XXI ENTAC – Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído
14 a 16 de outubro de 2026 | Goiânia-Brasil
DOI: https://doi.org/10.46421/entac.v21i1.8934

Gêmeos Digitais e BIM na Transformação Digital do Ambiente Construído

Digital Twins and BIM in the digital transformation of Built Environment

Guilherme Akyo Cremonesi
Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo- IPT | São Paulo | Brasil | gcremonesi@ipt.br
Eliane Hayashi Suzuki
Universidade de São Paulo | São Paulo | Brasil | eliane.suzuki@usp.br
Maria Akutsu
Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo- IPT | São Paulo | Brasil | akutsuma@ipt.br
Jacqueline Elhage Ramis
Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo- IPT | São Paulo | Brasil | jacramis@ipt.br

Resumo

A indústria da Arquitetura, Engenharia, Construção e Operação (AECO) está em processo de transformação digital do ambiente construído por meio do uso de diferentes tecnologias. Enquanto a modelagem da informação da construção (BIM) descreve o edifício, o Gêmeo Digital (GD) revela como ele se comporta. O objetivo deste artigo é contribuir com a compreensão sobre GD para a transformação digital do ambiente construído. Para isso, buscaram-se definições de GD, como funcionam, qual a sua relação com BIM e os principais desafios, por meio de uma revisão bibliográfica narrativa. O BIM estabelece a base geométrica e semântica estática do ambiente construído ativo, enquanto os GDs adicionam conectividade dinâmica em tempo real permitindo entender as interações com o mundo físico. A integração exige uma arquitetura complexa, da camada física (sensores) à cognitiva (digital). Contudo, a adoção em larga escala enfrenta desafios significativos, como a interoperabilidade semântica e a desordem informacional de diferentes fontes de dados heterogêneos. A evolução do setor depende tanto da geometria como de uma governança de dados robusta, padrões interoperáveis e uma visão que alinhe tecnologias aos usuários.

Palavras-chave: Gêmeos digitais. Modelagem da informação da construção. BIM. Transformação digital. Ambiente construído.

Abstract

The Architecture, Engineering, Construction, and Operation (AECO) industry is undergoing a digital transformation of the built environment concerning various technologies. While Building Information Modeling (BIM) describes the building, the Digital Twin (DT) reveals its behavior. The objective of this article is to contribute to the understanding of DTs in the digital transformation of the built environment. To this end, definitions of DTs, their functionality, their

relationship with BIM, and the main challenges were explored through a narrative literature review. BIM establishes the static geometric and semantic foundation of the asset, while DTs add real-time dynamic connectivity, providing an understanding of interactions with the physical world. Integration requires a complex architecture, from the physical layer (sensors) to the cognitive (digital) layer. However, the large-scale utilization faces significant challenges, such as semantic interoperability and informational disorder from heterogeneous data sources. The evolution of the sector depends on both geometry and robust data governance, interoperable standards, and a vision that aligns technologies with users.

Keywords: Digital twin. Building information modeling. Digital transformation. Built environment.

INTRODUÇÃO

A transformação digital no setor de Arquitetura, Engenharia, Construção e Operação (AECO) tem avançado à medida que modelos informacionais, sensoriamento e plataformas de análise passam a ser articulados ao longo do ciclo de vida das edificações. Nesse contexto, a aproximação entre Building Information Modeling (BIM) e gêmeos digitais (GDs) pode ser compreendida menos como uma solução já consolidada e mais como uma frente estratégica de integração entre a estruturação semântica do ambiente construído ativo, típica do BIM, e o uso de dados operacionais para monitoramento, simulação e apoio à decisão [1], [2], [3], [4].

Essa articulação é relevante porque amplia o potencial de continuidade informacional entre projeto, construção, operação e manutenção; contudo, seus efeitos sobre interoperabilidade e gestão orientada por dados dependem de condições ainda em aberto, como protocolos de integração, conectividade com sensores e padronização dos fluxos de dados [4].

A transformação digital está remodelando o ambiente construído, impulsionada pela convergência de tecnologias digitais avançadas e pela crescente demanda por edificações mais sustentáveis, resilientes e eficientes [5]. Nesse contexto, os gêmeos digitais podem ser compreendidos como representações digitais dinâmicas de ativos físicos, alimentadas por dados e modelos, capazes de apoiar monitoramento, simulação, predição e gestão ao longo do ciclo de vida.

Os GD se apoiam, em grande medida, nos fundamentos estabelecidos pelo BIM, amplamente adotado no setor da AECO, como base para a modelagem, a documentação e a estruturação semântica das informações do ambiente construído ativo [6].

No entanto, a literatura indica que a adoção integrada dessas abordagens ainda é incipiente, e BIM e gêmeos digitais não devem ser tratados como conceitos equivalentes. Em termos analíticos, o BIM organiza e estrutura a informação do ambiente construído ativo (geometria, atributos, especificações e documentação técnica), funcionando como base informacional para as fases de projeto e construção e, em muitos casos, como ponto de partida para aplicações posteriores [1], [3]. O gêmeo digital acrescenta a essa base uma dimensão dinâmica, ao conectar o modelo virtual a dados provenientes da operação do edifício, como sensores Internet das Coisas (IoT), históricos de desempenho e rotinas analíticas, permitindo atualização

contínua, monitoramento quase em tempo real, simulação de cenários e suporte à manutenção e à tomada de decisão [2], [3], [4], [7].
Essa distinção é central porque mostra que o GD não substitui simplesmente o BIM; ele depende, em grande medida, da qualidade e da reutilização dos modelos BIM, mas exige capacidades adicionais de integração, infraestrutura e governança de dados para produzir valor efetivo na operação e manutenção [4].
Portanto, este artigo tem como objetivo desenvolver uma revisão da literatura sobre (i) as definições de GDs e seu funcionamento, (ii) sua relação com o BIM e (iii) os principais desafios.

MÉTODO

A revisão bibliográfica adotou o método narrativo, sintetizando o conhecimento a partir da busca de conexões dos diferentes elementos sobre os assuntos para uma compreensão do tema seguindo as etapas: i) definição das questões a serem investigadas ii) definição das bases e palavras-chave, iii) leitura e análise dos materiais, iv) síntese e escolha por aderência ao tema. Essa metodologia permite delinear descritivamente e transversalmente assuntos contextualizados no tema, além de permitir uma articulação holística das ideias e descobertas priorizando a relevância da discussão [8].

A revisão buscou sobre as definições de GDs, sua relação com BIM e alguns dos principais desafios, pelo Google Acadêmico, *ScienceDirect* e *Scopus*, utilizando as palavras-chave “gêmeos digitais”, “*digital twin*”, “*BIM*”, “modelagem da informação da construção”, “transformação digital”, “*digital transformation*”, “ambiente construído”, “*built environment*”.

Também foram utilizadas as ferramentas *Scopus AI* e *Leapspace* na busca, filtragem e seleção de materiais e, de forma a auxiliar a análise dos conteúdos dos materiais selecionados, o *NotebookLM*, levantando as principais relações entre as diferentes referências, baseando-se nos objetivos, e conferindo nas fontes. As buscas, utilizando as ferramentas com inteligência artificial, partiram da problemática e das iterações por meio de questionamentos sequenciais, até que respostas mais específicas fossem obtidas, limitando-as aos assuntos de interesse, incluindo suas referências.

Os artigos foram selecionados considerando sua relação com ao menos um dos assuntos de interesse, incluindo outros pontos de vista sobre um mesmo assunto, proporcionando uma visão mais abrangente e sob diferentes pontos de vista. Aqueles que abordavam o tema sob uma ótica específica foram removidos, assim como os duplicados. Em síntese, as fontes de artigos por editora utilizadas na pesquisa foram: Engineering Journal, ASCE, Taylor & Francis, I.A.A.R.C, MDPI, ScienceDirect, IEEE, SRIT, Ensino & Pesquisa, EDP Sciences, Emerald, UPV, ITcon, Springer, IGLC, IET e ACM.

A pesquisa se propôs a estudar as publicações que tratassem sobre GDs e a modelagem da informação da construção (BIM) dentro do contexto de transformação digital do ambiente construído, demonstrando os potenciais dessas tecnologias quando utilizadas em conjunto.

GÊMEOS DIGITAIS NO AMBIENTE CONSTRUÍDO

O conceito de Gêmeos Digitais (GD) surgiu antes de sua aplicação na construção civil, originando-se na década de 1990 com o conceito de *Mirrored Worlds* de Gelernter e sendo formalizado por Grieves em 2003. Na década de 2010, a tecnologia consolidou-se industrialmente por meio de *roadmaps* da NASA como uma simulação multifísica e multiescala voltada para prever comportamentos e mitigar falhas em ambientes críticos e complexos.

GDs podem ser definidos como réplicas virtuais dinâmicas de ativos ou entidades físicas digitalizadas (de produtos, serviços ou processos), integrando dados, em tempo real ou assíncronos, para replicar estados e comportamentos do Gêmeo Físico (GF), com base em condições passadas (histórico) e atuais (em tempo real) para projetar condições futuras (testar cenários) [9], [10], [11], [12], [13].

Quando a comunicação é unidirecional e o fluxo de dados ocorre do ativo físico para sua réplica virtual, essa configuração pode ser caracterizada como uma Sombra Digital *(Digital Shadow)* [9], [14]. Este tipo de configuração pode ser utilizado numa fase intermediária entre o modelo digital e o gêmeo digital.

O GD normalmente compreende um ativo físico real, uma entidade virtual detalhada no ciberespaço e uma conexão contínua e bidirecional de dados entre ambos. Os modelos tridimensionais associados a dados de sensores já caracterizam um tipo de GD, enquanto aqueles que possuem capacidade de retroalimentação ativa para inferir, decidir e atuar sobre o ambiente físico são classificados como GDs autônomos.

No setor da AECO, a adoção dessa tecnologia ocorre de forma gradual baseada em taxonomias que classificam os GDs em níveis de maturidade, complexidade e grau de autonomia.

GÊMEO DIGITAL E BIM

O GD e o BIM são tecnologias com características semelhantes e ao mesmo tempo distintas. Ambos são representações digitais de um objeto físico. O BIM possui dados estáticos de características da construção associadas às geometrias, e os GDs sincronizam dados a um objeto que passa a se tornar uma entidade física ativa. Isso significa aumentar a compreensão sobre o comportamento das construções, pois é inserido o seu contexto dinâmico e variável ao longo do tempo, indo além daquele definido em um dado momento no projeto [15]. No Quadro 1 é apresentada uma síntese dos níveis de maturidade e funcionalidade dos GDs no ambiente construído.

Quadro 1: Níveis de maturidade e funcionalidade dos Gêmeos digitais no Ambiente construído

Nível de maturidade	Classificação do GD	Característica Técnica	Aplicação prática
1	Descritivo	Fornece uma representação virtual estática, capturando detalhes de geometria, design e propriedades dos materiais. Não incorpora dados dinâmicos em tempo real.	Utilizado nas fases iniciais de projeto para visualização, extração de quantitativos e coordenação de interferências. Na prática, é o equivalente a um modelo BIM 3D/4D de alta fidelidade (como construído).
2	Informativo	Integra fluxos de dados em tempo real provenientes de sensores e sistemas de medição físicos, permitindo monitoramento contínuo das condições.	Monitoramento remoto e Gestão de ativos. Painéis de controle (dashboards) exibem temperatura, umidade, ocupação de espaços e níveis instantâneos de consumo de energia, por exemplo.
3	Preditivo	Utiliza análises avançadas, algoritmos de Inteligência Artificial e Machine Learning para extrapolar dados históricos e presentes, prevendo estados futuros.	Manutenção preditiva. Identificação de padrões de anomalia, permitindo a previsão de falhas em sistemas (p. ex. de refrigeração ou elevadores), e fadiga estrutural antes que a falha física ocorra.
4	Abrangente	Oferece uma visão holística que integra múltiplas fontes de Big Data complexas e sobrepõe dados de ciclo de vida com condições de entorno (micro com macro escala).	Planejamento estratégico urbano, modelagem de redes de energia em distritos e avaliação contínua de sustentabilidade. Cruza o comportamento do edifício com dados climáticos, de tráfego e metas macroeconômicas, por exemplo.
5	Autônomo	Possui capacidade de aprendizado contínuo, autodiagnóstico e atuação física automatizada (controle em malha fechada). O sistema toma e executa decisões otimizadas que são supervisionadas pelo ser humano.	Ajuste dinâmico e sem intervenção humana de sistemas prediais. Por exemplo, modulação autônoma de chillers e ventilação mecânica baseada na previsão meteorológica e no rastreamento térmico da ocupação no interior da edificação.

Fonte: Adaptado de [16].

O BIM, por ter revolucionado o setor, é essencialmente uma metodologia de autoria, estruturação e coordenação de banco de dados. Ele serve como um repositório relacional no qual a geometria 3D está ligada a propriedades dos componentes do edifício [15].

Todavia, a topologia de dados do BIM, regida por estruturas padronizadas (p. ex. Industry Foundation Classes - IFC), foi desenhada para abrigar dados estáticos, descritivos e metadados de longo prazo. Quando a fase de construção é concluída, produz-se o modelo "como construído" (*as-built)*.

Em contrapartida, o GD é concebido como um sistema ciberfísico definido por sua dinâmica contínua, telemetria ininterrupta e fluxos de dados bidirecionais, buscando atuar de forma analítica e executiva. O BIM descreve *o que* a estrutura é e *como* foi

concebida, o GD expressa *como* a estrutura está se comportando no momento presente, se está de acordo com o histórico conhecido para o qual foi projetada, e *como* deverá se comportar no futuro sob determinados cenários, situações e eventos [15].

Essas diferenças não devem sugerir uma dicotomia excludente. O BIM é estático, o GD é dinâmico, mas o GD não pode existir sem uma base estrutural espacial. Ele requer uma topologia geométrica e semântica precisa para contextualizar seus dados dinâmicos.

Esta integração não se resume a sobrepor diversos modelos 3D, mas trata-se do estabelecimento de um ecossistema complexo de hardware e software que requer sincronia de processamento, interoperabilidade semântica e a implantação de modelos analíticos baseados em dados. A estrutura da arquitetura dessa integração pode ser dividida em uma matriz de cinco camadas de operação sobrepostas:

- **Camada física e sensorial**: engloba a estrutura tangível do edifício, seus materiais, equipamentos e a instrumentação acoplada. Esta camada é equipada com sensores de (IoT), atuadores robóticos, sistemas de automação predial e medidores inteligentes, os quais são responsáveis por amostrar continuamente grandezas físicas, tais como vibração, luminosidade, CO2e, umidade, consumo de energia [17].
- **Camada de rede e transmissão**: utiliza topologias de comunicação, redes com ou sem fio e protocolos de segurança para transportar a massa bruta de dados de forma segura até os centros de processamento locais (Edge Computing) ou remotos [17].
- **Camada de dados, integração semântica e BIM**: É nesta etapa que a "geminação" (twinning) propriamente ocorre. O modelo BIM IFC é instanciado em um Ambiente Comum de Dados (CDE - Common Data Environment) ou plataforma em nuvem dedicada. Para edifícios novos, o BIM (as-built) já está disponível. No caso de edificações existentes ou históricas, aplica-se a integração reversa, como os processos avançados de Scan-to-BIM [18], [19]. O objetivo é reconstruir virtualmente o ativo físico, extraindo e inferindo primitivas geométricas e metadados semânticos a partir desses levantamentos para compor um BIM confiável [20], [21].
- **Camada de cognição, modelagem analítica e IA**: a capacidade preditiva atua empregando abordagens como data-driven, physics-based ou híbridas, que combinam restrições físicas com aprendizado de máquina para melhorar acurácia, generalização e interpretabilidade em gêmeos digitais [14].
- **Camada de aplicação, serviços e visualização dos usuários**: voltada para a usabilidade dos *Facility Managers* (gestores do edifício). Em projetos pioneiros, os sistemas utilizam interfaces imersivas em 3D. Aplicativos avançados unem a interface BIM com as predições do Gêmeo Digital por meio de dispositivos de Realidade Mista (MR) ou Realidade Estendida (XR). Em operações interativas, por exemplo, um técnico percorre o andar do arranha-céu utilizando os óculos holográficos que projetam o modelo BIM dos dutos superpostos visualmente às paredes físicas, pop-ups mostram a vazão dos

medidores IoT em tempo real, e setas de navegação o direcionam até um equipamento que a IA embarcada no Gêmeo Digital previu falhar na semana seguinte, orquestrando um processo de manutenção eficiente e preditivo [22].

DESAFIOS DOS GÊMEOS DIGITAIS NA TRANSFORMAÇÃO DIGITAL DO AMBIENTE CONSTRUÍDO

A integração entre BIM e Gêmeos Digitais pode ampliar a eficiência operacional, a manutenção preditiva e o suporte à sustentabilidade ao longo do ciclo de vida das edificações [4], [23]. A transposição desses modelos de casos experimentais e pilotos acadêmicos para uma adoção industrial, ambiental e social em larga escala ainda encontra barreiras técnicas.

A passagem de um modelo BIM para um Gêmeo Digital operacional depende de integração com dados de sensores, protocolos de informação, modelos comportamentais e estruturas de gestão de dados que ainda são pouco consolidadas [4], [24], [25].

Outro desafio à adoção em escala de Gêmeos Digitais a partir do BIM está menos em uma única ferramenta e mais na fragmentação dos ecossistemas de dados, softwares e sistemas [22], [26]. A integração entre modelos BIM, sistemas de automação predial, dispositivos IoT e bases operacionais ainda ocorre em ambientes heterogêneos, com formatos proprietários, metadados inconsistentes e baixa interoperabilidade semântica [27].

Nesse contexto, embora o IFC seja central para a interoperabilidade do BIM, ele não resolve sozinho a integração fluida com séries temporais, metadados de sensores, lógica de controle e dados de manutenção, o que tem motivado o uso de ontologias, modelos de conhecimento e semânticos complementares [26], [28].

A aplicação desta integração em empreendimentos finalizados (Gestão de Facilidades) enfrenta certas previsibilidades, porém transpor o GD da Construção (*Construction Digital Twin*) para as fases de construção ativa impõe desafios devido à dinâmica de mudanças constantes do ambiente de obra física [29].

No ambiente construído, o valor do GD decorre da integração entre modelos BIM, fluxos de dados operacionais e capacidades analíticas, porém essa mesma integração introduz desafios persistentes de interoperabilidade, qualidade dos dados, governança, privacidade e segurança [30], [31], [32]. Assim, mais do que uma simples conexão de sistemas prediais, a transformação digital exige arquiteturas seguras, padrões semânticos consistentes e mecanismos robustos de atualização e validação do modelo digital ao longo do ciclo de vida do ativo [26].

Sistemas orientados por Gêmeos Digitais e BIM no ambiente construído dependem da coleta contínua de dados operacionais e de uso para apoiar automação, controle e tomada de decisão. Em edifícios inteligentes, essa infraestrutura pode incluir dados de ocupação, localização, variáveis ambientais, registros de acesso centrados no ocupante [33], [34], [35]. Embora esses recursos ampliem a capacidade de otimização

de conforto, energia e operação, também intensificam riscos de privacidade, vigilância e uso secundário de dados, sobretudo quando diferentes fontes são combinadas para inferir comportamentos, preferências e padrões de circulação dos ocupantes [36].

CONCLUSÃO

A transformação digital sistêmica do ambiente construído materializa-se através do abandono da fragmentação analógica do setor da Arquitetura, Engenharia, Construção e Operação (AECO) em favor de paradigmas ciberfísicos. O estudo e a literatura demonstram que a simbiose arquitetônica, semântica e algorítmica entre a Modelagem da Informação da Construção (BIM) e os Gêmeos Digitais (GD) não configura uma simples justaposição de softwares auxiliares, mas uma reanálise do ambiente construído.

O BIM consolidou-se como uma base descritiva e referencial, por sua capacidade de modelação geométrica detalhada, compatibilização de infraestruturas multidimensionais e mapeamento de propriedades dos materiais, garantindo um mapa topológico fundamental para que qualquer sistema cognitivo inteligente possua consciência situacional. Por sua vez, o GD atua como a contraparte que introduz as variáveis fenomênicas do tempo presente. A partir do processamento do volume de dados, o GD transpõe a estaticidade do *as-built*, ressignificando edifícios e o ambiente construído de forma adaptativa aos contextos [37], [38].

A transformação digital do ambiente construído não pode ser tratada apenas como um desafio técnico de interoperabilidade e desempenho. Os outros desafios envolvem definir quais dados são efetivamente necessários, estabelecer bases legais e mecanismos de consentimento adequados, limitar retenção e compartilhamento, e incorporar princípios de *privacy by design* e governança de acesso desde a concepção dos sistemas. A aceitação dessas tecnologias depende da transparência sobre práticas de coleta e uso dos dados, bem como da percepção de benefício e controle por parte dos usuários. Assim, no uso combinado de Gêmeos Digitais e BIM, o desafio central não é apenas hiperotimizar o espaço construído, mas fazê-lo com salvaguardas éticas e jurídicas compatíveis com os direitos dos ocupantes.

Esse campo de pesquisa permite explorar oportunidades futuras como o desenvolvimento de padrões e plataformas de integração semântica de dados e ontologias, a automação na reconstrução de modelos para agilizar a digitalização de edifícios, a otimização com IA ajustando dinamicamente as operações dos edifícios conforme o contexto e a quantificação e rastreamento de incertezas para quantificar erros inerentes às diferentes técnicas de criação de modelos digitais.

DECLARAÇÃO

Durante a preparação deste artigo, os autores utilizaram as ferramentas Scopus AI e Leapspace para revisão, e o NotebookLM, de forma auxiliar, para analisar os conteúdos dos materiais selecionados. Após a utilização das ferramentas, os autores revisaram e

editaram o conteúdo conforme necessário e assumem total responsabilidade pelo conteúdo do artigo publicado.

REFERÊNCIAS

[1] VISARTSAKUL, B., DAMRIANANT, J. A review of building information modeling and simulation as virtual representations under the digital twin concept. **Engineering Journal**, v. 27, p. 11-27, 2023. DOI: https://doi.org/10.4186/ej.2023.27.1.11.

[2] FENG, H. et al. Digital twin applications for building energy and carbon performance. In: **Digital Twins in Construction and the Built Environment**. Reston: ASCE, 2024.

[3] SALDANA OCHOA, K.S et al. A theoretical framework for integrating digital twins in building lifecycle management. In: **Routledge Handbook of Smart Built Environment**. 1 ed. Abingdon: Routledge, 2025.

[4] REVOLTI, A., GUALTIERI, L., PAUWELS, P., DALLASEGA, P. From building information modeling to construction digital twin: a conceptual framework. **Production and Manufacturing Research**, v. 12, p. 2387679, 2024. DOI: https://doi.org/10.1080/21693277.2024.2387679.

[5] MUHUDIN, A. A. et al. Reframing BIM and Digital Twins for Intelligent Built Environments. **Smart Cities**, v. 9(4), p. 71, 2026. DOI: https://doi.org/10.3390/smartcities9040071.

[6] HEATON, J.; PARLIKAD, A. K. Asset information model to support the adoption of a digital twin: West Cambridge case study. IFAC-PapersOnLine, v. 53, n. 3, p. 366-371, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2020.11.059.

[7] PETRENKO, A.I. From CAD and BIM to Digital Twins. **System Research and Information Technologies**, n. 2, p. 7-24, 2025. https://doi.org/10.20535/SRIT.2308-8893.2025.2.01.

[8] OGASSAVARA, D. et al. Concepções e interlocuções das revisões de literatura narrativa: contribuições e aplicabilidade. **Ensino & Pesquisa**, v. 21, n. 3, p. 8-21, 2023.

[9] SINGH, M. et al. Digital Twin: Origin to Future. **Applied System Innovation**, v. 4, n. 2, p. 36, 2021. DOI: https://doi.org/10.3390/asi4020036.

[10] DIHAN, M. S. et al. Digital twin: Data exploration, architecture, implementation and future. **Heliyon**, v. 10, n. 5, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e26503.

[11] BOTÍN-SANABRIA, D. M. et al. Digital twin technology challenges and applications: A comprehensive review. **Remote Sensing**, v. 14(6), p. 1335, 2022. DOI: https://doi.org/10.3390/rs14061335.

[12] TAO, F. et al. Digital twin in industry: State-of-the-art. **IEEE Transactions on industrial informatics**, v. 15(4), p. 2405-2415, 2018.

[13] SEGOVIA, M.; GARCIA-ALFARO, J. Design, modeling and implementation of digital twins. **Sensors**, v. 22(14), p. 5396, 2022. DOI: https://doi.org/10.3390/s22145396.

[14] IRANSHAHI, K. et al. Digital twins: Recent advances and future directions in engineering fields. **Intelligent Systems with Applications**, v. 26, p. 200516, 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.iswa.2025.200516.

[15] RADZI, A.R. et al. Relationship between digital twin and building information modeling: a systematic review and future directions. **Construction Innovation: Information, Process, Management**, v. 24(3), p. 811-829, 2024. DOI: https://doi.org/10.1108/CI-07-2022-0183.

[16] LEMIAN, Diana; BODE, Florin. Digital twins in the building sector: Implementation and key features. In: **E3S Web of Conferences**. EDP Sciences, 2025. p. 05004.

[17] CHEN, Z. et al. Life Cycle-Oriented Digital Twin for Civil Infrastructure Assets: A natural language processing model-assisted review**. Journal of Infrastructure Intelligence and Resilience**, v. 5(3), p. 100225, 2026.

[18] ANDRIASYAN, M., MOYANO-CAMPOS, J., NIETO, J.E., ANTÓN, D. From point cloud data to Building Information Modelling: An automatic parametric workflow for heritage. **Remote Sensing**, v. 12(7), p. 1094, 2020. DOI: https://doi.org/10.3390/rs12071094.

[19] ESCUDERO, P.A. Scan-to-HBIM: automated transformation of point clouds into 3D BIM models for the digitization and preservation of historic buildings. **Vitruvio**, v. 8, p. 53-63, 2023. DOI: https://doi.org/10.4995/vitruvio-ijats.2023.20413.

[20] CROCE, V. et al. From the semantic point cloud to heritage-building information modeling: A semiautomatic approach exploiting machine learning**. Remote Sensing**, v. 13(3), p. 461, 2021. DOI: https://doi.org/10.3390/rs13030461.

[21] CHELARU, B., ONUȚU, C., UNGUREANU, G., SERBANOIU, A.A. (2024) Integration of point cloud, historical records, and condition assessment data in HBIM. **Automation in Construction**, v. 161, p. 105347, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105347.

[22] DENG, M.; MENASSA, C. C.; KAMAT, V. R. From BIM to digital twins: A systematic review of the evolution of intelligent building representations in the AEC-FM industry. **Journal of information technology in construction**, v. 26, p. 58-83, 2021. DOI: https://doi.org/10.36680/j.itcon.2021.005.

[23] CUBIDES, A.S., JRADI, M. A review of building digital twins to improve energy efficiency in the building operational stage. **Energy Informatics**, v. 7, p. 11, 2024. DOI: https://doi.org/10.1186/s42162-024-00313-7.

[24] YOON, S. Virtual Building Models in built environments. **Developments in the Built Environment**, v. 18, p. 100453, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.dibe.2024.100453.

[25] PARK, J. Framework for BIM-to-Asset Data Integration in Digital Twins. Computing in Civil Engineering. In: **Computing in Civil Engineering 2025: Computational and Intelligent Technologies**. Reston: ASCE, 2025.

[26] BOJE, C., GUERRIERO, A., KUBICKI, S., REZGUI, Y. Towards a semantic Construction Digital Twin: Directions for future research. **Automation in Construction**, v. 114, p. 103179, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103179.

[27] LUCCHI, E. Digital twins and smart sensors for building performance and maintenance optimization. In: **Digital Transformation in the Construction Industry**. Sawston: Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering, 2025, p. 417-428.

[28] TUHAISE, V.V., TAH, J.H.M., ABANDA, F.H. Technologies for digital twin applications in construction. **Automation in Construction**, v. 152, p. 104931, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.104931.

[29] PAL, A. et al. Automated vision-based construction progress monitoring in built environment through digital twin. **Developments in the Built Environment**, v. 16, p. 100247, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.dibe.2023.100247.

[30] SEMERARO, C., BIYROUTI, S.J.A., ABDELKAREEM, M.A., OLABI, A.G. Digital twin-driven innovation in smart and green building: a structured review and research agenda. **International Journal of Thermofluids**, v. 29, p. 101393, 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijft.2025.101393.

[31] ZRIBI, H. et al. Industry 4.0: digital twins characteristics, applications, and challenges in-built environments. **Production and Manufacturing Research**, v. 13(1), p. 2456277, 2025. DOI: https://doi.org/10.1080/21693277.2025.2456277.

[32] YOON, S. Building digital twinning: Data, information, and models**. Journal of Building Engineering**, v. 76, p. 107021, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.107021

[33] PARK, J.Y. et al. A critical review of field implementations of occupant-centric building controls. **Building and Environment**, v. 165, p. 106351, 2019. DOI: https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106351.

[34] LABEODAN, T., ZEILER, W., BOXEM, G., ZHAO, Y. Occupancy measurement in commercial office buildings for demand-driven control applications - A survey and detection system evaluation. **Energy and Buildings**, v. 93, p. 303-314, 2015. DOI: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.02.028.

[35] WANG, Z. et al. Advanced occupant perception technologies in building automation systems: A comprehensive review of computer vision and wearable devices. **Journal of Building Engineering**, v. 117, p. 114948, 2026. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jobe.2025.114948.

[36] VAN ZOONEN, L. Privacy concerns in smart cities. **Government Information Quarterly**, v. 33, p. 472-480, 2016. DOI: https://doi.org/10.1016/j.giq.2016.06.004.

[37] AZHAR, S. Building information modeling (BIM): Trends, benefits, risks, and challenges for the AEC industry. **Leadership and management in engineering**, v. 11, n. 3, p. 241-252, 2011. DOI: https://doi.org/10.1061/(ASCE)LM.1943-5630.0000127.

[38] MOUSAVI, Y. et al. Digital twin technology in built environment: A review of applications, capabilities and challenges. **Smart Cities**, v. 7(5), p. 2594-2615, 2024. DOI: https://doi.org/10.3390/smartcities7050101.