Indústria 5.0: Oportunidades e Desafios para Arquitetura e Construção

13º Simpósio Brasileiro de Gestão e Economia da Construção e 4º Simpósio Brasileiro de Tecnologia da Informação e Comunicação na Construção

ARACAJU-SE | 08 a 10 de Novembro

[1]GÊMEOS DIGITAIS, BIM E LEAN: ANÁLISE DE SINERGIAS VIA MINERAÇÃO DE TEXTO

Digital Twin, BIM and Lean: synergy analysis through text mining

Leonardo de Aguiar Corrêa
Universidade Federal de Santa Catarina | Florianópolis, Santa Catarina | leonardo.ac@posgrad.ufsc.br

Fernanda Fernandes Marchiori
Universidade Federal de Santa Catarina | Florianópolis, Santa Catarina | fernanda.marchiori@ufsc.br

Rafael Fernandes Teixeira da Silva
Universidade Federal de Santa Catarina | Florianópolis, Santa Catarina | rfs2574@gmail.com

Lucas Rollin Ferreira
Universidade Federal de Santa Catarina | Florianópolis, Santa Catarina | lucasrollinferreira@gmail.com

RESUMO

A digitalização do mundo físico e sua integração com o mundo digital é uma oportunidade para melhorar a Indústria da Construção Civil (ICC). Conceitos como *Building Information Modeling* (BIM) e *Lean Construction* podem se beneficiar se associados a novas tecnologias como do *Digital Twin* (DT). O DT integra o mundo físico e digital, enfrentando desafios em várias indústrias, inclusive na ICC. O objetivo desta pesquisa é examinar e discutir as sinergias, padrões, tendências e lacunas nas pesquisas relacionadas com DT, BIM e Lean aplicando mineração de texto em 29 artigos selecionados por meio de uma revisão bibliográfica. Foi identificado crescente interesse no BIM devido à aceleração de processos. O DT vai além do BIM, permitindo modelagem atualizada e simulação de cenários "e se" com inteligência artificial. O *Lean Construction* busca reduzir desperdícios e aumentar a produtividade. Foram identificados seis *clusters* de maior interesse *Smart Bulding Design*, *Construction Industry Process*, *Digital Twin Technology*, *LeanBIM*, *Managing Construction Informatio*n e *Conceptual Model Simulation*. Esses resultados fornecem uma visão das pesquisas recentes nessa área e podem orientar futuros estudos e aplicações práticas na ICC.

Palavras-chave: Gêmeos Digitais; Construção enxuta; Building Information Modeling; Mineração de Texto.

ABSTRACT

The digitization of the physical world and its integration with the digital world presents an opportunity to enhance the Construction Industry (ICC). Concepts such as Building Information Modeling (BIM) and Lean Construction can benefit from being associated with new technologies like the Digital Twin (DT). The DT integrates the physical and digital worlds, addressing challenges in various industries, including the ICC. The objective of this research is to examine and discuss the synergies, patterns, trends, and gaps in research related to DT, BIM, and Lean by applying text mining to 29 selected articles obtained through a literature review. Growing interest in BIM has been identified due to process acceleration. The DT goes beyond BIM, enabling real-time modeling and "what if" scenario simulation using artificial intelligence. Lean Construction aims to reduce waste and increase productivity. Six clusters of major interest have been identified: Smart Building Design, Construction Industry Process, Digital Twin Technology, LeanBIM, Managing Construction Information, and Conceptual Model Simulation. These findings provide insights into recent research in this area and can guide future studies and practical applications in the ICC.

Keywords: Digital Twin; Lean Construction; Building Information Modeling; Text Mining.

1 INTRODUÇÃO

A Indústria da Construção Civil (ICC) enfrenta vários desafios, incluindo baixa produtividade, falta de pesquisa e desenvolvimento e avanços tecnológicos insuficientes (OPOKU *et al*., 2021). Recentemente, a combinação de *Lean*, *Building Information Modeling* (BIM) e tecnologias digitais tem sido visto como uma tendência incremental na literatura publicada (SEPASGOZAR *et al*., 2020). Enquanto a ICC está adotando a era digital, os processos envolvidos no projeto, construção e operação de construções são cada vez mais influenciados por tecnologias que lidam com monitoramento de dados, redes de sensores, gerenciamento desses dados em

[1]CORREA, L; MARCHIORI, F; SILVA, R.; ROLLIN, L. Gêmeos digitais, BIM e *Lean*: análise de sinergias via mineração de texto. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GESTÃO E ECONOMIA DA CONSTRUÇÃO, 13., 2023, Aracaju. **Anais [...].** Porto Alegre: ANTAC, 2023.

sistemas de armazenamento seguros e resilientes sustentados por modelos semânticos, bem como na simulação e otimização de sistemas de engenharia (BOJE *et al*., 2020).

O *Digital Twin* (DT) ou Gêmeo Digital é uma forma de integrar o mundo físico e o mundo digital, o que auxilia a enfrentar os desafios das diferentes indústrias (OPOKU *et al*., 2021). Segundo tais autores, isso fica evidente principalmente nas indústrias mais digitalizadas, como as indústrias da manufatura e automotiva. Consequentemente, nos últimos anos, os pesquisadores têm aplicado o DT na solução de problemas de outras indústrias, incluindo os da ICC. O termo "*lean thinking*" ou "pensamento enxuto" foi iniciado na indústria automotiva japonesa como uma abordagem para atender melhor às expectativas do cliente, usando "menos de tudo" e foi adaptado para a ICC como "*lean construction*" na busca de gerenciar melhor o processo de construção de forma a atender às expectativas do cliente. *Lean Construction* e BIM são dois dos conceitos proeminentes que desafiam as práticas tradicionais de gestão de construção (TEZEL *et al*., 2020). Ambos os conceitos vêm ganhando maturidade na ICC e o DT pode ser uma forma de acelerar e potencializar essa evolução quando aplicados juntos. Contudo, na literatura atual, não foram identificados trabalhos que tenham feito a utilização de conceitos Lean na construção, atrelados ao monitoramento do DT em obra a partir de modelos BIM. Os trabalhos publicados têm abordagem teórica (BOJE *et al*., 2020; OZTURK, 2021; MICHALSKI *et al*., 2022) ou então usam os conceitos de forma isolada. Desta forma, faz-se necessário compreender as frentes de foco para a aplicação dos conceitos, visando otimização dos esforços para a evolução conjunta Lean x BIM x DT.

Deste modo o objetivo desta pesquisa é examinar e discutir as sinergias, padrões, tendências e lacunas nas pesquisas relacionadas com "*Digital Twin* (DT)", "*Building Information Modeling* (BIM)" e "*Lean*". Foi realizada uma revisão bibliográfica em 29 artigos obtidos das bases Scopus, ScienceDirect e Web of Science.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 *Building Information Modeling* (BIM)

O BIM gera um interesse crescente na ICC por causa de suas possibilidades de acelerar o processo de projeto, planejamento, construção, operação e gerenciamento de instalações (OZTURK, 2020). O BIM fornece uma fonte constante de informações em tempo real e precisas que permitem o trabalho remoto digital por meio do monitoramento, reprogramação e otimização (SEPASGOZAR *et al*., 2020). Os processos de design *lean* e BIM podem ajudar a projetar o aprimoramento de fluxo, a transformação de informações, redução de desperdícios e a geração de valor (ROTHER; SHOOK, 2003).

2.2 *Digital Twin* (DT)

O DT é uma réplica virtual de ativos físicos, processos, sistemas ou serviços que representa as propriedades (e.g. geometria), a condição (e.g. status) e o desempenho (MADNI; MADNI, 2019). O DT vai além do BIM para uma modelagem mais "atualizada". Com a ajuda de sensores IoT habilitados, o DT pode tornar o BIM um instrumento vivo, atualizando automaticamente o BIM "*as-built*" ou "como construído". Além disso, o DT pode ser usado para simular cenários "e se" usando técnicas baseadas em inteligência artificial para descobrir possíveis soluções contra novos problemas, como estouros de orçamento e atrasos de cronograma, o que permite que os profissionais tomem proativamente uma ação de controle (LEE *et al.,* 2021).

2.3 Lean Construction

O *Lean Construction* ou Construção Enxuta é um conceito que pode reduzir o desperdício em projetos de construção. Desperdício é algo que não agrega valor atividades no canteiro de obras. A implementação de conceitos "*lean*" na indústria da construção busca aumentar a produtividade da empresas (HAKAS PRAYUDA *el al*., 2021). O *Lean Construction* busca maximizar o valor entregue ao cliente, eliminando desperdícios e otimizando os processos construtivos, por meio do envolvimento de todos os membros da equipe em uma abordagem colaborativa" (TEZEL *et al*., 2020).

2.4 Mineração de texto

A mineração de texto refere-se à extração de informações e padrões que estão implícitos e potencialmente valiosos de forma automática ou semi-automática de dados textuais não estruturados, como textos em linguagem natural (DUMAIS *et al*., 1998). Diversos programas são capazes de extrair informações de textos

e fornecer relatório sobre a frequência de palavras, a associação entre palavras e as principais ideias do documento. Estas funções de software pertencem ao campo de mineração de texto e semântica (FYTILAKOS, 2021). Neste artigo foi utilizado o software *KH Coder* (HIGUCHI, 2016), um software gratuito especializado em conteúdo quantitativo. O *KH Coder* é capaz de realizar revisões da literatura e produzir resultados de mineração de texto quantitativos. É adequado para lidar com *big data* em análise de frequência contendo pré-processamento totalmente automatizado de documentos, codificação e análise com estatística multivariada e técnicas avançadas.

A integração do BIM, *Digital Twin* e *Lean Construction* na indústria da construção oferece oportunidades de acelerar o processo, reduzir desperdícios e maximizar o valor entregue. A mineração de dados pode extrair *insights* valiosos desses conceitos para aprimorar ainda mais a eficiência e a produtividade. Os capítulos seguintes descrevem a metodologia utilizada para obter esses *insights* e os resultados da pesquisa.

3 METODOLOGIA

O processo de revisão sistemática de literatura foi adotado nesta pesquisa adaptado de (ANSAH *et al*., 2019) (Figura 1). Este processo é divido em três passos: (i) busca na literatura; (ii) seleção da literatura; e, (iii) processo de revisão. Além da análise bibliométrica foi realizada no último passo a mineração dos dados para auxiliar na revisão dos artigos.

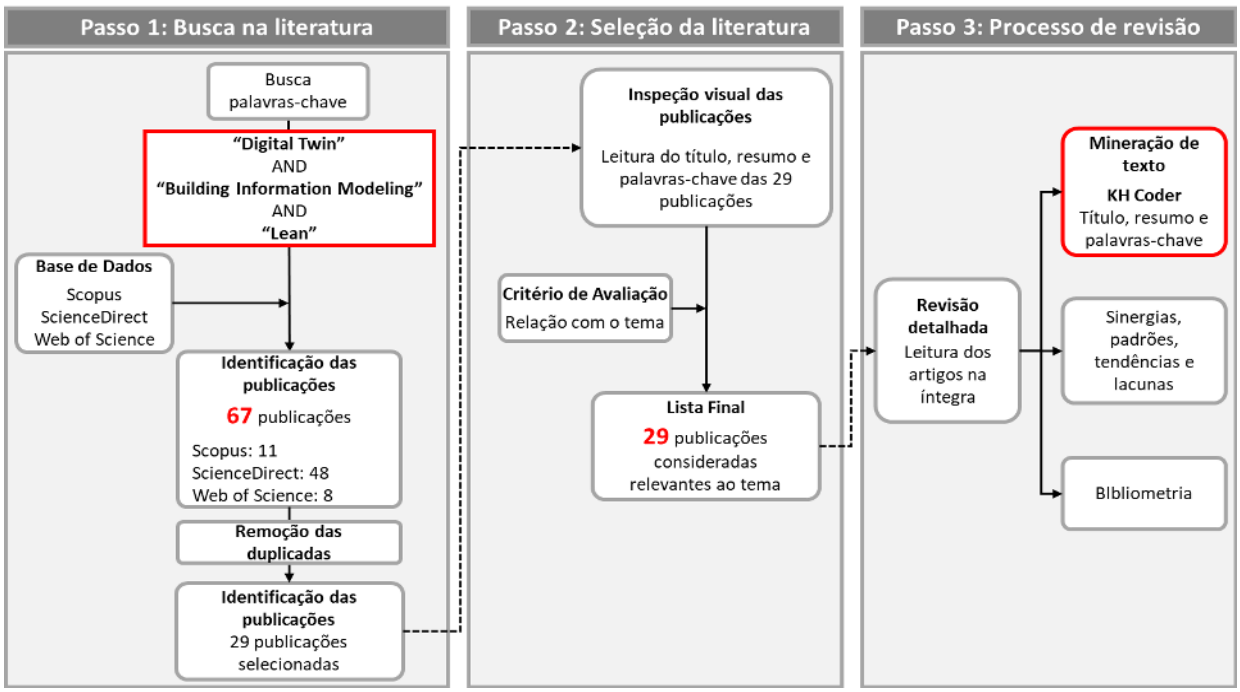
3.1 Passo 1: busca na literatura

Foram inseridos os termos "*Digital Twin*" AND "Building Information Modeling" AND "*Lean*" nas bases de dados Scopus, ScienceDirect e Web of Science. Foram encontrados, respectivamente as bases de dados, 11, 48 e 8 publicações, totalizando 67 publicações. O espaço temporal utilizado foi até fevereiro de 2023. Na sequência, as informações dos artigos foram importadas para o software Mendeley e realiza a conferência de publicações duplicadas, resultando em 29 publicações selecionadas.

3.2 Passo 2: seleção da literatura

No passo 2, foi realizada a inspeção visual das publicações selecionas, com a leitura do título, resumo e palavras-chave para identificar se as publicações possuíam aderência com o tema da pesquisa. Foram mantidas as publicações de congresso que possuíam aderência com o tema visando enriquecer o processo de mineração de dados e bibliometria. A lista final totalizou 29 publicações selecionadas.

Figura 1: Delineamento de pesquisa.



Fonte: os autores

3.3 Passo 3: processo de revisão

No processo de revisão, o título, resumo e palavras-chave dos artigos foram inseridos em um documento ".txt", respeitando a ordem alfabética do título na inserção do texto. Também, se desenvolveu outro documento apenas com as palavras-chave para poder gerar a rede de co-ocorrência de palavras-chave. Esse documento foi processado no software *KH Coder* para gerar as análises das informações textuais. Para obter os resultados de mineração de texto apresentados no capítulo 4, foram utilizadas configurações pré-determinadas no *KH Coder*. O documento "*KH Coder reference manual*" de Higuchi (2016) foi utilizado como referência. Além da mineração dos dados, procedeu-se com análise bibliométrica das publicações.

4 RESULTADOS

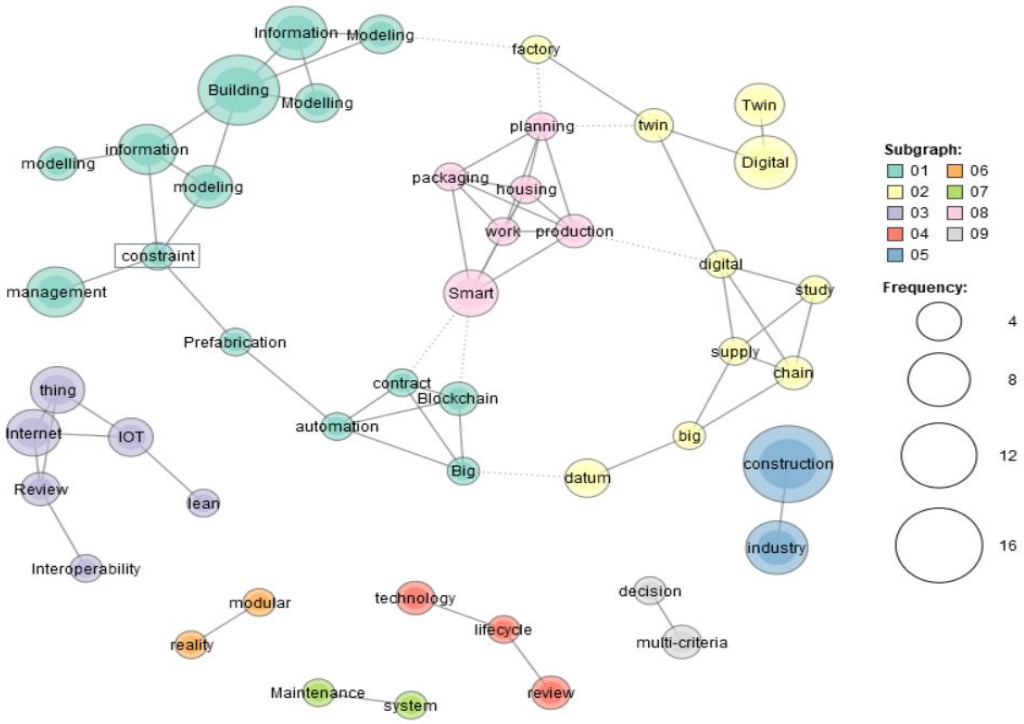
4.1 Bibliometria

As pesquisas envolvendo os três termos nas bases buscadas iniciaram em 2017, sendo que o ano de 2022 é o mais representativo com 17 artigos publicados, o que representa o aumento no interesse do tema atualmente. "*Automation in Construction*" foi o meio de publicação com maior número de artigos, representando 21% da amostra. Seguido por "*Journal of Cleaner Production*" e "*Advanced Engineering Informatics*". O "APÊNDICE A" apresenta a lista final dos artigos selecionados.

4.2 Mineração dos dados

A análise de co-ocorrência de rede de palavras-chaves, auxilia na elaboração de mapas para descrição do conhecimento e relação entre artigos por meio das palavras-chaves. O tamanho do círculo envolto na palavra indica a frequência com que a palavra aparece nos artigos e as conexões são geradas de acordo com o a proximidade entre as palavras nos artigos. Na Figura 2, "*construction*" e "*building*" foram as palavras com maior frequência. Pode-se destacar que a palavra "*lean*" aparece relacionada com "IoT", "internet" e "*interoperability*", porém não está relacionada com "*planning*", "*production*" ou "*management*" como se poderia esperar. Outra vertente de co-ocorrência é a conexão em termos do "BIM" com "*automation*", "*blockchain*", "*smart*", "*digital*" e "*twin*".

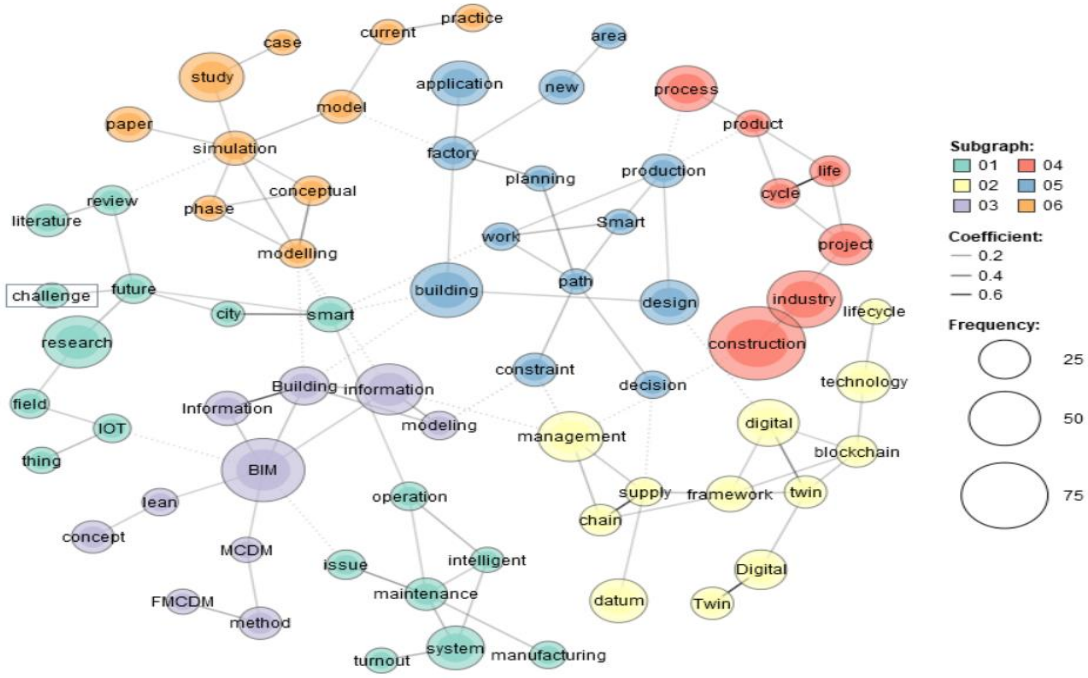
Figura 2: Co-ocorrência de rede de palavras-chave.



Fonte: os autores

Na análise de co-ocorrência de rede de palavras contemplando o título, resumo e palavras-chave (Figura 3), existe forte relação entre "*construction*" e "*industry*".

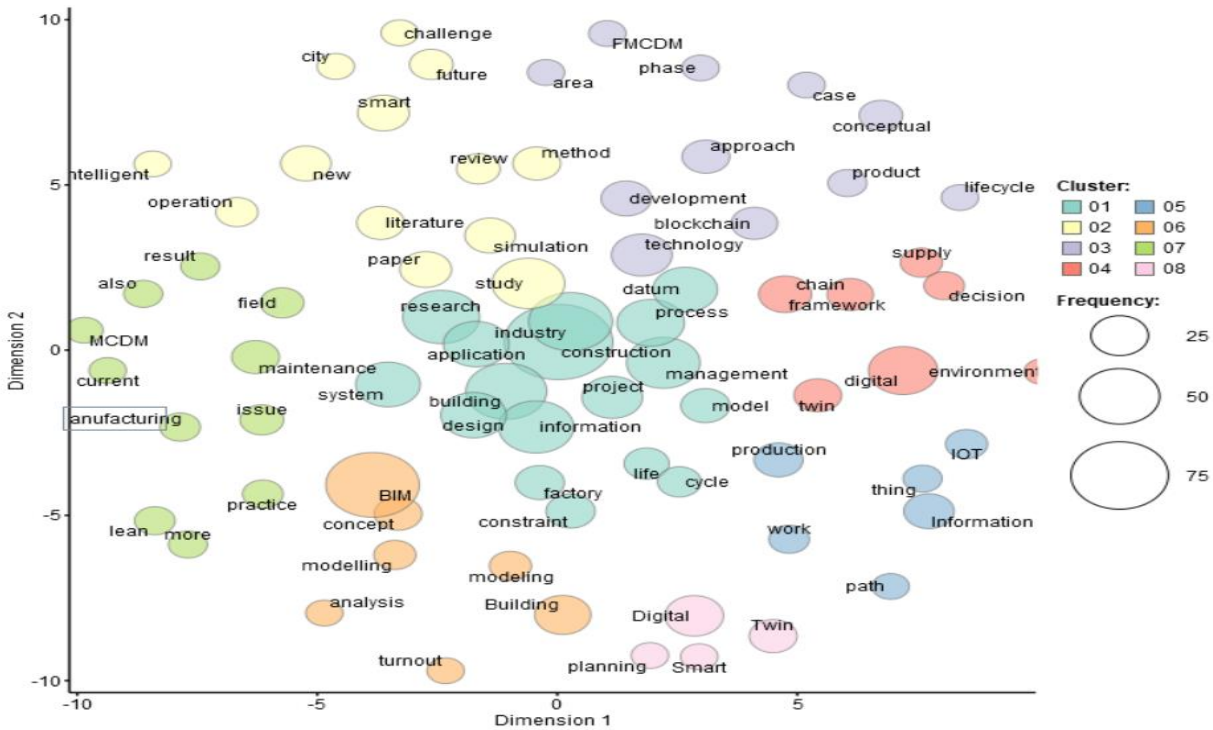
Figura 3: Co-ocorrência de rede de palavras (título, resumo e palavras-chave).



Fonte: os autores

Para escala multidimensional de palavras (Figura 4), existe grande concentração em "*management*", "*information*" e "*industry*". "*Lean*" e "*Digital Twin*" aparecem em área mais periféricas do mapa.

Figura 4: Escala multidimensional de palavras.

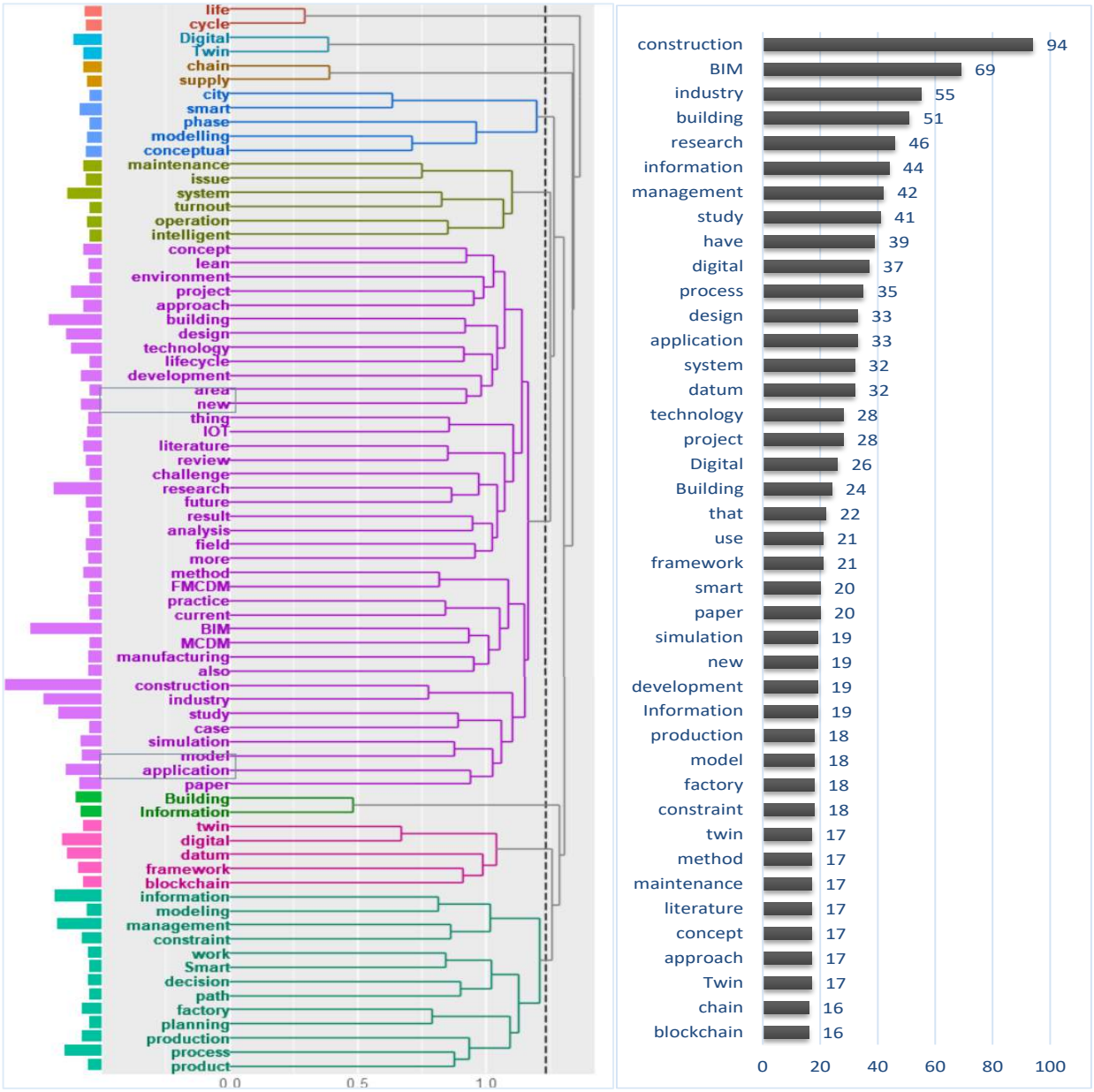


Fonte: os autores

O coeficiente de similaridade de Jaccard foi utilizado para medir a associação entre os termos da pesquisa. O coeficiente de similaridade de Jaccard, também conhecido como coeficiente de comunidade, mede a

similaridade definida pela razão entre o número de elementos da intersecção e o número de elementos da união. Por exemplo, "*digital twin*" se relaciona com "*smart*", "*production*", "*process*", "*plannig*", "*product*" e "*decision*". E estas palavras se relacionam com "*building information*". A Figura 5 (à esquerda) apresenta a formação de *clusters* utilizando o coeficiente de similaridade de Jaccard. A Figura 5 (à direita) apresenta a análise de frequência das palavras presentes no texto desenvolvido com o título, resumo e palavras-chave das publicações em análise. "construction", "BIM" e "industry" foram as palavras com maior frequência, nessa ordem.

Figura 5: Clusters (à esquerda) e análise de frequência de palavras (à direita).



Fonte: os autores

Utilizando a análise de cluster (Figura 5 à esquerda) e os mapas de análise de co-ocorrência (Figura 2 e Figura 3) e a escala multi-dimensional de palavras (Figura 4) foi possível identificar seis tópicos ou clusters para descrever a relação do conhecimento entre os artigos analisados: C1 – *Smart Bulding Design*; C2 – *Construction Industry Process*; C3 - *Digital Twin Technology*; C4 – L*eanBIM*; C5 – *Managing Construction Information*; C6 – *Conceptual Model Simulation*.

Por meio de análise dos estudos da amostra, foram identificadas algumas limitações e lacunas de pesquisa que podem ser subsídio para futuras pesquisas na área. Kaewunruen e Lian (2019) indicam a necessidade de explorar a eficiência do modelo 6D BIM em relação à sustentabilidade e a aplicação do BIM no gerenciamento do ciclo de vida de sistemas de mudança de direção de trens, conhecidos como "*railway turnouts*". Mark *et al*.

(2021) abordam a transição da produção artesanal para a produção em fluxo personalizada, por meio do uso de elementos pré-fabricados modulares de concreto. Embora essa abordagem apresente vantagens, como redução de tempo e recursos, limitações ainda precisam ser exploradas, como a integração do modelo digital e a gestão da qualidade ao longo da vida útil da estrutura. Futuras pesquisas podem se concentrar nessas áreas para aprimorar o processo de produção modular e maximizar seus benefícios. Menozzi e Danzi (2019) aplicam o conceito de gêmeo digital para túneis e estruturas subterrâneas. Embora tenham sido feitos avanços significativos na compreensão dos processos de gerenciamento e na criação de gêmeos digitais detalhados, ainda existem limitações a serem superadas. Isso inclui a necessidade de aprimorar a interoperabilidade dos dados, a automação de processos e o desenvolvimento de linguagens avançadas de consulta. Lee *et* al. (2021) apresentam uma abordagem para melhorar a colaboração e a compartilhamento de informações na indústria da construção. Segundo tais autores, a integração de gêmeos digitais e *blockchain* ainda está em estágio inicial de desenvolvimento, e é necessário um trabalho adicional para aprimorar a interoperabilidade e a escalabilidade dessas tecnologias. Além disso, é importante considerar questões de privacidade e segurança dos dados ao implementar um framework desse tipo em projetos de construção.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diversas são as possibilidades de pesquisa e aplicação dos conceitos explorados nessa pesquisa. Compreender como o meio acadêmico está avançando e quais são os tópicos mais promissores no tema pode auxiliar no desenvolvimento de pesquisas mais alinhadas com as necessidades dos diferentes atores da ICC.

Em conclusão, a pesquisa examinou as sinergias, padrões, tendências e lacunas nas pesquisas relacionadas ao *Digital Twin*, *Building Information Modeling* e *Lean Construction*. A análise bibliométrica e a mineração de dados forneceram insights sobre os principais tópicos abordados e as conexões entre eles. Foi constatado que o BIM oferece possibilidades de acelerar o processo de projeto, construção e gerenciamento de instalações na indústria da construção. O DT vai além do BIM, permitindo uma modelagem mais atualizada e a simulação de cenários "e se" para solucionar problemas e tomar ações proativas. A aplicação do pensamento enxuto (*Lean*) na construção busca reduzir o desperdício e aumentar a produtividade das empresas. A análise bibliométrica revelou um aumento no interesse pelo tema nos últimos anos, com as publicações concentradas em periódicos como "*Automation in Construction*" e "*Journal of Cleaner Production*". A mineração de dados identificou os principais tópicos abordados nas pesquisas, divididos em 6 clusters como o C1 – *Smart Bulding Design* ou projeto de edifícios inteligentes, C2 – *Construction Industry Process* ou processos na indústria da construção, C3 - *Digital Twin Technology* ou tecnologia de gêmeo digital, C4 – *LeanBIM* ou integração do Lean com BIM, C5 – *Managing Construction Information* ou gerenciamento da informação na construção e C6 – *Conceptual Model Simulation* ou simulação de modelos conceituais.

Outras limitações e lacunas identificadas nas pesquisas abrangem a eficiência do modelo 6D BIM em relação à sustentabilidade, a integração do modelo digital na produção em fluxo personalizada, a interoperabilidade e automação de processos no uso de gêmeos digitais para túneis e estruturas subterrâneas, e a necessidade de aprimorar a interoperabilidade e escalabilidade da integração de gêmeos digitais e *blockchain* na indústria da construção. Esses resultados fornecem uma visão abrangente das pesquisas recentes nessa área e podem orientar futuros estudos e aplicações práticas na ICC. Foram apontados seis possíveis tópicos de pesquisa para explorar esta sinergia.

A principal contribuição desse trabalho é a identificação das sinergias entre DT, BIM e *Lean* e a análise das limitações e lacunas de pesquisas dos trabalhos da amostra, sugerindo possíveis frentes para trabalhos futuros. A integração do DT, BIM e *Lean* pode ser uma abordagem promissora para enfrentar os desafios da Indústria da Construção Civil, como baixa produtividade e falta de avanços tecnológicos. A aplicação desses conceitos pode acelerar e potencializar a evolução da indústria, tornando-a mais eficiente, sustentável e capaz de atender às expectativas dos clientes. No entanto, é importante compreender as frentes de foco para a aplicação desses conceitos, a fim de otimizar os esforços e obter os melhores resultados.

6 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) para realização desse trabalho.

REFERÊNCIAS

ANSAH, Mark Kyeredey et al. **A review and outlook for integrated BIM application in green building assessment**. Sustainable Cities and Society, v. 48, p. 101576, 2019.

BOJE, Calin et al. **Towards a semantic Construction Digital Twin: Directions for future research**. Automation in Construction, v. 114, p. 103179, 2020.

DUMAIS, Susan et al. **Using SVMs for text categorization**. IEEE Intelligent Systems, v. 13, n. 4, p. 21-23, 1998.

FYTILAKOS, Ioannis. **Text mining in fisheries scientific literature: A term coding approach**. Ecological Informatics, v. 61, p. 101203, 2021.

HAKAS PRAYUDA, Fanny Monika et al. **Critical Review on Development of Lean Construction in Indonesia**. In: Proceedings of the 4th International Conference on Sustainable Innovation 2020–Technology, Engineering and Agriculture. 2021.

HIGUCHI, Koichi. **KH Coder 3 reference manual**. Kioto (Japan): Ritsumeikan University, 2016.

LEE, Dongmin et al. **Integrated digital twin and blockchain framework to support accountable information sharing in construction projects**. Automation in construction, v. 127, p. 103688, 2021.

MADNI, Azad M.; MADNI, Carla C.; LUCERO, Scott D. **Leveraging digital twin technology in model-based systems engineering**. Systems, v. 7, n. 1, p. 7, 2019.

OPOKU, De-Graft Joe et al. **Digital twin application in the construction industry: A literature review**. Journal of Building Engineering, p. 102726, 2021.

OZTURK, Gozde Basak. **Interoperability in building information modeling for AECO/FM industry**. Automation in Construction, v. 113, p. 103122, 2020.

ROTHER, M.; SHOOK, J. **Learning to See: Value Stream Mapping to Add Value and Eliminate Muda**. Lean Enterprise Institute: Boston, MA, USA, 2003.

SEPASGOZAR, Samad ME et al. **Lean Practices Using Building Information Modeling (BIM) and Digital Twinning for Sustainable Construction**. Sustainability, v. 13, n. 1, p. 1-1, 2020.

TEZEL, Algan et al. **Lean construction and BIM in small and medium-sized enterprises (SMEs) in construction: a systematic literature review**. Canadian Journal of Civil Engineering, v. 47, n. 2, p. 186-201, 2020.

APÊNDICE A: LISTA FINAL DA PUBLICAÇÕES SELECIONADAS

Abdelmegid, M. A., González, V. A., O'Sullivan, M., Walker, C. G., Poshdar, M., & Ying, F. (2020). **The roles of conceptual modelling in improving construction simulation studies: A comprehensive review**. Advanced Engineering Informatics, 46, 101175. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aei.2020.101175

Al-Saeed, Y., Edwards, D. J., & Scaysbrook, S. (2020). **Automating construction manufacturing procedures using BIM digital objects (BDOs): Case study of knowledge transfer partnership project in UK**. Construction Innovation, 20(3), 345–377. https://doi.org/10.1108/CI-12-2019-0141

Alvanchi, A., TohidiFar, A., Mousavi, M., Azad, R., & Rokooei, S. (2021). **A critical study of the existing issues in manufacturing maintenance systems: Can BIM fill the gap?** Computers in Industry, 131, 103484. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compind.2021.103484

Barata, J. (2021). **The fourth industrial revolution of supply chains: A tertiary study**. Journal of Engineering and Technology Management, 60, 101624. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jengtecman.2021.101624

Boje, C., Guerriero, A., Kubicki, S., & Rezgui, Y. (2020). **Towards a semantic Construction Digital Twin: Directions for future research**. Automation in Construction, 114(November 2019), 103179. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103179

Chen, L., & Pan, W. (2021). **Review fuzzy multi-criteria decision-making in construction management using a network approach**. Applied Soft Computing, 102, 107103. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.asoc.2021.107103

Ciribini, A. L. C., Pasini, D., Tagliabue, L. C., Manfren, M., Daniotti, B., Rinaldi, S., & De Angelis, E. (2017). **Tracking Users' Behaviors through Real-time Information in BIMs: Workflow for Interconnection in the Brescia Smart Campus Demonstrator**. Procedia Engineering, 180, 1484–1494. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.311

He, R., Li, M., Gan, V. J. L., & Ma, J. (2021). **BIM-enabled computerized design and digital fabrication of industrialized buildings: A case study**. Journal of Cleaner Production, 278, 123505. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123505

Jiang, W., Ding, L., & Zhou, C. (2022). **Digital twin: Stability analysis for tower crane hoisting safety with a scale model**. Automation in Construction, 138, 104257. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104257

Jiang, Y., Li, M., Li, M., Liu, X., Zhong, R. Y., Pan, W., & Huang, G. Q. (2022). **Digital twin-enabled real-time synchronization for planning, scheduling, and execution in precast on-site assembly**. Automation in Construction, 141, 104397. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104397

Juma, M., & Shaalan, K. (2020). 4 - Cyberphysical systems in the smart city: challenges and future trends for strategic research. **In** A. E. Hassanien & A. Darwish (Eds.), Swarm Intelligence for Resource Management in Internet of Things (pp. 65–85). Academic Press. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818287-1.00008-5

Kaewunruen, S., & Lian, Q. (2019). **Digital twin aided sustainability-based lifecycle management for railway turnout systems**. Journal of Cleaner Production, 228, 1537–1551. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.156

Lee, D., Lee, S. H., Masoud, N., Krishnan, M. S., & Li, V. C. (2021). **Integrated digital twin and blockchain framework to support accountable information sharing in construction projects**. Automation in Construction, 127, 103688. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103688

Li, Q., & Liu, A. (2019). **Big Data Driven Supply Chain Management**. Procedia CIRP, 81, 1089–1094. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.03.258

Li, X., Chi, H., Wu, P., & Shen, G. Q. (2020). **Smart work packaging-enabled constraint-free path re-planning for tower crane in prefabricated products assembly process**. Advanced Engineering Informatics, 43, 101008. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aei.2019.101008

Li, X., Shen, G. Q., Wu, P., Xue, F., Chi, H., & Li, C. Z. (2019). **Developing a conceptual framework of smart work packaging for constraints management in prefabrication housing production**. Advanced Engineering Informatics, 42, 100938. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aei.2019.100938

Mark, P., Lanza, G., Lordick, D., Albers, A., König, M., Borrmann, A., Stempniewski, L., Forman, P., Frey, A. M., Renz, R., Manny, A., Koenig, M., Borrmann, A., Stempniewski, L., Forman, P., Frey, A. M., Renz, R., & Manny, A. (2021). **From craft to customised flow production - the priority program adaptive modularised constructions made in a flux**. Bautechnik, 98(3), 245–258. https://doi.org/10.1002/bate.202000110

McNamara, A. J., & Sepasgozar, S. M. E. (2021). **Intelligent contract adoption in the construction industry: Concept development**. Automation in Construction, 122, 103452. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103452

Menozzi, A., & Danzi, A. (2019). **i-Bim: Digital Twin for Tunnels and Underground Structures**. GALLERIE E GRANDI OPERE SOTTERRANEE, 130, 17–28.

Michalski, A., Głodziński, E., & Böde, K. (2022). **Lean construction management techniques and BIM technology–systematic literature review**. Procedia Computer Science, 196, 1036–1043.

Nazareth, A. P. (2019). **How close is the built environment to achieving circularity? IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, 225(1). https://doi.org/10.1088/1755-1315/225/1/012070

Opoku, D.-G. J., Perera, S., Osei-Kyei, R., & Rashidi, M. (2021). **Digital twin application in the construction industry: A literature review**. Journal of Building Engineering, 40, 102726. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102726

Ozturk, G. B. (2021). **Digital Twin Research in the AECO-FM Industry**. Journal of Building Engineering, 40, 102730. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102730

Panteli, C., Kylili, A., & Fokaides, P. A. (2020). **Building information modelling applications in smart buildings: From design to commissioning and beyond A critical review**. Journal of Cleaner Production, 265, 121766. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121766

Sepasgozar, S. M. E., Hui, F. K. P., Shirowzhan, S., Foroozanfar, M., Yang, L., & Aye, L. (2021). **Lean practices using building information modeling (Bim) and digital twinning for sustainable construction**. Sustainability (Switzerland), 13(1), 1–22. https://doi.org/10.3390/su13010161

Succar, B., & Poirier, E. (2020). **Lifecycle information transformation and exchange for delivering and managing digital and physical assets**. Automation in Construction, 112, 103090. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103090

Tan, T., Mills, G., Papadonikolaki, E., & Liu, Z. (2021). **Combining multi-criteria decision making (MCDM) methods with building information modelling (BIM): A review**. Automation in Construction, 121, 103451. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103451

Yang, R., Wakefield, R., Lyu, S., Jayasuriya, S., Han, F., Yi, X., Yang, X., Amarasinghe, G., & Chen, S. (2020). **Public and private blockchain in construction business process and information integration**. Automation in Construction, 118, 103276. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103276

Yu, G., Wang, Y., Hu, M., Shi, L., Mao, Z., & Sugumaran, V. (2021). **RIOMS: An intelligent system for operation and maintenance of urban roads using spatio-temporal data in smart cities**. Future Generation Computer Systems, 115, 583–609. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.future.2020.09.010