GÊMEOS DIGITAIS NO BIM: do modelo estático à operação em tempo real

DIGITAL TWINS IN BIM: *from static models to real-time operation*

Fabio Rodrigues da Costa*

RESUMO

A convergência entre *Building Information Modeling* (BIM) e gêmeos digitais (*digital twins*) propõe estender a utilidade dos modelos informacionais do projeto e da obra para décadas de operação e manutenção (O&M). Enquanto o BIM consolida o que o ativo deveria ser em representação majoritariamente estática, o gêmeo digital busca expressar o que o ativo está fazendo no presente por meio de sincronização em frequência adequada ao uso e retroalimentação operacional. Este artigo realiza revisão narrativa e análise técnico-normativa com o objetivo de confrontar a retórica comercial do setor com as definições formais (ISO/IEC 30173:2023, ISO 23247, série ABNT NBR ISO 19650 e padrões *openBIM*) e com a evidência empírica disponível em operação predial, infraestrutura e execução de obras. A análise distingue modelo BIM tradicional, gêmeo geométrico, sombra digital e gêmeo digital verdadeiro, organiza a arquitetura em quatro camadas e avalia casos de referência e estudos revisados por pares segundo o que efetivamente medem. Os achados indicam ganhos estimados em subsistemas delimitados, como climatização (por otimização) e gestão de frotas em obras rodoviárias (em validação retrospectiva), mas mostram que, nos estudos examinados, a atuação autônoma plena ainda é rara. Conclui-se que a viabilidade depende menos de geometria hiperdetalhada e mais de governança de dados, interoperabilidade semântica, pragmatismo em ativos existentes (*slimBIM*), cibersegurança e verificação técnica humana.

Palavras-chave: gêmeos digitais; BIM; ISO 19650; ISO/IEC 30173; interoperabilidade; gestão de ativos.

* Consultor sênior, professor universitário e palestrante, com mais de 26 anos de experiência na construção civil e especialização em gestão de projetos, planejamento de obras e aplicação de BIM. MBA em Gestão de Projetos (FGV); pós-graduação em Gerenciamento de Obras (Uninove), em Metodologia BIM (IBEC) e em Gestão de Projetos na Construção (USP); pós-graduando em Inteligência Artificial e Negócios (PUC-PR). Participou de projetos industriais que somam mais de 1 milhão de m² de área construída, integrando equipes de obras vencedoras do prêmio internacional Golden Trowel em 2015 e 2018. E-mail: fabiocosta81@gmail.com.

ABSTRACT

The convergence of Building Information Modeling (BIM) and digital twins aims to extend the utility of information models from design and construction into decades of operation and maintenance (O&M). While BIM consolidates what an asset is intended to be in a predominantly static representation, a digital twin seeks to reflect what the physical asset is doing in the present through synchronization at a use-appropriate frequency and operational feedback. This article conducts a narrative review and technical-normative analysis to contrast commercial industry rhetoric with formal standards (ISO/IEC 30173:2023, ISO 23247, the ABNT NBR ISO 19650 series, and openBIM specifications) and empirical evidence across building operation, infrastructure management, and construction execution. The analysis distinguishes traditional BIM models, geometric twins, digital shadows, and true digital twins, structures a four-layer integration architecture, and evaluates benchmark cases and peer-reviewed studies according to what they actually measure. Findings indicate estimated gains in bounded subsystems, such as HVAC optimization and earthmoving fleet management in highway construction (optimization results and a retrospective validation, respectively), yet show that, in the studies examined, full autonomous closed-loop actuation is still rare. Viability depends less on hyper-detailed geometry and more on data governance, semantic interoperability, pragmatic approaches for existing assets (*slimBIM*), cybersecurity, and human technical validation.

Keywords: digital twins; BIM; ISO 19650; ISO/IEC 30173; interoperability; asset management.

1 INTRODUÇÃO

Um empreendimento corporativo ou hospitalar recém-entregue costuma reunir um modelo federado em *Building Information Modeling* (BIM) coordenado com rigor geométrico, quantitativos compatibilizados e especificações de projeto. Semanas depois da entrega das chaves, contudo, a construtora desmobiliza a equipe, o arquivo congela em um servidor e a operação passa a depender de planilhas avulsas, chamados corretivos e um sistema de automação predial (*Building Management System* — BMS) sem vínculo cadastral com os objetos modelados. Na primeira reforma de pavimento ou troca de equipamento de climatização, o modelo deixa de corresponder ao edifício real. O investimento feito na modelagem informacional encerra sua vida útil justamente na porta da fase mais longa e onerosa do ativo construído.

É sobre essa fratura entre entrega de obra e operação que o conceito de gêmeos digitais (*digital twins*) ganhou centralidade nas discussões sobre BIM e transformação digital da indústria de Arquitetura, Engenharia, Construção e Operação (AECO). A distinção conceitual que orienta essa agenda é direta: enquanto o BIM consolida o que a edificação ou a infraestrutura *deveria ser* — reunindo geometria paramétrica, materiais, especificações,

prazos e custos em uma representação majoritariamente estática voltada à concepção, à coordenação e à construção —, o gêmeo digital procura revelar o que o ativo físico *está fazendo* no presente e simular o que tende a fazer sob cenários futuros de uso, degradação ou intervenção (Boje *et al.*, 2020; Deng; Menassa; Kamat, 2021; ISO/IEC, 2023a).

A promessa tem apelo evidente, mas o vocabulário do mercado avançou mais depressa do que a engenharia de sistemas que o sustenta. Revisões recentes da literatura internacional mostram que o conceito ainda não tem definições maduras no ambiente construído e que parte dos especialistas trata BIM e gêmeo digital como praticamente a mesma coisa (Davila Delgado; Oyedele, 2021; Shahzad *et al.*, 2022), terreno fértil para que modelos BIM tridimensionais detalhados, visualizadores web ou painéis estáticos, sem telemetria contínua nem ciclo de retroalimentação operacional, recebam o rótulo de "gêmeo digital". Ao mesmo tempo, a consolidação de marcos normativos — como a norma internacional ISO/IEC 30173:2023, o esquema IFC 4.3 ratificado como ISO 16739-1:2024, a especificação *Information Delivery Specification* (IDS 1.0) e a internalização da série ISO 19650 pela ABNT, concluída com a Parte 6 em agosto de 2026 — oferece, pela primeira vez, critérios objetivos para separar retórica comercial de arquitetura verificável.

A tese analítica deste artigo é moderada e delimitada. O BIM estruturado segundo normas abertas constitui uma base espacial e semântica valiosa para gêmeos digitais, mas a passagem do modelo estático à operação em tempo real não decorre automaticamente do detalhamento geométrico nem da instalação massiva de sensores. Ela exige sincronização proporcional ao caso de uso, interoperabilidade entre modelos de ativo e séries temporais, governança contínua dos dados cadastrais, controles de cibersegurança e responsabilidade técnica clara sobre decisões assistidas por algoritmos. O entusiasmo setorial tende a omitir que a atuação autônoma em malha fechada ainda é exceção: na revisão de Deng, Menassa e Kamat (2021), nenhum estudo chegou ao controle automático, e Reynaud, Journaux e Roxin (2026) recomendam chegar a ele de forma gradual, partindo da análise consultiva.

O objetivo deste artigo é examinar criticamente a integração entre BIM e gêmeos digitais no ambiente construído, separando definições normativas, evidência empírica medida, relatos setoriais não auditados e limitações estruturais. O texto organiza-se em oito seções: após esta introdução, a seção 2 explicita os procedimentos metodológicos e os critérios de seleção das fontes; a seção 3 delimita fundamentos conceituais e normativos, contrapondo BIM tradicional, gêmeo geométrico e gêmeo digital verdadeiro; a seção 4 analisa a arquitetura tecnológica em camadas, a latência e os fluxos bidirecionais; a seção 5 examina aplicações empíricas em operação de edifícios, infraestruturas e canteiros de obras; a seção 6 discute

governança de dados, pragmatismo em ativos existentes (*brownfield*), interoperabilidade, cibersegurança e responsabilidade técnica; a seção 7 confronta contra-argumentos, explicita limites da revisão e propõe uma agenda de pesquisa para o Brasil; e a seção 8 apresenta as considerações finais.

2 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Trata-se de uma revisão narrativa e análise técnico-normativa, de caráter qualitativo e exploratório, não sistemático. A pesquisa foi estruturada em seis eixos temáticos complementares: (i) fundamentos conceituais e taxonomias de maturidade entre BIM e gêmeos digitais; (ii) normas internacionais e brasileiras de gestão da informação, terminologia e classificação; (iii) padrões abertos de interoperabilidade e ontologias semânticas para o ambiente construído; (iv) aplicações empíricas em operação predial, infraestrutura civil e execução de obras; (v) governança de dados, ativos existentes (*brownfield*), cibersegurança e responsabilidade profissional; e (vi) marcos legais e produção técnica brasileira.

Foram priorizadas quatro classes de fontes primárias conferíveis: artigos revisados por pares publicados em periódicos científicos consolidados da área — entre eles *Automation in Construction*, *Advanced Engineering Informatics*, *Data-Centric Engineering*, *Journal of Management in Engineering*, *Journal of Building Engineering*, *Applied Energy*, *Advances in Building Energy Research*, *Structure and Infrastructure Engineering*, *Developments in the Built Environment*, *Decision Support Systems*, *Journal of Information Technology in Construction* (ITcon) e *Buildings*; normas técnicas oficiais da *International Organization for Standardization* (ISO/IEC), da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e da *British Standards Institution* (BSI); relatórios técnicos de centros acadêmicos e consórcios especializados, como o *Centre for Digital Built Britain* (CDBB) da Universidade de Cambridge, o *National Institute of Standards and Technology* (NIST), a *buildingSMART International* e o *Digital Twin Consortium*; e legislação federal brasileira vigente.

Como critério de exclusão, descartaram-se blogs corporativos, textos promocionais de fornecedores de software e notícias secundárias desprovidas de fonte técnica auditável. Duas exceções deliberadas foram mantidas pela relevância que assumiram no debate técnico do setor, sempre com declaração explícita de natureza e viés: o relatório setorial patrocinado por fornecedor de FMI e Autodesk (2021), cujas estimativas macroeconômicas baseadas em autorrelato são confrontadas com a linha de base independente do NIST (Gallaher *et al.*, 2004); e os casos de referência inscritos no *buildingSMART International openBIM Awards*

(*The Henderson* e *Water Supplies Department* de Hong Kong), tratados expressamente como registros de premiação institucional, e não como experimentos submetidos à revisão por pares independente.

Cada estudo empírico foi fichado segundo o que de fato demonstra, distinguindo cinco níveis de evidência: proposta conceitual ou arquitetural; protótipo computacional ou simulação; piloto de campo com métrica delimitada; operação longitudinal em ativo real; e relato institucional ou levantamento por autorrelato. Tal separação evita que resultados obtidos em subsistemas controlados ou estimativas de percepção sejam extrapolados como prova geral de retorno econômico em todo o ciclo de vida.

Por fim, a fim de preservar a rastreabilidade científica, verificou-se o identificador digital (DOI) ou o registro catalográfico oficial de cada documento citado. Nos casos em que a consulta se limitou a um resumo oficial, a um registro de catálogo normativo ou a uma página institucional, as afirmações deste artigo se restringem ao conteúdo verificado nessa fonte.

3 FUNDAMENTOS CONCEITUAIS E NORMATIVOS: BIM, GÊMEO GEOMÉTRICO E GÊMEO DIGITAL

3.1 DEFINIÇÕES FORMAIS: ISO/IEC 30173:2023, ISO 23247 E *DIGITAL TWIN CONSORTIUM*

O conceito de gêmeo digital consolidou-se originalmente na engenharia de sistemas complexos e na manufatura aeroespacial como meio para representar o comportamento real de um ativo físico e mitigar comportamentos emergentes indesejáveis ao longo de seu ciclo de vida (Grieves; Vickers, 2017). Ao migrar da manufatura seriada para o ambiente construído — caracterizado por ativos únicos, longa vida útil, cadeia produtiva fragmentada e múltiplas trocas de propriedade —, o termo passou a sofrer forte dispersão semântica (Davila Delgado; Oyedele, 2021).

Para disciplinar essa dispersão, a taxonomia proposta por Kritzinger *et al.* (2018) tornou-se referência transversal ao classificar sistemas segundo o grau de automação do fluxo de dados entre o objeto físico e o digital. Em um *modelo digital* (*digital model*), não há fluxo automático em nenhuma direção: mudanças no ativo físico exigem atualização manual no modelo, e decisões tomadas no modelo dependem de ação humana desconectada. Em uma *sombra digital* (*digital shadow*), existe fluxo automático unidirecional do físico para o digital

— sensores atualizam o estado virtual —, mas o retorno ao ambiente físico permanece manual. Somente no *gêmeo digital* (*digital twin*) o fluxo de dados é integrado nos dois sentidos, de modo que alterações no ativo atualizam a réplica virtual e saídas analíticas da réplica retroalimentam o ativo físico (Kritzinger *et al.*, 2018; VanDerHorn; Mahadevan, 2021).

Os marcos normativos recentes cristalizaram essa exigência de conexão e convergência de estados. Publicada em novembro de 2023 pelo comitê conjunto ISO/IEC JTC 1/SC 41, a norma setorialmente neutra ISO/IEC 30173:2023 (*Digital twin — Concepts and terminology*) define gêmeo digital como uma representação digital de uma entidade-alvo com conexões de dados que possibilitam a convergência entre os estados físico e digital a uma taxa apropriada de sincronização (ISO/IEC, 2023a). Complementada pelo relatório técnico ISO/IEC TR 30172:2023, que cataloga casos de uso multissetoriais (ISO/IEC, 2023b), a norma estabelece a sincronização — ação de manter alinhados os estados da entidade-alvo e da entidade digital por meio de redes — como atributo constitutivo, e não acessório. Em linha semelhante, no domínio industrial, a norma ISO 23247 enfatiza que a representação digital deve ser adequada ao propósito (*fit-for-purpose*) e mantida sincronizada com o elemento observável (ISO, 2021).

Na mesma direção, o *Digital Twin Consortium* (2020) formulou definição amplamente adotada na interface entre tecnologia da informação (IT) e tecnologia operacional (OT): um gêmeo digital é uma representação virtual de entidades e processos do mundo real, sincronizada em frequência e fidelidade especificadas, que utiliza dados históricos e em tempo real para representar passado e presente e simular futuros previstos em função de resultados operacionais concretos. A definição foi revista pelo consórcio em 2024; a citada aqui é a de 2020. Dois elementos merecem destaque: primeiro, nessa formulação, sincronização não implica atualização instantânea indiscriminada, mas frequência aderente ao caso de uso; segundo, na leitura deste artigo, a troca bidirecional de dados — sensores de Internet das Coisas (IoT) e BMS alimentando o modelo com leituras vivas, enquanto análises, simulações e algoritmos de inteligência artificial (IA) devolvem alertas priorizados, ordens de serviço ou ajustes automáticos ao ambiente físico — é o que transforma dados em ação verificável.

Transpondo esse gradiente para a realidade de edificações e infraestruturas, Deng, Menassa e Kamat (2021) propuseram em revisão sistemática uma escada evolutiva de cinco níveis entre o BIM e o gêmeo digital na indústria AEC-FM: o Nível 1 corresponde ao BIM como representação estática de projeto e documentação; o Nível 2, a simulações apoiadas em

BIM (obra 4D, energia, conforto térmico, iluminação e acústica); o Nível 3, à integração do BIM a sensores e IoT para monitoramento em tempo real; o Nível 4, à integração do BIM à inteligência artificial para previsões, com estratégias geradas de forma automática ou semiautomática e decididas pelo gestor; e o Nível 5, ao gêmeo digital ideal, que acrescenta realimentação e controle automáticos. Nenhum dos estudos revisados pelos autores alcançou o Nível 5. Na leitura deste artigo, o Nível 3 corresponde à sombra digital de Kritzinger *et al.* (2018).

Neste artigo, adota-se um critério operacional: há gêmeo digital quando o estado físico é sincronizado automaticamente com a representação digital, na frequência que o caso de uso exige, e quando existe retorno estruturado ao ativo, automático ou por decisão humana registrada, como alertas priorizados e ordens de serviço. Sem esse retorno, o sistema é uma sombra digital. O critério é mais amplo que o de Kritzinger *et al.* (2018), que exige automação nos dois sentidos, e coerente com a ISO/IEC 30173:2023, que fala em convergência de estados a uma taxa apropriada (ISO/IEC, 2023a). É nesse sentido que a expressão "gêmeo digital verdadeiro" é usada nas seções seguintes.

3.2 O EQUÍVOCO COMERCIAL DO "GÊMEO GEOMÉTRICO"

Confrontadas com a ISO/IEC 30173:2023 e com a escada de Deng, Menassa e Kamat (2021), muitas soluções oferecidas comercialmente como "gêmeos digitais" revelam-se reembalagens de ferramentas conhecidas. Em estudo que combinou revisão de literatura e entrevistas com dez especialistas, Shahzad *et al.* (2022) registram que parte dos entrevistados considera BIM e gêmeo digital essencialmente a mesma coisa. Essa confusão abre espaço para que modelos BIM tridimensionais detalhados, nuvens de pontos ou bases cadastrais estáticas recebam o rótulo de gêmeo digital sem dispor de sincronização, análise contínua ou capacidade de simulação vinculada ao estado operacional.

Convém denominar com precisão esse artefato intermediário de gêmeo geométrico (ou réplica visual estática): um modelo 3D com elevado nível de detalhe gráfico — por vezes hospedado em visualizador em nuvem e acompanhado de painéis de indicadores desconectados dos objetos construtivos — que reproduz fielmente a forma da edificação na data de sua captura, mas não mantém vínculo vivo com telemetria operacional nem orienta decisões recorrentes. Mesmo quando sensores são exibidos sobre o modelo apenas como marcadores informativos sem semântica estruturada nem retorno operacional, o sistema alcança no máximo o estágio de sombra digital (Kritzinger *et al.*, 2018; Boje *et al.*, 2020).

O equívoco não é meramente terminológico; ele produz distorções contratuais e financeiras. Na experiência da engenharia de projetos e gestão de empreendimentos, contratantes que encomendam "um gêmeo digital" sem especificar casos de uso operacionais, requisitos de informação e protocolos de integração frequentemente recebem um modelo *as-built* hiperdetalhado, pesado para navegar e impossível de atualizar com a equipe de manutenção disponível. Davila Delgado e Oyedele (2021) observam que o conceito chegou ao ambiente construído vindo da manufatura e que a pesquisa no setor ainda forma definições maduras. Importado sem adaptar os modelos de processo à fragmentação da construção civil, o termo tende a gerar expectativa desproporcional, que, na experiência do autor, costuma terminar no abandono do modelo após a entrega.

3.3 TRANSIÇÃO BASEADA NA SÉRIE ISO 19650 E PADRÕES *OPENBIM*: DO PIM AO AIM

Se um modelo BIM estático não é, por si só, um gêmeo digital, tampouco deve ser descartado como etapa superada. Na arquitetura normativa atual, o BIM estruturado segundo a série ISO 19650 constitui a espinha dorsal geométrica, topológica e cadastral que ancora espacialmente os fluxos operacionais (ISO, 2018a; 2018b; 2020a; 2022). No Brasil, a Associação Brasileira de Normas Técnicas internalizou a série: as Partes 1 e 2 em 2022, as Partes 3, 4 e 5 em outubro de 2025 e a Parte 6, sobre informações de saúde e segurança, em agosto de 2026 (ABNT, 2022c; 2022d; 2025a; 2025b; 2025c; 2026b).

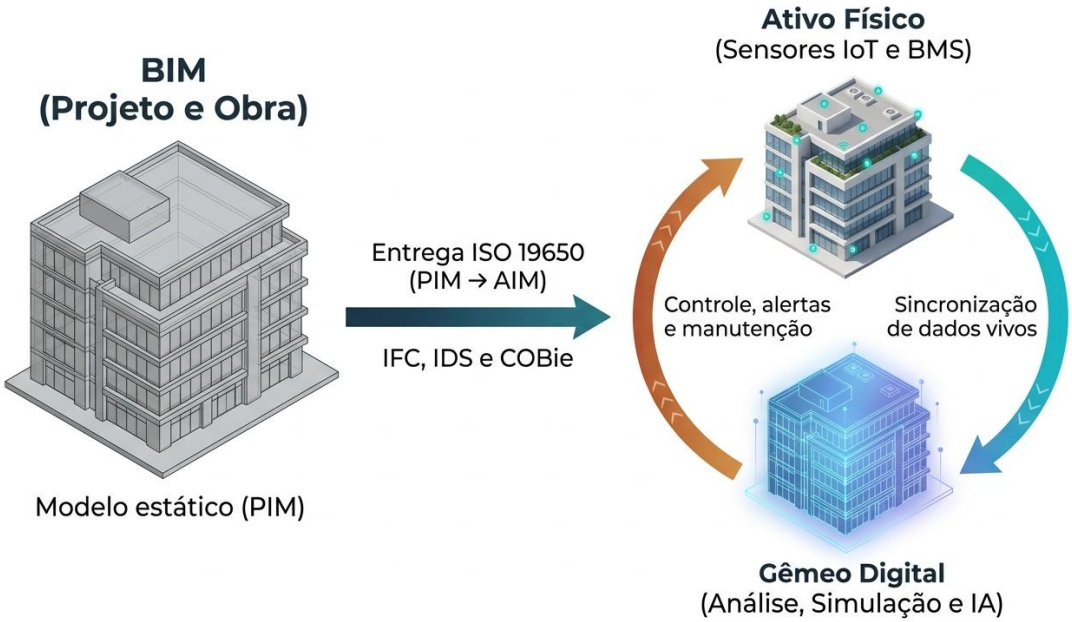
O mecanismo central da série ISO 19650 é o encadeamento entre os requisitos de informação da organização (*Organizational Information Requirements* — OIR), os requisitos de informação do ativo (*Asset Information Requirements* — AIR), os requisitos do projeto (PIR) e os requisitos de troca de informação (EIR), operados dentro de um Ambiente Comum de Dados (*Common Data Environment* — CDE). Durante a fase de entrega — projeto e obra —, a informação é consolidada no Modelo de Informação do Projeto (*Project Information Model* — PIM). Ao final da construção, a parcela relevante para operação e manutenção deve ser verificada, filtrada e convertida no Modelo de Informação do Ativo (*Asset Information Model* — AIM), conforme disciplinado pela ABNT NBR ISO 19650-3:2025 e pela ABNT NBR ISO 19650-4:2025 (ABNT, 2025a; 2025b).

Para que o AIM não fique aprisionado a formatos proprietários de softwares autorais — cujo ciclo de obsolescência é muito inferior à vida útil de 50 anos ou mais de uma edificação ou obra de arte especial —, a estratégia institucional da *buildingSMART*

International (2020) defende um ecossistema aberto de gêmeos digitais sustentado por padrões *openBIM*. Quatro especificações cumprem papel complementar nessa transição: (i) o esquema IFC (*Industry Foundation Classes*), cuja versão 4.3 foi publicada em março de 2024 como ISO 16739-1:2024, estendendo a representação padronizada de edificações para infraestruturas lineares como rodovias, ferrovias, pontes e sistemas hidráulicos (ISO, 2024a), e adotada no Brasil como ABNT NBR ISO 16739-1:2026 (ABNT, 2026a); (ii) o formato COBie (*Construction Operations Building Information Exchange*), codificado na norma britânica BS 1192-4:2014, retirada pela BSI em 2022, para estruturar dados não geométricos de espaços, sistemas, equipamentos, garantias e peças de reposição voltados ao *Facility Management* (BSI, 2014); (iii) a especificação IDS 1.0 (*Information Delivery Specification*), aprovada como padrão definitivo em junho de 2024, que permite declarar requisitos contratuais de informação em XML legível por humanos e auditável de modo determinístico em modelos IFC (buildingSMART International, 2024); e (iv) dicionários de dados como o *buildingSMART Data Dictionary* (bSDD), articuláveis no Brasil ao sistema de classificação da série ABNT NBR 15965.

A evidência empírica sobre o *handover* adverte, contudo, que normas e formatos não eliminam a perda informacional sem validação rigorosa. Estudos sobre BIM para gestão de instalações (*Facility Management*) — como Pishdad-Bozorgi *et al.* (2018), Matarneh *et al.* (2019) e Patacas, Dawood e Kassem (2020) — apontam como desafios recorrentes da passagem do PIM para o AIM a definição dos requisitos de informação para a operação, a validação dos dados entregues e a integração do modelo com os sistemas informatizados de gestão de manutenção (*Computerized Maintenance Management Systems* — CMMS). A Figura 1 sintetiza essa passagem estruturada do modelo estático para o ciclo operacional bidirecional, enquanto o Quadro 1 sistematiza as diferenças entre modelo BIM tradicional, gêmeo geométrico e gêmeo digital verdadeiro.

Figura 1 – Transição do modelo BIM estático (PIM) para o ciclo operacional bidirecional de um gêmeo digital



Fonte: elaboração do autor a partir de ISO (2018a; 2020a; 2024a), ISO/IEC (2023a) e buildingSMART International (2020; 2024).
Nota: a seta horizontal representa a entrega estruturada e validada (PIM → AIM) que fornece âncora espacial e semântica; o ciclo à direita sintetiza a convergência de estados e a retroalimentação operacional que distinguem o gêmeo digital de uma réplica estática. IFC, IDS e COBie aparecem como formatos abertos adotados neste exemplo; a ISO 19650 não os torna obrigatórios.

Quadro 1 – Comparativo estrutural entre Modelo BIM Tradicional (PIM/AIM), Gêmeo Geométrico e Gêmeo Digital Verdadeiro

Dimensão	**Modelo BIM Tradicional (PIM / AIM)**	**Gêmeo Geométrico (Réplica Estática)**	**Gêmeo Digital Verdadeiro**
Estado temporal	Passado ou futuro prescritivo: descreve o que o ativo *deveria ser* (projeto) ou *foi* na entrega (*as-built*).	Fotografia congelada de uma data específica; envelhece a cada reforma ou alteração não modelada.	Presente vivo e futuro simulado: expressa o que o ativo *está fazendo* e projeta cenários de operação.
Fluxo de dados e sincronização	Atualização discreta e manual por marcos de entrega ou revisões periódicas no CDE (*Digital Model*).	Unidirecional manual ou visualizador acoplado a painéis isolados, sem vínculo semântico ou sincronização viva.	Entrada automática de dados em frequência adequada ao uso e retorno estruturado ao ativo, automático ou por decisão humana registrada.
Normas e padrões base	Série ABNT NBR ISO 19650, IFC (ISO 16739-1), IDS 1.0, COBie (BS 1192-4, retirada em 2022) e ABNT NBR 15965.	Formatos proprietários ou exportações 3D/nuvens de pontos sem validação contratual de AIR ou ontologias operacionais.	ISO/IEC 30173:2023, ISO 23247 (conceito *fit-for-purpose*), ISO 19650-3/5, IFC/IDS federados a BOT, Brick, REC e ASHRAE 223P.
Capacidade de análise e atuação	Compatibilização, quantitativos, simulações *off-line* (4D/5D/energia) e cadastro estático de ativos.	Visualização espacial, passeios virtuais e consulta gráfica; capacidade de atuação física nula.	Diagnóstico de falhas (FDD), manutenção preditiva, simulação sob estado real, alertas, ordens CMMS e controle supervisionado ou fechado.

Dimensão	Modelo BIM Tradicional (PIM / AIM)	Gêmeo Geométrico (Réplica Estática)	Gêmeo Digital Verdadeiro
Papel na tomada de decisão	Apoio à concepção, licitação, planejamento de obra e registro documental de entrega.	Comunicação visual e demonstração institucional; baixo valor recorrente na rotina de O&M.	Suporte contínuo à decisão operacional, energética, estrutural e logística, sujeito à validação humana e auditoria.
Principal risco técnico-contratual	Perda de dados no *handover* (PIM → AIM) e abandono do modelo após desmobilização da obra.	Descompasso entre promessa comercial e utilidade real; elevado *CapEx* sem retorno operacional.	Automatização de decisões sobre dados ruins, deriva de calibração (*model drift*), vulnerabilidade cibernética e custo de curadoria.

Fonte: elaboração do autor a partir de Kritzinger *et al.* (2018), Deng, Menassa e Kamat (2021), Shahzad *et al.* (2022), ISO/IEC (2023a) e ABNT (2022c; 2025a).
Nota: sistemas com leitura automática de sensores sem retorno estruturado ao ambiente físico situam-se em posição intermediária — a sombra digital (*digital shadow*) —, etapa frequentemente confundida com o gêmeo digital verdadeiro.

4 ARQUITETURA TECNOLÓGICA E FLUXOS BIDIRECIONAIS DE INFORMAÇÃO

4.1 CAMADAS DE INTEGRAÇÃO: DO ATIVO FÍSICO À ATUAÇÃO

Transformar o AIM em um gêmeo digital operacional demanda uma arquitetura de sistemas que conecte o mundo físico, a representação semântica, os motores analíticos e os mecanismos de atuação. A literatura emprega nomenclaturas e números de camadas variados (Boje *et al.*, 2020; Sacks *et al.*, 2020; Pan; Zhang, 2021; Cremonesi *et al.*, 2026). Para fins de análise, este artigo organiza a arquitetura em quatro camadas funcionais interdependentes, atravessadas verticalmente por requisitos de governança e segurança.

A primeira camada — física e de aquisição — reúne o ativo construído e os dispositivos capazes de observar seu estado. Em edificações em operação, predominam redes de sensores IoT (temperatura, umidade relativa, CO_2, presença, iluminância, medição setorizada de energia e água), sistemas de automação predial (BMS/BAS) e controladores SCADA, comunicando-se por protocolos industriais e prediais como BACnet, Modbus, OPC UA e MQTT. Em infraestruturas civis e canteiros de obras, somam-se acelerômetros, extensômetros e inclinômetros voltados ao monitoramento de integridade estrutural (*Structural Health Monitoring* — SHM), além de captura periódica de realidade por escaneamento a laser (LiDAR), fotogrametria aérea e telemetria embarcada em máquinas

(GPS, unidades de medição inercial — IMU — e sensores de consumo de combustível) (Pregnolato *et al.*, 2022; Tuhaise; Tah; Abanda, 2023; Qu; Zhang; Jiang, 2026).

A segunda camada — semântica e de interoperabilidade — enfrenta o desafio de integração entre BIM e IoT revisado por Tang *et al.* (2019): conciliar dados geométricos e cadastrais de baixa frequência de mudança (armazenados em BIM/IFC) com fluxos contínuos de séries temporais gerados por sensores. Tentar embutir leituras dinâmicas diretamente dentro de arquivos IFC monolíticos compromete desempenho e manutenção, pois o esquema IFC foi concebido originalmente para trocas baseadas em arquivos e *snapshots* de projeto. Por essa razão, a literatura de *Linked Building Data* consolidou arquiteturas federadas apoiadas em grafos de conhecimento e identificadores únicos (URIs), nas quais a topologia espacial — formalizada pela ontologia BOT (*Building Topology Ontology*), do grupo comunitário *Linked Building Data* do W3C (Rasmussen *et al.*, 2021) — conecta-se a esquemas semânticos especializados na operação, como o Brick Schema para pontos de telemetria e sistemas HVAC (Balaji *et al.*, 2018), a ontologia RealEstateCore para espaços e gestão imobiliária corporativa (Hammar *et al.*, 2019) e a proposta de norma ASHRAE 223P para modelagem semântica de automação e análise predial, ainda em revisão pública (ASHRAE, 2026). Nessa federação, o AIM em IFC/COBie ancora "o quê" e "onde" cada componente está, enquanto bancos de séries temporais armazenam as medições vivas e o grafo semântico preserva as relações funcionais entre equipamentos, zonas e sensores.

A terceira camada — núcleo cognitivo e analítico — realiza a sincronização de estados e converte séries temporais brutas em diagnóstico e previsão. Os sistemas mais robustos combinam duas famílias de modelos: simulações baseadas em física (balanço térmico e energético, análise estrutural por elementos finitos, modelagem hidráulica) e modelos orientados a dados baseados em aprendizado de máquina, usados para detecção e diagnóstico automatizado de falhas (*Fault Detection and Diagnosis* — FDD), detecção de anomalias, previsão de demanda e otimização multiobjetivo (Boje *et al.*, 2020; Hosamo *et al.*, 2023). Um requisito crítico destacado por Reynaud, Journaux e Roxin (2026) é a calibração contínua: como edificações e obras sofrem desgaste, alterações de ocupação e intervenções físicas, modelos não recalibrados acumulam deriva (*model drift*) e passam a emitir previsões desconectadas da realidade física.

A quarta camada — atuação física e interface humana — fecha o ciclo bidirecional. Dependendo da criticidade do subsistema, a retroalimentação assume duas modalidades: atuação em malha fechada, em que o núcleo analítico envia comandos diretos a atuadores via BMS/SCADA (por exemplo, ajuste de *setpoints* de climatização, dimerização de luminárias

ou reatribuição de rotas de frota); ou atuação supervisionada com humano no circuito (*human-in-the-loop*), na qual o gêmeo digital gera alertas priorizados, simula alternativas de intervenção e abre ordens de serviço em sistemas CMMS para validação e execução por engenheiros e equipes de manutenção (Deng; Menassa; Kamat, 2021; Reynaud; Journaux; Roxin, 2026). A Figura 2 sintetiza essas quatro camadas, o retorno bidirecional e o pilar transversal de governança e cibersegurança.

Figura 2 – Arquitetura em quatro camadas e fluxos bidirecionais de um gêmeo digital no BIM



Fonte: elaboração do autor com base em Tang *et al.* (2019), Boje *et al.* (2020), Rasmussen *et al.* (2021), ISO/IEC (2023a), ABNT (2025a; 2025c) e Reynaud, Journaux e Roxin (2026).
Nota: a linha tracejada à esquerda evidencia o ciclo de retroalimentação que diferencia o gêmeo digital da sombra digital; o pilar à direita destaca controles transversais frequentemente omitidos em arquiteturas puramente tecnológicas.

4.2 LATÊNCIA, GRANULARIDADE TEMPORAL E O LIMITE REAL DA ATUAÇÃO AUTÔNOMA

Um dos equívocos técnicos mais difundidos na divulgação sobre gêmeos digitais consiste em interpretar "operação em tempo real" como sinônimo de coleta contínua em milissegundos para todo o empreendimento. Nem a ISO/IEC 30173:2023 nem o *Digital Twin*

Consortium (2020) sustentam essa leitura: a norma fala em taxa apropriada de sincronização, e o consórcio, em frequência e fidelidade especificadas. Na leitura deste artigo, a taxa deve ser definida pelo tempo de resposta requerido pelo fenômeno físico e pela decisão operacional associada. Aumentar artificialmente a frequência de amostragem além da dinâmica física do subsistema multiplica custos de rede, armazenamento e processamento sem agregar valor decisório.

Na prática da engenharia do ambiente construído, convivem ao menos três regimes temporais distintos no mesmo empreendimento. Em subsistemas críticos de segurança, dinâmica estrutural ou logística ativa de canteiro, os tempos de resposta ficam na casa de milissegundos a poucos segundos: alarmes de incêndio e fumaça, controle de acesso, monitoramento vibracional de pontes sob tráfego intenso ou despacho dinâmico de frotas de terraplenagem — caso em que o sistema avaliado por Qu, Zhang e Jiang (2026) levou, em média, 600 ms entre a chegada dos dados e a atualização do painel. Em subsistemas prediais de inércia térmica moderada, como climatização (HVAC), qualidade do ar interno e iluminação adaptativa, intervalos da ordem de minutos tendem a bastar para otimização energética e conforto térmico sem induzir ciclagem excessiva de atuadores — Hosamo *et al.* (2023), por exemplo, recalcularam os *setpoints* a cada 10 minutos. Já em análise de ocupação espacial, balanço hídrico-energético consolidado, inspeção geométrica de obras por LiDAR e acompanhamento de degradação estrutural de longo prazo, frequências horárias, diárias ou mensais tendem a atender ao propósito analítico.

Mais importante do que ajustar a latência é reconhecer a distância entre monitorar e atuar. Na revisão de escopo mais recente sobre gêmeos digitais na operação e manutenção de edificações, que sintetiza 91 estudos publicados entre 2019 e 2025, Reynaud, Journaux e Roxin (2026) organizam as capacidades documentadas do sensoriamento à atuação em malha fechada e recomendam uma progressão por portões de prontidão (*stage-gated progression*): partir da análise consultiva e chegar ao controle em malha fechada apenas com salvaguardas e práticas de garantia. A atuação autônoma segue rara: na revisão de Deng, Menassa e Kamat (2021), nenhum estudo alcançou o Nível 5. Entre as razões que este artigo identifica estão sistemas BMS legados de protocolos fechados, a dificuldade de traduzir inferências de IA em comandos seguros para equipamentos físicos e a falta de definição clara de responsabilidade por falhas de comandos autônomos (ver seção 6.3). O Quadro 2 mapeia frequências, captura, métodos analíticos e respostas por subsistema.

Quadro 2 – Mapeamento de frequências de sincronização, captura, métodos analíticos e respostas por subsistema

Subsistema / Domínio	**Frequência / Latência**	**Tecnologias de Captura**	**Métodos Analíticos / IA**	**Resposta Operacional e Limite**
Segurança predial e combate a incêndio	Milissegundos a segundos	Detectores de fumaça/calor, sensores de gás, controle de acesso, CFTV e painéis endereçáveis.	Regras determinísticas, fusão de sensores e simulação de rotas de evacuação no AIM.	Alarmes críticos, acionamento de extração/pressurização (intertravamento normativo prevalece sobre IA).
Climatização (HVAC) e iluminação	Minutos (ex.: 10 min em Hosamo *et al.*, 2023)	BMS/BACnet, sensores IoT de temperatura, umidade, CO_2, presença, luminosidade e medidores elétricos.	FDD automatizado, redes neurais (ANN), controle preditivo (MPC) e otimização multiobjetivo (MOGA).	Ajuste de *setpoints*, dimerização e ordens preventivas; risco de ciclagem se mal calibrado.
Monitoramento estrutural (SHM) de pontes e OAEs	Milissegundos (dinâmico) a horas/dias (tendência)	Acelerômetros, extensômetros, fibra óptica, inclinômetros, termômetros e LiDAR periódico.	Identificação modal, atualização de modelos de elementos finitos, detecção de anomalias e Valor da Informação.	Alertas de limite estrutural, inspeção *in loco* dirigida e priorização de reforço; sem atuação autônoma.
Ocupação espacial e gestão de *facilities*	Horas a dias (agregação semanal ou mensal)	Contadores de presença, sensores em luminárias PoE, reservas de salas e registros de CMMS.	Análise estatística de uso, agrupamento de padrões e simulação de cenários de *layout*.	Otimização de limpeza, alocação de espaços e revisão de contratos; restrições de privacidade (LGPD).
Redes urbanas de água e saneamento	Segundos a minutos (pressão/vazão); dias (cadastro)	Medidores inteligentes, transdutores de pressão, sensores acústicos, SCADA e integração *openBIM*/openGIS.	Balanço hidráulico, detecção de vazamentos e previsão de falhas de tubulações por aprendizado de máquina.	Isolamento de setores, despacho de equipes de reparo e gestão de perdas; alta complexidade de cadastro legado.
Terraplenagem e logística em canteiro de obras	Subsegundo (~600 ms até o painel); horas a semanas (LiDAR e topografia)	GNSS, IMU, telemetria de combustível e LiDAR terrestre, registrados às superfícies de projeto do modelo BIM.	Redes em grafos espaço-temporais (ST-GAT), diferenciação de nuvens de pontos e otimização evolutiva.	Planos de despacho para escolha do gestor e medição de avanço físico; tempos tratados como determinísticos e grafo a particionar acima de 100 máquinas.

Fonte: elaboração do autor com base em Jalia, Bakker e Ramage (2018), Pregnolato *et al.* (2022), Hosamo *et al.* (2023), Limongelli *et al.* (2024), Qu, Zhang e Jiang (2026), Reynaud, Journaux e Roxin (2026) e WSD (2026); as faixas de frequência são estimativas do autor, salvo indicação.

5 APLICAÇÕES EMPÍRICAS NA OPERAÇÃO E NA EXECUÇÃO DE OBRAS

5.1 OPERAÇÃO DE EDIFÍCIOS E INFRAESTRUTURAS: CASOS DE REFERÊNCIA E EVIDÊNCIA MEDIDA

A atração econômica dos gêmeos digitais no BIM apoia-se na duração da fase operacional, a mais longa do ciclo de vida, e no peso que ela tem nos custos de informação: no levantamento do NIST, 57% do custo da interoperabilidade inadequada recaía sobre a operação e a manutenção (Gallaher *et al.*, 2004). Ao examinar os casos mais citados na literatura técnica e nos fóruns setoriais, contudo, o rigor metodológico exige distinguir relatos institucionais e casos premiados — valiosos para ilustrar escala e viabilidade organizacional, mas desprovidos de auditoria independente — de estudos empíricos revisados por pares com medições controladas e limites declarados.

Entre os casos emblemáticos de operação predial, o edifício corporativo *The Edge*, em Amsterdã, tornou-se referência recorrente. Documentado em relatório técnico do *Centre for Digital Built Britain* (CDBB), o edifício reúne cerca de 28.000 pontos de entrada e saída de dados em um *data lake* central; parte dos sensores fica nas luminárias LED alimentadas por *Power over Ethernet* (PoE), com sensores de movimento, luz, temperatura e ar, que apoiam o ajuste de climatização e iluminação e o uso flexível das estações de trabalho (Jalia; Bakker; Ramage, 2018). Uma leitura crítica, porém, impõe duas qualificações essenciais: primeira, concebido antes da maturação dos padrões abertos atuais para AIM e gêmeos digitais, *The Edge* opera historicamente como edifício inteligente pioneiro fortemente ancorado em automação predial e nuvem proprietária, mais próximo de um ecossistema IoT/BMS avançado do que de um gêmeo digital baseado em IFC aberto; segunda, o próprio relatório do CDBB registra fricções reais de governança, incluindo a recusa de parte dos ocupantes ao rastreamento via aplicativo, por privacidade, e um volume de dados tão grande que não é analisado em tempo real nem bem aproveitado na operação (Jalia; Bakker; Ramage, 2018).

Na fronteira do ecossistema *openBIM*, iniciativas sediadas em Hong Kong ganharam destaque na galeria internacional do *buildingSMART Awards*. A torre comercial *The Henderson* — edifício de 36 pavimentos, segundo a ficha de inscrição, desenvolvido pela *Henderson Land Development* em terreno urbano adensado junto a seis túneis ativos do metrô (MTR) — empregou fluxos *openBIM* baseados em IFC desde a coordenação geométrica de sua fachada curva com mais de 4.000 painéis envidraçados e o monitoramento geotécnico e estrutural por mais de 500 sensores durante a construção até a estruturação da entrega digital

para gestão operacional, eficiência energética e suporte por IA, o que lhe rendeu o prêmio da categoria Operações em 2025 (buildingSMART International, 2025a; 2025b). Em escala urbana, o Departamento de Abastecimento de Água de Hong Kong (*Water Supplies Department* — WSD), responsável por cerca de 8.600 km de tubulações, integrou modelos *openBIM*, GIS, sensores IoT e ferramentas de IA à gestão de ativos, com o sistema AMIS (*Asset Management Information System*), para antecipar falhas e elevar a eficiência operacional, e recebeu o Grande Prêmio da categoria Operações no *buildingSMART International openBIM Awards* de 2026, em Tóquio (WSD, 2026; buildingSMART International, 2026). Como casos submetidos a premiação setorial, ambos indicam viabilidade técnica em escala real sob padrões abertos, mas não substituem avaliações independentes sobre custo de implantação e retorno financeiro líquido.

A evidência controlada e auditável provém da literatura revisada por pares. Em escala de edifício e campus, Lu *et al.* (2020) desenvolveram e documentaram um gêmeo digital no *West Cambridge Campus* (Universidade de Cambridge), integrando modelos BIM em IFC, telemetria IoT, BMS e dados de manutenção (CMMS). O estudo demonstrou a viabilidade de uma arquitetura federada, com detecção de anomalias aplicada a duas bombas centrífugas do edifício do *Institute for Manufacturing*, e evidenciou o peso prático da heterogeneidade entre os sistemas de origem: falta de identificador único e diferenças de semântica e de unidades (Lu *et al.*, 2020).

Quando o recorte se concentra em um subsistema bem delimitado, os ganhos estimados tornam-se mais claros. Hosamo *et al.* (2023) desenvolveram um gêmeo digital de sistema de climatização (*HVACDT*) combinando BIM, sensores IoT, modelos de conforto térmico, redes neurais artificiais (ANN) e algoritmos genéticos multiobjetivo (MOGA), alimentado com dados operacionais coletados entre agosto de 2019 e outubro de 2021 em um edifício de escritórios em Grimstad, na Noruega. Pela otimização, os autores estimaram economia média de energia de resfriamento de 13,2% em um pico de verão de quatro dias e de 10,8% nos três meses de verão (junho a agosto), mantendo a porcentagem prevista de ocupantes insatisfeitos (PPD) abaixo de 10%; o estudo não relata a aplicação dos ajustes no edifício nem a medição posterior (Hosamo *et al.*, 2023). No domínio das infraestruturas civis existentes, Pregnolato *et al.* (2022) formularam um fluxo de trabalho de gêmeo digital para esses ativos e o aplicaram, como prova de conceito, ao monitoramento das selas da ponte pênsil de Clifton, no Reino Unido, com sensores de monitoramento estrutural (SHM). Na leitura deste artigo, essa direção converge com as diretrizes regionais de monitoramento estrutural de pontes da Lombardia sistematizadas por Limongelli *et al.* (2024).

5.2 AVANÇO SOBRE O CANTEIRO DE OBRAS: O GÊMEO DIGITAL DE CONSTRUÇÃO

Embora a literatura inicial tenha associado gêmeos digitais predominantemente à fase pós-entrega, uma vertente consolidada desde 2020 estende o conceito à execução de obras. O desafio nesse ambiente é estruturalmente mais difícil do que na operação predial: no canteiro, a geometria do ativo transforma-se diariamente, os recursos são móveis e as condições de contorno variam com o clima e a produtividade da mão de obra. Sacks *et al.* (2020) formalizaram o conceito de *Digital Twin Construction* (DTC) como um sistema de controle em malha fechada que integra BIM, princípios da construção enxuta (*lean construction*), captura automatizada de estado no canteiro e IA para comparar continuamente o executado ao planejado e reajustar planos de curto prazo. Em linha complementar, Pan e Zhang (2021) propuseram a integração entre BIM, IoT e mineração de dados para gestão de projetos, e Jiang *et al.* (2022) demonstraram, em experimento numérico e em bancada robótica, a sincronização em tempo real do planejamento, da programação e da execução da montagem de pré-moldados.

Uma validação particularmente ilustrativa desse avanço, feita retrospectivamente com dados de campo, foi publicada por Qu, Zhang e Jiang (2026) na revista *Buildings* (MDPI). Os autores desenvolveram o *framework* BIM-iDT, um gêmeo digital integrado ao BIM baseado no esquema aberto IFC, voltado à gestão em tempo real de frotas de terraplenagem em obras de infraestrutura rodoviária. A arquitetura combina quatro módulos: (i) camada de fusão de sensores heterogêneos alinhando dados de GNSS, IMU, consumo de combustível e LiDAR terrestre ao sistema de coordenadas do modelo BIM; (ii) rede neural de atenção em grafos espaço-temporais (ST-GAT) para reconhecer estados operacionais das máquinas e prever produtividade de curto horizonte, alcançando pontuação F1 macro de 0,943; (iii) módulo de diferenciação temporal de nuvens de pontos confrontado às superfícies de projeto BIM, com erro percentual absoluto médio (MAPE) de 2,14% no corte e de 2,87% no aterro; e (iv) otimizador evolutivo multiobjetivo restrito (CMOEO) para gerar planos de despacho balanceando combustível, tempo de ciclo, utilização da frota e prazo (Qu; Zhang; Jiang, 2026).

Na validação retrospectiva, com 14 meses de dados de uma obra rodoviária e 32 máquinas, o sistema levou, em média, 600 ms entre a chegada dos dados e a atualização do painel. Na comparação com o despacho manual, os autores reportam redução de 12,6% no consumo de combustível da frota e de 9,3% no tempo de ciclo, com aderência ao cronograma

de 96,1%, o que estimam equivaler a cerca de 168 toneladas de CO_2 evitadas. Os planos otimizados são propostos ao gestor da obra, que escolhe o plano final, e um teste complementar de transferência foi feito em um canteiro de barragem (Qu; Zhang; Jiang, 2026). Ainda assim, a transposição desse desempenho para a rotina geral da construção pesada exige cautela. Os autores reconhecem que o otimizador trata tempos de viagem e produtividade como determinísticos, sem modelar clima e quebras, que o reconhecimento de estados depende de anotação manual de vídeo e que, acima de cem máquinas, pode ser preciso particionar o grafo ou distribuir a inferência para manter a latência. O ruído de GNSS e IMU, testado em simulação, reduziu pouco o desempenho. O Quadro 3 sintetiza os estudos de caso e evidências empíricas examinados nesta seção.

Quadro 3 – Síntese dos estudos de caso e evidências empíricas: natureza da fonte, escala, padrões, métricas e limites

Caso / Estudo	**Natureza da Fonte**	**Escala e Fase**	**Padrões e Tecnologias**	**Métricas Reportadas**	**Alcance e Limitações**
The Edge, Amsterdã (Jalia; Bakker; Ramage, 2018)	Relatório institucional (CDBB / Cambridge)	Edifício corporativo; Operação (O&M)	~28.000 pontos de dados, luminárias PoE com sensores, BMS, *data lake* e aplicativo de ocupação	Ajuste de HVAC e iluminação; alta eficiência energética (BREEAM)	Precursor proprietário (não ancorado em IFC aberto); fricções de privacidade e volume excessivo de dados.
The Henderson, Hong Kong (buildingSMART International, 2025a; 2025b)	Caso premiado / vitrine setorial (sem revisão por pares)	Torre comercial (36 pav.); Obra e Operação	*openBIM* (IFC), >500 sensores geotécnicos e estruturais (obra) e IA em O&M	Coordenação de >4.000 painéis curvos, segurança junto a túneis MTR e entrega digital	Orçamento atípico de empreendimento ícone; ausência de auditoria independente de ROI operacional.
Rede de Água WSD, Hong Kong (WSD, 2026; buildingSMART International, 2026)	Caso premiado (Grande Prêmio Operações 2026)	Infraestrutura linear (~8.600 km); Operação	*openBIM*, GIS, AMIS, sensores IoT e IA	Gestão integrada do ciclo de vida, detecção antecipada de falhas e eficiência	Demonstra escala institucional em saneamento; métricas financeiras e de custo de manutenção não auditadas.

Caso / Estudo	Natureza da Fonte	Escala e Fase	Padrões e Tecnologias	Métricas Reportadas	Alcance e Limitações
West Cambridge Campus (Lu *et al.*, 2020)	Artigo revisado por pares (*J. Manag. Eng.*)	Edifício e campus universitário; Operação	BIM/IFC, sensores IoT, BMS e integração a CMMS em arquitetura federada	Arquitetura viável em edifício e campus; detecção de anomalias em duas bombas	Heterogeneidade dos sistemas de origem (identificadores, semântica e unidades); sincronização de dados feita offline.
HVACDT, Noruega (Hosamo *et al.*, 2023)	Artigo revisado por pares (*Adv. Build. Energy Res.*)	Edifício de escritórios (dados 2019–2021); Operação	BIM, sensores IoT, conforto térmico, redes neurais (ANN) e otimização (MOGA)	Estimado por otimização: −13,2% de energia de resfriamento (pico de 4 dias) e −10,8% no verão; PPD < 10%	Foco restrito ao subsistema HVAC em edifício único; generalização climática e custo de integração em aberto.
Pontes existentes — SHM (Pregnolato *et al.*, 2022)	Artigo revisado por pares (*Autom. Constr.*)	Infraestrutura civil existente (pontes); Operação	Modelo digital, sensores de SHM e fluxo de trabalho para ativos existentes	Prova de conceito na ponte de Clifton (Reino Unido)	Infraestrutura *brownfield* sem BIM prévio; sem atuação física automática e dependente de calibração estrutural.
BIM-iDT Rodoviário (Qu; Zhang; Jiang, 2026)	Artigo revisado por pares (*Buildings*, MDPI)	Obra rodoviária, validação retrospectiva (e teste em barragem); Execução	IFC, GNSS, IMU, LiDAR terrestre, ST-GAT (F1 = 0,943) e otimização CMOEO	600 ms até o painel; −12,6% de combustível e −9,3% de ciclo frente ao despacho manual; aderência de 96,1%; MAPE de 2,1% a 2,9%	Tempos tratados como determinísticos (sem clima e quebras); anotação manual de vídeo; grafo a particionar acima de 100 máquinas.

Fonte: elaboração do autor a partir das obras citadas.
Nota: casos premiados e relatórios institucionais ilustram maturidade de implantação em escala, mas possuem menor grau de auditabilidade metodológica do que estudos empíricos revisados por pares.

6 GOVERNANÇA DE DADOS, PRAGMATISMO E BARREIRAS À ADOÇÃO

6.1 QUALIDADE DE DADOS E O RISCO DE AUTOMATIZAR DECISÕES EQUIVOCADAS

A confiabilidade de um gêmeo digital é limitada pelo elo mais fraco de sua cadeia informacional: o cadastro de ativos e a integridade das medições. Conectar algoritmos

preditivos a um AIM incompleto, a códigos de equipamentos duplicados ou a sensores descalibrados não produz inteligência operacional; apenas acelera e automatiza decisões equivocadas.

A magnitude econômica desse problema costuma ser ilustrada no setor pela estimativa publicada em conjunto por FMI e Autodesk (2021) no relatório *Harnessing the Data Advantage in Construction*. Combinando um levantamento global com mais de 3.900 profissionais de engenharia e construção e uma modelagem macroeconômica aplicada ao PIB mundial de 2020, o estudo estimou que "dados ruins" — definidos como imprecisos, incompletos, inacessíveis, inconsistentes ou intempestivos — podem ter custado US$ 1,848 trilhão à indústria global da construção e respondido por cerca de 14% do retrabalho naquele ano, com aproximadamente 30% dos respondentes declarando que mais da metade de seus dados de projeto é deficiente (FMI; Autodesk, 2021). Por rigor metodológico, esse número deve ser lido com duas ressalvas explícitas: trata-se de estudo patrocinado por fornecedor comercial diretamente interessado na venda de plataformas de dados, e o valor agregado decorre de extrapolação macroeconômica sobre autorrelatos, não de auditoria contábil direta em obras.

O diagnóstico qualitativo subjacente, porém, independe dessa estimativa comercial, pois já havia sido documentado em linha de base independente pelo *National Institute of Standards and Technology* (NIST). Em análise econômica clássica da indústria norte-americana de edificações e instalações de capital, Gallaher *et al.* (2004) estimaram o custo anual da interoperabilidade inadequada em US$ 15,8 bilhões (em dólares de 2002), dos quais US$ 9,1 bilhões, cerca de 57%, na fase de operação e manutenção; somadas todas as fases, proprietários e operadores arcaram com US$ 10,6 bilhões, cerca de dois terços do total. Mais de quinze anos depois, Patacas, Dawood e Kassem (2020) ainda propõem um ambiente comum de dados com padrões abertos justamente para validar o AIM contra os requisitos antes de usá-lo na manutenção. Sem sanear o cadastro e definir quem atualiza o ativo após cada manutenção, o gêmeo digital tende a se deteriorar logo nas primeiras intervenções.

6.2 PRAGMATISMO EM ATIVOS EXISTENTES (*BROWNFIELD*): *SLIMBIM* E FOCO EM CASOS DE USO

A literatura e a prática profissional de BIM concentram-se desproporcionalmente em empreendimentos novos (*greenfield*), mas a maior parte do parque construído em operação no mundo e no Brasil é composta por ativos existentes (*brownfield*) — hospitais, campi, plantas

industriais, edifícios públicos e pontes construídos antes da difusão do BIM, sem PIM prévio e frequentemente com documentação 2D desatualizada. Tentar reproduzir nesse estoque a lógica de modelagem hiperdetalhada de projeto (*scan-to-BIM* integral de alta densidade geométrica) antes de definir o caso de uso operacional costuma inviabilizar o projeto pelo custo inicial e pelo prazo de implantação.

Tanto o conceito *fit-for-purpose* da ISO 23247 (ISO, 2021) quanto os *Gemini Principles* do CDBB — estruturados em três pilares de propósito (bem público, criação de valor e discernimento), confiança (segurança, abertura e qualidade) e função (federação, curadoria e evolução) (Bolton *et al.*, 2018) — apontam para o caminho oposto: partir da decisão operacional desejada para então especificar o nível mínimo de informação necessário. Em ativos existentes, este artigo adota uma abordagem enxuta, aqui chamada de *slimBIM* ou *Minimal BIM*, alinhada ao princípio de proporcionalidade previsto no escopo da ISO 19650-1 e da ISO 19650-3 e ao nível de informação necessária tratado pela ISO 7817-1:2024 (ISO, 2018a; 2020a; 2024b). Em vez de modelar parafusos, armaduras ocultas ou acabamentos irrelevantes para O&M, constrói-se uma envoltória geométrica simplificada (setores, pavimentos, ambientes e posicionamento de ativos críticos) acoplada a uma estrutura semântica limpa que vincula equipamentos manuteníveis, pontos de telemetria e histórico de manutenção.

Esse pragmatismo admite inclusive reconhecer quando a geometria 3D é secundária. Em redes espalhadas geograficamente, subestações ou carteiras de edifícios antigos cujo objetivo imediato é o monitoramento energético ou a gestão de ordens de serviço, plataformas de dados operacionais integradas a inventários estruturados e georreferenciados podem entregar valor mais rapidamente do que um modelo BIM completo, reservando-se o detalhamento tridimensional apenas às áreas técnicas críticas — casas de máquinas, *shafts* e ativos estruturais instrumentados.

6.3 INTEROPERABILIDADE, SEGURANÇA CIBERNÉTICA E RESPONSABILIDADE TÉCNICA

Superada a decisão de escopo, três barreiras técnicas e institucionais condicionam a sustentabilidade de longo prazo: heterogeneidade de exportação IFC, cibersegurança e responsabilidade técnica sobre modelos e recomendações automatizadas.

No plano da interoperabilidade, adotar IFC no contrato não garante, sozinho, qualidade semântica utilizável. Exportadores de diferentes softwares autorais frequentemente

gravam a mesma propriedade sob conjuntos de propriedades (*Property Sets*) distintos, classificam equipamentos como entidades genéricas (*IfcBuildingElementProxy*) ou omitem a hierarquia espacial necessária para associar sensores a ambientes (Tang *et al.*, 2019; Patacas; Dawood; Kassem, 2020). A resposta técnica contemporânea combina três instrumentos: regras explícitas de verificação automatizada em IDS 1.0 exigidas como critério contratual de recebimento do AIM (buildingSMART International, 2024); classificação padronizada vinculada a dicionários abertos (bSDD e ABNT NBR 15965); e mapeamento federado para ontologias operacionais como BOT, Brick e RealEstateCore (Rasmussen *et al.*, 2021).

No plano da segurança cibernética e privacidade, conectar o modelo do ativo a redes IoT, sistemas BMS e atuadores físicos amplia substancialmente a superfície de ataque ciberfísica. Yao e García de Soto (2024) mostram que os riscos cibernéticos já podem ser avaliados, projeto a projeto, ainda na construção, e propõem fazê-lo com aprendizado de máquina; na operação, a ligação com sistemas físicos acrescenta riscos como adulteração de telemetria, indisponibilidade operacional, comprometimento de Ambientes Comuns de Dados e acesso não autorizado a plantas de infraestruturas sensíveis. O enquadramento normativo aplicável é a ISO 19650-5:2020, adotada no Brasil como ABNT NBR ISO 19650-5:2025, que impõe uma abordagem orientada à segurança desde a concepção da gestão da informação, segmentação de acessos e avaliação de sensibilidade do ativo (ISO, 2020b; ABNT, 2025c). No contexto brasileiro, sempre que o gêmeo digital coletar dados de presença, deslocamento, biometria ou padrões de uso vinculáveis a pessoas naturais — problema já observado no caso *The Edge* —, incide também a Lei Geral de Proteção de Dados Pessoais (LGPD), Lei nº 13.709/2018. Ela exige finalidade definida, coleta limitada ao necessário, base legal adequada e medidas de segurança; para dados biométricos, que são sensíveis, as hipóteses de tratamento são mais restritas. A anonimização só tira os dados do alcance da lei quando não pode ser revertida com meios razoáveis; quando o uso exige identificar a pessoa, como no controle de acesso, ela não cabe, e valem as demais exigências (Brasil, 2018).

No plano da responsabilidade técnica e governança humana, recomendações geradas por algoritmos de IA e simulações acopladas ao gêmeo digital não transferem responsabilidade jurídica nem dispensam verificação independente. No Brasil, a Lei nº 5.194/1966 reserva a profissionais legalmente habilitados atividades como projeto, vistorias, perícias, pareceres, fiscalização, direção e execução de obras, e só reconhece valor jurídico a trabalhos de engenharia, inclusive laudos, de autoria desses profissionais; a Resolução Confea nº 218/1973 inclui entre as atividades profissionais a operação e a manutenção de equipamentos e instalações; e a Lei nº 6.496/1977 vincula a responsabilidade técnica de

contratos de obras e serviços à Anotação de Responsabilidade Técnica (ART) (Brasil, 1966; 1977; Confea, 1973). Em sistemas ciberfísicos sujeitos a falha de sensor, deriva de calibração (*model drift*) e premissas físicas simplificadas, a governança humana no BIM e no gêmeo digital exige trilha de auditoria das decisões, limites explícitos para atuação automatizada e definição contratual de quem responde pela curadoria contínua do AIM após a entrega — princípio alinhado à visão de *Information Management Framework* proposta por Hetherington e West (2020). O Quadro 4 sintetiza barreiras, mecanismos de falha e controles verificáveis de governança.

Quadro 4 – Barreiras estruturais, mecanismos de falha e controles de governança para gêmeos digitais no BIM

Barreira Estrutural	**Mecanismo de Falha**	**Controle Técnico / Normativo**	**Responsável Principal**	**Marco de Verificação**
Qualidade de dados e *handover* (PIM → AIM)	Cadastro incompleto, ativos sem código único e redigitação manual em CMMS; automação de erros.	AIR objetivos vinculados a OIR; modelo IFC verificado por regras IDS 1.0 e planilha COBie validada em campos e referências, no CDE (ABNT NBR ISO 19650-3/4).	Contratante (gestor de ativos) e equipe de entrega	Aceite provisório e comissionamento digital antes do recebimento final.
Heterogeneidade de exportação IFC	Entidades genéricas (*Proxy*), nomes incoerentes de propriedades e perda de relação espaço-equipamento.	*Template* de mapeamento validado em múltiplos leitores; classificação ABNT NBR 15965/bSDD e grafo BOT/Brick.	Coordenador BIM e integrador semântico	Rodadas de validação automatizada a cada marco contratual.
Ativos existentes (*brownfield*) sem BIM	Custo proibitivo e atraso por exigir *scan-to-BIM* hiperdetalhado sem caso de uso definido.	Abordagem *fit-for-purpose* (*slimBIM* / *Minimal BIM*) com geometria enxuta orientada aos subsistemas críticos.	Gestor de *facilities* e consultor BIM/DT	Estudo de viabilidade e piloto em subsistema prioritário.
Deriva do modelo (*model drift*) e sensores	Sensores descalibrados, reformas não registradas e degradação gradual da acurácia de modelos de IA.	Rotinas periódicas de recalibração, monitoramento de integridade de sensores e gestão de mudanças no AIM.	Equipe de O&M e engenharia de dados/automação	Auditoria periódica (sugestão: trimestral) ou a cada reforma relevante.

Barreira Estrutural	Mecanismo de Falha	Controle Técnico / Normativo	Responsável Principal	Marco de Verificação
Cibersegurança IT/OT e privacidade	Superfície de ataque expandida, adulteração de comandos BMS/SCADA e exposição de dados de ocupantes.	Segurança desde a concepção (ABNT NBR ISO 19650-5:2025), segregação de redes IT/OT e minimização de dados pessoais, com anonimização quando cabível (LGPD).	Segurança da informação, automação e jurídico	Análise de risco cibernético pré-operação e testes periódicos.
Responsabilidade técnica e atuação	Aceitação acrítica de alertas ou comandos automáticos sem validação humana e sem dono contratual.	Progressão por portões (*stage-gated*), revisão por profissional habilitado (ART) e cláusula de curadoria do AIM.	Responsável técnico (engenheiro) e direção contratante	Revisão periódica de logs decisórios e renovação contratual de O&M.

Fonte: elaboração do autor a partir de Bolton *et al.* (2018), Hetherington e West (2020), Patacas, Dawood e Kassem (2020), Yao e García de Soto (2024), ABNT (2025a; 2025c) e Reynaud, Journaux e Roxin (2026).

7 DISCUSSÃO, LIMITES E AGENDA DE PESQUISA

7.1 CONTRA-ARGUMENTOS E TENSÕES EM ABERTO

Uma avaliação científica equilibrada precisa enfrentar quatro contra-argumentos sólidos frequentemente relativizados pelo entusiasmo tecnológico em torno dos gêmeos digitais no BIM.

O primeiro contra-argumento diz respeito ao descompasso entre custo de implantação e retorno no ciclo de vida (ROI). A implantação de um gêmeo digital concentra desembolsos iniciais elevados (*CapEx*) em modelagem ou saneamento cadastral, instrumentação IoT, integração de sistemas e infraestrutura em nuvem, enquanto os benefícios — economia energética, redução de paradas não planejadas e extensão de vida útil — diluem-se ao longo de anos de operação (*OpEx*) (Shahzad *et al.*, 2022; Opoku *et al.*, 2023). Além disso, raramente se contabiliza com transparência o custo recorrente de manter vivo o próprio gêmeo digital (*twin upkeep*): substituição de sensores, licenciamento de plataformas, atualização do AIM após pequenas reformas e retreinamento de algoritmos. Sem métricas longitudinais com linha de base auditável, a promessa de ROI permanece hipótese na maioria dos segmentos.

O segundo contra-argumento aponta a maturidade ainda incompleta dos padrões abertos para fluxos dinâmicos. Embora a publicação da ISO 16739-1:2024 (IFC 4.3), do IDS 1.0 e da ISO/IEC 30173:2023 represente avanço substancial, a convergência operacional entre

esquemas originados no projeto (IFC/COBie) e ontologias de automação e telemetria (Brick, RealEstateCore e ASHRAE 223P) ainda exige camadas de tradução customizadas, elevada especialização técnica e esforço de integração pouco acessível a construtoras e equipes de manutenção de médio porte (Tang *et al.*, 2019; Tuhaise; Tah; Abanda, 2023).

O terceiro contra-argumento refere-se ao viés de estudos patrocinados por fornecedores e casos de vitrine. Boa parte dos números divulgados em eventos comerciais origina-se de relatórios de fabricantes (como FMI e Autodesk, 2021), edifícios-ícone com orçamento excepcional ou protótipos acadêmicos testados por períodos curtos, raramente publicando projetos abandonados ou falhas de integração. Mesmo iniciativas públicas altamente estruturadas esbarram em questões institucionais: no Reino Unido, o programa nacional de gêmeos digitais precisou propor um *framework* comum de gestão da informação, com modelo de dados de base, biblioteca de dados de referência e arquitetura de integração, para viabilizar o compartilhamento de dados entre gêmeos de organizações diferentes (Hetherington; West, 2020).

O quarto contra-argumento invoca o princípio da proporcionalidade técnica. Nem toda edificação precisa de um gêmeo digital com IA e sincronização contínua. Em ativos de baixa complexidade ou orçamento restrito, um AIM enxuto bem governado, aliado a um BMS corretamente comissionado e a um CMMS utilizado com disciplina, pode entregar parcela expressiva dos ganhos operacionais com menor risco de obsolescência e dependência tecnológica.

7.2 LIMITES DESTA REVISÃO

Esta pesquisa apresenta limitações que devem ser consideradas na leitura de suas conclusões. Por tratar-se de revisão narrativa e análise técnico-normativa, a seleção bibliográfica não seguiu protocolo sistemático exaustivo nem produziu meta-análise quantitativa. A base empírica reunida concentra-se em periódicos internacionais em língua inglesa, o que pode refletir a escassez de estudos longitudinais auditados em ativos brasileiros. Parte das normas técnicas e artigos científicos foi consultada exclusivamente por meio de resumos oficiais, registros de catálogo normativo ou páginas institucionais, e os casos oriundos do *buildingSMART Awards* não passaram por verificação primária independente de custos e desempenho.

7.3 AGENDA DE PESQUISA PARA O CONTEXTO BRASILEIRO

No Brasil, o ambiente institucional e normativo evoluiu de forma expressiva nos últimos anos, criando condições formais que antes inexistiam para a transição do BIM ao gêmeo digital. A Lei nº 14.133/2021 (Nova Lei de Licitações e Contratos Administrativos) estabeleceu, em seu art. 19, § 3º, a adoção preferencial do BIM, sempre que adequada ao objeto da licitação — ou de tecnologias e processos integrados similares ou mais avançados —, nas licitações de obras e serviços de engenharia e arquitetura (Brasil, 2021). Em janeiro de 2024, o Decreto nº 11.888/2024 instituiu a nova etapa da Estratégia Nacional de Disseminação do BIM (Estratégia BIM BR), reforçando a visão de ciclo de vida do ativo, a interoperabilidade em padrões abertos e a articulação entre setor público e privado (Brasil, 2024). No plano normalizador, o país passou a contar com as seis partes da série ABNT NBR ISO 19650 (Partes 1 e 2 em 2022; Partes 3, 4 e 5 em outubro de 2025; Parte 6 em agosto de 2026), com a ABNT NBR ISO 16739-1:2026, que adota o IFC 4.3, e com as sete partes do sistema nacional de classificação ABNT NBR 15965, publicadas entre 2011 e 2022 (ABNT, 2011; 2012; 2014; 2015; 2021; 2022a; 2022b; 2022c; 2022d; 2025a; 2025b; 2025c; 2026a; 2026b).

Apesar desse avanço regulatório e normativo, ainda são escassas, entre os trabalhos examinados, as validações operacionais em escala real no país; mesmo estudos brasileiros recentes, como o de Cremonesi *et al.* (2026), têm caráter de revisão conceitual. Para preencher essa lacuna, propõe-se uma agenda de investigação aplicada estruturada em cinco frentes prioritárias:

- mapeamento semântico formal entre as sete partes da ABNT NBR 15965, o esquema IFC 4.3 (ISO 16739-1:2024) e ontologias operacionais (BOT, Brick Schema e ASHRAE 223P), viabilizando bibliotecas abertas de requisitos de ativos (AIR) em língua portuguesa;
- desenvolvimento e validação de protocolos verificáveis de transição PIM → AIM com uso de IDS 1.0 e ABNT NBR ISO 19650-3/4 aplicados a contratos públicos sob a Lei nº 14.133/2021 e a concessões de infraestrutura — especialmente obras de arte especiais (pontes e viadutos), redes de saneamento, hospitais e campi universitários;
- estudos comparativos em ativos públicos existentes (*brownfield*) confrontando modelos enxutos (*slimBIM*) e plataformas operacionais contra modelagem *scan-to-BIM* detalhada, medindo esforço de levantamento, acurácia funcional e velocidade de entrada em operação;

- medição empírica longitudinal de retorno sobre investimento (ROI) em operação e manutenção no Brasil, contemplando explicitamente o custo total de propriedade (*TCO*), o custo recorrente de manutenção do gêmeo digital (*twin upkeep*) e linhas de base auditáveis de consumo energético e indisponibilidade de sistemas;
- definição de critérios técnicos, contratuais e de auditoria para cibersegurança (ABNT NBR ISO 19650-5:2025), proteção de dados pessoais (LGPD) e delimitação de responsabilidade técnica (ART) em sistemas prediais e de infraestrutura com automação assistida por IA ou atuação em malha fechada.

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A transição do BIM estático para os gêmeos digitais representa uma inflexão real na maneira como a engenharia civil concebe a utilidade da informação ao longo do ciclo de vida: deixar de tratar o modelo como produto descartável da etapa de obra para estruturá-lo como ativo vivo de suporte à operação, à manutenção e à própria execução em canteiro. As normas publicadas nos últimos anos — com destaque para a ISO/IEC 30173:2023, a ISO 16739-1:2024 (IFC 4.3), o IDS 1.0 e a internalização da série ISO 19650 pela ABNT, concluída com a Parte 6 em 2026 — reduziram grande parte da ambiguidade conceitual que favorecia o uso indistinto do termo.

A evidência empírica examinada neste artigo autoriza conclusões equilibradas. Em subsistemas bem delimitados e com métricas claras — como a otimização de climatização estimada por Hosamo *et al.* (2023) ou o despacho de frotas de terraplenagem avaliado retrospectivamente em obra rodoviária por Qu, Zhang e Jiang (2026) —, gêmeos digitais ancorados em BIM indicam ganhos expressivos de eficiência energética, tempo de ciclo e controle operacional, ainda que estimados, e não medidos após a implantação. Em contrapartida, a revisão da literatura indica que a atuação autônoma plena permanece rara no ambiente construído, que soluções apresentadas como gêmeos digitais muitas vezes equivalem a gêmeos geométricos ou sombras digitais e que o retorno econômico em escala de portfólio carece de medição longitudinal independente.

Para engenheiros, gestores de ativos e contratantes públicos e privados, a lição central é de pragmatismo e rigor de governança. Um gêmeo digital não compensa cadastros deficientes nem dispensa validação técnica humana: construído sem propósito operacional claro, sem padrões abertos verificados e sem curadoria contínua, ele corre o risco de apenas automatizar decisões ruins a custo elevado. O caminho mais defensável consiste em começar

por casos de uso verificáveis, dimensionar a geometria à medida do problema (*fit-for-purpose* e *slimBIM* em ativos existentes), assegurar a integridade da passagem PIM → AIM e tratar a qualidade, a segurança e a auditabilidade dos dados como infraestrutura crítica do ambiente construído.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS (ASHRAE). **BSR/ASHRAE Standard 223P**: semantic data model for analytics and automation applications in buildings. Second ISC public review draft. Atlanta: ASHRAE, 2026. Proposta de norma, ainda não publicada. Disponível em: https://open223.info/. Acesso em: 28 nov. 2026.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 15965-1**: sistema de classificação da informação da construção — Parte 1: terminologia e estrutura. Rio de Janeiro: ABNT, 2011. Norma técnica.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 15965-2**: sistema de classificação da informação da construção — Parte 2: características dos objetos da construção. Rio de Janeiro: ABNT, 2012. Norma técnica.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 15965-3**: sistema de classificação da informação da construção — Parte 3: processos da construção. Rio de Janeiro: ABNT, 2014. Norma técnica.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 15965-7**: sistema de classificação da informação da construção — Parte 7: informação da construção. Rio de Janeiro: ABNT, 2015. Norma técnica.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 15965-4**: sistema de classificação da informação da construção — Parte 4: recursos da construção. Rio de Janeiro: ABNT, 2021. Norma técnica.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 15965-5**: sistema de classificação da informação da construção — Parte 5: resultados da construção. Rio de Janeiro: ABNT, 2022a. Norma técnica.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 15965-6**: sistema de classificação da informação da construção — Parte 6: unidades e espaços da construção. Rio de Janeiro: ABNT, 2022b. Norma técnica.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR ISO 19650-1**: organização e digitização da informação sobre edifícios e obras de engenharia civil, incluindo modelagem da informação da construção (BIM) — gestão da informação usando modelagem da informação da construção — Parte 1: conceitos e princípios. Rio de Janeiro: ABNT, 2022c. Norma técnica.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR ISO 19650-2**: organização e digitização da informação sobre edifícios e obras de engenharia civil, incluindo modelagem da informação da construção (BIM) — gestão da informação usando a modelagem da informação da construção — Parte 2: fase de entrega de ativos. Rio de Janeiro: ABNT, 2022d. Norma técnica.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR ISO 19650-3**: organização e digitização da informação sobre edifícios e obras de engenharia civil, incluindo modelagem da informação da construção (BIM) — gestão da informação usando modelagem da informação da construção — Parte 3: fase operacional dos ativos. Rio de Janeiro: ABNT, 2025a. Norma técnica.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR ISO 19650-4**: organização e digitização da informação sobre edifícios e obras de engenharia civil, incluindo modelagem da informação da construção (BIM) — gestão da informação usando modelagem da informação da construção — Parte 4: troca de informação. Rio de Janeiro: ABNT, 2025b. Norma técnica.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR ISO 19650-5**: organização e digitização da informação sobre edifícios e obras de engenharia civil, incluindo modelagem da informação da construção (BIM) — Parte 5: abordagem voltada à segurança para a gestão da informação. Rio de Janeiro: ABNT, 2025c. Norma técnica.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR ISO 16739-1**: Industry Foundation Classes (IFC) para o compartilhamento de dados pelas indústrias da construção e da gestão de facilities — Parte 1: esquema de dados. Rio de Janeiro: ABNT, 2026a. Norma técnica.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR ISO 19650-6**: organização e digitização da informação sobre edifícios e obras de engenharia civil, incluindo modelagem da informação da construção (BIM) — gestão da informação usando modelagem da informação da construção — Parte 6: informações de saúde e segurança. Rio de Janeiro: ABNT, 2026b. Norma técnica.

BALAJI, Bharathan; BHATTACHARYA, Arka; FIERRO, Gabriel; GAO, Jingkun; GLUCK, Joshua; HONG, Dezhi; JOHANSEN, Aslak; KOH, Jason; PLOENNIGS, Joern; AGARWAL, Yuvraj; BERGÉS, Mario; CULLER, David; GUPTA, Rajesh K.; KJÆRGAARD, Mikkel Baun; SRIVASTAVA, Mani; WHITEHOUSE, Kamin. Brick: metadata schema for portable smart building applications. **Applied Energy**, v. 226, p. 1273-1292, 2018. DOI: 10.1016/j.apenergy.2018.02.091. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.02.091. Acesso em: 28 nov. 2026. Estudo revisado por pares.

BOJE, Calin; GUERRIERO, Annie; KUBICKI, Sylvain; REZGUI, Yacine. Towards a semantic Construction Digital Twin: directions for future research. **Automation in Construction**, v. 114, art. 103179, 2020. DOI: 10.1016/j.autcon.2020.103179. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103179. Acesso em: 28 nov. 2026. Estudo revisado por pares.

BOLTON, Alexandra; BUTLER, Lorraine; DABSON, Ian; ENZER, Mark; EVANS, Matthew; FENEMORE, Tim; HARRADENCE, Fergus; KEANEY, Emily; KEMP, Anne; LUCK, Alexandra; PAWSEY, Neill; SAVILLE, Steve; SCHOOLING, Jennifer; SHARP, Miranda; SMITH, Tom; TENNISON, Jeni; WHYTE, Jennifer; WILSON, Alan; MAKRI, Chara. **The Gemini Principles**: guiding values for the national digital twin and information management framework. Cambridge: Centre for Digital Built Britain, University of Cambridge, dez. 2018. DOI: 10.17863/CAM.32260. Disponível em: https://doi.org/10.17863/CAM.32260. Acesso em: 28 nov. 2026. Relatório institucional.

BRASIL. **Lei nº 5.194, de 24 de dezembro de 1966**. Regula o exercício das profissões de Engenheiro, Arquiteto e Engenheiro-Agrônomo, e dá outras providências. Brasília, DF: Presidência da República, 1966. Disponível em: https://www2.camara.leg.br/legin/fed/lei/1960-1969/lei-5194-24-dezembro-1966-364675-normaatualizada-pl.html. Acesso em: 28 nov. 2026. Legislação federal.

BRASIL. **Lei nº 6.496, de 7 de dezembro de 1977**. Institui a "Anotação de Responsabilidade Técnica" na prestação de serviços de engenharia, de arquitetura e agronomia, e dá outras providências. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, p. 16871, 9 dez. 1977. Legislação federal.

BRASIL. **Lei nº 13.709, de 14 de agosto de 2018**. Lei Geral de Proteção de Dados Pessoais (LGPD). Brasília, DF: Presidência da República, 2018. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2018/lei/l13709.htm. Acesso em: 28 nov. 2026. Legislação federal.

BRASIL. **Lei nº 14.133, de 1º de abril de 2021**. Lei de Licitações e Contratos Administrativos. Brasília, DF: Presidência da República, 2021. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2021/lei/l14133.htm. Acesso em: 28 nov. 2026. Legislação federal.

BRASIL. **Decreto nº 11.888, de 22 de janeiro de 2024**. Dispõe sobre a Estratégia Nacional de Disseminação do *Building Information Modelling* no Brasil — Estratégia BIM BR e institui o Comitê Gestor da Estratégia do *Building Information Modelling* - BIM BR. Brasília, DF: Presidência da República, 2024. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2024/decreto/d11888.htm. Acesso em: 28 nov. 2026. Legislação federal.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION (BSI). **BS 1192-4:2014**: collaborative production of information — Part 4: fulfilling employer's information exchange requirements using COBie — code of practice. London: BSI, 2014. Norma técnica retirada pela BSI em 16 set. 2022.

BUILDINGSMART INTERNATIONAL. **Enabling an ecosystem of digital twins**: a buildingSMART International positioning paper. Kings Langley: buildingSMART International, maio 2020. Relatório institucional. Disponível em: https://www.buildingsmart.org/wp-content/uploads/2020/05/Enabling-Digital-Twins-Positioning-Paper-Final.pdf. Acesso em: 28 nov. 2026.

BUILDINGSMART INTERNATIONAL. **Information Delivery Specification (IDS) v1.0**. Padrão final aprovado em jun. 2024. Disponível em: https://github.com/buildingSMART/IDS/releases/tag/v1.0.0. Acesso em: 28 nov. 2026. Norma técnica aberta.

BUILDINGSMART INTERNATIONAL. **The buildingSMART openBIM Awards 2025 winners announced**. [S. l.]: buildingSMART International, 2025a. Página institucional. Disponível em: https://www.buildingsmart.org/the-buildingsmart-openbim-awards-2025-winners-announced/. Acesso em: 28 nov. 2026.

BUILDINGSMART INTERNATIONAL. **The Henderson — openBIM for building lifecycle**. Ficha de inscrição na categoria Operations, Finalists Gallery 2025. [S. l.]: buildingSMART International, 2025b. Caso premiado / página institucional. Disponível em: https://awards.buildingsmart.org/gallery/NpJQxbDr/nkknqRqm. Acesso em: 28 nov. 2026.

BUILDINGSMART INTERNATIONAL. **The buildingSMART openBIM Awards 2026 winners announced**. [S. l.]: buildingSMART International, 2026. Página institucional. Disponível em: https://www.buildingsmart.org/the-buildingsmart-openbim-awards-2026-winners-announced/. Acesso em: 28 nov. 2026.

CONSELHO FEDERAL DE ENGENHARIA, ARQUITETURA E AGRONOMIA (CONFEA). **Resolução nº 218, de 29 de junho de 1973**. Discrimina atividades das diferentes modalidades profissionais da Engenharia, Arquitetura e Agronomia. Brasília, DF: Confea, 1973. Disponível em: https://normativos.confea.org.br/Ementas/Visualizar?id=266. Acesso em: 28 nov. 2026. Legislação profissional.

CREMONESI, Guilherme Akyo; SUZUKI, Eliane Hayashi; AKUTSU, Maria; RAMIS, Jacqueline Elhage. Gêmeos digitais e BIM na transformação digital do ambiente construído. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 21., 2026, Goiânia. **Anais** [...]. Goiânia: ANTAC, 2026. DOI: 10.46421/entac.v21i1.8934. Disponível em: https://doi.org/10.46421/entac.v21i1.8934. Acesso em: 28 nov. 2026. Estudo revisado por pares.

DAVILA DELGADO, Juan Manuel; OYEDELE, Lukumon. Digital twins for the built environment: learning from conceptual and process models in manufacturing. **Advanced Engineering Informatics**, v. 49, art. 101332, 2021. DOI: 10.1016/j.aei.2021.101332. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.aei.2021.101332. Acesso em: 28 nov. 2026. Estudo revisado por pares.

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 (ITcon)**, v. 26, p. 58-83, 2021. DOI: 10.36680/j.itcon.2021.005. Disponível em: https://doi.org/10.36680/j.itcon.2021.005. Acesso em: 28 nov. 2026. Estudo revisado por pares.

DIGITAL TWIN CONSORTIUM. **Definition of a Digital Twin**. Needham, MA: Digital Twin Consortium, dez. 2020. Relatório institucional / consórcio setorial. Definição revista em out. 2024. Disponível em: https://www.digitaltwinconsortium.org/2020/12/digital-twin-consortium-defines-digital-twin/. Acesso em: 28 nov. 2026.

FMI CORPORATION; AUTODESK. **Harnessing the data advantage in construction**. Raleigh, NC: FMI; San Rafael, CA: Autodesk, set. 2021. Relatório setorial (patrocinado por fornecedor). Disponível em: https://a.storyblok.com/f/64835/x/137c281eda/harnessing_the_data_advantage_in_construction.pdf. Acesso em: 28 nov. 2026.

GALLAHER, Michael P.; O'CONNOR, Alan C.; DETTBARN JR., John L.; GILDAY, Linda T. **Cost analysis of inadequate interoperability in the U.S. capital facilities industry**. Gaithersburg, MD: National Institute of Standards and Technology (NIST), ago. 2004. (NIST GCR 04-867). DOI: 10.6028/NIST.GCR.04-867. Disponível em: https://doi.org/10.6028/NIST.GCR.04-867. Acesso em: 28 nov. 2026. Relatório institucional.

GRIEVES, Michael W.; VICKERS, John H. Digital twin: mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems. In: KAHLEN, Franz-Josef; FLUMERFELT, Shannon; ALVES, Anabela (ed.). **Transdisciplinary perspectives on complex systems**: new findings and approaches. Cham: Springer, 2017. p. 85-113. DOI: 10.1007/978-3-319-38756-7_4. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-3-319-38756-7_4. Acesso em: 28 nov. 2026. Capítulo revisado por pares.

HAMMAR, Karl; WALLIN, Erik Oskar; KARLBERG, Per; HÄLLEBERG, David. The RealEstateCore ontology. In: INTERNATIONAL SEMANTIC WEB CONFERENCE (ISWC), 18., 2019, Auckland. **Proceedings** [...]. Cham: Springer, 2019. p. 130-145. DOI: 10.1007/978-3-030-30796-7_9. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-3-030-30796-7_9. Acesso em: 28 nov. 2026. Estudo revisado por pares.

HETHERINGTON, James; WEST, Matthew. **The pathway towards an information management framework**: a 'commons' for digital built Britain. Cambridge: Centre for Digital Built Britain, University of Cambridge, maio 2020. DOI: 10.17863/CAM.52659. Disponível em: https://doi.org/10.17863/CAM.52659. Acesso em: 28 nov. 2026. Relatório institucional.

HOSAMO, Haidar; HOSAMO, Mohsen Hosamo; NIELSEN, Henrik Kofoed; SVENNEVIG, Paul Ragnar; SVIDT, Kjeld. Digital twin of HVAC system (HVACDT) for multiobjective optimization of energy consumption and thermal comfort based on BIM framework with ANN-MOGA. **Advances in Building Energy Research**, v. 17, n. 2, p. 125-171, 2023. DOI: 10.1080/17512549.2022.2136240. Disponível em: https://doi.org/10.1080/17512549.2022.2136240. Acesso em: 28 nov. 2026. Estudo revisado por pares.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 19650-1:2018**: organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling (BIM) — information management using building information modelling — Part 1: concepts and principles. Geneva: ISO, 2018a. Norma técnica. Disponível em: https://www.iso.org/standard/68078.html. Acesso em: 28 nov. 2026.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 19650-2:2018**: organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling (BIM) — information management using building information modelling — Part 2: delivery phase of the assets. Geneva: ISO, 2018b. Norma técnica.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 19650-3:2020**: organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling (BIM) — information management using building information modelling — Part 3: operational phase of the assets. Geneva: ISO, jul. 2020a. Norma técnica.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 19650-5:2020**: organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling (BIM) — information management using building information modelling — Part 5: security-minded approach to information management. Geneva: ISO, jun. 2020b. Norma técnica.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 23247-1:2021**: automation systems and integration — digital twin framework for manufacturing — Part 1: overview and general principles. Geneva: ISO, 2021. Norma técnica.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 19650-4:2022**: organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling (BIM) — information management using building information modelling — Part 4: information exchange. Geneva: ISO, 2022. Norma técnica.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 16739-1:2024**: Industry Foundation Classes (IFC) for data sharing in the construction and facility management industries — Part 1: data schema. Geneva: ISO, mar. 2024a. Norma técnica.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 7817-1:2024**: building information modelling — level of information need — Part 1: concepts and principles. Geneva: ISO, jun. 2024b. Norma técnica. Disponível em: https://www.iso.org/standard/82914.html. Acesso em: 28 nov. 2026.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION; INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION (ISO/IEC). **ISO/IEC 30173:2023**: digital twin — concepts and terminology. Geneva: ISO/IEC, nov. 2023a. Norma técnica. Disponível em: https://www.iso.org/standard/81442.html. Acesso em: 28 nov. 2026.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION; INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION (ISO/IEC). **ISO/IEC TR 30172:2023**: Internet of Things (IoT) — digital twin — use cases. Geneva: ISO/IEC, 2023b. Relatório técnico normativo.

JALIA, Aftab; BAKKER, Ron; RAMAGE, Michael. **The Edge, Amsterdam**: showcasing an exemplary IoT building. Cambridge: Centre for Digital Built Britain, University of Cambridge, 2018. Relatório institucional. Disponível em: https://www.cdbb.cam.ac.uk/news/2018CaseTheEdge. Acesso em: 28 nov. 2026.

JIANG, Yishuo; LI, Ming; LI, Mingxing; LIU, Xinlai; ZHONG, Ray Y.; PAN, Wei; HUANG, George Q. Digital twin-enabled real-time synchronization for planning, scheduling, and execution in precast on-site assembly. **Automation in Construction**, v. 141, art. 104397, 2022. DOI: 10.1016/j.autcon.2022.104397. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104397. Acesso em: 28 nov. 2026. Estudo revisado por pares.

KRITZINGER, Werner; KARNER, Matthias; TRAAR, Georg; HENJES, Jan; SIHN, Wilfried. Digital twin in manufacturing: a categorical literature review and classification. **IFAC-PapersOnLine**, v. 51, n. 11, p. 1016-1022, 2018. DOI: 10.1016/j.ifacol.2018.08.474. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.474. Acesso em: 28 nov. 2026. Estudo revisado por pares.

LIMONGELLI, Maria Pina; GENTILE, Carmelo; BIONDINI, Fabio; DI PRISCO, Marco; BALLIO, Francesco; ZONNO, Giacomo; BORLENGHI, Paolo; BIANCHI, Silvia; CAPACCI, Luca; ANGHILERI, Mattia; ZANI, Giulio; SCALBI, Agnese; FLORES FERREIRA, Katherina; D'ANGELO, Manuel; CAZZULANI, Gabriele; BENEDETTI, Lorenzo; SOMASCHINI, Claudio; BERNARDINI, Lorenzo; BELLOLI, Marco; RESTA, Ferruccio; VIGO, Paola; COLOMBO, Aldo. Bridge structural monitoring: the Lombardia regional guidelines. **Structure and Infrastructure Engineering**, v. 20, n. 4, p. 461-484, 2024. DOI: 10.1080/15732479.2022.2107023. Disponível em: https://doi.org/10.1080/15732479.2022.2107023. Acesso em: 28 nov. 2026. Estudo revisado por pares.

LU, Qiuchen; PARLIKAD, Ajith Kumar; WOODALL, Philip; RANASINGHE, Gishan Don; XIE, Xiang; LIANG, Zhenglin; KONSTANTINOU, Eirini; HEATON, James; SCHOOLING, Jennifer. Developing a digital twin at building and city levels: case study of West Cambridge Campus. **Journal of Management in Engineering**, v. 36, n. 3, art. 05020004, 2020. DOI: 10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000763. Disponível em: https://doi.org/10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000763. Acesso em: 28 nov. 2026. Estudo revisado por pares.

MATARNEH, Sandra T.; DANSO-AMOAKO, Mark; AL-BIZRI, Salam; GATERELL, Mark; MATARNEH, Rana. Building information modeling for facilities management: a literature review and future research directions. **Journal of Building Engineering**, v. 24, art. 100755, 2019. DOI: 10.1016/j.jobe.2019.100755. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.100755. Acesso em: 28 nov. 2026. Estudo revisado por pares.

OPOKU, De-Graft Joe; PERERA, Srinath; OSEI-KYEI, Robert; RASHIDI, Maria; BAMDAD, Keivan; FAMAKINWA, Tosin. Barriers to the adoption of digital twin in the construction industry: a literature review. **Informatics**, v. 10, n. 1, art. 14, 2023. DOI: 10.3390/informatics10010014. Disponível em: https://doi.org/10.3390/informatics10010014. Acesso em: 28 nov. 2026. Estudo revisado por pares.

PAN, Yue; ZHANG, Limao. A BIM-data mining integrated digital twin framework for advanced project management. **Automation in Construction**, v. 124, art. 103564, 2021. DOI: 10.1016/j.autcon.2021.103564. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103564. Acesso em: 28 nov. 2026. Estudo revisado por pares.

PATACAS, João; DAWOOD, Nashwan; KASSEM, Mohamad. BIM for facilities management: a framework and a common data environment using open standards. **Automation in Construction**, v. 120, art. 103366, 2020. DOI: 10.1016/j.autcon.2020.103366. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103366. Acesso em: 28 nov. 2026. Estudo revisado por pares.

PISHDAD-BOZORGI, Pardis; GAO, Xinghua; EASTMAN, Charles; SELF, Alonzo Patrick. Planning and developing facility management-enabled building information model (FM-enabled BIM). **Automation in Construction**, v. 87, p. 22-38, 2018. DOI: 10.1016/j.autcon.2017.12.004. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.12.004. Acesso em: 28 nov. 2026. Estudo revisado por pares.

PREGNOLATO, Maria; GUNNER, Sam; VOYAGAKI, Elia; DE RISI, Raffaele; CARHART, Neil J.; GAVRIEL, G.; TULLY, Patrick; TRYFONAS, Theo; MACDONALD, John; TAYLOR, Colin. Towards Civil Engineering 4.0: concept, workflow and application of digital twins for existing infrastructure. **Automation in Construction**, v. 141, art. 104421, 2022. DOI: 10.1016/j.autcon.2022.104421. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104421. Acesso em: 28 nov. 2026. Estudo revisado por pares.

QU, Yilin; ZHANG, Dongfang; JIANG, Liye. A BIM-integrated digital twin framework with AI and IoT for real-time earthmoving fleet management in infrastructure construction. **Buildings**, v. 16, n. 14, art. 2724, 2026. DOI: 10.3390/buildings16142724. Disponível em: https://doi.org/10.3390/buildings16142724. Acesso em: 28 nov. 2026. Estudo revisado por pares.

RASMUSSEN, Mads Holten; LEFRANÇOIS, Maxime; SCHNEIDER, Georg Ferdinand; PAUWELS, Pieter. BOT: the building topology ontology of the W3C linked building data group. **Semantic Web**, v. 12, n. 1, p. 143-161, 2021. DOI: 10.3233/SW-200385. Disponível em: https://doi.org/10.3233/SW-200385. Acesso em: 28 nov. 2026. Estudo revisado por pares.

REYNAUD, Stéphane; JOURNAUX, Ludovic; ROXIN, Ana. Digital twins for building operation and maintenance: a scoping review (2019–2025). **Automation in Construction**, v. 192, art. 107261, 2026. DOI: 10.1016/j.autcon.2026.107261. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.autcon.2026.107261. Acesso em: 28 nov. 2026. Estudo revisado por pares.

SACKS, Rafael; BRILAKIS, Ioannis K.; PIKAS, Ergo; XIE, Haiyan Sally; GIROLAMI, Mark A. Construction with digital twin information systems. **Data-Centric Engineering**, v. 1, art. e14, 2020. DOI: 10.1017/dce.2020.16. Disponível em: https://doi.org/10.1017/dce.2020.16. Acesso em: 28 nov. 2026. Estudo revisado por pares.

SHAHZAD, Muhammad; SHAFIQ, Muhammad Tariq; DOUGLAS, Dean; KASSEM, Mohamad. Digital twins in built environments: an investigation of the characteristics, applications, and challenges. **Buildings**, v. 12, n. 2, art. 120, 2022. DOI: 10.3390/buildings12020120. Disponível em: https://doi.org/10.3390/buildings12020120. Acesso em: 28 nov. 2026. Estudo revisado por pares.

TANG, Shu; SHELDEN, Dennis R.; EASTMAN, Charles M.; PISHDAD-BOZORGI, Pardis; GAO, Xinghua. A review of building information modeling (BIM) and the internet of things (IoT) devices integration: present status and future trends. **Automation in Construction**, v. 101, p. 127-139, 2019. DOI: 10.1016/j.autcon.2019.01.020. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.01.020. Acesso em: 28 nov. 2026. Estudo revisado por pares.

TUHAISE, Valerian Vanessa; TAH, Joseph Handibry Mbatu; ABANDA, Fonbeyin Henry. Technologies for digital twin applications in construction. **Automation in Construction**, v. 152, art. 104931, 2023. DOI: 10.1016/j.autcon.2023.104931. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.104931. Acesso em: 28 nov. 2026. Estudo revisado por pares.

VANDERHORN, Eric; MAHADEVAN, Sankaran. Digital twin: generalization, characterization and implementation. **Decision Support Systems**, v. 145, art. 113524, 2021. DOI: 10.1016/j.dss.2021.113524. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.dss.2021.113524. Acesso em: 28 nov. 2026. Estudo revisado por pares.

WATER SUPPLIES DEPARTMENT (WSD). Government of the Hong Kong Special Administrative Region. **Water Supplies Department wins Grand Prize at the buildingSMART International openBIM Awards 2026**. Hong Kong: WSD, 8 out. 2026. Página institucional. Disponível em: https://www.wsd.gov.hk/en/whats-new/index_id_433.html. Acesso em: 28 nov. 2026.

YAO, Dongchi; GARCÍA DE SOTO, Borja. Assessing cyber risks in construction projects: a machine learning-centric approach. **Developments in the Built Environment**, v. 20, art. 100570, 2024. DOI: 10.1016/j.dibe.2024.100570. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.dibe.2024.100570. Acesso em: 28 nov. 2026. Estudo revisado por pares.

DECLARAÇÃO DE USO DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

Durante a elaboração deste artigo, foram utilizadas as ferramentas de Inteligência Artificial Generativa Gemini (modelo Gemini 4 Neon Extra High, na plataforma Antigravity), desenvolvida pelo Google, Codex (modelo GPT 6.2 astra ultra), desenvolvida pela OpenAI, e Claude (modelo Fable 5.2), desenvolvida pela Anthropic, como recurso de apoio ao processo de elaboração do trabalho: o Gemini, na fase de redação, para a localização de fontes primárias e normativas, a sistematização preliminar de evidências, a geração de diagramas conceituais, a redação inicial, a revisão linguística e a adequação da formatação acadêmica; o Codex e o Claude, na fase de revisão, para a conferência das referências e das afirmações nas fontes originais e para a proposta de correções; e o Claude, ainda na fase de revisão, para o redesenho da Figura 2.

As ferramentas foram utilizadas de maneira complementar e supervisionada, não substituindo a análise crítica, as decisões metodológicas, a interpretação dos resultados nem a autoria do pesquisador. Todo conteúdo sugerido ou produzido com o auxílio das ferramentas foi analisado, revisado, adaptado e validado pelo autor antes de sua incorporação ao trabalho.

As referências bibliográficas, os dados, as análises, as interpretações, as decisões metodológicas e as conclusões apresentadas neste artigo são de responsabilidade integral do autor. As ferramentas de Inteligência Artificial não foram utilizadas para fabricar dados, resultados, citações ou referências bibliográficas.

O uso das ferramentas ocorreu de forma transparente e responsável, em conformidade com os princípios de integridade científica, responsabilidade autoral e transparência previstos na Portaria CNPq nº 2.664, de 6 de março de 2026, e com a Portaria CNPq nº 3.004, de 16 de novembro de 2026.