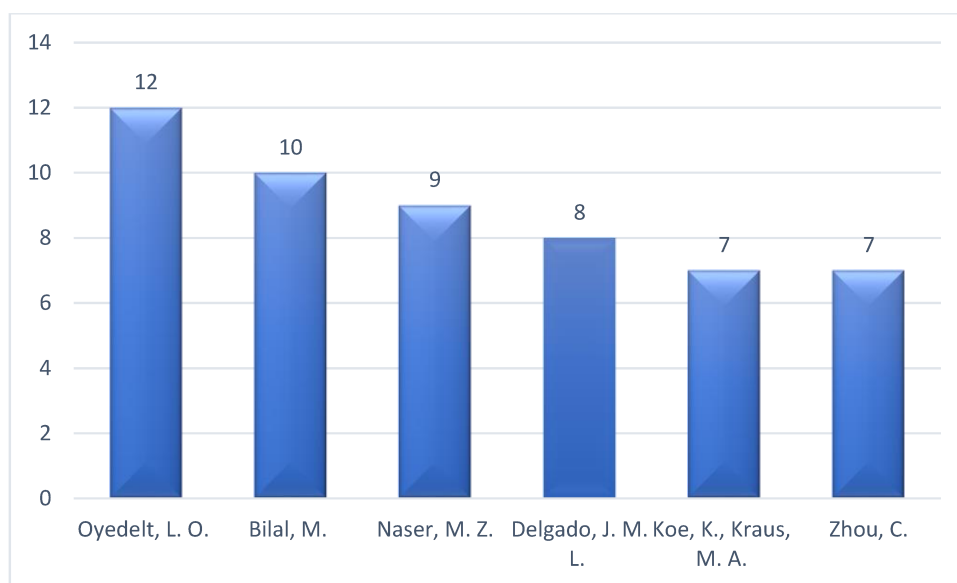
Fonte: Autor (2024)

Percebe-se um crescimento no interesse pelo tema entre 2018 e 2021, porém entre 2022 e 2023 a quantidade de estudos quase que se mantém estável, com um pequeno crescimento, 4,09%. Quanto ao ano de 2024, nota-se que nos primeiros seis meses já foram publicados 120 estudos sendo mais que

a metade dos estudos no ano anterior, assim, pode-se supor um crescimento maior na quantidade de publicações para o ano em questão.

Quanto aos autores que mais publicaram sobre a temática foram Oyedelt, L. O. com 12 registros; Bilal, M. com 10 registros; Naser, M. Z. com 9 registros; Delgado, J. M. L. com 8 registros e; empatados, Koe, K., Kraus, M. A. e Zhou, C. com 7 registros (Figura 2).

Figura 2 - Autores que mais publicaram



Fonte: Autor (2024)

Os artigos mais citados não são de autoria dos autores que mais publicaram. Os dez artigos mais citados e suas contribuições foram analisadas e estão apresentados no Quadro 1.

Quadro 1 - Estudos mais citados

Título	Autores/ano	Citações	Resultados
Rumo a um gêmeo digital de construção semântica: direções para pesquisas futuras	Boje et al. (2020)	404	Para que o BIM alcance o máximo de sua eficiência os autores recomendam sua implementação associada as tecnologias de IA, principalmente com auxílio de gêmeos digitais.
Papéis da inteligência artificial na engenharia e gestão de construção: uma revisão crítica e tendências futuras	Pan e Zhang (2020)	353	A inteligência artificial é capaz de automatizar e acelerar processos de aprendizagem, raciocínio e percepção a partir de grandes dados, o que representa um enorme potencial na abordagem de diferentes projetos de engenharia de acordo com as suas próprias características. Ou seja, as soluções baseadas em IA em projetos de construção são diferentes umas das outras.
Previsão de resistência à compressão baseada em aprendizado de máquina para concreto: uma abordagem de reforço adaptativo	Feng et al. (2020)	342	Os pesquisadores criaram uma metodologia inteligente, baseada em IA, o algoritmo AdaBoost, para analisar a resistência à compressão do concreto. O modelo se mostrou eficiente nas análises, permitindo obter a resistência de concretos com diferentes proporções de mistura em diferentes momentos. 1030 conjuntos de testes de compressão de concreto foram coletados e as variáveis de teste são divididas em 8 entradas (por exemplo, agregados grossos/finos, cimento, água, aditivo, etc.) e 1 saída (valor de resistência à compressão). O conjunto total de dados foi dividido em conjunto de treinamento e conjunto de teste. O modelo é gerado pelo AdaBoost a partir do conjunto de treinamento é então avaliado pelo conjunto de teste. O modelo AdaBoost pode prever com precisão e eficiência a resistência à compressão do concreto com variáveis de entrada fornecidas. O modelo é como uma caixa-preta e os usuários não precisam saber o mecanismo real, o que o torna simples e conveniente para aplicação. O modelo também pode capturar a resistência à compressão variável ao longo do tempo do concreto em diferentes dias de cura.
Inteligência artificial na indústria da arquitetura, engenharia e construção: análise cienciométrica e visualização de atividades de pesquisa	Darko et al. (2020)	248	Os autores investigaram quais as abordagens dentro da IA mais usadas na construção civil, bem como os segmentos dentro do setor que mais são aplicados. Os resultados indicaram que algoritmos genéticos, redes neurais, lógica difusa, conjuntos fuzzy e aprendizado de máquina têm sido os métodos de IA mais utilizados no setor da construção. Otimização, simulação, incerteza, gerenciamento de projetos e pontes têm sido os tópicos/problemas mais comumente abordados usando métodos/conceitos de IA.

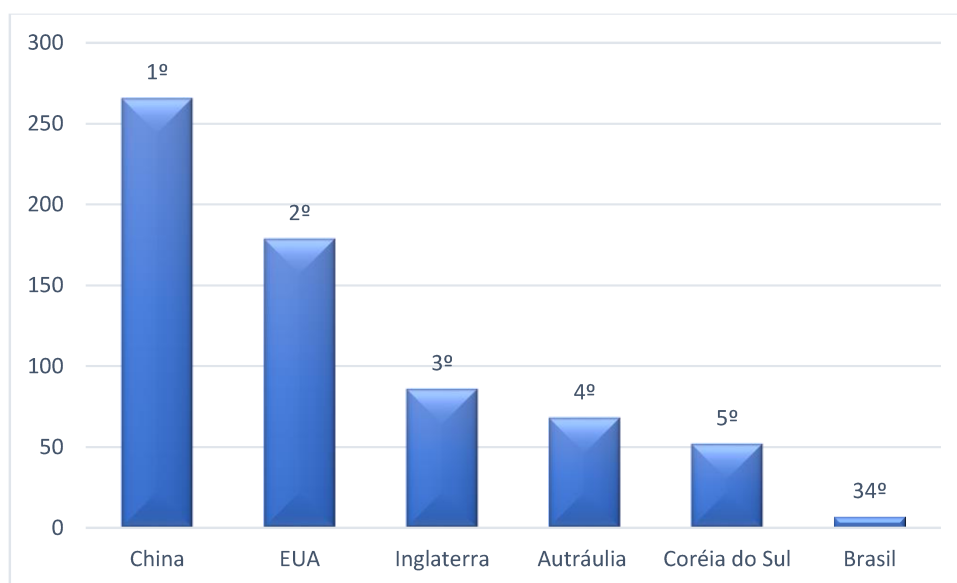
Um sistema especialista em rede neural artificial com algoritmo Firefly modificado para prever a resistência à compressão e à tração de concreto de alto desempenho	Bui et al. (2020)	243	O estudo aplica a IA na análise de resistência à compressão e a tração de concretos de alto desempenho. O sistema baseado em IA criado foi eficaz para fazer previsões rápidas e precisas e, portanto, adequada para uma ampla gama de problemas em engenharia.
Robótica e sistemas automatizados na construção: compreendendo os desafios específicos da indústria para adoção	Delgado et al. (2019)	239	A robótica, com auxílio da IA, tem potencial para proporcionar inúmeras vantagens à indústria da construção; no entanto, os níveis de adoção são muito baixos.
Modelagem e simulação da operação de reservatórios utilizando rede neural artificial, regressão vetorial de suporte, algoritmo de aprendizagem profunda	Zhang et al. (2020)	239	O estudo investigou a aplicação de dois modelos tradicionais de IA e um novo modelo de aprendizagem profunda no auxílio à operação e manutenção em barragens. Os modelos se mostraram eficazes para as atividades propostas.
A promessa de implementar aprendizado de máquina na engenharia sísmica: uma revisão do estado da arte	Xie et al.	211	O artigo investigou a importância das técnicas de IA para aplicações de engenharia sísmica, por meio de quatro áreas: análise de risco sísmico, identificação de sistema e detecção de danos, avaliação de fragilidade sísmica e controle estrutural para mitigação de terremotos. O estudo revelou que as técnicas de IA podem aprender e inferir inter-relações complicadas entre os parâmetros contribuintes e, assim, permitir resolver diversos problemas na engenharia sísmica que são desafiadores, usando métodos tradicionais.
Desenvolvendo um gêmeo digital em nível de edifício e cidade: estudo de caso do campus West Cambridge	Lu et al. (2020)	194	O estudo visou desenvolver gêmeos digitais de edifícios (maquetes virtuais dos edifícios). Por meio dos modelos criados foi possível obter dados que podem ajudar no processo de tomada de decisão quanto a gestão e manutenção de tais estruturas.
Inteligência artificial na indústria da construção: uma revisão da situação atual, oportunidades e desafios futuros	Abioye et al. (2021)	186	A indústria da construção enfrenta um problema de produtividade e outros inúmeros desafios, que têm potencial para serem resolvidos pela IA. Com o aumento dos dados gerados ao longo do ciclo de vida do edifício e o surgimento de outras tecnologias digitais, a IA tem a capacidade de aproveitar esses dados e utilizar as capacidades de outras tecnologias para melhorar os processos de construção.

Fonte: Autor (2024)

As revistas que mais publicaram sobre Inteligência Artificial aplicada à construção civil foram: *Automation in Construction* com 156 registros; *Construction and Building Materials* com 83 registros e; *Buildings* com 72 registros.

Quanto aos países que mais publicaram sobre IA na construção civil, a China lidera, com 266 publicações seguido pelos EUA, com 179 publicações, Inglaterra, com 86 publicações, Austrália, com 68 publicações e Coréia do Sul, com 52 publicações. O Brasil está na 34ª posição, com 8 publicações como ilustrado na Figura 3. Todos os estudos foram publicados em inglês.

Figura 3 - Representação dos países que mais publicaram

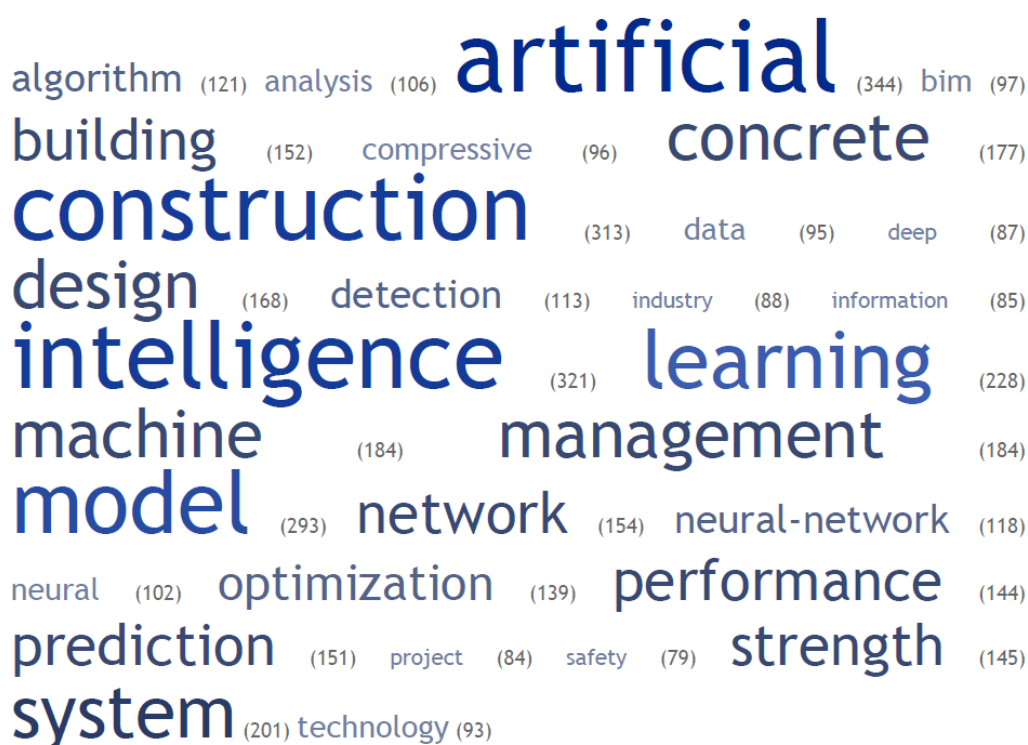


Fonte: Autor (2024)

Foram ainda investigadas as agências que mais financiaram pesquisas sobre a temática, sendo elas: *National Natural Science Foundation Of China - NSFC*, com 117 estudos financiados; *National Key Research And Development Program Of China*, com 23 estudos financiados; *National Science Foundation - NSF*, com 23 estudos financiados; *National Research Foundation of Korea* com 22 estudos financiados e; *UK Research Innovation Ukri*, com 19 estudos financiados.

Quanto as palavras-chave, foi criada uma nuvem de palavras (Figura 4) com as 30 mais identificadas nos 835 estudos identificados no período analisado.

Figura 4 - Palavras-chave



Fonte: Autor (2024)

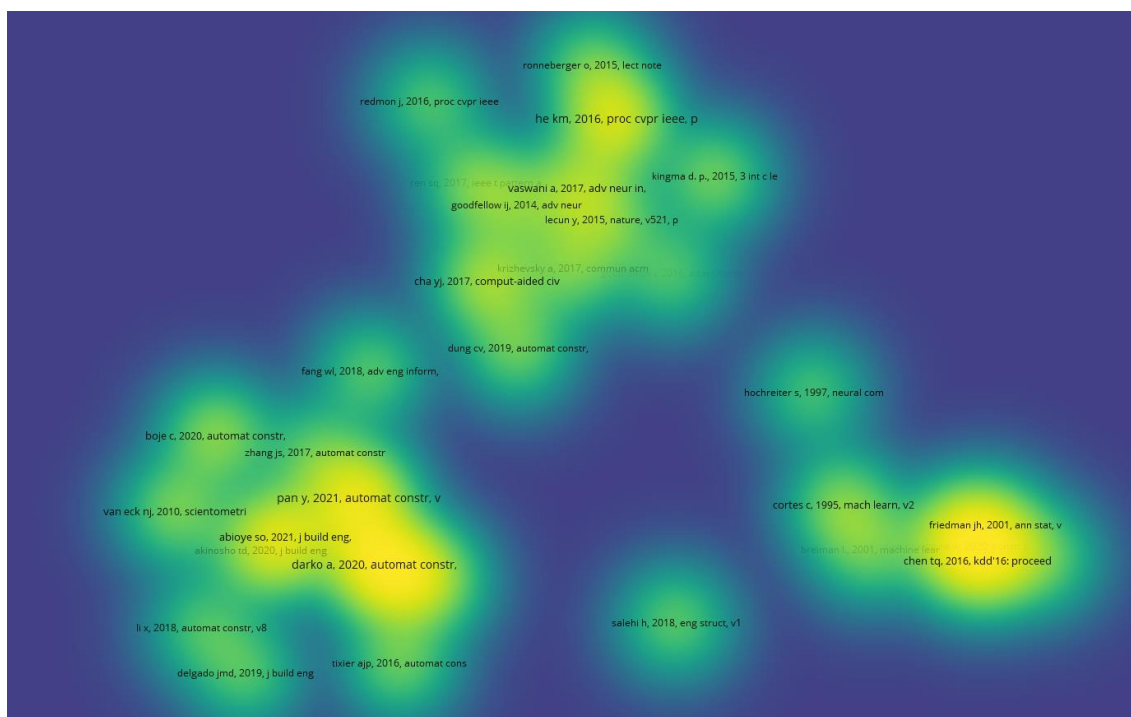
A nuvem de palavras (Figura 4) mostra as 30 palavras mais usadas na combinação de termos chaves dos estudos analisados. Porém, as cinco mais usadas foram: *artificial* com 344 aparições; *construction*, com 313 aparições; *intelligence* com 321 publicações; *model* com 293 publicações e; *learning* com 229 publicações.

As diversas perspectivas sobre o tema inteligência artificial na construção civil, visam estimular o conhecimento a respeito do tema, evidenciando a necessidade de aumentar a aplicação da IA no setor da construção, além a necessidade de se conhecer as abordagens fundamentais. Assim, foi desenvolvido um “mapa de calor” de co-citações² que visa principalmente demonstrar os estudos mais próximos entre eles, definindo então, as principais colaborações ou referencias teóricas no tema. Desse modo, identificou-se a

² É uma visualização gráfica que mostra como diferentes elementos (geralmente autores, artigos, palavras-chave ou fontes) são mencionados juntos em citações acadêmicas ou referências bibliográficas.

existência de cinco aspectos de estudo na área, representadas por cada intensidade de cor mostrada na Figura 5.

Figura 5 - Mapa de calor de co-citação

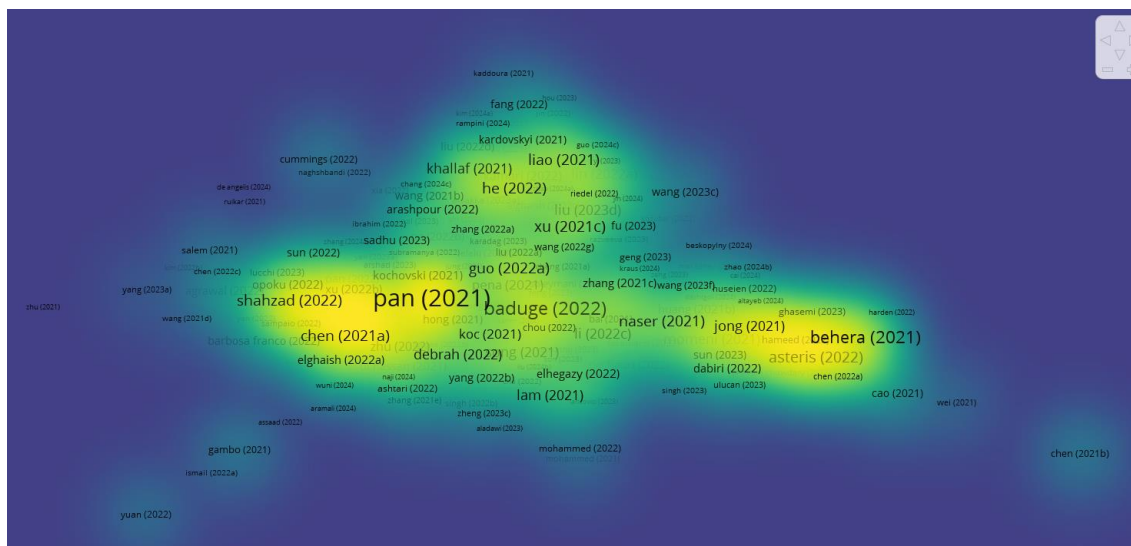


Fonte: Autor (2024)

Por meio da análise do “mapa de calor” ilustrado pela Figura 5, nota-se as maiores concentrações nas manchas amareladas, de estudos ao redor da pesquisa de Pan e Zhang (2021) uma vez que esse é o segundo estudo mais citado na literatura, conforme apresentado no Quadro 1. Isso decorre da discussão proposta na pesquisa, debatendo de modo mais amplo como a IA pode contribuir com o setor da construção, apresentando novas tecnologias que podem favorecer o setor. Outras pesquisas, ao redor da mancha amarelada, podem ser destacadas como Darko et al. (2020), sendo o quarto estudo mais citado na literatura, eles destacam que a IA tem sido usada na construção civil por meio de algoritmos genéticos, redes neurais, lógica difusa, conjuntos fuzzy e aprendizado de máquina.

Foi criado outro diagrama, dessa vez o mapa de *coupling*³ ou conexão entre os dados (Figura 6), que visa identificar quais as principais frentes de pesquisa, ou seja, de que maneira os estudos mais atuais estão sendo caracterizados.

Figura 6 - Mapa de calor de coupling



Fonte: Autor, 2024

O mapa de calor de *coupling* destaca, em amarelo, distingue as linhas de estudo das que foram encontradas no mapa de *co-citation*, ou seja, com base nos autores mais citados, são analisadas as linhas de pesquisa mais próximas. Dessa maneira, os autores mais citados a respeito do tema inteligência artificial na construção civil se destacaram entre os demais. Pan e Zhang (2021) novamente se destacam, comprovando a relevância desse estudo para a literatura. Naser (2021) usou IA para criar três algoritmos para prever a capacidade máxima de momento de vigas reforçadas com laminados compostos de polímero reforçado com fibra e a propensão do sistema falhar sob vários mecanismos. Lam et al. (2021) estudaram a criação de um sistema baseado em IA para avaliar e controlar ruído no ambiente construtivo. Zhang et al. (2021) usam os princípios de Internet das Coisas, que está dentro do universo da IA,

³ Um mapa de coupling (ou acoplamento bibliográfico) é uma técnica de análise bibliométrica usada para visualizar as conexões entre documentos, autores, instituições ou países com base em referências bibliográficas compartilhadas.

para monitorar em tempo real a construção de túneis. Behera et al. (2021) usaram IA para gerenciar rejeitos e empregá-los como material de aterro.

Assim, após o levantamento desses dados, foram identificados oito estudos brasileiros. No entanto, somente cinco deles foram relevantes a discussão desta pesquisa, os demais não tinham relação ao objetivo dessa pesquisa (QUADRO 2).

Quadro 2 - Estudos brasileiros

Título	Autores/ano	Citações	Universidade
Design generativo na construção civil: um estudo de caso no Brasil	Oscar et al. (2023)	0	Universidade Federal do Rio de Janeiro
Plataforma web para inspeção de manutenção de telhados de edifícios usando UAS e inteligência artificial	Staffa JR et al., 2023	0	Universidade Federal da Bahia
Um modelo de gestão da informação para atender reclamações de moradores por meio de técnicas de inteligência artificial	Bazzan et al. (2023)	4	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Modelo de carbonatação para concreto de cinza volante baseado em rede neural artificial: Desenvolvimento e análise paramétrica	Félix, Carrazedo e Possan (2021)	49	Universidade Federal de São Carlos
Caracterização do teor de vazios de ar em matrizes de agregados miúdos em misturas de concreto asfáltico	Enríquez-León et al. (2021)	11	Universidade Federal do Rio de Janeiro

Fonte: Autor (2024)

5.1 DESIGN GENERATIVO NA CONSTRUÇÃO CIVIL: UM ESTUDO DE CASO NO BRASIL – OSCAR ET AL. (2023)

Oscar et al. (2023) estudaram uma abordagem para projetos auxiliada por algoritmos por meio do design generativo. O design generativo utiliza algoritmos para produzir resultados tridimensionais únicos e irrepetíveis em decorrência da expressão múltipla dessa ideia geradora, que, por sua vez, é identificada pelo designer como uma proposta subjetivamente viável quando executada. Esta seção apresenta um projeto hipotético como estudo de caso do uso do design generativo na construção civil. O caso compreende uma análise do design inicial de empreendimentos localizados na zona portuária do Rio de Janeiro utilizando o software TestFit. Nesse estudo, foi possível gerar soluções para uma concepção inicial de empreendimento imobiliário por meio da combinação dos

dados coletados, dos objetivos desejados e do software TestFit. O algoritmo buscou otimizar os desenhos de projeto, uma vez inseridas as informações necessárias, e foi mais rápido do que se feito manualmente, permitindo testes e avaliações com menos esforço humano. Entretanto, o algoritmo não permitiu soluções tão eficientes quanto aquelas que poderiam ser obtidas com a liberdade de uma operação manual. Isso se deveu tanto às limitações do software quanto à dificuldade de adaptá-lo a um empreendimento brasileiro, dadas suas especificações para o mercado imobiliário norte americano. Além disso, não foi possível gerar saídas de cálculos financeiros das soluções, dados que seriam de extrema importância para uma avaliação adequada das alternativas (OSCAR et al., 2023).

Foi realizado um estudo utilizando o *software* TestFit, ferramenta específica para projetos imobiliários. Neste estudo, foi possível gerar rapidamente soluções otimizadas para um projeto hipotético em uma região do porto do Rio de Janeiro com os dados introduzidos no programa e avaliá-los conforme objetivos definidos (OSCAR et al., 2023).

O design generativo⁴ pode ser considerado uma evolução das abordagens de design CAD e BIM. Essa abordagem tem sido cada vez mais acessível no setor Arquitetura, Engenharia e Construção - AEC graças à facilidade de implementação de algoritmos de programação e devido ao progresso nas áreas de inteligência artificial e computação em nuvem. Sua aplicação na construção civil pode alcançar soluções de projeto mais rápidas e assertivas, que considerem as restrições do projeto e os objetivos das partes interessadas. Tal aplicação nas fases de projeto e viabilidade, entendida como a etapa de construção com alto grau de oportunidade de criação e custo relativamente baixo (comparado às demais etapas), sugere potencial para aumento da produtividade e da qualidade do projeto, além de absorver as complexidades envolvidas no atendimento das necessidades e objetivos do objeto construído. Dentre os potenciais usos observados no estudo, destacou-

⁴ O design generativo é uma abordagem criativa que utiliza inteligência artificial (IA), algoritmos e computação para explorar inúmeras soluções para um problema de design com base em restrições e objetivos definidos. É amplamente usado em arquitetura, engenharia, design de produtos e outras áreas criativas para gerar e otimizar soluções que seriam difíceis ou demoradas para os humanos conceberem sozinhos.

se que a disseminação desta abordagem, somada às tecnologias de impressão 3D, pode ser melhor aproveitada para a construção de elementos, principalmente quando se trata de grandes variações e alternativas. Desta forma, informações em projetos futuros podem ter melhores insumos para uma geração mais adequada e próxima de casos reais. A pesquisa também apresentou algumas barreiras a serem superadas para que essa tecnologia generativa possa ser melhor implementada na construção. O projetista deve conseguir, de certa forma, entender seu processo de trabalho em detalhes, definindo objetivamente os critérios de desempenho do projeto que podem ser analisados por algoritmos e tendo um certo nível de conhecimento sobre programação para automatizar o processo. Outro problema é que a tarefa de escolher entre muitas alternativas não é simples, reforçando a necessidade de desenvolver uma análise eficaz do desempenho dos desenhos para embasar as decisões (OSCAR et al., 2023).

5.2 PLATAFORMA WEB PARA INSPEÇÃO DE MANUTENÇÃO DE TELHADOS DE EDIFÍCIOS USANDO UAS E INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL - STAFFA Jr et al. (2023)

Staffa Jr et al. (2023) estudaram o desenvolvimento e teste piloto de uma plataforma web para inspeção de estruturas de coberturas de edificações para assistência técnica apoiada por drones e inteligência artificial. A integração dessas tecnologias permite a padronização do processo de coleta de dados, reconhecimento automático de parte das patologias encontradas, compartilhamento de informações e confiabilidade dos dados. Para o reconhecimento automático das patologias, foi utilizada uma base de imagens de 173 coberturas de edificações residenciais coletadas por drone, sendo realizado o teste piloto da plataforma em 5 empreendimentos com um total de 54 coberturas. A pesquisa buscou contribuir para o desenvolvimento de uma plataforma para inspeções de telhados usando Sistema de Aeronaves Não Tripuladas - UAS⁵, dispositivos móveis e inteligência artificial (*Smart Inspects*). Este sistema permite o processamento e armazenamento de dados, mantendo-

⁵ Popularmente conhecido como drone

os disponíveis para seus usuários, permitindo a identificação automática de patologias de telhados e a geração de relatórios de inspeção de telhados (STAFFA JR et al., 2023). A rapidez e facilidade de aquisição de ativos visuais proporcionadas pela tecnologia utilizada no UAS possibilitaram a criação de um banco de dados. Por outro lado, o desenvolvimento de mecanismos de automatização da análise de ativos visuais promoveu benefícios no processamento e análise de dados, contribuindo para a precisão na identificação de patologias de telhados, rapidez na elaboração de relatórios e aplicação de ações corretivas. A ferramenta de detecção de objetos adotada, Custom Vision e o UAS contribuíram para a automatização de processos ao identificar automaticamente patologias de telhados. Essas duas tecnologias foram unidas e executadas pelo sistema web-based, uma alternativa acessível que permite o processamento e armazenamento de dados (STAFFA JR et al., 2023). Com o sistema proposto, a inspeção de telhados de um condomínio residencial com cerca de oito telhados cada obteve um tempo médio de inspeção inferior a 40 min. Os métodos tradicionais de inspeção podem durar dias ou algumas semanas, dependendo do tipo de edifício e telhado. A eficiência no processo permite, assim, a adoção de inspeções preventivas e frequentes, minimizando danos (STAFFA JR et al., 2023).

O sistema web proposto, associado a um drone e integrado ao reconhecimento automático de parte das patologias do telhado, permite aumentar a transparência da vistoria, pois facilita o compartilhamento de dados com os gestores. Utilizar um sistema responsável por armazenar, processar e integrar documentos e dados facilita o processo, tornando-o mais confiável (STAFFA JR et al., 2023).

Após os testes de reconhecimento das patologias utilizando imagens originais e artificiais no software Custom Vision, foi possível testar dez classes de patologia, obtendo um percentual de 77,08% de acerto nos testes de identificação dessas patologias de cobertura em imagens de cobertura obtidas por drones para assistência técnica. Dessa forma, a plataforma web embarcada proposta com reconhecimento automático de parte das patologias possibilita aumentar a transparência na identificação das patologias, simplificando as etapas de inspeção a partir da coleta rápida de dados com drone e

processamento automático de imagens com inteligência artificial. Assim, reduzindo o tempo e o custo de realização de inspeções de cobertura, agilizando a entrega de laudos e aplicando ações corretivas (STAFFA JR et al., 2023).

5.3 UM MODELO DE GESTÃO DA INFORMAÇÃO PARA ATENDER RECLAMAÇÕES DE MORADORES POR MEIO DE TÉCNICAS DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL - BAZZAN ET AL. (2023)

Bazzan et al. (2023) desenvolveram o modelo de gestão de informações para reclamações de clientes em projetos residenciais de uma construtora. A empresa executa projetos residenciais e tem um departamento de serviço de garantia bem estruturado que lida com reclamações, fornecendo serviços de reparo durante o período de responsabilidade do produto de cinco anos. Os projetos considerados nesta investigação foram do segmento de mercado de classe média e média-alta. A abordagem *Natural Language Processing*⁶ (NLP) foi usada para identificar os termos mais frequentes e construir um menu de palavras para os clientes reclamarem. Algoritmos de aprendizado de máquina também foram programados para classificar os textos de reclamações e sugerir o tipo de defeito a ser investigado pela equipe técnica. O modelo forneceu dados que puderam melhorar a compreensão de defeitos de construção e fornecer algum grau de automação em processos de serviço de garantia (BAZZAN et al., 2023). Assim, o modelo proposto pôde ajudar a melhorar tanto os serviços de reclamação do cliente quanto a qualidade do produto, o que pode melhorar a imagem da indústria na sociedade, bem como eliminar desperdícios e reduzir o impacto ambiental das atividades de construção (BAZZAN et al., 2023).

⁶ É uma área da inteligência artificial que permite que computadores compreendam, gerem e manipulem a linguagem humana.

5.4 MODELO DE CARBONATAÇÃO PARA CONCRETO DE CINZA VOLANTE BASEADO EM REDE NEURAL ARTIFICIAL: DESENVOLVIMENTO E ANÁLISE PARAMÉTRICA - FÉLIX, CARRAZEDO E POSSAN (2021)

Félix, Carrazedo e Possan (2021) utilizaram uma Rede Neural Artificial (RNA)⁷ com algoritmo de retropropagação para analisar a profundidade de carbonatação de concretos que contêm adição de cinza volante. O processo proposto mostra que a técnica é bastante simples e confiável para mapear comportamentos físico-químicos, mesmo os mais complexos, como é o caso da difusão de CO₂ na matriz do concreto. Considerando os resultados do desenvolvimento e treinamento da RNA, 80% das redes treinadas apresentaram erro máximo abaixo de 5,0 mm (profundidade de carbonatação) e erro médio de 3,0 mm, mostrando que, independentemente da topologia empregada, essa técnica produziu modelos com representação consistente do fenômeno de carbonatação. O modelo desenvolvido é capaz de representar coerentemente a profundidade de carbonatação do concreto em função do consumo de cimento, teor de adição de cinza volante, umidade relativa, relação a/c e concentração de CO₂ do ambiente de exposição, refletindo, portanto, fielmente a influência de vários parâmetros envolvidos no fenômeno. O modelo proposto pode ser usado para estimar a profundidade de carbonatação para qualquer instante da vida útil do concreto. Também pode ser usado para prever o tempo de início da corrosão, quando o cobrimento de concreto estiver totalmente carbonatado (FÉLIX, CARRAZEDO e POSSAN, 2021).

5.5 CARACTERIZAÇÃO DO TEOR DE VAZIOS DE AR EM MATRIZES DE AGREGADOS MIÚDOS EM MISTURAS DE CONCRETO ASFÁLTICO - ENRÍQUEZ-LEÓN ET AL. (2021)

Enríquez-León et al. (2021) propuseram um critério para determinar o conteúdo de vazios de ar que deve ser adotado na fabricação de espécimes de teste isolados de matriz de agregado fino que sejam representativos do material

⁷ É um modelo de computação que usa o aprendizado de máquina para aprender a partir de dados, inspirado no funcionamento do cérebro humano.

existente dentro das misturas de concreto asfáltico correspondentes. Para esse fim, foi realizado um exame abrangente dos vazios de ar usando tomografia computadorizada de raios X (micro-CT) e processamento de imagem digital com técnicas de inteligência artificial. Os resultados indicam que o procedimento proposto pode fornecer ideias importantes sobre as características volumétricas das misturas de matriz de agregado fino. Isso pode, por sua vez, contribuir para a melhoria dos protocolos de projeto de matriz de agregado fino e resultar em caracterizações mais precisas do comportamento deste constituinte relevante das misturas asfálticas.

Assim, os estudos brasileiros analisados estão voltados para estudo de materiais, patologias, projeto e gestão, corroborando com os estudos internacionais que também aplicaram a IA com as mesmas finalidades no setor da construção. Porém ainda não se pode dizer que há uma tendência única, pois a utilização da IA na engenharia civil se mostrou abrangente ainda sendo testada em diversos seguimentos dentro do setor.

6 CONCLUSÃO

O primeiro estudo publicado sobre a temática foi em 1988 e desde então todos os anos cresceram o interesse nessa área, pois a quantidade de publicações só aumentou, principalmente entre 2018 e 2024. Foi possível identificar que a IA tem sido estudada na área de estruturas, barragens, projetos, confecção de concretos, manutenção e monitoramento de obras. Além disso, a IA pode potencializar os resultados no setor, contribuindo para maior produtividade, cumprimento dos prazos e custos, levando o setor para um outro patamar.

Os estudos brasileiros comprovam que a IA tem potencial de desenvolvimento na construção civil do país, mesmo que de modo tímido, já vem sendo aplicada e apresentando resultados positivos ao setor.

É importante destacar que ainda não existe um padrão de uso da IA no setor, entretanto, os estudos, tanto nacionais quanto internacionais, vem usando das diversas ferramentas e algoritmos dispostos em diferentes segmentos da construção civil.

Apesar de todas as vantagens, a IA ainda é pouco empregada no setor. Nesse sentido, mais estudos precisam ser desenvolvidos., Sugestão de pesquisa futura: realizar pesquisa em obras da cidade de Uberlândia para verificar a utilização de sistemas baseados em IA na construção de empreendimentos.

REFERÊNCIAS

ABIOYE, S. O. et al. Artificial intelligence in the construction industry: a review of present status, opportunities and future challenges. *Journal Of Building Engineering*. Volume 44, december 2021, 103299. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103299>.

ASHLOCK, D. *Evolutionary Computation for Modeling and Optimization*. New York: Springer, 2006.

BAZZAN, J. et al. An Information Management Model for Addressing Residents' Complaints through Artificial Intelligence Techniques. *Buildings* 2023, 13, 737. <https://doi.org/10.3390/buildings13030737>.

BEHERA, S. K. et al. Utilization of mill tailings, fly ash and slag as mine paste backfill material: Review and future perspective. *Construction and Building Materials*. Volume 309, 22 November 2021, 125120. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125120>.

BOJE, C. et al. Towards a semantic Construction Digital Twin: Directions for future research. *Automation In Construction*. Volume 114. 2020. DOI: 10.1016/j.autcon.2020.103179.

CUPERTINO, F. T. Impactos da inteligência artificial na economia mundial. Monografia (Bacharel em Ciências Econômicas). Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia. 2023.

DARKO, A. et al. Artificial intelligence in the AEC industry: Scientometric analysis and visualization of research activities. *Automation in Construction*. Volume 112, April 2020, 103081. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103081>.

DELGADO, J. M. D. Robotics and automated systems in construction: Understanding industry-specific challenges for adoption. *Journal of Building Engineering*. Volume 26, November 2019, 100868. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.100868>.

DISCHER, M. G.; SANTOS, G. J.; TELES, E. O. Utilização de Inteligência Artiicial para Análise e Dimensionamento de Estruturas em Concreto Armado: uma prospecção tecnológica. *Cadernos de Prospecção – Salvador*, v. 15, n. 4, outubro a dezembro, 2022, p. 1354-1368.

DOMINGOS, P. O. *O algoritmo mestre: como a busca pelo algoritmo de machine learning definitivo recriará nosso mundo*. São Paulo: Novatec, 2017.

ENRÍQUEZ-LE'ON, A. J. et al. Characterization of the air void content of fine aggregate matrices within asphalt concrete mixtures. *Construction and Building Materials* 300 (2021) 124214.

FÉLIX, E. F.; CARRAZEDO, R.; POSSAN, E. Carbonation model for fly ash concrete based on artificial neural network: Development and parametric analysis. *Construction and Building Materials* 266(2021)121050.

FENG, D. A. et al. Machine learning-based compressive strength prediction for concrete: An adaptive boosting approach. *Construction And Building Material*. Volume 230. 2020. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117000.

FLORES, D. A. N. BIM evolucionário: aplicabilidade de algoritmo de inteligência artificial no desenvolvimento de projetos de edificação. Dissertação (Mestre em Construção Civil). Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2021.

GALVÃO, M. C. B.; Ricarte, I. L. M. Revisão sistemática da literatura: conceituação, produção e publicação. *LOGEION: Filosofia da informação*, Rio de Janeiro, v. 6 n. 1, p.57-73, set.2019/fev. 2020.

GARCIA, A. C. Ética e inteligência artificial. *Computação Brasil*, n. 43, p. 14-22, 2020.

HODGE, A. Alan Turing: The Enigma. Princeton: Princeton University Press, 2014.

KAUFMAN, D. A inteligência artificial irá suplantará a inteligência humana? Coleção Interrogações. Lúcia Santaella (coord.). São Paulo: Estação das Letras e Cores Editora, 2019.

LAM, B. et al. Ten questions concerning active noise control in the built environment. *Building and Environment*. Volume 200, August 2021, 107928. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107928>.

LI, Y. Deep reinforcement learning. arXiv:1810.06339v1 [cs.LG] 15 Oct 2018.

LU, Q. et al. Developing a Digital Twin at Building and City Levels: Case Study of West Cambridge Campus. Publication: *Journal of Management in Engineering*. 2020.

MARIANO, A. M.; ROCHA, M. S. Revisão da Literatura: Apresentação de uma Abordagem Integradora. In *AEDM International Conference—Economy, Business and Uncertainty: Ideas for a European and Mediterranean industrial policy*. Reggio Calabria (Italia). 2017.

MCKINSEY & COMPANY. McKinsey Technology Trends Outlook 2022. 2022.

MCKINSEY GLOBAL INSTITUTE. Reinventing Construction: a route to higher productivity. McKinsey & Company. Fev. 2017. Disponível em: <https://www.mckinsey.com/~media/McKinsey/Industries/Capital%20Projects%20and%20Infrastructure/Our%20Insights/Reinventing%20construction%20through%20a%20productivity%20revolution/MGI-Reinventing-Construction-Fullreport.ashx>. Acesso em: 05 mar. 2024.

NASER, M. Z. An engineer's guide to eXplainable Artificial Intelligence and Interpretable Machine Learning: Navigating causality, forced goodness, and the false perception of. Automation in Construction. Volume 129, September 2021, 103821. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103821>.

OSCAR, L. H. et al. Generative design in civil construction: a case study in Brazil. Frente. Construído Environ., 04 de junho de 2023. Sec. Projeto e Construção Sustentáveis. Volume 9 – 2023. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2023.1150767>.

PAN, Y.; ZHANG, L. M. Roles of artificial intelligence in construction engineering and management: A critical review and future trends. Automation In Construction. Volume 122. 2021. DOI: 10.1016/j.autcon.2020.103517.

POZZEBON, E.; FRIGO, L. B.; BITTENCOURT, G. Inteligência artificial na educação universitária: quais as contribuições. Revista do Centro de Ciências da Economia e Informática da Universidade da Região da Campanha Urcamp, Editora da URCAMP-EDIURCAMP, v. 8, n. 13, p. 34-41, 2004.

SANTOS, V. S. et al. Prospecção Bibliométrica e Patentária de Tecnologias com Inteligência Artificial Aplicáveis a Smart Cities. Cadernos de Prospecção, Salvador, v. 15, n. 2, p. 523-540, 2022.

SARDUY, J. R. G.; et al. Determining cement ball mill dosage by artificial intelligence tools aimed at reducing energy consumption and environmental impact. Ing. Investig., Bogotá, v. 33, n. 3, Sept.-Dec. 2013. ISSN 0120-5609.

SILVA, R. Inteligência Artificial. Enciclopédia da Conscienciologia. Amigos da Enciclopédia Editares. 2013. <http://repositorios.org/jspui/handle/123456789/3737>.

STAFFA, L. D. JR et al. Web platform for building roof maintenance inspection using UAS and artificial intelligence. International Journal Of Building Pathology And Adaptation. Doi 10.1108/ijbpa-12-2022-0186.

TAVARES, L. A.; MEIRA, M. C.; DO AMARAL, S. F. Inteligência Artificial na Educação: Survey. Brazilian Journal of Development, v. 6, n. 7, p. 48699-48714, 2020.

TEIXEIRA, F. S.; TEIXEIRA, P. S.; ROCHA, C. A. M. Estudo Prospectivo Sobre Inteligência Artificial Aplicada ao Setor da Construção Civil. Cadernos de Prospecção – Salvador, v. 13, n. 4, p. 1134-1146, setembro, 2020.

TURING, A. M. Computing Machinery and intelligence. In: Parsing the turing test. Springer, Dordrecht, 2009.

XI, Y. M. et al. The promise of implementing machine learning in earthquake engineering: A state-of-the-art review. Sage Journals. Volume 36, Issue 4. <https://doi-org.ez34.periodicos.capes.gov.br/10.1177/8755293020919419>.

ZHANG, D. et al. Modeling and simulating of reservoir operation using the artificial neural network, support vector regression, deep learning algorithm. Journal Of Hydrology. V. 565, october 2018, pages 720-736. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.08.050>.

ZHANG, P. et al. An AIoT-based system for real-time monitoring of tunnel construction. Tunnelling and Underground Space Technology. Volume 109, March 2021, 103766. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2020.103766>.