

BIM e Inteligência Artificial: Uma análise bibliométrica na indústria da construção

<https://doi.org/10.21814/uminho.ed.142.16>

**Lorena Moreira¹, Paula Mota²,
Fernanda Machado³**

¹ Universidade Federal da Bahia, Salvador – BA, 0000-0001-8172-6572

² SIPPRO, Birmingham – UK, 0009-0001-8602-6740

³ Autodesk, São Paulo – SP, 0000-0001-5571-1254

Resumo

O período da pandemia acelerou a transformação digital, posicionando as soluções digitais integradas no cerne das estratégias corporativas do mercado, em nível global. No âmbito da indústria da construção, a definição de objetivos de negócio que convergem para maior resiliência, competitividade e inovação aponta para a adoção da Modelagem da Informação da Construção (BIM) como espinha dorsal das mudanças. O BIM integrado à Inteligência Artificial (IA) tornou-se destaque em aplicações interdisciplinares, por ser um caminho potencial para melhorar a eficiência e precisão dos processos de projeto, construção e operação de empreendimentos. Essa interface traz à luz a capacidade computacional de resolução de problemas e o subsídio às tomadas de decisão orientadas por dados. Nesse sentido, o objetivo deste artigo é apresentar uma análise bibliométrica de pesquisas que exploram a interface entre BIM e IA abrangendo a identificação e classificação dos artefatos em áreas de aplicação referentes a Arquitetura, Engenharia, Construção e Operação. A metodologia empregada foi a bibliometria integrada à revisão bibliográfica. Os periódicos *Buildings* e *Automation in Construction* destacaram-se com o maior número de publicações nessa área, sendo identificados na amostra a produção científica anual, documento mais citado mundialmente, palavras-chave e países líderes. As contribuições explanam os principais indicadores sobre a combinação de BIM com métodos de IA, a exemplo de tecnologias empregadas, tendências de crescimento e aplicação.

1. Introdução

O período da pandemia acelerou a transformação digital cerca de três a quatro anos, posicionando as soluções digitais integradas em nível global [1], [2]. No âmbito da indústria da construção, a definição de objetivos de negócio que convergem para maior competitividade aponta para a adoção de inovações tecnológicas que permitem o gerenciamento da informação no ciclo de vida de ativos, a exemplo de BIM, robótica, contratos inteligentes e Inteligência Artificial (IA) [3]. Em pesquisa realizada pela [1], essas inovações foram caracterizadas como tendências emergentes do ecossistema de tecnologias da indústria. Seu agrupamento em *clusters* abarca uso aplicados em *back-office*, colaboração digital e execução no campo, bem como soluções interconectadas. Entre os indicadores de quais tecnologias estão ganhando mais força no setor, o relatório descreve em constelações tecnológicas: (i) impressão 3D, modularização e robótica; (ii) gêmeos digitais; (iii) IA e *analytics*; e (iv) otimização da cadeia de suprimentos e *marketplaces*.

Nesse contexto, [4] observam que a IA está evoluindo como a próxima fronteira para impulsionar a engenharia civil tradicional; e traz à luz a capacidade computacional de raciocínio, aprendizagem e resolução de problemas complexos para subsidiar tomadas de decisão orientadas por dados. Suas técnicas percorrem, a título de exemplo, aprendizagem de máquina (*Machine Learning - ML*), aprendizagem profunda (*Deep Learning - DL*), IA generativa e, eventualmente, design generativo no âmbito da Arquitetura, Engenharia, Construção e Operação (AECO). De acordo com [5], uma vez que a construção civil é reconhecida como um campo intenso de dados e o BIM se posiciona como uma espinha dorsal digital para ampliar a inteligência nas diversas etapas de um empreendimento, há campo exploratório para a integração BIM/IA e tecnologias correlatas. A interdisciplinaridade inerente à integração BIM/IA reverbera em potenciais aplicações de automação e análise; como modelagem, aprimoramento semântico, checagem e controle de qualidade, entre outros, tendo em vista melhorias na produtividade destas e de outras diversas atividades.

É relevante observar que o BIM tem sido amplamente adotado no mercado global em domínios de aplicação que correspondem a mais de 76 usos [6] associados à indústria da construção, como captura da realidade, planejamento, simulação e quantificação, até o vínculo entre sistemas corporativos como Facility Management (FM). Ademais, [7] estima que até 2026, 77% das companhias ampliarão investimentos em IA e tecnologias emergentes; e um terço destas acreditam na ubiquidade da IA e sua adoção em todas as áreas. Logo, o objetivo deste artigo é apresentar uma análise bibliométrica de pesquisas que exploram a interface entre BIM e IA abarcando a identificação e classificação dos artefatos produzidos em AECO.

2. Método

Este estudo é exploratório e a pesquisa bibliográfica foi o método empregado com o uso do estudo bibliométrico. A disciplina da bibliometria desempenha um papel

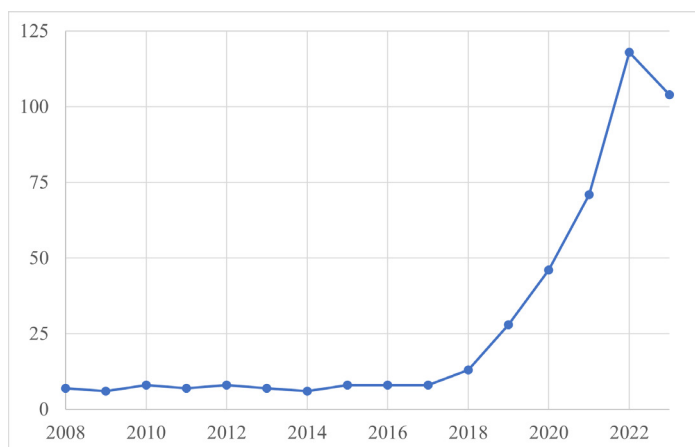
significativo na delimitação de tendências relacionadas à expansão, dispersão e declínio em domínios específicos do conhecimento. A bibliometria concentra-se na análise da estrutura e organização de áreas científicas e tecnológicas, fundamentando-se em fontes bibliográficas e informações provenientes de patentes [8]. Com o objetivo de realizar o mapeamento da literatura científica dos termos citados foi utilizado o *software* livre Bibliometrix (versão 4.2.3), criado em linguagem R pela “*The R Foundation for Statistical Computing Platform*” para auxiliar na compilação de dados e análise das informações. O Bibliometrix foi empregado com a extensão Biblioshiny, que cria uma interface gráfica facilitando a visualização dos dados [9].

Para esse estudo foram pesquisados trabalhos de congressos e artigos publicados em periódicos indexados na base de dados *Web of Science*, sem a determinação de um intervalo temporal, nem definição de idioma. O tipo da busca foi por tópico, que abrange o título, o resumo, as palavras-chaves do autor e os termos gerados a partir dos artigos citados na amostra (*keywords plus*). A busca na base de dados foi realizada em setembro de 2023 e seu delineamento foi iniciado pela etapa A - fundamentação teórica, seguida da etapa B - formulação dos termos de busca, etapa C - busca das fontes, e etapa D - análise e apresentação de resultados. A etapa A foi realizada por meio de uma revisão bibliográfica. Já a etapa B contemplou as palavras BIM e IA (*string*: “*building information modeling*” and BIM and “*artificial intelligence*”) e resultou em 90 artigos. Entende-se que o resultado da amostra não expressa a totalidade de trabalhos nesse campo de conhecimento, o que pode gerar uma pesquisa futura em outras bases de dados além da *Web of Science*. Na etapa C, 15 artigos não estavam disponíveis para *download* e foram excluídos. Na etapa D serão apresentados os gráficos originados de dados bibliométricos compilados pela plataforma Bibliometrix e será apresentado um esquema de objetivos, áreas de aplicação, tecnologias empregadas e práticas realizadas de BIM com IA.

3. Resultados

Dos 90 resultados encontrados na base de dados, constata-se crescimento exponencial do número de artigos a partir de 2018, atingindo seu ápice em 2022 (Figura 1). Acredita-se que esse fenômeno se deva a fatores como o alto nível de maturidade BIM – que proporciona uma base sólida para explorar a IA, o avanço nos experimentos de IA buscando inovação na indústria da construção civil, e o aumento nos investimentos em *startups* que exploram BIM com IA. Como a busca na base de dados foi até setembro de 2023, infere-se que a queda do gráfico nesse ano é inexpressiva, uma vez que a busca não atingiu a completude anual.

Figura 1
Produção científica
anual de BIM com IA.



Entre os países mais citados, observa-se que a corrida tecnológica está sendo dominada por Estados Unidos e China, cada um com 1160 e 960 resultados respectivamente. Esses dois países emergem como protagonistas na produção e disseminação de conhecimento tecnológico. Alemanha, Reino Unido, Israel, Coreia, Austrália, Singapura, Itália e Canadá surgem entre os 10 países mais citados. Brasil e Portugal não aparecem entre os primeiros resultados, mas estão presentes entre os 30 mais citados. Esse dado é um sinal de que há potencial para um aumento da visibilidade e impacto científico-tecnológico dessas regiões (Figura 2). Essas observações oferecem informações importantes sobre a distribuição geográfica do conhecimento científico-tecnológico, destacando as potências dominantes e identificando países que podem desempenhar papéis estratégicos em determinados campos de pesquisa.

Em termos de fontes mais relevantes da amostra para o universo de BIM com a IA surgem os periódicos *Buildings*, *Automation in Construction* e *Sustainability* como os três mais influentes. Já o documento mais citado mundialmente nesse campo foi o *Roles of Artificial Intelligence in Construction Engineering and Management: A Critical Review and Future Trends*, publicado na *Automation in Construction* [10], que aborda *blockchain*, *big data*, realidade virtual (*virtual reality – VR*) e realidade aumentada (*augmented reality – AR*) como tecnologias que, aliadas ao BIM e a IA, são importantes para a transformação digital na indústria da construção. A pesquisa também revela que a aplicação de gêmeos digitais em cidades apresenta-se como uma tendência futura, permitindo a simulação, a previsão e as tomadas de decisão como fatores estratégicos em ambientes urbanos complexos.

A análise das palavras mais relevantes nas pesquisas fornece uma visão significativa sobre as tendências no campo de estudo abordado. Em termos de palavras mais relevantes, destacam-se IA e AR. A VR vem em seguida reforçando essa afirmação e sugere uma abordagem abrangente, que envolve a experiência imersiva para a interação em contextos relacionados. Também fazem parte da amostra (Figura 3): ML, DL, internet das coisas (*internet of things - IoT*) e visão computacional (ou *computer vision*), apontando não somente o papel geoespacial e de contexto do BIM na integração, como também sua caracterização como fonte estruturada de dados. Em resumo, a análise das palavras-chave destaca uma interconexão entre BIM, IA, AR e

outras tecnologias. Essa interdisciplinaridade reflete a natureza múltipla das pesquisas, evidenciando a necessidade de uma abordagem integrada.

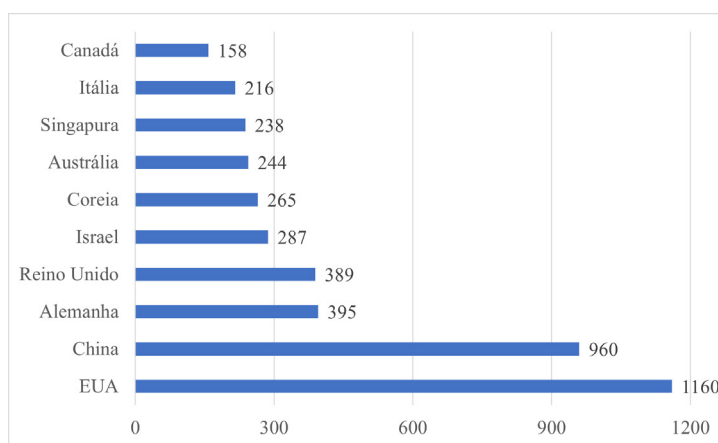


Figura 2
Países mais citados da amostra.

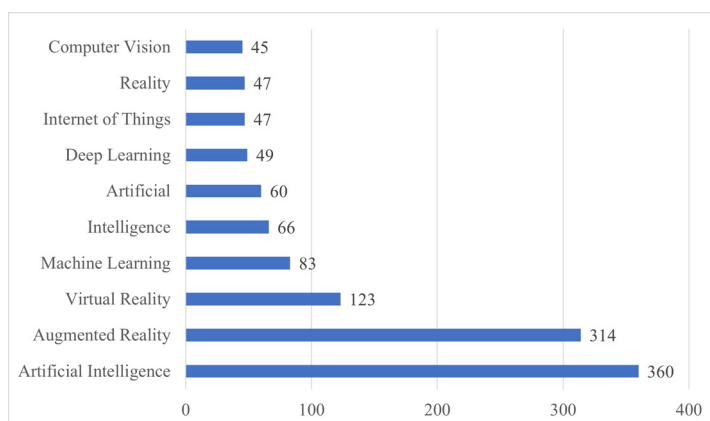


Figura 3
Palavras mais relevantes.

A nuvem de palavras por autor proporciona a complementação dos termos de busca a partir dos títulos de artigos citados – keyword plus. Com relação a amostra pesquisada, foram elencadas 50 palavras-chaves recorrentes (Figura 4).

Essas recorrências de palavras proporcionam uma visão geral das áreas e conceitos mais enfatizados nas pesquisas sobre BIM com IA fornecendo orientações sobre os tópicos de interesse na interseção dessas duas disciplinas. Em resumo, a análise das palavras-chave destaca a importância central do BIM, a atenção à modelagem e integração de sistemas, a aplicação prática em *design* e indústria, a exploração de VR/AR, os esforços para estabelecer *frameworks* unificados, a interconexão com a IoT, o tratamento de *big data* e simulações, bem como desafios e oportunidades nesse domínio.

Para um melhor entendimento, ampliando a rede de palavras apresentadas na amostra para aquelas mais recorrentes dos resumos, pode-se extrair a visualização gráfica da relação existente, conforme apresentado na Figura 5, na rede de co-ocorrência de palavras.

Figura 4

Nuvem de palavras.

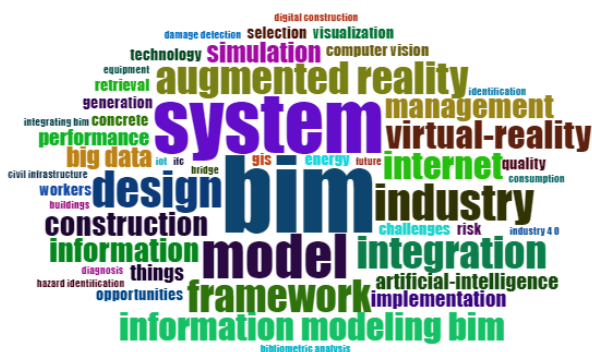
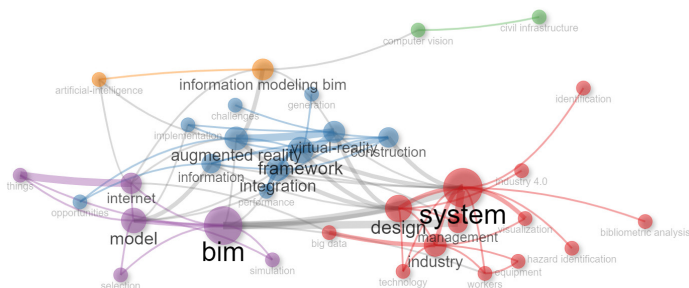


Figura 5

Rede de co-ocorrência de palavras.



Na sequência, a leitura analítica abarcou 75 artigos, sendo excluídos dos 90 da amostra aqueles que não foram escritos na língua inglesa ou mostraram-se inacessíveis. Desses, 48 artigos apresentaram revisões bibliográficas, revisões sistemáticas de literatura e bibliometria sobre BIM com IA na indústria AECO. De modo geral, esses trabalhos exploram o papel da IA na indústria da construção, destacando a importância da automação e o impacto positivo das tecnologias emergentes. Os tópicos são diversos e compreendem a potencial integração com BIM e usos em otimização de sistemas de engenharia, técnicas de gerenciamento e visualização de dados, gêmeos digitais, *blockchain*, avaliação do ciclo de vida, entre outros.

Os demais 27 artigos apresentam aplicações práticas e, portanto, foram apreciados em termos de objetivos, áreas de aplicação, tecnologias empregadas e práticas realizadas. As áreas de aplicação foram classificadas da seguinte forma: (i) modelo matemático; (ii) edificação; (iii) infraestrutura de transporte (iv) infraestrutura de saneamento; e (v) canteiro (estaleiro) de obras.

Na área de aplicação modelo matemático, os estudos detêm o objetivo comum de aprimorar aspectos pertinentes à construção civil, relacionando processamento de linguagem natural (NLP), sistemas de perguntas e respostas e demais algoritmos para realizar consultas, buscar informações e encontrar respostas sobre requisitos necessários de construção de maneira mais eficiente e precisa [11] e [12]. Em [13] elaborase uma visão baseada em IA para mapear gestos e movimentos corporais

para *inputs* em um software VR, propondo-se a interação de usuários com modelos BIM em ambientes imersivos – sem a necessidade de controladores físicos. O foco em [14] é a gestão de projetos de construção por meio de um AI Middle Office, que fornece suporte a evidências para as partes interessadas, define responsabilidades em termos de condições contratuais, prevê preços de materiais, analisa custos e a programação do projeto durante a construção. As aplicações incluem técnicas de IA inerentes a ML, DL; processos de *data mining*, e tecnologias de *blockchain* e VR; conforme Figura 6.

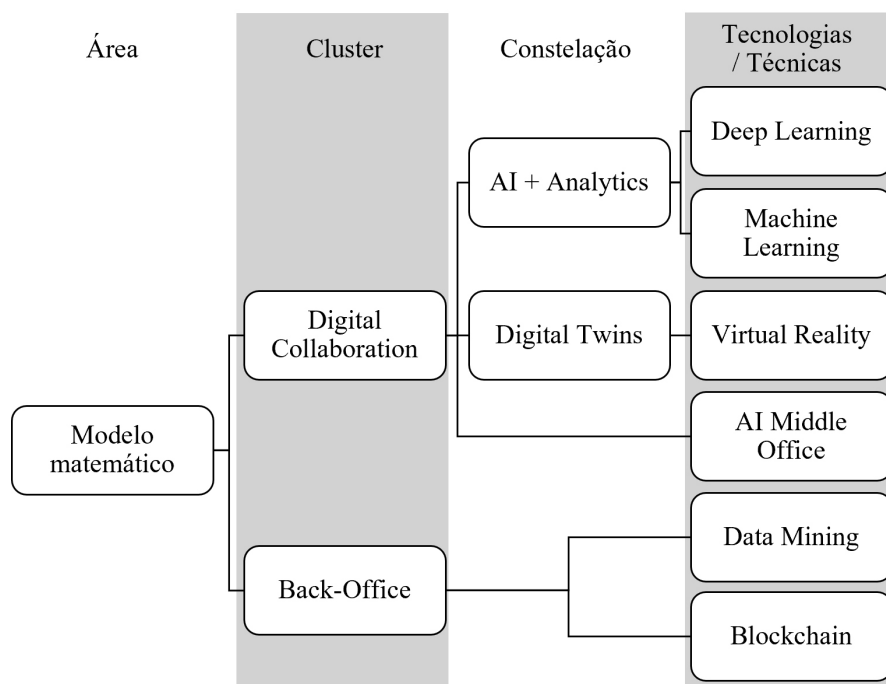
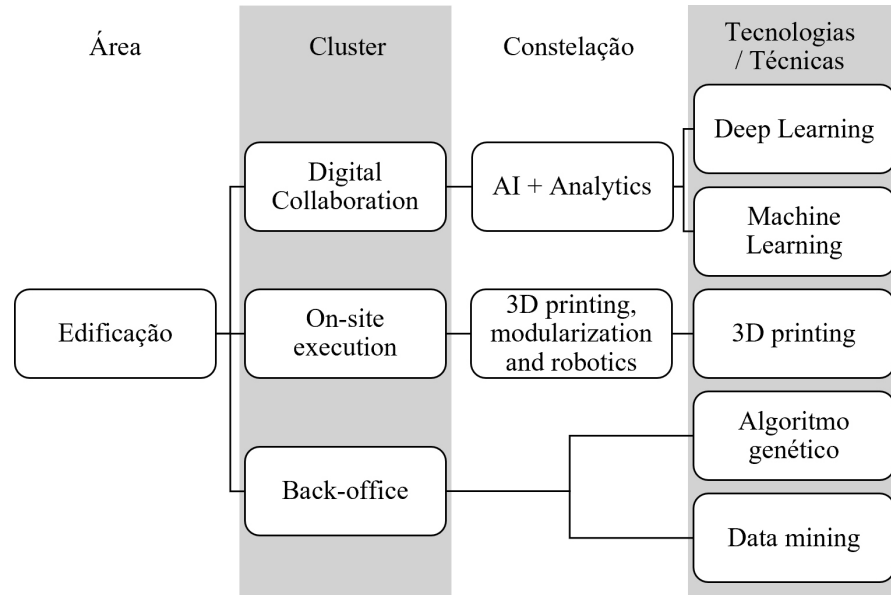


Figura 6
Diagrama da área de aplicação (i) Modelo Matemático.

Por sua vez, na área de edificação (Figura 7) com ênfase comercial ou residencial, a qual apresentou maior recorrência de aplicações, os estudos abrangem domínios relativos ao planejamento de empreendimentos, *design* de interiores, otimização de *layouts* de materiais de construção e vigilância em edifícios.

Figura 7
Diagrama da área de aplicação (ii) Edificação.



A integração BIM/IA nestas investigações visa o desenvolvimento de conjuntos de dados para testar a integridade semântica de modelos BIM [15], a criação de uma plataforma baseada em IA para facilitar o acesso à informação em modelos 4D [16] e [17], a otimização do *design* de edificações [18] e [19], a geração do sequenciamento das atividades do projeto [20], a redução do desperdício de materiais [21], e o uso de algoritmos de otimização para monitorar o comportamento dos ocupantes [22] e [23]. As aplicações incluem tecnologias avançadas tais como *design* paramétrico, VR/AR, computação em nuvem, e GIS; NLP, processo de decisão de Markov (MDP) e técnicas de IA que envolvem ML supervisionado e não supervisionado, como algoritmos de *support vector machine* (SVM), algoritmos de otimização genética e auto-ajustáveis – a exemplo de *symbiotic organisms search* (SOS), bem como DL abrangendo *convolutional neural networks* (CNNs). Esse resultado reflete a diversidade de aplicações e a abordagem abrangente de BIM e IA na otimização de processos e tomada de decisões.

Os artigos que aplicaram BIM com IA na área de edificação com ênfase institucional, empregam ML como método. Em termos de tecnologias avançadas, utilizam de *design* paramétrico, simulação computacional, programação visual, computação em nuvem, GIS, VR/AR, robótica e reconhecimento facial. Essas tecnologias integradas auxiliam a tornar mais eficientes objetivos específicos como adaptação de layouts, simulação de multidões e gestão de ativos [24], [25] e [26]. Já a área de edificação com foco em patrimônio abarca estudos com o objetivo similar de aprimorar o setor construtivo com o uso de BIM com IA, a partir da detecção, avaliação e digitalização de danos em edificações existentes [27], reconstrução *Scan-to-BIM* do patrimônio a partir de dados de levantamento, segmentação semântica e classificação de elementos arquitetônicos [28] e gestão e recuperação de conteúdo BIM em projetos históricos [29]. As investigações utilizam técnicas de IA inerentes a ML e DL, e o processo de *data mining* (Figura 10) para otimizar os processos construtivos. Em termos de aplicações e modelos avançados, explora-se o uso de CNNs e algoritmo *Random Forest*.

Em relação à área de infraestrutura de transporte (Figura 8) com ênfase ferroviária, os artigos levantados abordam técnicas de IA inerentes à DL e tecnologias pertinentes à IoT para localizar defeitos na infraestrutura ferroviária, com alto grau de precisão (a exemplo de queimaduras de roda) [30], desenvolver um sistema de treinamento de evacuação de incêndio com usuários reais [31] e automatizar a modelagem paisagística a partir da captura da realidade via escaneamento a laser (LiDAR) [30], [31] e [32]. No domínio da DL, foram considerados os modelos CNNs/R-CNNs e *deep neural networks* (DNNs). Os usos referentes à captura envolvem veículos aéreos não tripulados (VANTs) e a voxelização de dados 3D.

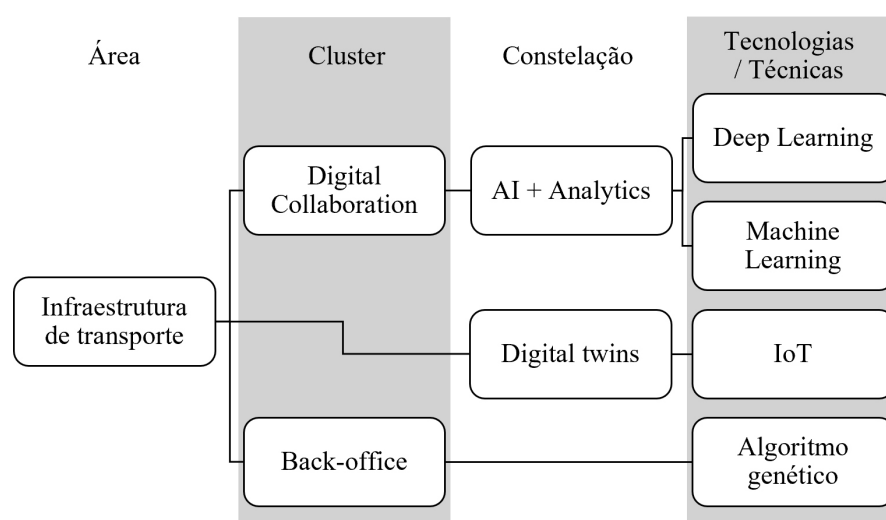
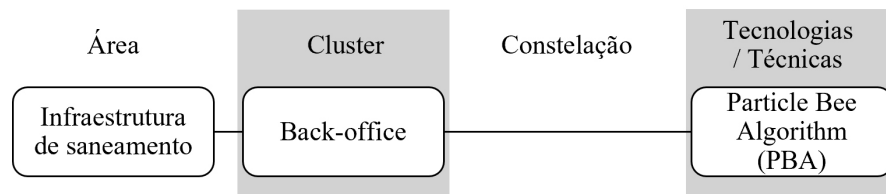


Figura 8
Diagrama da área de aplicação (iii) Infraestrutura de transporte.

No âmbito das obras de arte especiais, os estudos detêm como objetivo simular incertezas geotécnicas, avaliar riscos de segurança em obras de túneis de diâmetro significativo, identificar e segmentar anomalias na estrutura em tempo real, prever o crescimento dos danos e aprimorar tomadas de decisão de reparo e demolição. Para tanto, as pesquisas empregam o método de elementos finitos (FEM) pra análise estrutural, técnicas de IA inerentes a ML e DL, a partir de modelos de CNNs/R-CNNs, Auto-ML, como *tree-based pipeline optimization tool* (TPOT); e abordagens relativas a *explainable AI* (XAI) e *shapley additive explanations* (SHAP) [33] e [34]. Por fim, no contexto da infraestrutura rodoviária, um único artigo aplica BIM com IA para explorar a otimização do alinhamento do traçado de rodovias. No contexto da IA, o estudo envolve o uso de algoritmos genéticos, como algoritmos de otimização e *particle swarm optimization* (PSO) para analisar e comparar inúmeras soluções distintas e definir o melhor corredor viário. As tecnologias integradas auxiliam engenheiros e projetistas a simplificar o processo de projeto, por meio da redução de erros, tempo de execução e, conseqüentemente, custo da obra [35]. Para além da área de infraestrutura de transporte, aplicações de BIM com IA no contexto do saneamento também foram identificadas, com ênfase em uma obra localizada (estação de tratamento de esgoto). A finalidade é integrar modelos com algoritmos de otimização, visando o melhor custo-benefício durante o corte de barras de aço e a minimização de desperdício de material na geração de planos de corte. Para tanto, os modelos BIM incluíram

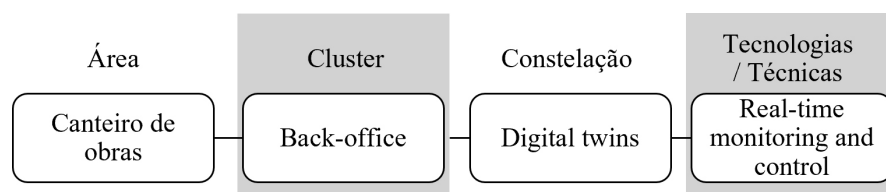
usos na detecção de conflitos e detalhamento com Revit e Navisworks, acrescidos do Matlab para a geração de planos de corte. O algoritmo de otimização utilizado é o *particle bee algorithm* (PBA), como apresentado na Figura 9 [36].

Figura 9
Diagrama da área de aplicação (iv) Infraestrutura de saneamento.



Assim como na área de aplicação anterior, somente um artigo aplica BIM com IA em canteiro de obras, por meio da adoção de tecnologia de monitoramento e controle em tempo real *Ultra-Wideband* (UWB) (Figura 10) para localizar trabalhadores no canteiro de obras, além de compreender situações construtivas e fornecer suporte às tomadas de decisão de gerenciamento de projetos. Essa solução utiliza os dados adquiridos por sensores distribuídos em canteiro para criar regras e hipóteses sobre as atividades de construção exercidas [37].

Figura 10
Diagrama da área de aplicação (v) Canteiro (estaleiro) de obras.



4. Considerações finais

O cenário pós-pandemia, marcado pela aceleração da transformação digital, tem indicadores proeminentes das tecnologias que devem impactar a indústria AECO. O interesse exponencial pelo assunto e a gama de potenciais aplicações de BIM com IA nas diversas etapas do ciclo de vida de empreendimentos de infraestrutura e edificações destacam sua relevância e tendência de crescimento como campo a ser explorado. O presente artigo indica em sua análise bibliométrica aumento da produção científica em BIM/IA a partir de 2018 e liderança de EUA e China na disseminação do conhecimento. Os trabalhos, classificados em 8 áreas de aplicação, apontam para os modelos BIM como estrutura semântica de dados de empreendimentos e visualização 3D (VR/AR) para integrar-se a tecnologias e técnicas de *machine learning*, *deep learning*, *data mining*, *blockchain*, *IoT*, entre outras, visando a automação, análise e otimização de tarefas. Os artefatos abarcam desde modelos, métodos e instanciações empregadas no planejamento de atividades de projeto e construção, adaptação e otimização de layouts conforme requisitos, até a automação na detecção de danos em infraestruturas, simulações computacionais e monitoramento e controle de trabalhadores em canteiros de obras. Esta gama de aplicações ratifica a importância das constelações tecnológicas mapeadas na bibliometria – impressão 3D, modularização

e robótica; gêmeos digitais; e IA e *analytics*. Os resultados também sinalizam mudança cultural na maneira como os profissionais do setor AECO irão usufruir do poder computacional como coautor das tomadas de decisão, visando eficiência, sustentabilidade e inovação. Vislumbra-se, como trabalhos futuros, a ampliação para outras bases de dados a fim de aumentar o valor da amostra encontrada.

Referências

- [1] J. L. Blanco, A. Mullin, K. Pandya, M. Parsons and M. J. Ribeirinho, "Seizing opportunity in today's construction technology ecosystem," in *McKinsey & Company Report*, 2018.
- [2] McKinsey & Company, "How COVID-19 has pushed companies over the technology tipping point and transformed business forever," in *McKinsey & Company Report*, 2020.
- [3] B. Succar and E. Poirier, "Lifecycle information transformation and exchange for delivering and managing digital and physical assets," in *Automation in Construction*, vol. 112, 2020, ISSN 0926-5805, doi: 10.1016/j.autcon.2020.103090.
- [4] Y. Pan and L. Zhang, "Integrating BIM and AI for Smart Construction Management: Current Status and Future Directions," in *Arch Computat Methods Eng* 30, pp. 1081-1110 (2023). doi: 10.1007/s11831-022-09830-8
- [5] F. Zhang, A. P.C. Chan, A. Darko, Z. Chen and D. Li, "Integrated applications of building information modeling and artificial intelligence techniques in the AEC/FM industry," in *Automation in Construction*, Vol 139, 2022, ISSN 0926-5805, doi: 10.1016/j.autcon.2022.104289.
- [6] B. Succar, N. Saleeb and W. Sher, "Model Uses: Foundations for a Modular Requirements Clarification Language", in *Australasian Universities Building Education* (AUBEA2016), Cairns, Austrália, Julho 2016, pp. 1-10.
- [7] Autodesk, "How will AI revolutionize human innovation?," in *Autodesk Infographic*, 2023.
- [8] N. A. P. Vanti, "Da bibliometria à webometria: uma exploração conceitual dos mecanismos utilizados para medir o registro da informação e a difusão do conhecimento," *Ciência da Informação*, vol. 31, n. 2, 2002. doi: 10.18225/ci.inf.v31i2.970.
- [9] M. Aria and C. Cuccurullo, "Bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis," in *Journal of informetrics*, vol. 11, n. 4, pp. 959-975, 2017.
- [10] Y. Pan and L. Zhang, "Roles of artificial intelligence in construction engineering and management: A critical review and future trends," in *Automation in Construction*, vol. 9, pp. 46391-46403, 2021, doi: 10.1016/j.autcon.2020.103517.

- [11] T. H. Lin, Y. H. Huang and A. Putranto, "Intelligent question and answer system for building information modeling and artificial intelligence of things based on the bidirectional encoder representations from transformers model," in *Automation in Construction*, v. 142, pp. 104483, 2022.
- [12] N. Wang, R. R. A. Issa and C. J. ANUMBA, "Query Answering System for Building Information Modeling Using BERT NN Algorithm and NLG," in *Computing in Civil Engineering*, 2021.
- [13] I. Ramaji, A. Anderson, S. Cates, J. Tetreault, A. Fleming, K. Pugsley and K. Mendela, "Application of Vision-Based Artificial Intelligence in Creating a Contactless Interaction with Immersive Environments," in *Computing in Civil Engineering 2021. Proceedings*. Reston: American Society of Civil Engineers, 2022. pp. 165-172. doi: 10.1061/9780784483893.165.
- [14] W. Li, P. Duan and J. Su, "The effectiveness of project management construction with data mining and blockchain consensus," in *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, vol. 1, no. 3, pp. 1-3, 2021, doi:10.1007/s12652-020-02668-7.
- [15] Y. Yu, D. Ha and K. Lee, "ArchShapesNet: a novel dataset for benchmarking architectural building information modeling element classification algorithms," in *Journal of Computational Design and Engineering*, v. 9, p. 1449-1466, 2022, doi: 10.1093/jcde/qwac064.
- [16] A. Nabavi, I. J. Ramaji, N. Sadeghi and A. Anderson, "Leveraging Natural Language Processing for Automated Information Inquiry from Building Information Models," in *Journal of Information Technology in Construction*, vol. 28, pp. 266-286, 2023, ISSN 1874-4753, doi: 10.36680/j.itcon.2023.013.
- [17] M.-Y. Cheng and N.-W. Chang, "Dynamic construction material layout planning optimization model by integrating 4D BIM," in *Engineering with Computers*, vol. 35, pp. 703-720, 2019.
- [18] R. He, M. Li and V. J. L. Gan, "BIM-enabled computerized design and digital fabrication of industrialized buildings: A case study," in *Journal of Cleaner Production*, 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.123505.
- [19] E. Karan, S. Asgari, and A. Rashidi, "A Markov Decision Process Workflow for Automating Interior Design," in *KSCE Journal of Civil Engineering*, vol. 25, no. 9, pp. 3199-3212, 2021, doi: 10.1007/s12205-021-1272-6.
- [20] K. M. Aljebory and M. Qaisissam, "Developing AI Based Scheme for Project Planning by Expert Merging Revit and Primavera Software," in 2019 16th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD'19), 2019, p. 412. doi: 10.1109/SSD.2019.8893274.

- [21] M. Y. Cheng, Y. C. Fang and C. Y. Wang, "Auto-tuning SOS algorithm for two-dimensional orthogonal cutting optimization," *KSCE Journal of Civil Engineering*, vol. 22, n. 10, pp. 3615-3623, 2018, doi: 10.1007/s12205-018-1935-6.
- [22] S. Erisen, "A Systematic Approach to Optimizing Energy-Efficient Automated Systems with Learning Models for Thermal Comfort Control in Indoor Spaces," in *IEEE Buildings*, vol. 13, pp. 1824, 2023, doi: 10.3390/buildings13071824.
- [23] Z. Chen, Z. Lai, C. Song and X. Zhang, "Smart camera placement for building surveillance using OpenBIM and an efficient bi-level optimization approach," in *Journal of Building Engineering*, vol.77, p. 107257, 2023.
- [24] J. Bielski, C. Langenhan, B. Wayand and M. Neuber, "Topological Queries and Analysis of School Buildings Based on Building Information Modeling (BIM) Using Parametric Design Tools and Visual Programming to Develop New Building Typologies," in *eCAADe – Education and Research in Computer Aided Architectural Design in Europe Setembro 2020*, Berlim, Alemanha, doi: 10.52842/conf.ecaade.2020.2.279.
- [25] Y. Zhou, L. Wand, Y. Xu and L. Ding, "Intelligent Fangcang Shelter Hospital Systems for Major Public Health Emergencies," in *Journal of Management in Engineering*, vol. 38, no. 1, 2022, doi: 10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0001010.
- [26] S. Meschini, L. Pellegrini, M. Locatelli, D. Accardo, L.C. Tagliabue, and M. Di Giuda, "Development of a BIM-GIS asset management system for a diffused university," in *Journal of Building Engineering*, vol. 43, pp. 101-109, 2021.
- [27] C. Musella, M. Serra, C. Menna and D. Asprone, "Building information modeling and artificial intelligence for the digitalization of seismic damage in existing buildings," in *Structural Concrete*, vol. 22, pp. 2761-2774, 2021. doi: 10.1002/suco.202000029.
- [28] V. Croce, G. Caroti, A. Piemonte, L. D. Luca and P. Veron, "H-BIM and Artificial Intelligence: Classification of Architectural Heritage for Semi-Automatic Scan-to-BIM Reconstruction," in *Sensors*, vol. 23, pp. 2497, 2023, doi: 10.3390/s23052497.
- [29] H. Abdirad and P. Mathur, "Artificial intelligence for BIM content management and delivery: Case study of association rule mining for construction detailing," in *Advanced Engineering Informatics*, vol. 50, pp. 101414, 2021, doi: 10.1016/j.aei.2021.101414.
- [30] J. Sresakoolchai and S. Kaewunruen, "Integration of Building Information Modeling and Machine Learning for Railway Defect Localization," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 166045-166057, 2021, doi: 10.1109/access.2021.3135451.
- [31] F. Yan, J. Jia, Y. Hu, H. Guo and Z. Pan, "Smart fire evacuation service based on Internet of Things computing for Web3D," in *Journal of Industrial Technology*, vol. 20(2), pp. 521-532, 2019, doi: 10.1109/JIT.2019.8887049.

- [32] M-K. Kim, D. Park, S. Yun, W-H. Park, D. Lee, J-D. Chung and K-J. Chung, "Establishment of a Landscape Information Model (LIM) and AI Convergence Plan through the 3D Digital Transformation of Railway Surroundings," in *Drones*, vol. 7, no. 3, pp. 167, Feb. 2023. doi: 10.3390/drones7030167.
- [33] K. Jang, J-W. Kim, K-B. Ju and Y-K An, "Infrastructure BIM Platform for Lifecycle Management," in *Applied Sciences*, vol. 11, n. 21, pp. 10310, 2021, doi: 10.3390/app112110310.
- [34] P. Lin, M. Wu and L. Zhang, "Probabilistic safety risk assessment in large-diameter tunnel construction using an interactive and explainable tree-based pipeline optimization method," in *Applied Soft Computing*, vol. 143, pp. 110376, 2023.
- [35] N. Bongiorno, G. Bosurgi, O. Carbone and G. Sollazzo, "Potentialities of a Highway Alignment Optimization Method in an I-BIM Environment," in *Period. Polytech. Civ. Eng.*, vol. 63, no. 2, pp. 352-361, 2019.
- [36] L.-C. Lien and U. Dolgorsuren, "BIM-based steel reinforcing bar detail construction design and picking optimization," in *Structures*, vol. 49, pp. 520-536, Feb. 2023.
- [37] K. W. Johansen, R. Nielsen, C. Schultz and J. Teizer, "Automated activity and progress analysis based on non-monotonic reasoning of construction operations," in *Proceedings of the 35th CIB W78 2018 Conference: IT in Design, Construction, and Management*, pp. 463-474, 2018.