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.v21i1.8835

Proposta de framework para a evolução multiescala dos Gêmeos Digitais no ambiente construído

Proposed framework for the multiscale evolution of Digital Twins in the built environment

Alisson Souza Silva
Universidade SENAI CIMATEC | Salvador | Brasil | so_alisson@hotmail.com
Ariane Prevedello Rubin
Universidade SENAI CIMATEC | Salvador | Brasil | arianeprubin@hotmail.com
Mariana da Penha Novaes
Universidade SENAI CIMATEC | Salvador | Brasil | mariana.penha.novaes@hotmail.com
Bruna Bueno Mariani
Universidade SENAI CIMATEC | Salvador | Brasil | brunabmariani@gmail.com
Moises Ferreira Eleoterio Silva
Universidade SENAI CIMATEC | Salvador | Brasil | eng_mfes@yahoo.com.br

Resumo
Os Gêmeos Digitais (GDs) têm ampliado suas aplicações no ambiente construído, embora ainda sejam frequentemente desenvolvidos de forma fragmentada e com integração limitada entre escalas, dados e sistemas. Este estudo propõe um framework multiescala que articula edifício, infraestrutura e cidade em quatro dimensões: escala, regime físico, paradigma de modelagem e maturidade funcional. A pesquisa combinou revisão integrativa, síntese conceitual e aplicação documental ao Punggol Digital District, em Singapura. Os resultados indicam que a evolução dos GDs não é linear, pois envolve mudanças na complexidade dos sistemas, nas abordagens de modelagem e nas capacidades funcionais. A análise do caso evidenciou a integração entre sistemas prediais, infraestrutura distrital e funções urbanas por meio de uma plataforma digital comum. Também mostrou que a escala e a maturidade funcional são relacionadas, mas não equivalentes. A estrutura proposta oferece uma base para comparar iniciativas, identificar requisitos e diagnosticar limitações de GDs multiescala.
Palavras-chave: Gêmeos Digitais. Estrutura Multiescala. Maturidade Funcional.

Abstract
Digital Twins (DTs) have broadened their use in the built environment, but they are often developed in a fragmented way and still lack integration across different scales, data, and systems. This study introduces a multiscale framework that categorizes buildings, infrastructure, and cities across four dimensions: scale, physical regime, modeling paradigm, and functional maturity. The research involved an integrative review, conceptual synthesis, and a practical application to Singapore's Punggol Digital District. Findings show that DT development is not a straightforward process; it involves evolving system complexity, modeling techniques, and functional capabilities. The case study demonstrated how building systems, district infrastructure, and urban functions are connected via a shared digital platform. It also revealed that while scale and functional maturity are linked, they are not the same. This framework provides a foundation for comparing initiatives, identifying needs, and diagnosing challenges in multiscale DTs.

Keywords: *Digital Twins. Multiscale Framework. Functional Maturity.*

Como citar:
SILVA, A. S.; RUBIN, A. P.; NOVAES, M. P.; MARIANI, B. B.; SILVA, M. F. E. Proposta de framework para a evolução multiescala dos Gêmeos Digitais no ambiente construído. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 21, 2026, Goiânia. **Anais**... Goiânia: ANTAC, 2026.

INTRODUÇÃO

A transformação digital do ambiente construído tem sido impulsionada pela integração entre modelagem, sensoriamento e sistemas distribuídos de dados. Nesse contexto, os Gêmeos Digitais (GDs) permitem articular representação, monitoramento e suporte à decisão ao longo do ciclo de vida dos ativos [1; 2; 3]. A conexão contínua entre sistemas físicos e digitais amplia a capacidade de analisar fenômenos complexos, antecipar comportamentos e otimizar o desempenho operacional [4; 5]. Entretanto, sua aplicação no setor de Arquitetura, Engenharia, Construção e Operação (AECO) exige adaptações decorrentes da heterogeneidade dos ativos, da multiplicidade de agentes e da natureza dinâmica do ambiente construído [1; 6].

As aplicações de GDs abrangem diferentes escalas. Nos edifícios, concentra-se na operação e na manutenção, com ênfase na eficiência energética, no conforto dos usuários e na automação predial [7; 8; 9]. Na infraestrutura, destacam-se o monitoramento da integridade estrutural, a gestão de ativos e a segurança operacional [10; 11]. Na escala urbana, esses sistemas apoiam o planejamento e a gestão de cidades por meio da integração de dados de mobilidade, energia e sustentabilidade [12]. Apesar desse avanço, as iniciativas permanecem frequentemente isoladas, com articulação limitada entre escalas, dados e sistemas [5; 13].

Essa fragmentação evidencia uma lacuna na literatura, ainda centrada predominantemente em aplicações específicas, sem explicar, de forma integrada, como os GDs se estruturam e evoluem entre edifícios, infraestruturas e cidades [6; 14]. A dispersão terminológica, os diferentes níveis de maturidade e a heterogeneidade das abordagens de modelagem dificultam a comparação entre soluções e a consolidação de arquiteturas interoperáveis e escaláveis [4; 5; 12; 13; 14]. Também dificultam verificar se uma iniciativa denominada GD efetivamente articula ativos, infraestruturas e processos decisórios, ou se permanece restrita à representação isolada de componentes.

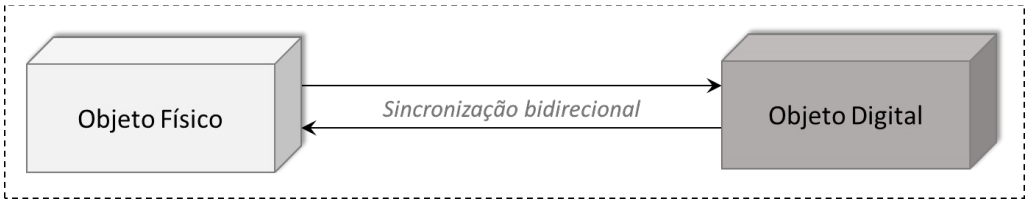
Como a transição entre escalas implica mudanças físicas, informacionais e operacionais [12], torna-se necessário propor um framework para organizar as diferenças de escala, de regime físico, de paradigma de modelagem e de maturidade funcional que distinguem os GDs de edifícios, infraestruturas e sistemas urbanos. Assim, este artigo propõe um framework multiescala para GDs no ambiente construído, integrando edifício, infraestrutura e cidade como níveis interdependentes de complexidade. Além disso, analisa-se sua aplicabilidade em um estudo de caso de Singapura, visando fortalecer a estrutura teórica do campo e criar uma base para identificar requisitos, capacidades e limitações de ações multiescalares.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Os GDs no ambiente construído podem ser compreendidos como réplicas virtuais dinâmicas capazes de representar, em tempo real, o comportamento de sistemas físicos [2]. Diferentemente dos modelos estáticos, o conceito formulado por Grieves e Vickers [15] fundamenta-se na integração ciberfísica e no fluxo bidirecional de dados, permitindo que a entidade digital reflita as mudanças do ativo físico ao longo de seu ciclo de vida (Figura 1). Essa vinculação contínua entre as entidades físicas e digitais distingue os GDs dos modelos digitais convencionais, cuja atualização ocorre manualmente ou sem conexão sistemática com o estado do objeto representado [3;

5]. Eles contribuem para a transformação digital da AECO ao apoiar simulações de cenários, a otimização de desempenho e a tomada de decisão [16; 7]. Além disso, auxiliam na gestão preditiva de ativos, na eficiência operacional e no atendimento de metas de sustentabilidade e de neutralidade de carbono [9; 11].

Figura 1: Representação geral de um GD



Fonte: Adaptado de Grieves e Vickers [15].

Apesar do amadurecimento tecnológico, as aplicações de GDs permanecem fragmentadas em domínios especializados e em escalas isoladas [17]. Nos edifícios, predominam estudos voltados à operação e manutenção de sistemas prediais, especialmente ao desempenho energético, à automação e ao monitoramento contínuo [8; 18; 19]. Na infraestrutura, destacam-se o monitoramento estrutural de pontes e a gestão de sistemas em rede [19; 17]. Entretanto, essas aplicações frequentemente operam em silos informacionais, desconectando ativos individuais de seu contexto urbano [17; 12]. Identifica-se, assim, a ausência de uma estrutura capaz de articular o edifício, a infraestrutura e a cidade em seus diferentes níveis de complexidade física, informacional e operacional.

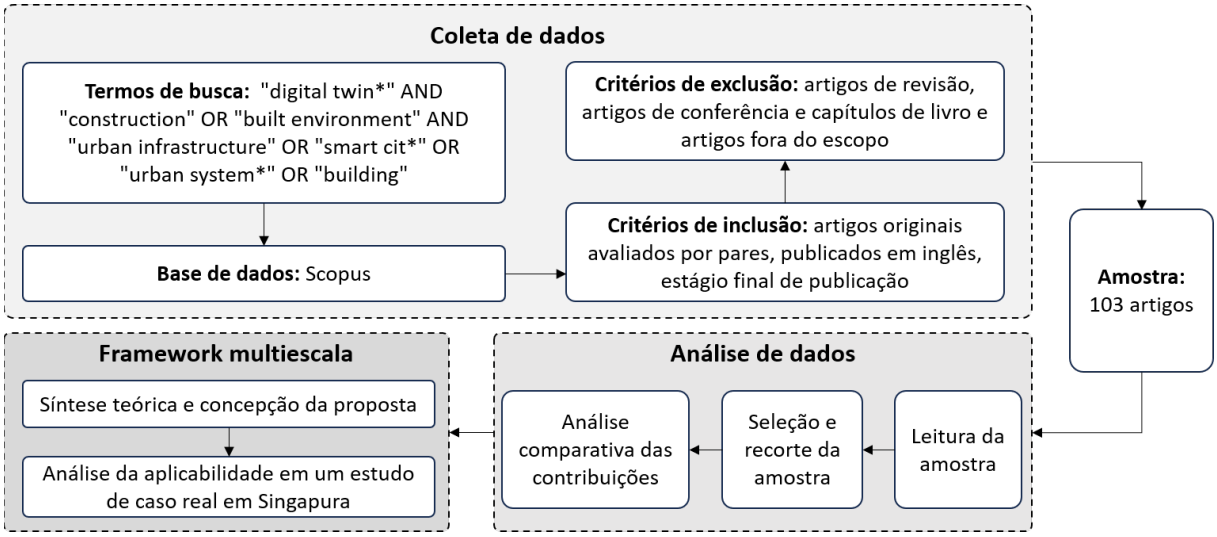
METODOLOGIA

A construção do framework seguiu uma abordagem teórico-integrativa [20], fundamentada no procedimento proposto por Fuller et al. [21], que articula o mapeamento da literatura, a análise comparativa e a síntese teórica. A pesquisa foi desenvolvida em 4 etapas: (i) coleta de dados; (ii) análise dos estudos selecionados; (iii) síntese teórica e concepção do framework; e (iv) análise da aplicabilidade do framework proposto em um estudo de caso real em Singapura.

A seleção da amostra seguiu as diretrizes do Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA), que orientam a identificação, seleção, exclusão e inclusão de estudos [22] (Figura 2). A busca foi realizada na Scopus, por sua cobertura e relevância [23], e os termos foram pesquisados nos campos de título, resumo e palavras-chave, em maio de 2026.

DOI: https://doi.org/10.46421/entac.v21i1.8835

Figura 1: Delineamento da pesquisa



A busca inicial identificou 634 artigos. Após a aplicação dos filtros e dos critérios de inclusão, a amostra foi reduzida a 270 estudos e exportada para o Zotero. Na etapa de curadoria, foram excluídos artigos de conferência indexados como periódicos, publicações em outra língua (não o inglês) e trabalhos externos ao escopo da pesquisa. O recorte concentrou-se no setor de AECO, abrangendo GDs aplicados a edifícios, infraestruturas e cidades. A amostra final totalizou 103 artigos.

Os estudos foram examinados segundo quatro questões analíticas: (i) escalas do ambiente construído representadas; (ii) regimes físicos dos sistemas; (iii) paradigmas de modelagem empregados; (iv) níveis de maturidade funcional alcançados. Também foram analisados os habilitadores tecnológicos e os desafios transversais associados à integração entre escalas. A análise comparativa buscou identificar convergências conceituais, divergências terminológicas, lacunas teóricas e padrões de evolução entre edifícios, infraestruturas e cidades. Esses resultados subsidiaram a síntese teórica e a proposta do framework multiescala na terceira etapa.

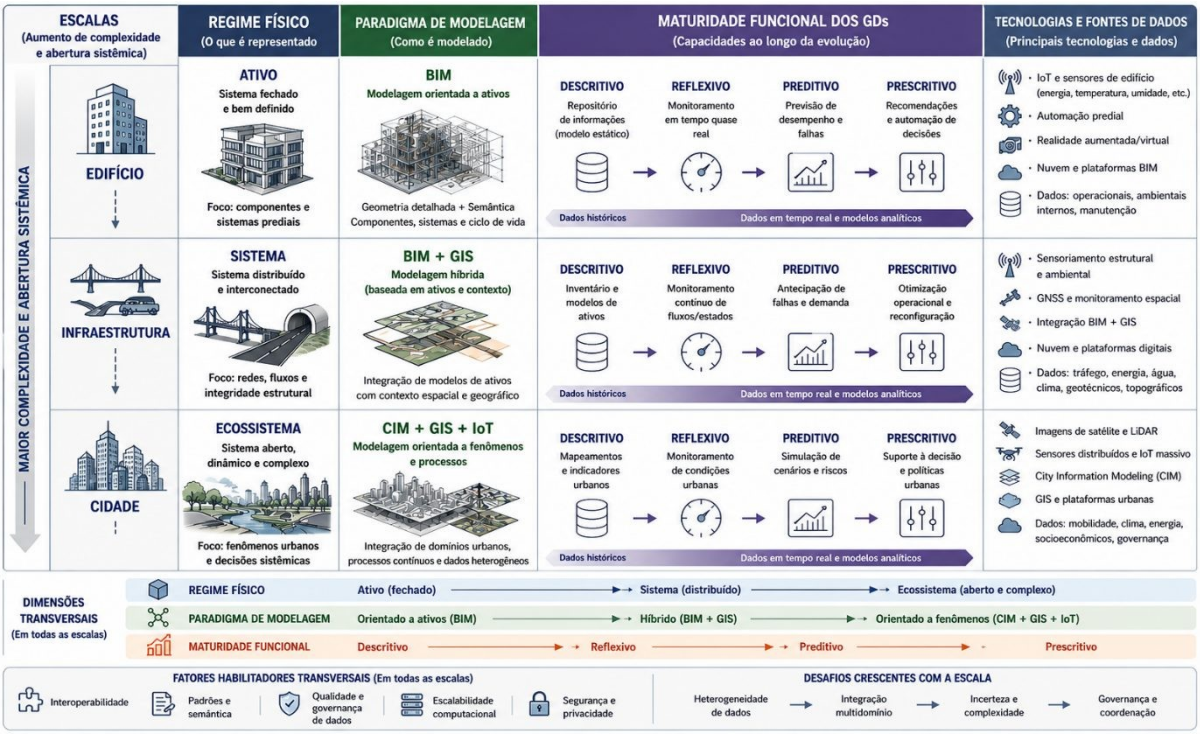
Na quarta etapa, o framework proposto foi avaliado por meio de uma análise documental do *Punggol Digital District*, em Singapura. O caso foi selecionado por sua relevância instrumental, considerando os seguintes fatores: (i) sua identificação explícita como iniciativa de GD; (ii) a documentação de sistemas nos níveis do edifício e do distrito; (iii) a integração de sistemas e serviços via plataforma digital comum; e (iv) a disponibilidade de documentação institucional compatível com as dimensões propostas. As evidências documentais foram classificadas segundo escala, regime físico, paradigma de modelagem, maturidade funcional, tecnologias habilitadoras e desafios transversais. A maturidade foi organizada em níveis descritivo, reflexivo, preditivo e prescritivo. A análise buscou verificar a capacidade do framework de caracterizar uma iniciativa real, distinguir funcionalidades demonstradas de capacidades declaradas e identificar lacunas da integração multiescala.

PROPOSTA DE FRAMEWORK MULTIESCALA

O framework proposto organiza os GDs no ambiente construído segundo uma lógica multiescala, na qual edifício, infraestrutura e cidade representam condições distintas de complexidade física, informacional e operacional (Figura 3). Esses níveis não

constituem uma sequência obrigatória de evolução tecnológica, podendo coexistir e apresentar diferentes graus de maturidade funcional. A proposta possui caráter taxonômico e analítico e articula quatro dimensões principais: escala, regime físico, paradigma de modelagem e maturidade funcional, além de tecnologias habilitadoras e desafios transversais.

Figura 2: framework multiescala



Na dimensão da escala, os GDs de edifícios concentram-se em ativos delimitados, componentes e sistemas prediais. Na infraestrutura, o escopo abrange redes e ativos distribuídos, como os sistemas de transporte, energia e saneamento, nos quais os fluxos e as interdependências desempenham um papel central. Na cidade, os GDs incorporam múltiplos domínios físicos, ambientais e socioeconômicos. Essa transição não se limita à ampliação territorial ou ao aumento do volume de dados, mas também a uma mudança qualitativa nos problemas tratados e nas capacidades requeridas [24; 25]. Assim, o avanço entre escalas deve ser compreendido como um aumento da complexidade relacional e operacional, e não apenas como a agregação de ativos digitais.

O regime físico acompanha essa variação. No edifício, predomina o “ativo fechado”, caracterizado por fronteiras identificáveis e maior controle sobre as condições operacionais. Na infraestrutura, configura-se um “sistema distribuído”, formado por ativos espacialmente conectados e sujeitos a condições variáveis. Na escala urbana, estabelece-se um “ecossistema aberto”, marcado por elevada dinamicidade e influência de fatores externos, como clima, comportamento humano e políticas públicas [26]. À medida que a escala se amplia, reduzem-se a previsibilidade e o controle, enquanto aumentam a incerteza e a complexidade sistêmica [27].

Essas diferenças também condicionam o paradigma de modelagem [26]. Nos edifícios, prevalece a abordagem orientada a ativos, apoiada no Building Information Modeling (BIM), que organiza as informações geométricas e semânticas dos componentes [28;

29]. Na infraestrutura, torna-se necessária uma abordagem híbrida que integre BIM e *Geographic Information Systems* (GIS) para representar redes e ativos distribuídos. Na cidade, a modelagem passa a incorporar fenômenos e processos contínuos por meio de sensores, GIS e City Information Modeling (CIM), abrangendo mobilidade, clima e fluxos urbanos [25]. Ocorre, portanto, uma transição da representação de objetos discretos para a modelagem de processos, interações e comportamentos emergentes.

A maturidade funcional, por sua vez, compreende quatro níveis. No nível descritivo, o GD organiza dados históricos e representações do ativo. No reflexivo, sensores, automação e plataformas digitais permitem acompanhar variáveis em tempo quase real [30; 31]. No preditivo, modelos analíticos e técnicas de aprendizado de máquina permitem antecipar falhas, estimar demandas e simular cenários [27]. No prescritivo, o sistema recomenda ou automatiza decisões operacionais e de planejamento. Essa progressão também não ocorre de forma homogênea entre as escalas. Edifícios já apresentam aplicações reflexivas e preditivas consolidadas [32], enquanto as infraestruturas avançam em funções preditivas relacionadas à integridade estrutural e à operação de redes [33]. Nas cidades, as capacidades prescritivas ainda são limitadas pela complexidade sistêmica e pelos requisitos de governança [24; 25]. Por isso, a maturidade deve ser avaliada com base nas funções efetivamente implementadas em cada sistema e escala.

Sensores, automação, BIM, GIS, computação em nuvem, inteligência artificial e modelos analíticos constituem tecnologias habilitadoras, mas sua adoção isolada não assegura integração multiescala. Interoperabilidade, padronização semântica, qualidade e governança dos dados, escalabilidade computacional, segurança e privacidade são condições transversais que se tornam mais críticas à medida que a heterogeneidade dos sistemas e da diversidade de agentes aumentam [34].

Assim, em termos operacionais, a estrutura do framework pode ser aplicada por meio da identificação de: (i) escalas abrangidas; (ii) regimes físicos representados; (iii) paradigmas de modelagem empregados; (iv) capacidades funcionais demonstradas; e (v) tecnologias habilitadoras e desafios transversais. A análise conjunta dessas dimensões permite distinguir a coexistência de representações digitais da integração funcional multiescala e identificar incompatibilidades entre a abrangência declarada, a arquitetura tecnológica e as funções efetivamente disponibilizadas.

ANÁLISE DAS EVIDÊNCIAS DO FRAMEWORK EM UM ESTUDO DE CASO EM SINGAPURA

A aplicabilidade do framework foi examinada com base em evidências documentais do *Punggol Digital District* (PDD), em Singapura. O empreendimento articula diferentes escalas do ambiente construído por meio da *Open Digital Platform* (ODP), desenvolvida pela JTC Corporation e pela GovTech. A plataforma integra modelos BIM, dados geoespaciais, representações tridimensionais e informações operacionais provenientes de sensores e sistemas conectados, utilizando padrões abertos para promover a interoperabilidade e reduzir silos informacionais [35; 36].

Figura 3: Modelo 3D do PDD em Singapura



Fonte: *Punggol Digital District* [37].

Sob a perspectiva das escalas do framework, observa-se uma progressão de complexidade. Na escala do edifício, estão presentes sistemas de climatização, elevadores, controle de acesso, monitoramento da ocupação e recarga de veículos elétricos [36]. Na infraestrutura distrital, o escopo inclui redes de energia, climatização centralizada, mobilidade, segurança e logística robotizada [35]. No nível distrital, esses sistemas são integrados a processos relacionados à ocupação, à demanda energética, às condições ambientais e aos fluxos de circulação [37].

Os regimes físicos variam conforme essa ampliação de escala. Os edifícios correspondem a ativos relativamente delimitados, com fronteiras e condições operacionais identificáveis. As infraestruturas configuram sistemas distribuídos, dependentes de fluxos e interações entre diferentes ativos. No distrito, edifícios, redes e serviços compõem um ecossistema aberto, influenciado por fatores ambientais, operacionais e humanos. Essa integração de tecnologias e dados dinâmicos amplia a representação dos ativos, incluindo processos e relações multiescalares [35].

Em relação à maturidade funcional, o PDD apresenta evidências dos níveis descritivos, por meio da documentação integrada dos ativos. Nível reflexivo, com monitoramento contínuo de ocupação, do consumo energético e das condições operacionais. E nível preditivo, por meio de simulações de fluxos de pessoas, de desempenho térmico e de circulação de robôs [37]. As capacidades prescritivas aparecem de forma parcial, restritas a funções específicas de automação e de otimização operacional, e algumas ainda são descritas como em desenvolvimento [36].

As capacidades funcionais também variam. O nível descritivo é evidenciado pela documentação e visualização integradas dos ativos. O nível reflexivo decorre do monitoramento de ocupação, do consumo energético e das condições operacionais. As funções preditivas aparecem em simulações de fluxos de pessoas, de desempenho térmico e de circulação de robôs [37]. As capacidades prescritivas são parcialmente demonstradas em funções específicas de automação e otimização, embora parte delas ainda esteja em desenvolvimento [35]. Assim, a maturidade funcional não pode ser atribuída de forma uniforme a todo o empreendimento.

Entre as tecnologias habilitadoras, destacam-se BIM, GIS, sensores, automação, Internet das Coisas, séries temporais, modelos tridimensionais e a própria ODP como infraestrutura de integração. Essas tecnologias permitem associar os ativos digitais às respectivas condições operacionais e viabilizar a comunicação entre sistemas prediais e distritais [35; 37]. Os desafios transversais estão relacionados principalmente à interoperabilidade entre protocolos, à compatibilidade semântica, à qualidade dos dados, à segurança da informação, à escalabilidade e à governança entre diferentes organizações. Embora a adoção de padrões abertos reduza barreiras técnicas, a integração multiescala permanece dependente da coordenação entre agentes, da definição de responsabilidades e da manutenção da consistência dos dados.

DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

O framework proposto contribui ao explorar aspectos ainda pouco abordados na literatura. Estudos como os de Tao et al. [2] e Fuller et al. [21] destacam os GDs como sistemas integrados de representação, comportamento e conectividade. Contudo, esses autores tratam de forma homogênea, sem considerar que diferentes escalas do ambiente construído demandam regimes físicos, paradigmas de modelagem e níveis de maturidade distintos. Nesse sentido, a estrutura proposta neste estudo explicita essa diferenciação, evidenciando que a evolução dos GDs não é linear nem uniforme.

Além disso, o framework proposto questiona abordagens que tratam os GDs como soluções universalmente aplicáveis, como as de Wang et al. [25] e de Lagap e Ghaffarian [34], ao evidenciar diferenças epistemológicas entre edifícios, infraestruturas e cidades. Ao integrar essas distinções, a proposta reforça a necessidade de abordagens multiescalares que considerem a diversidade de regimes físicos, de fluxos informacionais e de dinâmicas operacionais. Por fim, a estrutura multiescala alinha-se às tendências da literatura, ao mesmo tempo em que contribui para as dimensões frequentemente tratadas de forma dispersa [29; 17; 12].

CONCLUSÃO

Este estudo propôs um framework multiescala para GDs no ambiente construído, articulando edifício, infraestrutura e cidade como níveis interdependentes de complexidade física, informacional e operacional. A partir de revisão integrativa e de síntese conceitual, a proposta relaciona escala, regime físico, paradigma de modelagem e maturidade funcional, demonstrando que a evolução dos GDs não decorre apenas da ampliação espacial dos modelos ou da incorporação de novas tecnologias.

A análise do PDD associou a aplicabilidade da estrutura à análise de uma iniciativa real, permitindo identificar a integração entre sistemas prediais, infraestruturas compartilhadas e funções distritais. Os resultados também mostraram que a maturidade funcional varia entre sistemas e escalas, não devendo ser atribuída de forma homogênea ao GD como um todo. Como contribuição, a estrutura fornece critérios para comparar iniciativas, distinguir a representação digital de integração funcional multiescala e identificar limitações relacionadas à interoperabilidade, à governança e à implementação das capacidades declaradas. Dessa forma, apresenta

utilidade tanto para a organização conceitual do campo quanto para a análise preliminar de sistemas existentes.

No entanto, o estudo apresenta limitações decorrentes de sua abordagem teórico-integrativa e do uso de apenas um caso na análise documental. Ainda não há validação empírica da estrutura em diferentes contextos, e a seleção e a interpretação dos estudos podem estar influenciadas por vieses relacionados à seleção da literatura e às fontes institucionais consultadas. Portanto, recomenda-se que o framework seja avaliado por especialistas na área para validar e aprimorar suas dimensões.

DECLARAÇÃO

Durante a preparação deste artigo, os autores utilizaram o ChatGPT e o Grammarly para revisão do manuscrito, melhoria de coesão e geração preliminar de imagens. Após o uso dessas ferramentas, os autores revisaram e editaram o conteúdo conforme necessário e assumem total responsabilidade pelo conteúdo do artigo publicado.

REFERÊNCIAS

[1] SILVA, Alisson Souza et al. Method for quality inspection during the execution of facades based on UAS images and Machine Learning algorithms. **International Journal of Construction Management**, v. 26, n. 2, p. 277-294, 2026.

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

[3] JONES, David et al. Characterising the Digital Twin: A systematic literature review. **CIRP journal of manufacturing science and technology**, v. 29, p. 36-52, 2020.

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

[5] DENG, Min; MENASSA, Carol C.; KAMAT, Vineet 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, 2021.

[6] SACKS, Rafael et al. Construction with digital twin information systems. **Data-centric engineering**, v. 1, p. e14, 2020.

[7] YOON, Sungmin; SONG, Jihwan; LI, Jiteng. Ontology-enabled AI agent-driven intelligent digital twins for building operations and maintenance. **Journal of Building Engineering**, v. 108, p. 112802, 2025.

[8] CHEN, XiaYi et al. 3D reconstruction of semantic-rich digital twins for ACMV monitoring and anomaly detection via scan-to-BIM and time-series data integration. **Developments in the Built Environment**, v. 19, p. 100503, 2024.

[9] LIU, Zhansheng; LI, Mingming; JI, Weiyu. Development and application of a digital twin model for Net zero energy building operation and maintenance utilizing BIM-IoT integration. **Energy and Buildings**, v. 328, p. 115170, 2025.

[10] ELLUL, Claire et al. Exploring data for construction digital twins: Building health and safety and progress monitoring twins using the unreal gaming engine. **Buildings**, v. 14, n. 7, p. 2216, 2024.

[11] BARRILE, Vincenzo et al. The Development of a BIM-Based Digital Twin Prototype of a Bridge. **Applied Sciences**, v. 16, n. 3, p. 1353, 2026.

[12] ZHANG, Anshan et al. Carbon emissions accounting and estimation of carbon reduction potential in the operation phase of residential areas based on digital twin. **Applied Energy**, v. 376, p. 123155, 2024.

[13] KETZLER, Bernd et al. Digital twins for cities: A state of the art review. **Built environment**, v. 46, n. 4, p. 547-573, 2020.

[14] SHAHAT, Ehab; HYUN, Chang T.; YEOM, Chunho. City digital twin potentials: A review and research agenda. **Sustainability**, v. 13, n. 6, p. 3386, 2021.

[15] GRIEVES, Michael; VICKERS, John. Digital twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems. In: **Transdisciplinary perspectives on complex systems: New findings and approaches**. Cham: Springer International Publishing, 2016. p. 85-113.

[16] AKANMU, Abiola A.; ANUMBA, Chimay J.; OGUNSEIJU, Omobolanle O. Towards next generation cyber-physical systems and digital twins for construction. **Journal of Information Technology in Construction**, v. 26, 2021.

[17] NGUYEN, Truong Dang Hoang Nhat et al. Digital twin framework to enhance facility management for relocatable modular buildings. **Automation in Construction**, v. 176, p. 106249, 2025.

[18] LEE, Kate Sangwon et al. Built environment digital twin as mediator of shared space: Balancing personal preferences and group decision making. **Building and Environment**, p. 113935, 2025.

[19] BÄCKLUND, Katarina; LUNDQVIST, Per; MOLINARI, Marco. Showcasing a digital twin for higher educational buildings: developing the concept toward human centricity. **Frontiers in Built Environment**, v. 10, p. 1347451, 2024.

[20] SNYDER, Hannah. Literature review as a research methodology: An overview and guidelines. **Journal of business research**, v. 104, p. 333-339, 2019.

[21] FULLER, Aidan et al. Digital twin: Enabling technologies, challenges and open research. **IEEE access**, v. 8, p. 108952-108971, 2020.

[22] MAHER, Christopher. PRISMA: helping to deliver information that physical therapists need. **Physical therapy**, v. 89, n. 9, p. 870-872, 2009.

[23] NHAMAGE, Idilson A. et al. Strategies for Maximising the Value of Digital Twins for Bridge Management and Structural Monitoring: A Systematic Review: IA Nhamage et al. **Archives of Computational Methods in Engineering**, v. 32, n. 7, p. 4555-4586, 2025.

[24] YAN, Ke et al. A Large-Scale 3D Gaussian Reconstruction Method for Optimized Adaptive Density Control in Training Resource Scheduling. **Remote Sensing**, v. 17, n. 23, p. 3868, 2025.

[25] WANG, Peng et al. F2-nerf: Fast neural radiance field training with free camera trajectories. In: **Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition**. 2023. p. 4150-4159.

[26] JEDDOUB, Imane et al. Enriched Semantic 3D Point Clouds: An Alternative to 3D City Models for Digital Twin for Cities?. In: **International 3D GeoInfo Conference**. Cham: Springer Nature Switzerland, 2023. p. 407-423.

[27] BABANAGAR, Nandeesh et al. Digital twins for urban underground space. **Tunnelling and Underground Space Technology**, v. 155, p. 106140, 2025.

[28] ALBALKHY, Wassim et al. Digital twins in the built environment: Definition, applications, and challenges. **Automation in Construction**, v. 162, p. 105368, 2024.

[29] JIANG, Feng et al. Digital twin enabled sustainable urban road planning. **Sustainable Cities and Society**, v. 78, p. 103645, 2022.

[30] BIBRI, Simon Elias; HUANG, Jeffrey. AI and AI-powered digital twins for smart, green, and zero-energy buildings: A systematic review of leading-edge solutions for advancing environmental sustainability goals. **Environmental Science and Ecotechnology**, p. 100628, 2025.

[31] LIU, Pengyuan et al. Towards human-centric digital twins: Leveraging computer vision and graph models to predict outdoor comfort. **Sustainable Cities and Society**, v. 93, p. 104480, 2023.

[32] PAVÓN, Rubén Muñoz et al. Bim-based Digital Twin development for university Campus management. Case study ETSICCP. **Expert Systems with Applications**, v. 262, p. 125696, 2025.

[33] XU, Yifan et al. A WebGIS-based digital twin platform for intelligent operation and maintenance of rail transit infrastructure. **Expert Systems With Applications**, v. 296, p. 129180, 2026.

[34] LAGAP, Umut; GHAFFARIAN, Saman. Digital twin-enabled post-disaster damage and recovery monitoring with deep learning: leveraging transfer learning, attention mechanisms, and explainable AI. **Geomatics, Natural Hazards and Risk**, v. 16, n. 1, p. 2485329, 2025.

[35] JTC CORPORATION. **Punggol Digital District's Living Lab**: how the digital twin will create an experiential playground for innovators. Singapore, 15 fev. 2023. Disponível em: https://www.jtc.gov.sg/punggoldigitaldistrict/story-articles/pdd-odp---5-levels-of-the-digital-twin. Acesso em: 17 jun. 2026.

[36] GOVERNMENT TECHNOLOGY AGENCY OF SINGAPORE. **Open Digital Platform**. Singapore Government Developer Portal, Singapore, 8 jun. 2026. Disponível em: https://www.developer.tech.gov.sg/products/categories/sensor-platforms-and-internet-of-things/open-digital-platform/overview. Acesso em: 17 jun. 2026.

[37] GOVERNMENT TECHNOLOGY AGENCY OF SINGAPORE. **Features & Roadmap**. Singapore Government Developer Portal, Singapore, 5 maio 2025. Disponível em: https://www.developer.tech.gov.sg/products/categories/sensor-platforms-and-internet-of-things/open-digital-platform/features-roadmap. Acesso em: 17 jun. 2026.