

Aplicação de gêmeos digitais na indústria da construção – Estado da arte

<https://doi.org/10.21814/uminho.ed.32.44>

**Anderson Garcia¹, Bianca Gabalde², Gabriel Borges³,
Murilo Bruza⁴, Eduardo Santos⁵, Fabiano Correa⁶**

¹ Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 0000-0003-3678-863X

² Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 0000-0002-4474-3194

³ Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 0000-0002-2685-2848

⁴ Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 0000-0001-9956-636X

⁵ Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 0000-0002-0125-7073

⁶ Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 0000-0001-9742-3971

Resumo

Gêmeo Digital ou *Digital Twin*, representação virtual de ativos ou processos do mundo real, sincronizados a uma frequência (de aquisição de dados) e fidelidade especificada, está no cerne da Indústria 4.0 e, desde que o termo foi cunhado em 2003, o gêmeo digital desenvolveu-se em inúmeras áreas tais como: manufatura, aviação, aeroespacial e saúde. Na indústria da construção civil, o gêmeo digital tem o potencial de romper o tradicional modelo de gestão da informação baseado em silos para um modelo integrado centrado em dados. Este trabalho desenvolve uma revisão sistemática da literatura científica com o objetivo de estabelecer o estado da arte do gêmeo digital na indústria da construção, identificando os conceitos, aplicações, tecnologias e resultados apresentados nas etapas do ciclo de vida de ativos da construção como edificações e infraestrutura, discorrendo sobre os desafios atuais no desenvolvimento do gêmeo digital na construção e apresentando algumas direções possíveis para futuros trabalhos neste tema.

Palavras Chave: *Digital Twin*, Gêmeo Digital, Indústria da Construção, Construção Civil, Estado da Arte

1. Introdução

A integração de modelos virtuais, com IA (Inteligência Artificial), de objetos físicos com análises de *Big Data* para processamento de dados *IoT* (*Internet of Things* ou Internet das Coisas, numa tradução para o Português), motivou um dos mais importantes avanços recentes no campo da tecnologia, o *digital twin* (*DT*) ou gémeo digital (*GD*) [1].

O conceito de gémeo digital foi implementado pela primeira vez pela Administração Nacional da Aeronáutica e Espaço (*NASA*), no programa Apollo 13, com o objetivo de permitir a comunicação e o controle durante a missão espacial, onde foi criado um veículo idêntico ao que realizou a missão no espaço para ser monitorado na Terra. Porém, quem primeiro cunhou o termo foi o professor da Universidade de Michigan, nos EUA, Michael Grieves, em 2003 [2].

Na primeira definição de Grieves, o gémeo digital foi definido como componentes físicos, produtos ou sistemas em um espaço físico, sua correspondente representação virtual em um espaço virtual e o fluxo de informação entre estes dois espaços [3].

O *Digital Twin Consortium*, iniciativa global para a aceleração do desenvolvimento, adoção, interoperabilidade e segurança de gémeos digitais, define gémeo digital da seguinte maneira: um gémeo digital é uma representação virtual de ativos ou processos do mundo real, sincronizados a uma frequência (de aquisição de dados) e fidelidade (dos dados) especificadas. O gémeo digital usa dados históricos e em tempo real para representar respectivamente o passado e o presente e prever e simular o futuro. O gémeo digital é potencializado pela integração, centrado em dados e implementado em sistemas de *IT/OT* ou Tecnologia de Informação e Tecnologia Operacional, em português [4].

Na Indústria da Construção, a utilização de gémeos digitais tem o potencial de romper o tradicional modelo de gestão da informação em silos para um modelo integrado centrado em dados. Na construção civil, os gémeos digitais são um novo fenómeno [5]. O termo ganhou maior popularidade na corrente revolução industrial (digitalização) [6]. O gémeo digital vem sendo cada vez mais reconhecido por mais e mais pesquisadores, e a empresa de pesquisas Gartner, em 2018, previu que os gémeos digitais seriam uma das 10 (dez) maiores tendências tecnológicas nos próximos dez anos [6].

Embora com um grande potencial mercadológico – globalmente de US\$ 3 bilhões em 2018, com perspectiva de crescimento de 28% ao ano entre 2019-2025, atingindo mais de US\$ 20 bilhões em 2025 [7] - de fato, a sua implementação pelas empresas vem crescendo lentamente. Pesquisa realizada pela Gartner em 2019, indicou que apenas 13% das organizações que implementaram projetos de *IoT*, usavam também gémeos digitais, enquanto 62% estavam ainda no processo de estabelecimento do uso do gémeo digital ou no plano para fazê-lo [8].

A criação de um gêmeo digital pressupõe a utilização de um modelo digital contendo informações do ativo real construído, associado com as informações (dados) relativas ao ciclo de vida que se pretende monitorar. Uma das barreiras para sua implantação está na complexidade do tratamento dos dados que, uma vez coletados, devem ser harmonizados, associados adequadamente aos elementos do modelo, armazenados e processados de forma a criar uma fidedigna e precisa informação de status e na definição de modelos matemáticos de predição de comportamento e ou performance do ativo baseados nos dados coletados.

Neste sentido, o objetivo desta pesquisa é responder às seguintes questões:

- Qual o estado da arte em termos de conceito, tecnologias, grau de maturidade e resultados práticos da aplicação do gêmeo digital na indústria da construção?
- Em qual etapa do ciclo de vida de um ativo o gêmeo digital pode ser aplicado?

2. Metodologia da pesquisa

A metodologia utilizada para a execução desta pesquisa foi uma revisão do estado da arte de Gêmeos Digitais aplicados à Construção Civil, apoiada em um protocolo de revisão sistemática da literatura, proposto por Dresch et al. [9], com horizonte de pesquisa entre 2015-2021, exclusão dos trabalhos de fora do setor da construção, termos de busca: (((*"All Metadata": "Digital Twin"*) OR (*"All Metadata": "Cyber-physical Systems"*)) AND (*"All Metadata": "Construction Industry"*) OR (*"All Metadata": "Smart Building"*) OR (*"All Metadata": "Smart Cities"*))) na base de dados *IEEE Xplore*; (*ALL="Digital Twin" OR "Cyber-physical Systems"*) AND (*ALL="Construction Industry" OR "Smart Building" OR "Smart Cities"*) na base *Web of Science* e (*"Digital Twin" OR "Cyber-physical Systems"*) AND (*"Construction Industry"*) AND (*"Smart Building" OR "Smart Cities"*) na *Scopus*. Em todas as bases selecionou-se apenas artigos em *Journals*.

3. Conceito de Gêmeos Digitais

3.1. Conceito

Dentro do período pesquisado, no intervalo de 2015 a 2018 pode-se constatar que o conceito de gêmeo digital é pouco mencionado pelos autores dos estudos analisados, tendo-se predominância de referências aos *Cyber-Physical Systems (CPS)* ou Sistemas Ciber-físicos [10] [11] [12].

Barricelli et al. [1] definem o gêmeo digital como uma máquina física ou virtual que espelha uma entidade física, um protótipo vivo, inteligente e progressivo. Pode ser aplicado de diferentes formas e ciclos de vida, é capaz de otimizar, monitorar e controlar os processos, investigar novas regras, obter diferentes simulações e testagens, prever acontecimentos, falhas e defeitos futuros antes deles ocorrerem e ter melhor controle para operação e manutenção.

Akanmu et al. [3] levantam que o gémeo digital se concentra na interação de dados de um-para-um entre uma entidade física e uma entidade virtual simultaneamente. Apoiar-se obrigatoriamente na modelagem do objeto e faz a utilização dos dados e informações geradas pelos modelos para prever e controlar o comportamento do meio físico, sendo a representação real do objeto construído, que pode ser aplicado em diversas áreas como rastreamento e controle, gestão de instalações, prevenção e manutenção e avaliação do desempenho da construção.

Sacks et al. [5] trazem o conceito voltado para o setor da construção, notadamente na fase de projeto e construção. Apontam a *DTC (Digital Twin Construction)* como um novo modo de gestão da produção em construção que aproveita as informações e volume de dados disponíveis implementando diversas tecnologias inteligentes a fim de fornecer informações precisas sobre o estado atual do objeto que contribuem com a execução, planejamento e monitoramento do objeto físico. Dizem ainda que o gémeo digital da construção possibilita melhor aplicabilidade de diversos processos que resultam em um modo de gestão da construção centralizado em informações de dados.

Tao et al. [13] que é o autor mais citado nos artigos estudados, diz que o gémeo digital é resultado da aplicação de 5 dimensões: a parte virtual, a parte física, a conexão entre elas, os dados e os serviços. Os autores consideram que essas dimensões possibilitam a integração dos dados físicos com os virtuais, resultando em informações de dados que possibilitam análises inteligentes e avançadas que contribuem com a qualidade do produto durante todo seu ciclo de vida.

Pode-se perceber que ainda existe uma “zona cinzenta” sobre a definição do conceito, sendo que, alguns autores referem ao termo gémeo digital como sendo *BIM* ou *CPS*. Na opinião dos autores, existe um desalinhamento e interpretação equivocada, sendo necessário estudos mais aprofundados relacionados aos conceitos dessas tecnologias.

3.2. *BIM* × *GD* × *CPS*

Para Akanmu et al. [3] *BIM* é uma plataforma de modelagem que contribui com o armazenamento de informações da construção e é o ponto inicial para o *GD* e o *CPS*. O *GD* é a representação de uma réplica da construção, é pré-requisito para a difusão do *CPS*, possui interação um para um. O *CPS* é a integração do sistema físico com a réplica digital através de meios computacionais, possui interação de um para muitos, seu recurso é caracterizado pela comunicação computacional e atuação de sensores. Segundo Jiang et al. [14], *BIM* é considerado como um modelo virtual, ou seja, representa virtualmente uma estrutura física de um objeto construído, pode representar algo que não existe ou não foi construído; já o *GD* necessita do modelo virtual e do objeto físico, faz transferência de dados entre o objeto físico e o modelo virtual, reflete o estado existente do objeto físico em tempo real. No caso do *CPS*, não é necessário o modelo virtual, faz transferência de dados do objeto físico para o sistema computacional em tempo real e têm a atuação de computadores e redes integradas

que monitoram e controlam o objeto físico. Para Sacks et al. [5], o *BIM* engloba os fluxos de trabalho e a tecnologia para modelagem de construção digital orientada a objetos, produtos e processos. O GD utiliza dados e monitoramento inteligente que reconhece o fluxo de informações em tempo real do projeto e permite um modelo de circuito fechado de monitoramento e controle de informações da construção. O *CPS* torna possível o monitoramento digital da cadeia produtiva da obra e análises de dados.

4. Tecnologias para aplicação de gêmeos digitais

4.1. Contexto

Para Sacks et al. [5], os gêmeos digitais aplicados à construção trazem a possibilidade da utilização de uma grande variedade de dados, através de tecnologias de monitoramento das atividades em campo, gerando informações e apoiando uma análise e tomada de decisão mais proativa, além de otimizar ações futuras relacionadas ao projeto, planejamento e execução.

Diferentes tipos de tecnologias de *hardware* e *software*, recentemente adaptadas e disponíveis para aplicação no setor da construção, podem ser utilizadas para a coleta de dados e geração de informações de diferentes características dos ambientes de produção como, por exemplo, relacionadas aos trabalhadores, insumos, materiais e equipamentos.

4.2. Estrutura de coleta, transmissão e análise de dados

Muitas vezes, colocada como uma tecnologia única, a *IoT* pode estar relacionada a diferentes tipos de dispositivos (*hardware*) como, por exemplo: sensores, atuadores, etiquetas de *RFID* (do inglês, "*Radio-Frequency IDentification*"), câmeras de vídeo e laser scanners [15]. E está relacionada também aos sistemas de informações, sejam eles softwares especificamente desenvolvidos para analisar os dados coletados ou, ainda, centralizadores de dados que se utilizam de modelos matemáticos mais simples, como ferramentas de análise estatísticas e/ou correlações, ou mais sofisticados, como algoritmos mais complexos de análise utilizando-se os conceitos de IA, que podem conter diferentes diretrizes de desenvolvimento, ou níveis de complexidade como, por exemplo, redes neurais artificiais, para desenvolvimento de métodos baseados em aprendizado de máquina (*ML*, do inglês, "*Machine Learning*"). Para You et al. [15], todas as diferentes camadas de tecnologia de *hardware* (dispositivos) e *software* (sistemas) darão subsídio para uma avaliação mais eficiente da performance, otimização de recursos, monitoramento de riscos, redução de emissões e consumo energético e entregas das características conforme projetadas. Para uma melhor compreensão sobre a estrutura de coleta, transmissão e análise dos dados, a Figura 1 traz uma representação das diferentes camadas de tecnologias, tanto de *hardware* como *software*, com o objetivo de proporcionar uma melhor visualização das interações entre os diferentes elementos que compõem o conceito de *IoT*, assim

como os sistemas e elementos de centralização e análise de dados, chegando-se ao conceito de Gémeos Digitais, ou seja, saídas de informações que possibilitem ações e respostas, através da geração de uma representação digital (ou modelo virtual) dos elementos físicos, proporcionando uma tomada de decisão baseada em dados e informações.



Figura 1
Estrutura de coleta, transmissão e análise de dados.

4.2.1. Estrutura de coleta de dados

A principal diferença entre a gestão realizada com o apoio dos Gémeos Digitais e as práticas atuais vem da utilização de dados para tomada de decisão, através do correcta definição dos dados que agregam maior valor aos processos, geração de informações e conhecimento, apoiado por ferramentas como a IA para interpretação, análise, simulação e predição [5]. Algumas etapas são necessárias para que sejam alcançados os resultados esperados, ou seja, o processo de coleta dos dados, a validação dos dados coletados e a geração de informações relevantes e confiáveis para a tomada de decisão. Através da maior disseminação da *IoT*, tornando a aplicação das tecnologias mais viável e acessível, a forma de coleta de dados e o seu compartilhamento tem mudado. Como colocado por Barricelli et al. [1], a grande difusão de tecnologias como sensores e atuadores conectados à Internet, tem proporcionado o contínuo fornecimento e troca de dados. Além disso, as tecnologias e/ou dispositivos citados na primeira coluna da Figura 1, têm sido largamente disseminados e aplicados à construção civil nos últimos anos.

4.2.2. Conectividade e transmissão dos dados

A conexão remota entre dispositivos, fontes geradoras e receptoras de dados, assim como Gémeos Digitais, podem ser realizadas através de uma grande variedade de protocolos de comunicação. E, com o advento da *IoT*, diferentes tipos de protocolos podem ser seleccionados [16]. No entanto, para cada aplicação podem ser detectadas

vantagens e desvantagens, conforme as aplicações na construção [16], podendo haver diferentes casos de uso, conforme citado anteriormente, dependendo da localização, acessos a redes de conexão, sendo necessária uma análise tanto da tecnologia quanto das possibilidades de conectividade da região, como apresentado na segunda coluna da Figura 1.

4.2.3. Análise dos Dados

O uso de ferramentas de análise de dados e IA tem ganho atenção no Setor da Construção. A análise de dados em tempo real, tanto dentro quanto fora dos ambientes de produção, tem a capacidade de melhorar a análise de riscos de segurança e atendimento a requisitos, proporcionando novas capacidades de predição e apoiando um sistema mais automatizado de aprendizado [16]. Da mesma forma, como no caso da definição das tecnologias de coleta e protocolo de transmissão, as técnicas ou ferramentas de análise estarão relacionadas aos objetivos específicos de interpretação desses dados para geração das informações que agregam maior valor aos processos, assim como a definição das aplicações onde serão consumidas essas informações. Levando isso em consideração, a terceira coluna da Figura 1 apresenta exemplos de tecnologias de entradas e/ou centralização dos dados coletados e de sistemas legados, ferramentas de análise desses dados e, por fim, as aplicações específicas para consumo das informações geradas pelos usuários.

5. Aplicação de Gémeos Digitais no ciclo de vida da construção

O Gémeo Digital pode ser aplicado em todas as fases da construção, para projeto, construção, operação e manutenção e, em todas as fases, ainda está em um estágio inicial ou conceitual, sendo que na fase de operação e manutenção já tem um maior número de aplicações e usos [3].

A Figura 2 apresenta os usos identificados para cada etapa do ciclo de vida da construção e que serão detalhados nas próximas subseções.

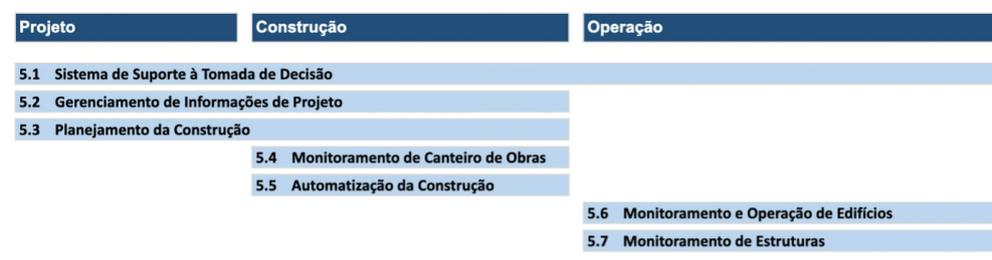


Figura 2

Aplicação de gémeo digital no ciclo de vida da construção.

5.1. Sistema de Suporte à Tomada de Decisão

A coleta de dados em tempo real, análise e representação das informações em um GD possibilita a construção de um sistema de suporte à tomada de decisão, que pode incluir diversas formas diferentes de visualização intuitiva de dados em tempo real, contribuindo para o processo de tomada de decisão na construção e consequente diminuição de erros [17]. Como é apresentado por Peng et al. [18], a utilização deste sistema mostrou um aumento de 10% em satisfação na gestão em comparação com dados históricos, diminuição de 1% ao ano no consumo geral de energia e mais de 10% de diminuição de chamados por falhas e reparos, por ter feito diagnósticos antecipados.

5.2. Gerenciamento de Informações de Projeto

Sacks et al. [5] desenvolveram uma metodologia para gerenciamento das informações nas etapas de projeto e construção com *Digital Twin Construction* (DTC) ou associado a diversas aplicações do gêmeo digital na construção, como o planejamento e monitoramento do canteiro de obras. Dentre elas, destaca-se o desenvolvimento do projeto e de um sistema que não só reproduz o estado *as-built* do empreendimento, mas também envolve as informações do processo construtivo, incluindo informações de tomada de decisão.

5.3. Planejamento da Construção

Pan e Zhang [6] apresentam um estudo de caso em que é aplicado um framework para construção de um modelo 4D através da utilização de *BIM*, *IoT* e nuvem de pontos. Dessa forma, os gargalos que causam atrasos podem ser facilmente detectados no processo atual, através de previsões de cargas de trabalho futura, antecipação de riscos e realizar realização de avaliações de desempenho com o propósito de otimização. Consequentemente, as sugestões podem orientar o processo no local de trabalho. Assim, trabalhadores podem formular uma programação de construção mais racional com fluxos e cargas de trabalho com o objetivo de melhorar rapidamente a eficiência operacional e reforçar a cooperação no processo de construção física. Wang e Wu [19] apresentam um sistema baseado em *Digital Twins* para utilização de dados coletados em tempo real para programação de atividades e replanejamento de forma automatizada, diminuindo-se o intervalo de tempo entre o planejamento e a realização das tarefas.

5.4. Monitoramento de Canteiro de Obras

Através da modelagem *BIM* em tempo real com utilização de sensores e *IoT*, Lee e Lee [20] realizaram um estudo de caso com um framework de uma plataforma virtual de projeto de construção modular que possibilita simulação logística utilizando informações geográficas e SIG. Os autores também relataram que o GD eliminou o tempo ocioso e contribuiu com a entrega *'just-in-time'*, antecipando riscos e sugerindo novos

meios ou rotas alternativas em tempo real. O GD associado a sensores inseridos em equipamentos da construção também pode ajudar na prevenção de acidentes e diminuição de riscos de colisões, utilizando-se de modelagem *BIM* 4D e um sistema que calcula as probabilidades de colisão em tempo real e informa o operador do equipamento [21].

5.5. Automatização da Construção

Akanmu et al. [3] entendem o GD como um passo importante para a construção de um *Cyber-Physical System* que poderia ser utilizado para automatização de tarefas em lugares pouco seguros ou para aumento de produtividade. O sistema proposto envolve utilização de sistemas de captura e sensores para modelagem do ambiente construído e reprodução dos movimentos de trabalhadores por máquinas.

5.6. Monitoramento e Operação de Edifícios

O gémeo digital pode colaborar durante toda a vida útil do edifício. Por meio de simulações e acompanhamento em tempo real, é possível prever anomalias em equipamentos, realizar reparos e aprimorar a inteligência e vida útil do edifício [22] [23]. Khajavi et al. [24] elaboraram um método para construção de um gémeo digital da fachada de um edifício, resultando em redução do custo de manutenção, aumento do conforto dos ocupantes e redução dos custos operacionais da construção. A utilização do gémeo digital também é possível em edifícios existentes que possuem pouca ou nenhuma informação *as-built*, conforme apresentado por Moretti et al. [25] que desenvolveram uma metodologia *openBIM* para auxiliar a gestão de ativos nessas condições de forma mais efetiva, associando informações estáticas dos ativos com dados capturados em tempo real.

5.7. Monitoramento de Estruturas

Shim et al. [26] apresentam um sistema de monitoramento de pontes de concreto através de modelagem paramétrica e acompanhamento por sensores com scanners em *UAV* para identificação e danos superficiais, além de realização de manutenção preventiva baseada no processamento dos dados coletados. O monitoramento de estruturas em tempo real também contribui para a segurança e avaliação de risco para estruturas de aço protendido, através da medição dos esforços e deslocamentos dos cabos durante a protensão [27].

6. Conclusões

O gémeo digital, criado em 2003, desenvolveu-se primeiro em áreas como a indústria, aviação e aeroespacial e saúde e é recente o interesse pela sua aplicação na indústria da construção, onde pode ser considerado um novo fenômeno [1][5].

Na indústria da construção, o gémeo digital pode ter aplicação nas etapas de projeto, construção, operação e manutenção e com diferentes objetivos, que vão desde o suporte para a tomada de decisão, no gerenciamento das informações de projeto, no planejamento e acompanhamento da construção, até o monitoramento da operação do edifício construído. Assim como em outras indústrias que já avançaram na utilização do gémeo digital, na indústria da construção, o gémeo digital pode ser aplicado em qualquer classe de ativo, ou seja, a edificação (toda ou parte dela), nos recursos utilizados durante a fase de construção tais como equipamentos; materiais, pessoas e processos, e também em infraestruturas (pontes, estradas etc.) ou em cidades inteiras, tornando estes ativos inteligentes, no sentido do uso e troca da informação.

Observou-se neste trabalho de revisão que, com relação ao conceito de gémeo digital, a existência de certa zona cinzenta na definição e abrangência do conceito, por exemplo, foram encontradas referências ao *BIM* e ao *CPS* como se ambos fossem a representação de um gémeo digital. Os estudos de caso encontrados, em sua maioria, estão num estágio inicial ou conceitual, com um grau de maturidade mais baixo. Aqueles mais avançados estão no campo do acompanhamento da construção (de edifícios mais simples) com uso de *LiDAR*, geração de modelagem *BIM* e verificação de conformidade com o planejamento e predição de tarefas futuras, e da operação de edifícios. Tecnologias tais como *IA* e *Machine Learning* estão também em fase inicial em sua aplicação conjunta com Gémeos Digitais, na área da Construção.

Diante do recente interesse da indústria de construção civil na aplicação do gémeo digital, é um fato concluir que há muitas oportunidades de exploração do tema na academia e principalmente na indústria. Sacks et al. [5] observam que, para implementar o gémeo digital na construção civil, será necessário ultrapassar várias barreiras técnicas, sociológicas, organizacionais e comerciais. Na academia, a exploração de temas relacionados à utilização de *IA* na predição de comportamentos dos ativos, baseada em dados, pode ser uma linha interessante de pesquisa. Outros temas como a aplicação de tecnologias de monitoramento das atividades da construção civil em tempo real e sua integração com modelos digitais e disponibilização de informações para correção de rumos da construção é outra linha que desponta como promissora.

Referências

- [1] B. R. Barricelli, E. Casiraghi, e D. Fogli, “*A Survey on Digital Twin: Definitions, Characteristics, Applications, and Design Implications*”, *IEEE Access*, vol. 7, pp. 167653-167671, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2953499.
- [2] D.-G.J. Opoku, S. Perera, R. Osei-Kyei, e M. Rashidi, “*Digital twin application in the construction industry: A literature review*”, *J. Build. Eng.*, vol. 40, p. 102726, ago. 2021, doi: 10.1016/j.job.2021.102726.
- [3] A. A. Akanmu, C. J. Anumba, e O. O. Ogunseiju, “*Towards Next Generation Cyber-Physical Systems and Digital Twins for Construction*”, *J. Inf. Technol. Constr.*, vol. 26, p. 505-525, 2021, doi: 10.36680/j.itcon.2021.027.

- [4] “Digital Twin Consortium™”. <https://www.digitaltwinconsortium.org/initiatives/the-definition-of-a-digital-twin.htm> (acessado dez. 23, 2021).
- [5] R. Sacks, I. Brilakis, E. Pikas, H. S. Xie, e M. Girolami, “Construction with digital twin information systems”, *Data-Centric Eng.*, vol. 1, ed 2020, doi: 10.1017/dce.2020.16.
- [6] Y. Pan e L. Zhang, “A BIM-data mining integrated digital twin framework for advanced project management”, *Autom. Constr.*, vol. 124, p. 103564, abr. 2021, doi: 10.1016/j.autcon.2021.103564.
- [7] A. D’mello, “Global digital twin market size to exceed \$20bn by 2025 | IoT Now News & Reports”, *IoT Now News – How to run an IoT enabled business*, jul. 08, 2019. <https://www.iot-now.com/2019/07/08/97220-global-digital-twin-market-size-exceed-20bn-2025/> (acessado ago. 29, 2021).
- [8] K. Costello e G. Omale, “Gartner Survey Reveals Digital Twins Are Entering Mainstream Use”, *Gartner*, fev. 20, 2019. <https://www.gartner.com/en/newsroom/press-releases/2019-02-20-gartner-survey-reveals-digital-twins-are-entering-mai> (acessado ago. 29, 2021).
- [9] A. Dresch, D. P. Lacerda, e J. A. V. Antunes Júnior, *Design Science Research: método de pesquisa para avanço da ciência e tecnologia*. Porto Alegre: Bookman, 2015.
- [10] A. Akanmu e C. J. Anumba, “Cyber-physical systems integration of building information models and the physical construction”, *Eng. Constr. Archit. Manag.*, vol. 22, nº 5, pp. 516-535, 2015, doi: 10.1108/ECAM-07-2014-0097.
- [11] C. Kan, C. J. Anumba, e J. I. Messner, “Potential Use of Cyber-Physical Systems (CPS) for Planning and Operation of Mobile Cranes on Construction Sites”, in *Computing in Civil Engineering 2017: Sensing, Simulation, and Visualization*, New York, 2017, pp. 139-146.
- [12] X. Yuan, C. J. Anumba, e M. K. Parfitt, “Cyber-physical systems for temporary structure monitoring”, *Autom. Constr.*, vol. 66, pp. 1-14, jun. 2016, doi: 10.1016/j.autcon.2016.02.005.
- [13] F. Tao, H. Zhang, A. Liu, e A. Y. C. Nee, “Digital Twin in Industry: State-of-the-Art”, *IEEE Trans. Ind. Inform.*, vol. 15, nº 4, pp. 2405-2415, abr. 2019, doi: 10.1109/TII.2018.2873186.
- [14] F. Jiang, L. Ma, T. Broyd, e K. Chen, “Digital twin and its implementations in the civil engineering sector”, *Autom. Constr.*, vol. 130, p. 103838, out. 2021, doi: 10.1016/j.autcon.2021.103838.
- [15] Z. You e L. Feng, “Integration of Industry 4.0 Related Technologies in Construction Industry: A Framework of Cyber-Physical System”, *IEEE Access*, vol. 8, pp. 122908-122922, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3007206.

- [16] C. J. Turner, J. Oyekan, L. Stergioulas, e D. Griffin, "Utilizing Industry 4.0 on the Construction Site: Challenges and Opportunities", *IEEE Trans. Ind. Inform.*, vol. 17, nº 2, pp. 746-756, fev. 2021, doi: 10.1109/TII.2020.3002197.
- [17] T. Greif, N. Stein, e C. M. Flath, "Peeking into the void: Digital twins for construction site logistics", *Comput. Ind.*, vol. 121, p. 103264, out. 2020, doi: 10.1016/j.comp-ind.2020.103264.
- [18] Y. Peng, M. Zhang, F. Yu, J. Xu, e S. Gao, "Digital Twin Hospital Buildings: An Exemplary Case Study through Continuous Lifecycle Integration", *Adv. Civ. Eng.*, vol. 2020, pp. 1-13, nov. 2020, doi: 10.1155/2020/8846667.
- [19] Y. Wang e Z. Wu, "Model construction of planning and scheduling system based on digital twin", *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 109, nº 7-8, pp. 2189-2203, ago. 2020, doi: 10.1007/s00170-020-05779-9.
- [20] D. Lee e S. Lee, "Digital Twin for Supply Chain Coordination in Modular Construction", *Appl. Sci.*, vol. 11, nº 13, p. 5909, jun. 2021, doi: 10.3390/app11135909.
- [21] M. Leonardo, N. Berardo, C. Alessandro, R. Luigi, e D. G. Giuseppe Martino, "Development of a Digital Twin Model for Real-Time Assessment of Collision Hazards", in *Proceedings of the Creative Construction e-Conference 2020*, Online, 2020, pp. 14-19. doi: 10.3311/CCC2020-003.
- [22] J. Nie, W. Xu, D. Cheng, e Y. Yu, "Digital Twin-based Smart Building Management and Control Framework", *DEStech Trans. Comput. Sci. Eng.*, nº icaic, maio 2019, doi: 10.12783/dtcse/icaic2019/29395.
- [23] Q. Lu, X. Xie, A. K. Parlikad, e J. M. Schooling, "Digital twin-enabled anomaly detection for built asset monitoring in operation and maintenance", *Autom. Constr.*, vol. 118, p. 103277, out. 2020, doi: 10.1016/j.autcon.2020.103277.
- [24] S. H. Khajavi, N. H. Motlagh, A. Jaribion, L. C. Werner, e J. Holmström, "Digital Twin: Vision, Benefits, Boundaries, and Creation for Buildings", *IEEE Access*, vol. 7, pp. 147406-147419, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2946515.
- [25] N. Moretti, X. Xie, J. Merino, J. Brazauskas, e A. K. Parlikad, "An openBIM Approach to IoT Integration with Incomplete As-Built Data", *Appl. Sci.*, vol. 10, nº 22, p. 8287, nov. 2020, doi: 10.3390/app10228287.
- [26] C.-S. Shim, N.-S. Dang, S. Lon, e C.-H. Jeon, "Development of a bridge maintenance system for prestressed concrete bridges using 3D digital twin model", *Struct. Infrastruct. Eng.*, vol. 15, nº 10, pp. 1319-1332, out. 2019, doi: 10.1080/15732479.2019.1620789.
- [27] Z. Liu, W. Bai, X. Du, A. Zhang, Z. Xing, e A. Jiang, "Digital Twin-based Safety Evaluation of Prestressed Steel Structure", *Adv. Civ. Eng.*, vol. 2020, pp. 1-10, set. 2020, doi: 10.1155/2020/8888876.