ANÁLISE DAS OPORTUNIDADES OFERECIDAS PELA ASSOCIAÇÃO BIM-IA À PRODUÇÃO DO AMBIENTE CONSTRUÍDO

Analysis of the opportunities offered by the BIM-AI association to the production of the built environment

Monica Santos Salgado
Universidade Federal do Rio de Janeiro | Rio de Janeiro, RJ | monicassalgado@fau.ufrj.br

RESUMO

As possibilidades oferecidas pelas tecnologias digitais se desenvolvem num ritmo além da capacidade da indústria da construção civil absorver mudanças. Dessa forma, é pertinente considerar alternativas para auxiliar (e acelerar) esse processo. Este artigo aborda as alternativas para associar a metodologia BIM (*Building Information Modeling*) à inteligência artificial (IA) – tecnologia digital que se desdobra em alternativas como: aprendizado de máquinas (*Machine Learning*), modelos de linguagem em grande escala (*Large Language Models*), entre outras. Realizou-se uma busca em bases nacionais e estrangeiras utilizando os *strings {artificial intelligence}* e {BIM}. Na base Scopus foram encontrados 755 documentos que, após os filtros, excluindo artigos de áreas não afins e palavras-chave selecionadas, resultaram em 95 documentos relacionados à indústria da construção civil. Os documentos foram analisados e os resultados indicaram alternativas da associação BIM+IA, especialmente na: gestão (projeto e obra), digitalização/gêmeos digitais, gestão das informações, riscos/segurança do trabalho, e produtividade/pré-fabricação. Entre os temas emergentes que podem aumentar a produtividade no processo de projeto e obra destacam-se os sistemas de comunicação/conversação, incorporando a linguagem natural ao processo de análise e, portanto, facilitando a interação pessoas-tecnologia. O levantamento realizado revelou um número reduzido de artigos, indicando a necessidade de se pensar novas investidas.

Palavras-chave: BIM; Inteligência Artificial; Tecnologias digitais; Modernização da Construção.

ABSTRACT

The possibilities offered by digital technologies develop at a pace beyond the ability of the construction industry to absorb changes. Therefore, it is pertinent to consider alternatives to assist (and accelerate) this process. This paper focuses on alternatives to associate BIM (Building Information Modeling) methodology with Artificial Intelligence (AI) - digital technology that unfolds in possibilities such as: Machine Learning (ML), Large Language Models (LLM), among others. A search on national and foreign bases was performed using strings {artificial intelligence} and {BIM}. In the Scopus base, 755 documents were found that, after the filters, excluding articles from non-related areas and selected keywords, resulted in 95 documents related to the civil construction industry. The documents were analyzed and the results indicated alternatives for the BIM+IA association, especially in: management (project and construction), digitalization/digital twins, information management, risks/work safety, and productivity/prefabrication. Among the emerging themes that can increase productivity in the design and construction process, communication/conversation systems stand out, incorporating natural language into the process and, therefore, facilitating people-technology interaction. The survey revealed a reduced number of papers, indicating the need to think about further investigations.

Keywords: BIM; Artificial Intelligence; Digital Technologies; Construction modernization.

1 INTRODUÇÃO

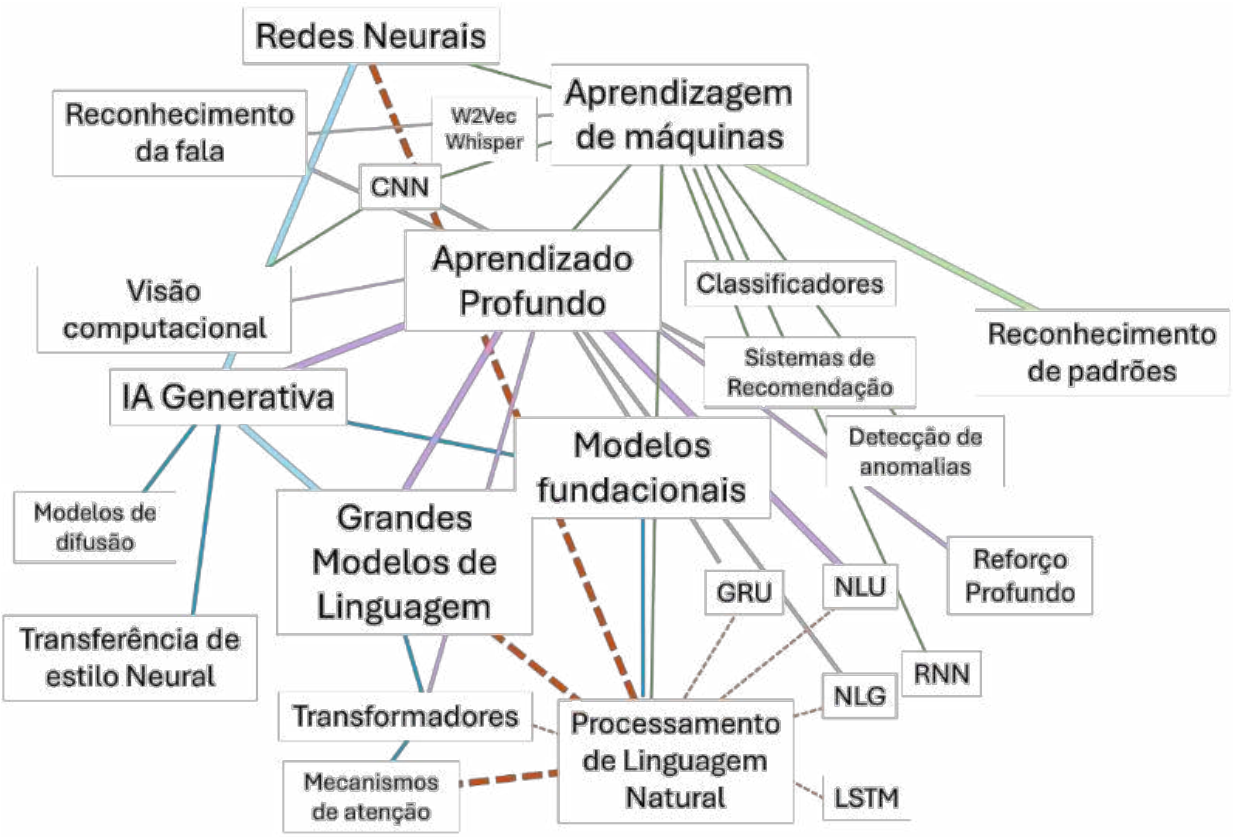
O avanço das tecnologias digitais, tem gerado impacto em todos os setores da economia. Recentes pesquisas (Xu *et al.*2021; Ziatdinov *et al.*, 2024; Gamboa-Rosales; Lópes-Robles, 2023) apontam para o início da 5° Revolução Industrial, que abrange a noção de colaborações harmoniosas entre humanos e máquinas, com foco específico no bem-estar de múltiplos stakeholders (ou seja, sociedade, empresas, funcionários, clientes). Este novo enfoque pode abrir caminho para uma (r)evolução no pensamento e na alavancagem de colaborações para um maior bem-estar social (Noble *et al*., 2022). De acordo com o Fórum Econômico Mundial, as possibilidades a serem exploradas estarão focadas nas pessoas e não tanto nas tecnologias em si.

> À medida que progredimos e testemunhamos os benefícios da quarta revolução industrial, estamos caminhando em direção à quinta, que resulta da convergência tecnológica entre os principais domínios industriais, permitindo olhar para um futuro em que máquinas com inteligência cognitiva realizam tarefas que correspondem à capacidade humana, ao mesmo tempo em que oferecem eficiência ao nível da máquina (WEF, 2025).

Sobre o futuro do trabalho, especificamente na construção civil brasileira, a partir dos anos 2000 a metodologia BIM (*Building Information Modeling*) tem se destacado como uma inovação disruptiva. Deutsch (2018) destaca seu uso desde a coordenação e fabricação, estimativa de custo, programação e controle de produção, simulação de desempenho, entre outras, até aplicações relacionadas à modelagem das condições locacionais e análise do sítio, programação da obra, avaliação dos requisitos para certificação ambiental, revisão de projeto, fabricação digital, gerenciamento de ativos e modelagem das condições da edificação ao longo do tempo. O autor entende que o processo BIM representa o que muito em breve será conhecido pela abordagem do “software de tudo” representando o processo de convergência entre as tecnologias digitais.

As possibilidades oferecidas pelas tecnologias digitais alteram as práticas de trabalho. Salgado-Reyes *et al*. (2024) entendem que a Inteligência artificial (IA) e transformação digital são dois conceitos intimamente relacionados que estão mudando a maneira como empresas e organizações operam e competem no mercado atual. A figura 1 ilustra as interdependências entre alguns campos existentes e emergentes da IA.

Figura 1: Exemplos de interdependências de diferentes campos da IA



Fonte: Adaptado e traduzido de Government Digital Service, 2025

A definição mais simples sobre inteligência artificial (IA) refere-se à capacidade de sistemas computacionais de executar tarefas que normalmente requerem inteligência humana (Dias, Santos e Diniz, 2024). A aprendizagem de máquina (*machine learning*), um dos desdobramentos da IA, consiste num método de aprendizado a partir de dados e experiências passadas para identificar regras operacionais. O aprendizado profundo (*deep learning*) é um subconjunto da aprendizagem de máquina, que aplica redes neurais multicamadas para simular funções de neurônios humanos, e alcançou avanços notáveis nos campos de imagens, vídeos e fala (Hsieh *et al*., 2024). Os grandes modelos de linguagem (*Large Language Models* - LLMs) surgiram como sistemas de IA de ponta, que podem processar e gerar texto com comunicação coerente e generalizar para múltiplas tarefas (Naveed, *et al.* 2023). Correspondem a uma classe de modelos avançados de aprendizagem de máquinas, projetados para entender e gerar linguagem semelhante à humana por meio de pré-treinamento em grandes quantidades de dados de texto (Zheng e Fischer, 2023).

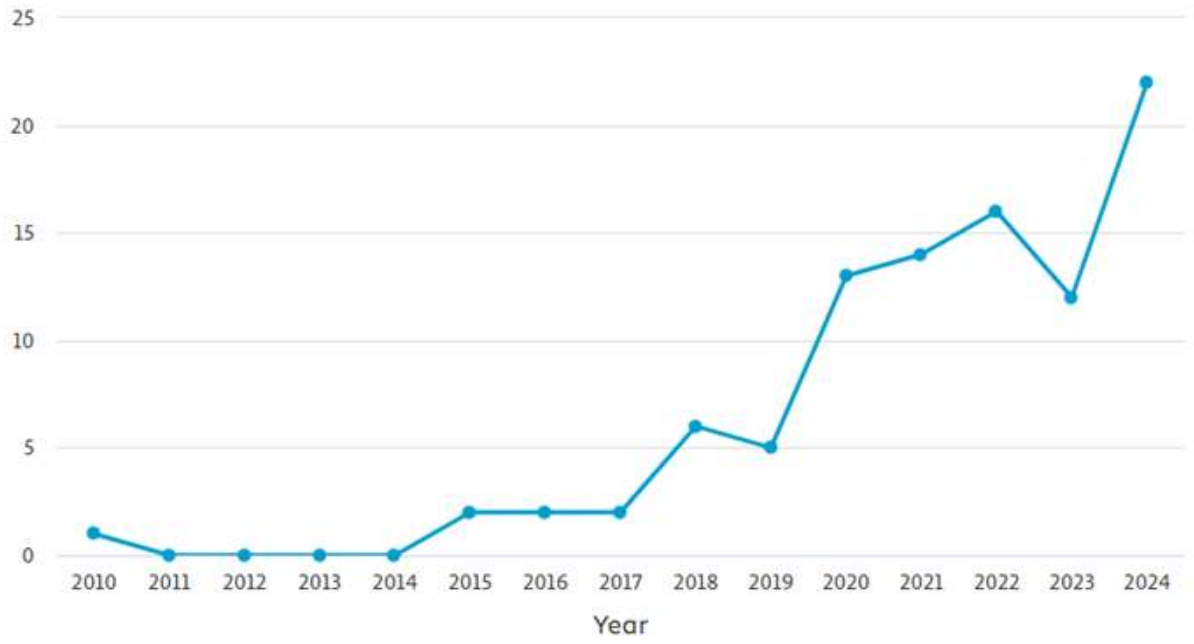
Entende-se que a ampliação das possibilidades oferecidas pelo BIM está relacionada à associação com as alternativas oferecidas pela IA. Dessa forma, a pesquisa teve como objetivo mapear aplicações práticas e tendências da associação BIM+IA, com base na literatura científica, visando subsidiar estratégias de adoção tecnológica para a modernização da construção no âmbito da indústria 4.0.

2 METODOLOGIA

Na primeira parte da pesquisa foram analisados três periódicos nacionais da área, de forma a identificar as publicações sobre o tema. Foram utilizadas as palavras-chave {Inteligência Artificial} e {BIM}. Os três periódicos analisados (Ambiente Construído, Revista PARC e Revista Gestão & Tecnologia de Projetos) não retornaram resultados. Usando apenas {Inteligência Artificial} foram identificados 14 artigos (um editorial), mas nenhum sobre as possibilidades oferecidas pela associação BIM+IA.

Considerando o reduzido número de artigos, realizou-se a busca na base Scopus. Foram utilizados os *strings* {*Artificial Intelligence*} e {BIM}. Como resultado foram encontrados 755 documentos. Observa-se o crescente interesse no tema, especialmente a partir de 2017, conforme ilustra a Figura 2. Em seguida fez-se a seleção usando o filtro por área do conhecimento, limitando às ciências sociais, engenharia e ciências da computação. Esses filtros foram considerados dada sua relação com o objetivo da pesquisa. O resultado retornou 416 documentos. O filtro seguinte refere-se à seleção apenas dos artigos publicados em periódicos e eventos, livros e capítulos de livros. Com este filtro, o total de documentos reduziu para a 359. O último filtro utilizado foi por palavra-chave, conforme descritas na Figura 2, totalizando 95 documentos (o eixo y indica o número de publicações).

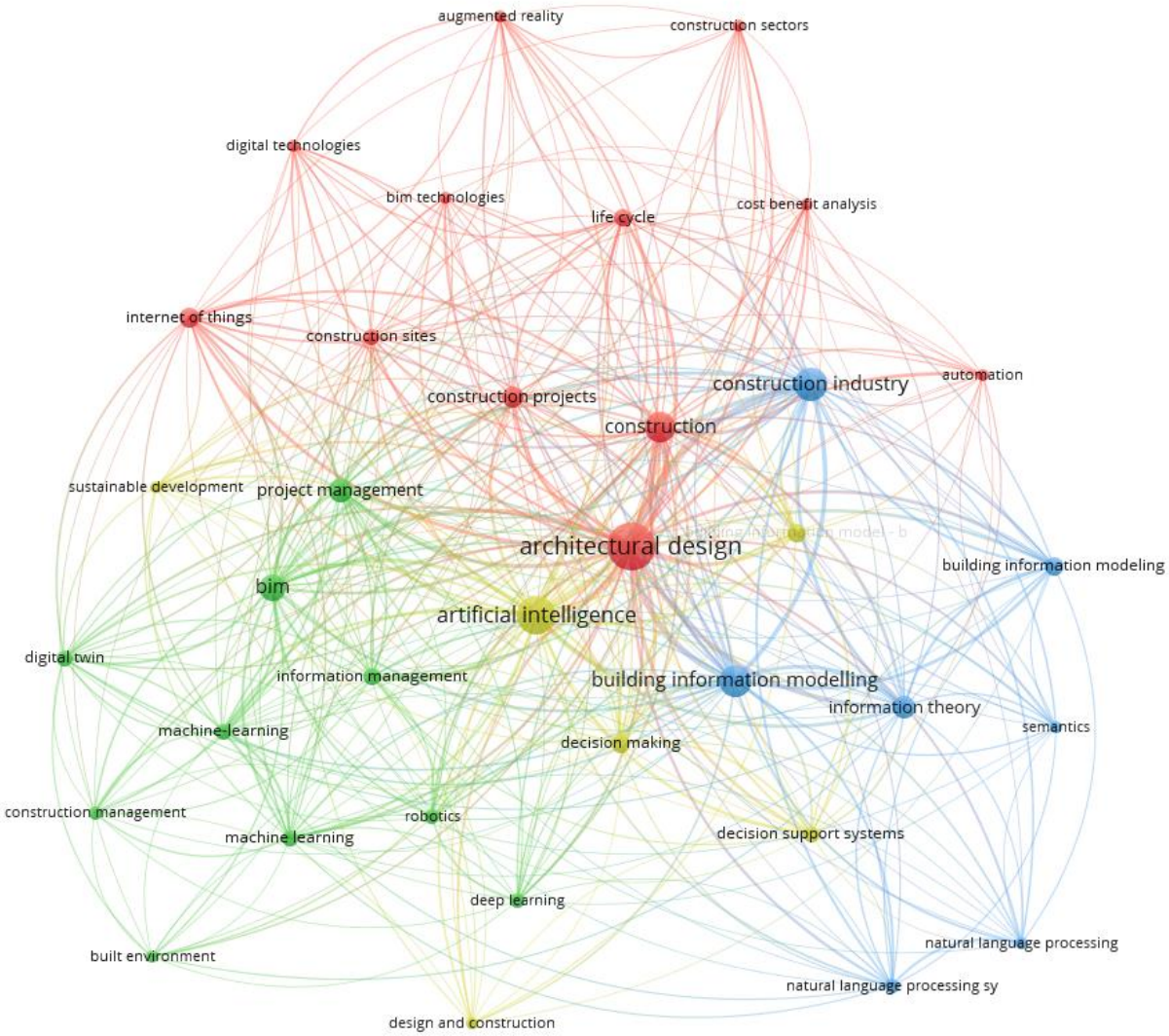
Figura 2: Resultado busca Scopus – publicações relacionando BIM+IA tendo como palavras-chave “Construction industry”, Construction”, “Construction project”, “Construction sites”, “Construction management”, “Design and Construction”, “Built environment”, “Construction process”, Construction safety” e “Construction monitoring”



Fonte: os autores, extraído da base Scopus

O mapa da Figura 3 foi gerado a partir do VOSviewer analisando as ocorrências das palavras-chave com no mínimo 6 repetições, nos 95 artigos. Observam-se algumas redundâncias: *BIM/Building Information Modeling/Building Information Modelling/Building Information Model*; *machine learning/machine-learning*; *natural language processing/natural language processing systems*. A expressão "*architectural design*" é a mais frequente, seguida de BIM (nas suas diversas formas) e "*artificial intelligence*" – os dois termos que nortearam a busca. Entre as demais expressões, três tecnologias relacionadas às possibilidades oferecidas pela IA chamam a atenção: o aprendizado de máquinas (*machine learning*), o processamento de linguagem natural (*natural language processing*) e a internet das coisas – ou internet de tudo (*internet of things* – IoT) alertando para questões a serem consideradas na prática profissional e no ensino.

Figura 3: VOSviewer com as relações das palavras-chave dos 95 artigos (mínimo 6 repetições)



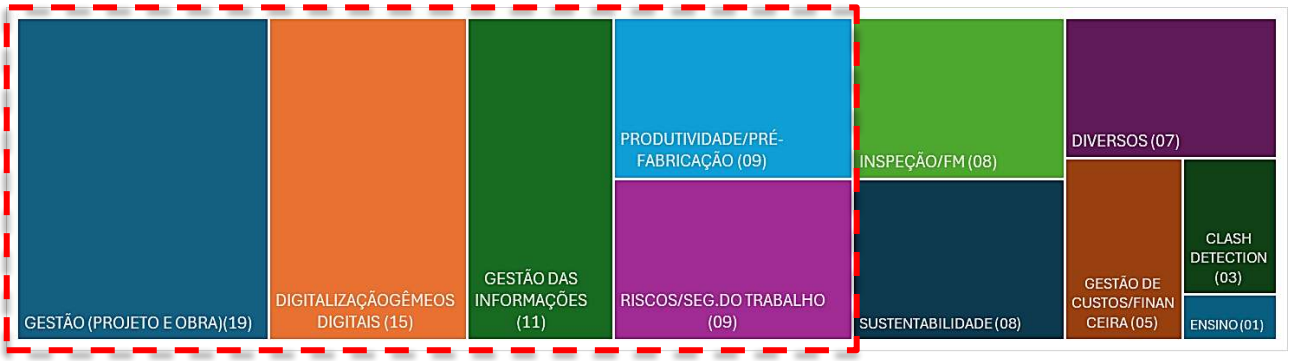
Fonte: Os autores a partir do arquivo extraído da base Scopus

Após esta análise preliminar, realizou-se a leitura dos resumos de todos os artigos para agrupar por afinidade temática. Esta categorização considerou os objetivos destacados pelos autores. Em seguida realizou-se a análise dos documentos completos para identificar tendências na associação BIM+IA.

3 RESULTADOS

A análise dos resumos levou ao agrupamento por afinidade temática nos seguintes temas: gestão (projeto e obra); digitalização/gêmeos digitais; gestão das informações; produtividade/pré-fabricação; gestão de riscos/segurança do trabalho; inspeção/FM (*facilities management*); sustentabilidade; gestão de custos/financeira; *clash detection*; e ensino.

Figura 4: Temas em destaque na associação BIM+IA para a construção civil.



Fonte: Os autores
Nota: O grupo "Diversos" refere-se aos artigos sem um foco definido

Dos 95 artigos, 36 não permitem livre acesso ao texto completo (pela Scopus ou Researchgate) e dois estavam no idioma do periódico onde foram publicados (chinês - *Journal of the China Railway Society*; e turco - *Turkish Journal of Civil Engineering*). Dessa forma, realizou-se a leitura e análise dos 57 artigos completos com livre acesso. Cabe acrescentar que a figura 4 tomou por base a leitura dos resumos de todos os 95 artigos revelados na busca Scopus.

De forma sintética, serão apresentadas as principais tendências nos temas mais explorados pelos artigos completos analisados, quais sejam: gestão (projeto e obra), digitalização/gêmeos digitais, gestão das informações, riscos/segurança do trabalho, e produtividade/pré-fabricação.

4 DISCUSSÃO

Entre os trabalhos relacionados ao tema da **gestão (projeto e obras**), destaque para as pesquisas que exploraram as possibilidades oferecidas pela utilização da tecnologia de reconhecimento de imagem. Hsieh *et al.*, 2024) apresentam a integração da detecção de imagem através da IA com o BIM por múltiplas câmeras, e aplicam um modelo de reconhecimento de imagem para identificar o status de desenvolvimento da construção inserindo as informações com o progresso da obra no modelo BIM.

Núñez-Morales *et al.* (2024) apresentam um método que explora o alinhamento de projeções ortográficas de nuvens de pontos e fotogrametria com desenhos da construção para obter os quantitativos e monitorar o progresso da obra de forma automatizada. Os autores combinam os resultados da captura de imagem através de algoritmos modernos de aprendizado profundo (*deep learning*) e visão computacional. Huda, Jonathan e Nashwan (2019) também propõem um sistema que integra o reconhecimento de imagem de IA, BIM, tecnologia de visualização, com o monitoramento em tempo real do progresso do canteiro de obras.

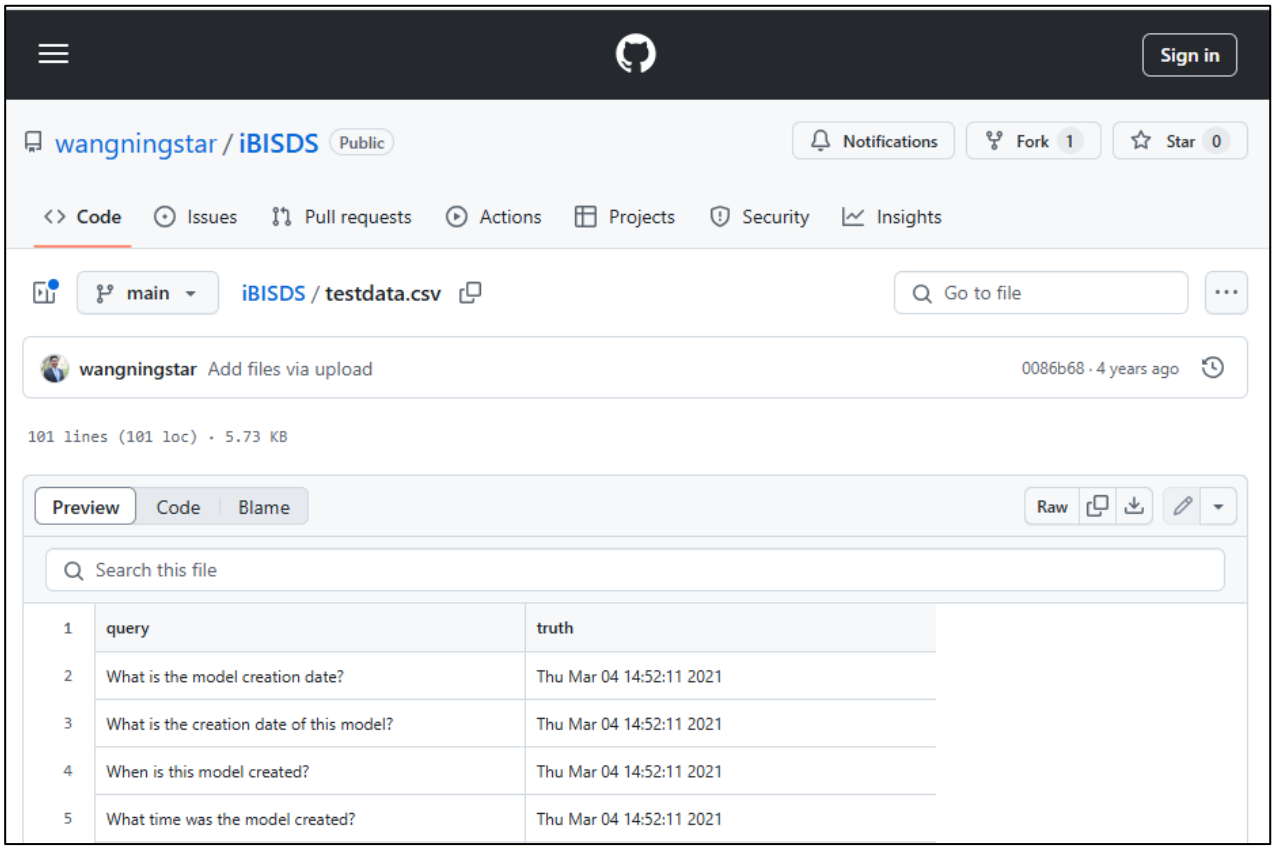
Com outro enfoque, Toniolo e Leon (2017) abordaram a questão da colaboração através da comunicação no ambiente BIM, com a análise dos diálogos que ocorrem durante os estágios iniciais do projeto, dada a complexidade das trocas nestas etapas. As informações geradas podem alimentar modelos computacionais de diálogo com foco no raciocínio prático. Nesse enfoque, Novembri e Rossini (2020) apresentam uma proposta que visa organizar a colaboração no processo de projeto através de simulação computacional usando o método SWARM (enxame de agentes), na qual os edifícios são considerados sistemas que incluem muitos agentes individuais, representados pelas entidades envolvidas no processo de projeto.

As possibilidades oferecidas pela **digitalização/gêmeos digitais** também foram exploradas por diferentes autores. Heaton, e Parlikad (2020) definem os gêmeos digitais como a integração de diferentes tipos de dados sobre um ativo construído, desde dados estáticos, como BIM, até dados dinâmicos, como condição, status operacional e histórico de manutenção em uma única plataforma. Em sua pesquisa, os autores apresentam uma estrutura para a criação de um AIM (*Asset Information Model* – Modelo de Informação do Ativo) para o desenvolvimento de um gêmeo digital (*Digital Twin* - DT), viabilizando uma visão coesa e abrangente dos dados, facilitando o acesso e o gerenciamento das informações entre os diferentes ativos. Pias *et al*. (2024) incomodados com os atrasos nas obras, decidiram elaborar uma metodologia para gerenciar o ambiente construído e/ou a ser construído, integrando gêmeos digitais, BIM, IA e internet das coisas (IoT). A proposta considera fluxos de rede neural transmitidos para árvores de decisão, de forma a apoiar a tomada de decisões para gerenciamento de prioridades. Entre os exemplos com aplicação prática dos gêmeos digitais está a pesquisa de Winter, Bassier e Vergauwen (2022), que propõem a captura de dados utilizando VANTs (Veículos Aéreos Não Tripulados) para melhorar a eficiência das tarefas de monitoramento da construção.

Lu *et al.* (2020) afirmam que, apesar das possibilidades oferecidas, ainda persistem dificuldades sobre as aplicações dos gêmeos digitais, além dos desafios de implementação, incluindo sua integração com alternativas (como BIM, realidade virtual e aumentada, internet das coisas, IA e computação em nuvem). Esta conclusão pode justificar os artigos com a revisão da literatura sobre o tema (Manea *et al.*, 2022; Desai, Sandbhor e Kaushik, 2023) algumas vezes associada com entrevistas junto aos profissionais do setor (Shahzad *et al.*, 2022; Zawada *et al*., 2024).

O destaque entre os artigos que tratam da associação BIM+IA na **gestão das informações** está no uso do processamento de linguagem natural (NLP – *Natural Language Processing*) para melhorar o acesso às informações. A pesquisa de Zheng e Fischer (2023) apresenta um assistente virtual baseado em *prompt* dinâmicos (nomeados BIMS-GPT) que permitem aos usuários a recuperação de informações no modelo BIM usando a linguagem natural. Lin *et al.* (2022) propõem uma comunicação homem-máquina utilizando um modelo de aprendizagem de máquina com técnica de processamento de linguagem natural (NLP) através do sistema BERT[1] (*Bidirectional Encoder Representations from Transformers*) integrado a um *chatbot* móvel com um sistema de perguntas e respostas (Q&A). O sistema BERT também foi explorado por Wang, Issa e Anumba (2021), que também desenvolveram um sistema de perguntas e respostas. Nesta proposta foram coletadas informações básicas, utilizadas para calcular a pontuação e precisão das respostas. O conjunto de dados do teste foi publicado no GitHub conforme ilustra a Figura 5.

Figura 5: Trecho ilustrando a página com publicação dos dados usados no teste da ferramenta



Fonte: Os autores, em consulta à página https://github.com/wangningstar/IfcReader

A proposta de Nabavi *et al*. (2023) apresenta como diferencial uma plataforma que também tem como objetivo facilitar o acesso às informações em modelos BIM. Os autores propõem um módulo de reconhecimento de voz para uma interface mais amigável, permitindo que os usuários façam perguntas usando comandos de voz.

A falta de compatibilidade entre os formatos e padrões BIM e mecanismos de IoT motivou a pesquisa de Al-Sadoon *et al*. (2023) Os autores destacam o potencial das tecnologias da Web Semântica na integração de dados do domínio AECO com dados de outros domínios, e apresentam uma estrutura multimodal desenvolvida com base no padrão ICDD ISO 21597 (norma internacional *Information container for linked*

[1] BERT (Bidirectional Encoder Representations from Transformers) é o algoritmo de aprendizado profundo (Deep Learning) do Google para PLN (Processamento de Linguagem Natural). Ajuda computadores e máquinas a entender a linguagem como nós, humanos, fazemos. (Deep Learning Book. Disponível em <https://www.deeplearningbook.com.br/o-que-e-bert-bidirectional-encoder-representations-from-transformers/>

document delivery — Exchange specification) para integrar vários modelos de dados. Esta solução pode ser particularmente útil considerando a produção de gêmeos digitais, na qual os dados de diversos campos devem ser integrados ao espaço virtual para tornar os modelos mais precisos e próximos da realidade.

No tema **segurança do trabalho e gestão de riscos**, as possibilidades se estendem desde a captura de imagens no acompanhamento das atividades no canteiro de obras buscando situações de risco, até a simulação 4D (gestão do tempo) com a modelagem e simulação 3D para identificar as interações no canteiro, oferecendo uma visão dos riscos potenciais. O artigo de Khan *et al.* (2024) propõe um sistema utilizando técnicas de agrupamento de médias e correspondência de palavras-chave para analisar as principais causas dos acidentes na construção, comparando com os procedimentos de execução das atividades. O uso da simulação na compreensão sobre de que forma diferentes fatores podem contribuir para situações de risco, como colisões e outros acidentes, é o tema do trabalho de Sorbi *et al.* (2024). O objetivo da pesquisa foi apresentar uma estrutura de análise de modelos simulados para estimar variáveis de risco. A estrutura proposta combina BIM – especificamente a gestão do tempo – com a modelagem e simulação baseada em agentes (ABMS - *Agent-Based Modeling and Simulation*), permitindo simular interações complexas entre diferentes entidades (agentes) em um canteiro de obras.

Doherty e Behzad (2020) também estudaram o tema, com a pesquisa em segurança elétrica, e propõem a adoção de algoritmos baseados em IA para interpretar as imagens capturadas (por drones ou outros meios) em busca de situações de risco no canteiro de obras (trabalhadores sem EPI, comportamentos inseguros), sugerindo prioridades de treinamento e educação. Peng e Chua (2017) acrescentam à discussão a preocupação com as operações de guindastes em obras, e apresentam um sistema de suporte à decisão onde BIM é utilizado para planejar operações de içamento de forma segura, incluindo: a modelagem paramétrica do guindaste, a parametrização de tarefas para o içamento, a definição das restrições considerando características da obra/local, e a definição do plano de içamento.

Com ênfase na **produtividade/pré-fabricação**, tem destaque o artigo de Chen *et al.* (2021) descrevendo o processo de construção, em apenas 12 dias, do hospital de Wuhan *Thunder God Mountain/Leishenshan* voltado ao tratamento de pacientes com COVID19. A associação BIM+IA incrementou a produtividade através de melhorias na visualização e planejamento, monitoramento em tempo real e auxílio na tomada de decisão, contribuindo para a eficiência do processo.

A construção em painéis de madeira foi tema do artigo de Tan *et al.* (2020) que apresentou uma proposta de integração entre BIM e os sistemas de manufatura, desenvolvendo um sistema automatizado de suporte à decisão para a fabricação de conjuntos de estruturas de madeira. A pesquisa entende que o BIM tem potencial para aprimorar o projeto para fabricação e montagem (*Design for Manufacturing and Assembly* – DfMA) tanto no nível do objeto quanto do ambiente colaborativo integrado.

Abordando o tema da colaboração em projetos pré-fabricados, Zhou, *et al.* (2024) apresentaram alternativas associando BIM com soluções de IA para aprimorar os detalhes arquitetônicos e otimizar fluxos de trabalho. Os autores destacam seis funções: eficiência do projeto com a automação de tarefas repetitivas, maior precisão entre informações, melhoria na colaboração humano-máquina, racionalização dos elementos do projeto, soluções rápidas para possíveis ajustes a serem feitos para atender às definições dos elementos construtivos, e proposição de modificações.

A construção habitacional pré-fabricada foi tema do artigo de Zhong *et al*. (2015) que explora o conceito de *Physical Internet* - PI (ou Internet Física) - uma abordagem para otimizar e integrar os fluxos logísticos e materiais dentro dos canteiros de obras e cadeias de suprimentos na construção civil – através de um estudo de caso considerando a construção de moradias em Hong Kong. Os autores associaram conceitos relacionados à PI com tecnologias avançadas como o RFID (Identificação por Radiofrequência) e nuvem de dados da *Hong Kong Housing Authority* (HKHA) - entidade governamental responsável pela administração, desenvolvimento e gerenciamento de habitação pública em Hong Kong. A adoção do RFID associado ao BIM também foi tema do trabalho de Xie, Shi e Issa (2011) que analisaram uma construção em *steel framing*, apresentando a estrutura do sistema de suporte à decisão para: transmitir dados, recuperar as informações solicitadas, integrar as informações no processo de análise, e atualizar o modelo BIM quando uma decisão é tomada.

Finalmente cabe mencionar o avanço promovido pela robótica associada à IA para obtenção de dados nos canteiros de obras. Este foi o tema do artigo de Prieto, Nikolaos e Borja (2023). A proposta enfatiza a importância de ter informações prévias sobre o ambiente de construção, o que pode ser obtido a partir dos modelos BIM, aumentando significativamente a eficiência dos sistemas robóticos.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As possibilidades oferecidas pelas tecnologias digitais à indústria da construção civil são inúmeras, não sendo possível abordar todos os aspectos num único artigo. A contribuição deste trabalho está na apresentação dos destaques em relação ao tema, tomando por base as referências bibliográficas consultadas.

As inovações identificadas permitem chegar a duas conclusões principais. Primeira: o reconhecimento de mecanismos que permitam o trabalho colaborativo como alternativa para viabilizar o compartilhamento de conhecimento entre profissionais de áreas distintas em benefício à qualidade na produção do ambiente construído. Não será possível para um único profissional dominar aspectos fundamentais de diferentes setores (neste artigo: arquitetura, construção civil e engenharia da computação). Os trabalhos apresentados, de maneira geral, indicam profissionais que uniram conhecimentos de diferentes áreas para desenvolver e explorar as alternativas oferecidas. Cada pesquisa tratou de um aspecto específico do processo de projeto e produção de obra para apresentar soluções explorando a associação BIM+IA.

Segunda: a forma de atuação no setor de AECO está mudando radicalmente com as tecnologias digitais. Conforme destacam Kemppainen,Tanja e Rauno (2024) um dos principais desafios à digitalização da construção está na capacitação da mão de obra. Daí a necessidade de investir na capacitação contínua dos docentes das instituições de ensino, para que possam orientar apropriadamente os profissionais do setor.

Entende-se que sem uma base teórica sólida não será possível dar continuidade ao processo de digitalização da construção civil. Daí a importância das pesquisas apresentadas, seus casos estudados e propostas metodológicas. A adoção inteligente das ferramentas digitais pode trazer benefícios relacionados à qualidade, produtividade, redução do retrabalho e desperdício, com a com a consequente aceleração das obras, sustentabilidade e a conquista de novos mercados. Se por um lado as tecnologias digitais podem substituir determinadas atividades profissionais, por outro abrem novas oportunidades que precisam ser identificadas e exploradas visando à definição de estratégias para o setor.

6 AGRADECIMENTOS

A autora agradece o apoio recebido do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq.

REFERÊNCIAS

ALMATARED, Manea et al. Digital Twin in the Architecture, Engineering, and Construction Industry: A Bibliometric Review. In: CONSTRUCTION RESEARCH CONGRESS 2022, 2022, **Proceedings [...].**. [S.l.]. [S.l.]: American Society of Civil Engineers (ASCE), 2022. p. 670–677. Disponível em: https://doi.org/10.1061/9780784483961.070. Acesso em: 21 mar. 2025

AL-SADOON, Nidhal; SCHERER, Raimar J.; MENZEL, Karsten. Multimodel Framework for Digital Twin Empowerment. In: AL-SADOON, Nidhal; SCHERER, Raimar J.; MENZEL, Karsten (Ed.). **Advances in Information Technology in Civil and Building Engineering**. Cham: Springer, p. 561–570. ISBN 978-3-031-35398-7. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-3-031-35399-4_38. Acesso em: 21 mar. 2025

AN, Shi; MARTINEZ RODRIGUEZ, Pablo; AL-HUSSEIN, Mohamed; AHMAD, Rafiq. BIM-based decision support system for automated manufacturability check of wood frame assemblies. **Automation in Construction**, v. 111, art. 103065, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.103065. Acesso em: 25 mar. 2025.

CHEN, Ling-Kun et al. Modular composite building in urgent emergency engineering projects: A case study of accelerated design and construction of Wuhan Thunder God Mountain/Leishenshan hospital to COVID-19 pandemic. **Automation in Construction**, v. 124, p. 103555, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103555. Acesso em: 25 mar. 2025.

CHERNYSHEV, Denys et al. Digital Object Detection of Construction Site Based on Building Information Modeling and Artificial Intelligence Systems. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER SCIENCE AND INFORMATION TECHNOLOGIES, 2022, 2022, **Proceedings [...].** [S.l.]. [S.l.]: [s.n.], 2022. p. 1–6. Disponível em: https://doi.org/10.1109/CSIT56902.2022.10000717. Acesso em: 21 mar. 2025.

DAWOOD, Huda; SIDDLE, Jonathan; DAWOOD, Nashwan. Integrating IFC and NLP for automating change request validations. **Journal of Information Technology in Construction**, v. 24, p. 540–552, 2019. Disponível em: https://www.itcon.org/2019/30. Acesso em: 25 mar. 2025.

DE WINTER, Heinder; BASSIER, Maarten; VERGAUWEN, Maarten. Digitisation in road construction: automation of as-built models. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences – **ISPRS**

Archives, v. XLVI-5/W1-2022, p. 69–76, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVI-5-W1-2022-69-2022. Acesso em: 21 abr. 2025.

DESAI, Pradnya; SANDBHOR, Sayali; KAUSHIK, Amit. AI and BIM-based construction defects, rework, and waste optimization. In: PROCEEDINGS OF THE 5TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON EMERGING SMART COMPUTING AND INFORMATICS (ESCI 2023), 2023, **Proceedings [...].** Pune, Índia. Piscataway: IEEE, 2023. p. 1–6. ISBN 978-1-6654-7524-2. DOI: 10.1109/ESCI56872.2023.10099726. Acesso em: 21 abr. 2025.

DEUTSCH, Randy. **Convergence: The Redesign of Design**.ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 240 p. ISBN 978-1-119-25621-2

DIAS, A.M.; SANTOS, L.C.G.S.; DINIZ, H.A.G. Inteligência artificial na engenharia civil. In: SOUZA, Ednilson Sergio Ramalho de (org.). **Coleção pesquisas em temas de engenharias**. Belém: RFB, 2023. p. 217-243. DOI: 10.46898/rfb.239965b3-5d6a-49eb-8c06-7b6be32468e4.

DOHERTY, Mike; ESMAEILI, Behzad. Application of Artificial Intelligence in Electrical Safety. IEEE Transactions on Industry Applications, **Proceedings [...].** v. 58, n. 4, p. 4535–4543, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1109/TIA.2022.3145678. Acesso em: 21 abr. 2025.

GAMBOA-ROSALES, Nadia Karina; LÓPEZ-ROBLES, José Ricardo. Evolução da Indústria 4.0 para a Indústria 5.0: Avaliação da estrutura concetual e perspectivas de um campo emergente. **Transinformação**, v. 35, 2023. Disponível em: https://periodicos.puc-campinas.edu.br/transinfo/article/view/7319. Acesso em: 24 jun. 2025

GOVERNMENT DIGITAL SERVICE. **Artificial Intelligence Playbook for the UK Government**. Fevereiro de 2025. Disponível em: https://www.gov.uk/government/publications/ai-playbook-for-the-uk-government/artificial-intelligence-playbook-for-the-uk-government-html. Acesso em: 21 mar. 2025.

HEATON, James; PARLIKAD, Ajith Kumar. Asset Information Model to support the adoption of a Digital Twin: West Cambridge case study. **IFAC-PapersOnLine**, v. 53, p. 366-371, 2020.

HSIEH, Chang-Cheng; CHEN, Hung-Ming; CHEN, Wan-Yu; WU, Ting-Yu. Integration of Construction Progress Monitoring Results using AI Image Recognition from Multiple Cameras onto a BIM. 41st International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC), **Proceedings [...]** Lille, França, 2024. p. 691–698. ISBN 978-0-6458322-1-1. DOI: https://doi.org/10.22260/ISARC2024/0090.

KEMPAINEN, Annika; KOLLI, Tanja; HEIKKILÄ, Rauno. Development of Online Course for Open Infra Built Environment Information Model. In: PROCEEDINGS OF THE 41ST INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON AUTOMATION AND ROBOTICS IN CONSTRUCTION (ISARC), **Proceedings [...]** Lille, França, 2024. p. 1025–1032. ISBN 978-0-6458322-1-1. DOI: https://doi.org/10.22260/ISARC2024/0133.

KHAN, Numan; NADEAU, Sylvie; PHAM, Xuan-Tan; BOTON, Conrad. Exploring associations between accident types and activities in construction using natural language processing. **Automation in Construction**, v. 164, p. 105457, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105457.

LIKHITRUANGSILP, Veerasak; HANDAYANI, Tantri N.; IOANNOU, Photios G.; YABUKI, Nobuyoshi. A BIM-enabled system for evaluating impacts of construction change orders. Construction Research Congress 2018 **Proceedings [...]** p. 622-631. Disponível em: https://doi.org/10.1061/9780784481264.061. Acesso em: 21 abr. 2025.

LIN, T.; HUANG, Y.; PUTRANTO, A. Intelligent question and answer system for building information modeling and artificial intelligence of things based on the bidirectional encoder representations from transformers model. **Automation in Construction,** [S.l.], v. 134, p. 104053, 2022. DOI: 10.1016/j.autcon.2021.104053.

LU, Qiuchen; XIE, Xiang; PARLIKAD, Ajith Kumar; SCHOOLING, Jennifer; KONSTANTINOU, Eirini. Moving from Building Information Models to Digital Twins for Operation and Maintenance. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Smart Infrastructure and Construction**, [S.l.], v. 7, p. 109-118, 2020. DOI: 10.1680/jsmic.19.00030.

NABAVI, A.; RAMAJI, I. J.; SADEGHI, N.; ANDERSON, A. Leveraging Natural Language Processing for Automated Information Inquiry from Building Information Models. **J. Inf. Technol. Constr**., v. 28, p. 266-285, 2023. Disponível em: https://itcon.org/papers/2023_13-ITcon-Nabavi.pdf Acesso em: 21 abr. 2025

NAVEED, Humza *et al*. A Comprehensive Overview of Large Language Models. **ArXiv**, 2023. Disponível em: https://arxiv.org/abs/2307.06435. Acesso em: 21 abr. 2025.

NOBLE, Stephanie M. MENDE, Martin; GREWAL, Dhruv; PARASURAMAN, A. The Fifth Industrial Revolution: How Harmonious Human–Machine Collaboration is Triggering a Retail and Service [R]evolution. **Journal of Retailing**, v. 98, n. 2, p. 199-208, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jretai.2022.04.003. Acesso em: 21 abr. 2025.

NOVEMBRI, G.; ROSSINI, F. Swarm modelling framework to improve design support systems capabilities. Journal of Information **Technology in Construction**, v. 25, p. 398-415, 2020. Disponível em: https://www.itcon.org/papers/2020_23-ITcon-Novembri.pdf Acesso em: 21 abr. 2025.

NUNEZ-MORALES, Juan D.; JUNG, Yoonhwa; GOLPARVAR-FARD, Mani. Evaluation of Mapping Computer Vision Segmentation from Reality Capture to Schedule Activities for Construction Monitoring in the Absence of Detailed BIM. In: **Proceedings of the 41st International Symposium on Automation and Robotics in Construction** (ISARC 2024). Lille, França, 2024. p. 847–854. DOI: https://doi.org/10.22260/ISARC2024/0110.

PENG, Le; CHUA, David K. H. Decision Support for Mobile Crane Lifting Plan with Building Information Modelling (BIM). **Procedia Engineering**, v. 182, p. 563-570, 2017. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.03.160.

PIRAS, Giuseppe; MUZI, Francesco; TIBURCIO, Virginia Adele. Digital Management Methodology for Building Production Optimization through Digital Twin and Artificial Intelligence Integration. **Buildings,** 2024. Disponível em: https://www.mdpi.com/2075-5309/14/4/543. Acesso em: 21 abr. 2025.

PRIETO, Samuel A.; GIAKOUMIDIS, Nikolaos; GARCIA DE SOTO, Borja. Multiagent robotic systems and exploration algorithms: Applications for data collection in construction sites. **Journal of Field Robotics**, v. 41, p. 1187-1203, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.1002/rob.22177. Acesso em: 21 abr. 2025.

SALGADO-REYES, N.; NICOLADE-RODRIGUEZ, D.; MEZA, J.; VACA-CARDENAS, M. Artificial Intelligence and Its Impact on Digital Transformation Processes. In: ROCHA, Á.; FAJARDO-TORO, C.H.; RODRÍGUEZ, J.M.R. (Eds.). **Developments and Advances in Defense and Security**. Singapore: Springer, 2024. p. 380. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-981-99-8894-5_4. Acesso em: 21 abr. 2025.

SHAHZAD, Muhammad; SHAFIQ, Muhammad Tariq; DOUGLAS, Dean; KASSEM, Mohamad. Digital Twins in Built Environments: An Investigation of the Characteristics, Applications, and Challenges. **Buildings**, v. 12, n. 2, p. 120, 2022. DOI: https://doi.org/10.3390/buildings12020120. Acesso em: 21 abr. 2025.

SINGH, Jyoti; ANUMBA, Chimay J.; CHENG, Jack C. P. Artificial Intelligence-Based Framework for Automating Practical Pipe System Installation Schedule Optimization and Generation. In: ISSA, R. Raymond A. (Ed.). **Computing in Civil Engineering** 2021: Selected Papers from the ASCE International Conference on Computing in Civil Engineering 2021. Virginia, EUA: American Society of Civil Engineers, 2022. p. 859–867. DOI: https://doi.org/10.1061/9780784483893.106.

SORBI, Tommaso; GETULI, Vito; CAPONE, Pietro; RAHIMIAN, Farzad Pour. Agent-based simulation framework for enhanced construction site risk estimation and safety management. **Journal of Information Technology in Construction** (ITcon), v. 29, p. 1219–1238, 2024. DOI: https://doi.org/10.36680/j.itcon.2024.054. Acesso em: 21 abr. 2025.

TAN, Tan; MILLS, Grant; PAPADONIKOLAKI, Eleni; LU, Weisheng; CHEN, Ke. BIM-enabled Design for Manufacture and Assembly. In: **Proceedings of the 27th International Workshop on Intelligent Computing in Engineering** (EG-ICE 2020). Berlim, Alemanha, 2020. p. 314–323. DOI: 10.14279/depositonce-9977.

TONIOLO, Alice; LEON, Marianthi. Towards computational dialogue types for BIM collaborative design: an initial study. In: BISTARELLI, Stefano; GIACOMIN, Massimiliano; PAZIENZA, Andrea (Eds.). **Proceedings of the 1st Workshop on Advances in Argumentation in Artificial Intelligence** (AI³ 2017). Bari, Itália, 16-17 nov. 2017. CEUR Workshop Proceedings, v. 2012, p. 79–84. Disponível em: http://ceur-ws.org/Vol-2012/AI3-2017_paper_8.pdf. Acesso em: 21 abr. 2025.

TRZECIAK, Maciej; BRILAKIS, Ioannis. Dense 3D Reconstruction of Building Scenes by AI-Based Camera–Lidar Fusion and Odometry. **Journal of Computing in Civil Engineering,** v. 37, n. 4, p. 04023022, jul. 2023. DOI: https://doi.org/10.1061/JCCEE5.CPENG-4909.

WANG, Ning; ISSA, Raja R. A.; ANUMBA, Chimay J. Query answering system for building information modeling using BERT NN algorithm and NLG. In: **Computing in Civil Engineering 2021**: Selected Papers from the ASCE International Conference on Computing in Civil Engineering 2021. Virgínia, EUA: American Society of Civil Engineers, 2022. p. 1–8. DOI: https://doi.org/10.1061/9780784483893.053.

WORLD ECONOMIC FORUM (WEF). **Future of Jobs Report. Janeiro de 2025**. Disponível em: https://reports.weforum.org/docs/WEF_Future_of_Jobs_Report_2025.pdf. Acesso em: 21 mar. 2025.

XIE, Haiyan; SHI, Wei; ISSA, Raja R. A. Implementation of BIM/RFID in computer-aided design-manufacturing-installation process. Journal of Information Technology in Construction (ITcon), v. 16, p. 291–308, 2011. Disponível em: https://www.itcon.org/2011/19. Acesso em: 21 abr. 2025.

XU, Xun; LU, Yuqian; VOGEL-HEUSER, B.; WANG, Lihui. Industry 4.0 and Industry 5.0—Inception, conception and perception. Journal of manufacturing systems, v. 1192, 1 out. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.10.006> Acesso: 24 jun 2025

YANG, Honglei; XIA, Min. Advancing bridge construction monitoring: AI-based building information modeling for intelligent structural damage recognition. **Applied Artificial Intelligence**, v. 37, p. 1-15, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.1080/08839514.2023.2180625. Acesso em: 21 abr. 2025.

ZAWADA, Karol; RYBAK-NIEDZÍÓŁKA, Kinga; DONDEREWICZ, Mikołaj; STARZYK, Agnieszka. Digitization of AEC industries based on BIM and 4.0 technologies. **Buildings**, v. 14, n. 2, p. 175-187, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.3390/buildings14020175. Acesso em: 21 abr. 2025.

ZHENG, J.; FISCHER, M. Dynamic prompt-based virtual assistant framework for BIM information search. Automation in Construction, v. 144, p. 104382, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.104382. Acesso em: 21 abr. 2025.

ZHONG, Ray Y. et al. Towards Physical Internet-enabled prefabricated housing construction in Hong Kong. **IFAC-PapersOnLine,** v. 48, p. 1079-1086, 2015. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.06.204. Acesso em: 21 abr. 2025.

ZHOU, D.; ZHANG, L.; LI, X.; LIU, Y.; ZHANG, Y.; LI, Z. Technology gap analysis on the BIM-enabled design process of prefabricated buildings: An autoethnographic study. **Buildings**, v. 14, n. 11, p. 3498, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.3390/buildings14113498. Acesso em: 21 abr. 2025.

ZIATDINOV, Rushan.; ATTERAYA, Madhu. S.; NABIYEV, Rifkat The Fifth Industrial Revolution as a Transformative Step towards Society 5.0. **Societies**, v. 14, n. 2, p. 19, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.3390/soc14020019 Acesso em: 24 jun. 2025

.