



Congresso Internacional
de Administração
ADM 2021

24 a 28
de outubro
Ponta Grossa - Paraná - Brasil

**SOBREVIVÊNCIA DAS ORGANIZAÇÕES
EM TEMPOS INCERTOS:**

O papel dos gestores e do ambiente externo
no sucesso e no fracasso organizacional.

DESAFIOS NO USO DO DIGITAL TWIN NA CONSTRUÇÃO PRÉ- FABRICADA – UMA REVISÃO SISTEMÁTICA

CHALLENGES IN USING THE DIGITAL TWIN IN PREFABRICATED CONSTRUCTION – A SYSTEMATIC REVIEW

ÁREA TEMÁTICA: GESTÃO DE OPERAÇÕES E LOGÍSTICA

Pedro Artur Fernandes Lino Andrade, UFOP, Brasil, pedro.artur@aluno.ufop.edu.br

Alessandra Bruna Silva Nascimento, UFOP, Brasil, alessandra.nascimento@aluno.ufop.edu.br

Carlos Henrique de Araújo, UFOP-MG, Brasil, carlos.ha@aluno.ufop.edu.br

Solange Aparecida Tolentino, UFOP, Brasil, solange.tolentino@aluno.ufop.edu.br

Irce Fernandes Gomes Guimarães, UFOP, Brasil, irce@ufop.edu.br

Resumo

Os processos envolvidos na arquitetura e engenharia civil estão cada vez mais influenciados por tecnologias de monitoramento e gerenciamento de dados. Neste sentido, diversos recursos surgiram para descrever conceitos modernos da automação e da indústria 4.0, sendo o *Digital Twin* um dos mais recentes. De maneira sucinta, um *Digital Twin* (DT) é um modelo virtual de um processo físico que coleta informações do mundo real e cria um protótipo de alta fidelidade. Por outro lado, a pré-fabricação pode ser definida como a manufatura de peças aptas para serem montadas no canteiro de obras. Sua lógica advém da racionalização da mão de obra e material. Visto isso, *digital twin* e pré-fabricados são altamente inter-relacionados e podem ser aplicados em conjunto na indústria da construção. Neste sentido, por meio de uma revisão sistemática, este artigo tem como objetivo analisar os desafios no uso do digital twin em construções com pré-fabricados. Os resultados demonstram potenciais melhorias advindas com o uso desse recurso, mas ainda há um longo caminho a se percorrer, sendo necessário investir na integração entre todas as tecnologias necessárias para este ambiente. Além disso, é preciso aprimorar o nível de detalhe dos sensores, a fim de evitar erros de leitura e propiciar melhor atualização.

Palavras-chave: (Digital twin; BIM; Pré-fabricação; Indústria 4.0; Construção Industrializada)

Abstract

The processes involved in architecture and civil engineering are increasingly influenced by monitoring and data management technologies. In this sense, several resources are described for modern concepts of automation and industry 4.0, the Digital Twin being the most recent. Briefly, a Digital Twin (DT) is a virtual model of a physical process that collects real-world information and creates a high-fidelity image. On the other hand, prefabrication can be defined as the manufacture of parts suitable for assembly at the construction site. Its logic comes from the rationalization of labour and material. In view of this, digital twin and prefabricated are highly interrelated and can be applied together in building construction. In this sense, through a systematic review, this article aims to analyse the challenges in the use of the digital twin in prefabricated buildings. The results have all the possible resources that come with the long use of this potential, but they can still invest in the integration between themselves, as necessary resources are needed for this environment. In addition, it is necessary to update the level of detail of the sensors to avoid reading errors and provide better results.

Keywords: (Digital Twin; BIM; Prefabrication; Industry 4.0; Industrialized Construction)

1. INTRODUÇÃO

Conforme a era digital chega aos setores da engenharia e da arquitetura, os processos envolvidos no projeto, construção e operação de obras estão cada vez mais influenciados por diferentes tecnologias que lidam com monitoramento e gerenciamento de dados, sistemas de armazenamento de informação, bem como na simulação e otimização de sistemas de engenharia (Boje et al., 2020). Além de aumentar a eficiência de cada operação, esses modelos desempenham um papel decisivo na minimização dos impactos do ciclo de vida dos edifícios.

Termos como *big data*, armazenamento em nuvem, *smart cities*, *machine learning*, inteligência artificial foram cunhados para descrever conceitos modernos da automação e da indústria 4.0, impulsionando e habituando cada vez mais a sociedade com esse processo (Batty, 2018). Neste sentido, um dos termos mais recentes a ser adicionado é o *Digital Twin* (Gêmeo Digital). De maneira sucinta, um *Digital Twin* (DT) é um modelo virtual de um processo físico que coleta informações do mundo real e cria um protótipo de alta fidelidade por meio de sensores, drones, lasers, entre outras tecnologias. O “gêmeo” reúne informações de várias fontes, como análises de dados, algoritmos e inteligência artificial para obter continuamente insights sobre o desempenho, operação ou eficiência do projeto, seja construído ou em andamento (Batty, 2018). Sendo assim, o *digital twin* vai além da simulação 3D para ajudar os usuários a compreender o que está acontecendo no mundo físico, gerando cenários hipotéticos que auxiliam, por exemplo, empreendedores a definir se vale a pena ou não colocar recursos em um determinado projeto.

Ao que tange à construção civil, o *digital twin* pode ser aplicado em diferentes momentos do ciclo de vida da edificação. Antes de iniciar a construção é possível criar o edifício digitalmente, auxiliando em melhores decisões de projeto e de obra. Uma vez que o projeto esteja concluído, o “gêmeo” pode ser útil para modificações na construção, operação e a manutenção das instalações prediais. Além disso, o conceito se aplica para gerenciamento de logística, fluxos de informações em tempo real, transparência da cadeia de suprimentos de ponta a ponta e melhorias nas interações humanas. Arquitetos, engenheiros, gerentes de instalações, construtores e proprietários de terrenos são os principais usuários e beneficiários do *digital twin*.

Com relação ao *Building Information Modeling* (BIM), outro termo exaustivamente analisado dentro da construção civil nos últimos anos, esse é parte integrante de um *digital twin*. Entretanto, o conceito deste último é muito mais amplo (Boje et al., 2020). Enquanto a funcionalidade de um Modelo BIM é replicar o edifício juntamente com suas propriedades, conforme o nível de detalhe (Florio, 2007), o DT está diretamente conectado com o mundo físico, simulando possíveis interações deste com situações reais. Ou seja, existe uma possibilidade maior de precisão.

Neste sentido, a fim de ampliar o debate sobre essa tecnologia, este artigo discute os desafios no uso do *digital twin* em construções com pré-fabricados. A pré-fabricação é um processo de manufatura de peças e elementos padronizados da construção, que após a fabricação fora do local de implantação tornam-se aptas para serem utilizadas mediante ações de montagem (ABNT, 1985). Sua lógica advém da racionalização da mão de obra e material.

Visto isso, *digital twin* e pré-fabricados são altamente inter-relacionados e podem ser aplicados em conjunto para maximizar os benefícios deste recurso dentro da indústria da construção. Embora a literatura da indústria da construção pré-fabricada esteja crescendo, ainda existem poucas avaliações científicas de como o DT pode efetivamente aprimorar as práticas atuais deste tipo de construção. Por esse motivo, este estudo tem o objetivo de diagnosticar, por meio de uma revisão sistemática, como o *digital twin* vem sendo aplicado em construções com materiais pré fabricados. Os objetivos específicos que também serão discutidos nesta pesquisa são: (1) Fornecer um mapeamento científico do estado atual da utilização dos gémeos digitais na construção civil com pré-fabricados; (2) investigar os principais tópicos de pesquisa, realizações atuais e limitações do uso do digital twin quando utilizado em pré-fabricados; e (3) apontar o potencial para o aprimoramento e adoção futura em pré-fabricados.

O artigo está organizado da seguinte forma. Na seção 2 são apresentados os referenciais teóricos relacionados aos tópicos *digital twin* e Construção Pré-fabricada. Na seção 3 é apresentada a metodologia de pesquisa. Posteriormente, os resultados e achados são descritos na seção 4. A última seção conclui destacando a contribuição de pesquisa deste artigo.

2. PRINCÍPIOS FUNDAMENTAIS DO *DIGITAL TWIN* E DA CONSTRUÇÃO PRÉ-FABRICADA

Nesta seção discute-se a revisão de literatura existente entre *digital twin* e Construção pré-fabricada para esclarecer a necessidade da revisão mista sobre estes temas.

2.1 Pré-fabricados

A história da pré-fabricação como “manifestação mais significativa da industrialização na construção”, começou após a Segunda Guerra Mundial, principalmente na Europa, em que a utilização intensiva do pré-fabricado em concreto deu-se em função da necessidade de se construir em grande escala e com rapidez (Ordonéz, 1974).

A construção pré-fabricada também pode ser chamada de construção pré-moldada, ou construção modular, com diferenças sutis em vários contextos. Nesta pesquisa, algumas definições estão incluídas e são referidas como construção pré-fabricada.

No contexto de fabricação *in loco*, Smith (2010) destaca que, apesar dos grandes avanços em segurança no trabalho, a construção *in loco* ainda representa um ambiente de trabalho perigoso e sujeito a potenciais acidentes. Já a construção industrializada (fora do local da obra) implica maior segurança, é mais enxuta e amplia a força de trabalho, trazendo maior competitividade econômica. Este ambiente de trabalho mais seguro e que elimina o fator de condições climáticas que, num ambiente externo pode paralisar a obra, a longo prazo pode também ser considerado uma medida de sustentabilidade. Logo, a pré-fabricação garante maior produtividade e potencial para crescimento.

Praticamente todos os edifícios contemporâneos integram a pré-fabricação em sua construção de alguma forma (Horta, 2018). Para aumentar a velocidade e qualidade da construção, o processo de pré fabricação ocorre em uma instalação especializada na qual vários componentes e sistemas são unidos no local de implantação para formar uma porção ou grande parte de uma edificação. O tipo de componentes pré-fabricados varia de acordo com o tamanho e a complexidade (incluindo a quantidade de trabalhos de acabamento realizados na fábrica e o

número de operações de construção envolvidas em um único componente), e com base na quantidade de trabalho necessária para a montagem no local. Um exemplo de processo de pré fabricação é demonstrado por Cunha e Palha (2020) na Figura 1.

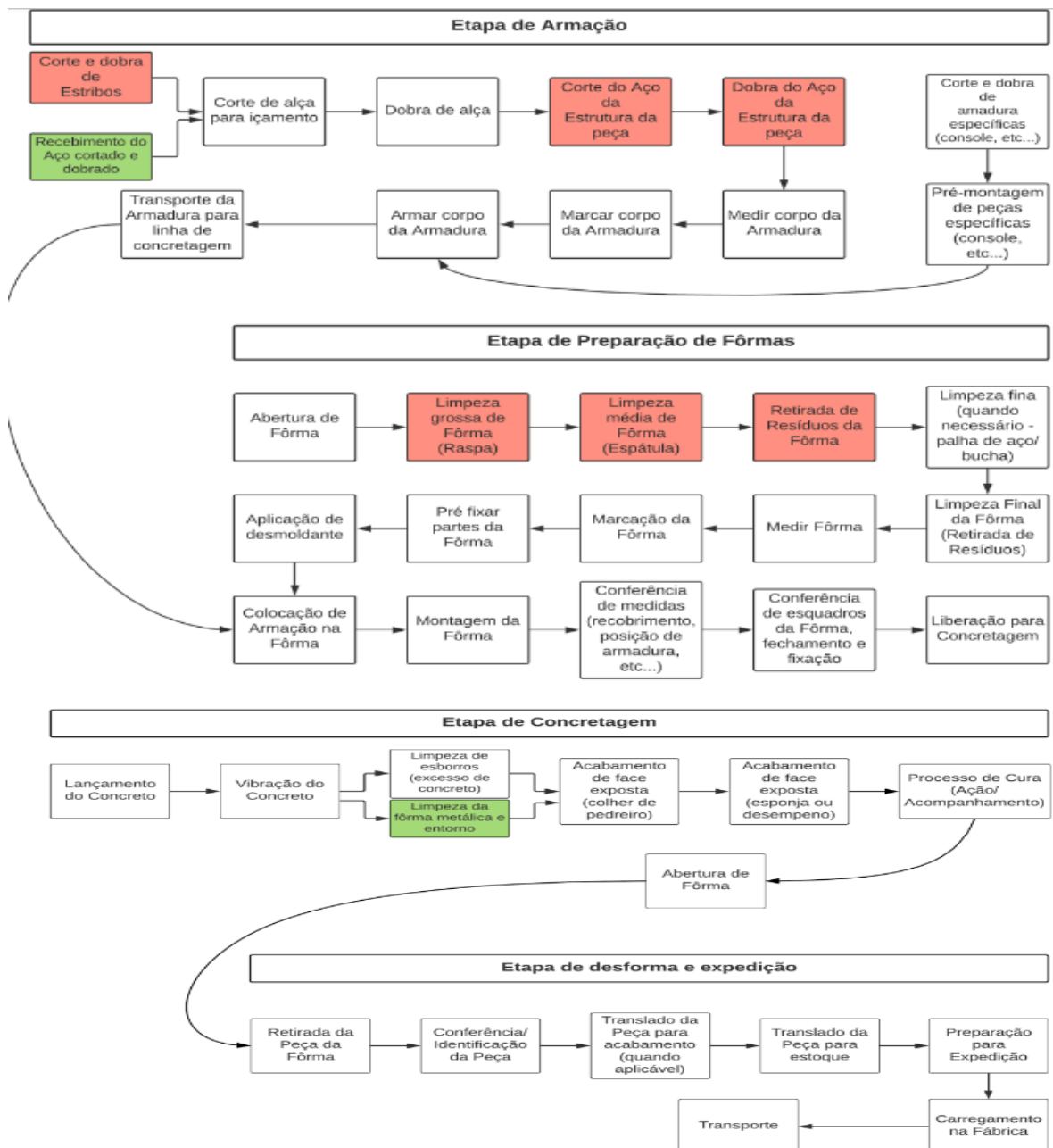


Figura 1 – Exemplo de processo de pré fabricação – Fonte: Cunha e Palha (2020)

Porém, o uso de peças pré-fabricadas encontra desafios dentro dos limites operacionais da construção civil brasileira, entre eles: a necessidade, em alguns projetos, de mão-de-obra mais qualificada e especializada para execução e instalação dos elementos fabricados, tornando a

obra mais onerosa; as restrições em relação a dimensão dos elementos pré-fabricados, visto que precisam ter um tamanho possível de realizar o transporte até o local definitivo na estrutura; e há necessidade de maiores espaços no canteiro para a central de produção e acomodação dos equipamentos de transporte das peças (Vasconcelos, 2002).

Visto isso, percebe-se que a qualidade dos projetos também é um fator determinante para a escolha da utilização de elementos pré-fabricados, uma vez que este método construtivo requer enorme precisão de projeto e planejamento bem elaborado. Neste campo recurso como o *Digital Twin* pode auxiliar para melhor entendimento e previsão das necessidades do projeto.

2.2 Digital Twin (DT)

Com os avanços tecnológicos e a crescente demanda de monitorar e controlar os ativos (edifícios, pontes, elementos manufaturados etc.) ao longo de todo o ciclo de vida, levaram vários campos de pesquisa a investigar os usos e o potencial do digital twin. Embora o BIM já englobe muitas dessas aplicações, o modelo do DT requer um nível maior de detalhes e precisão, podendo simular desde pequenas residências, pontes, até fábricas ou cidades inteiras (Bolton et al., 2018).

O termo surgiu há mais de 20 anos e está ganhando força conforme a sociedade abraça a automatização (Batty, 2018). O conceito de “gêmeo” originou-se através de uma simulação realizada pela National Aeronautics and Space Administration (NASA), que previu o status de voo do veículo aéreo preciso da aeronave “gêmea” no solo (ROSEN et al., 2015). Foi somente em 2011 que o professor Michael Grieves (2014) propôs formalmente o conceito de *digital twin*, que inclui entidades físicas, modelos digitais virtuais e a conexão de dados e informações entre eles. Desde a criação, no entanto, o conceito se ampliou a medida em que está sendo aplicado para caracterizar uma variedade de modelos de simulação digital que funcionam ao lado de processos em tempo real, sendo estes fábricas, edifícios, pontes, entre outros. Desta forma, o conceito atual do *digital twin* se baseia na digitalização do conceito de “gêmeo” e estabelece a conexão entre o espaço real e o espaço virtual, permitindo que eles interajam ao mesmo tempo (Negri, Fumagalli & Macchi, 2017).

Em resumo, um DT é uma representação virtual de um sistema físico usado para entender e prever possíveis problemas em todo seu ciclo de vida. Um *digital twin* consiste em três componentes principais: o objeto físico, o objeto virtual e a ligação entre eles (Keen, 2022). Ainda segundo Keen (2022), isso pode ser analisado no diagrama presente na Figura 2, em que são expostos os elementos fundamentais de um DT.

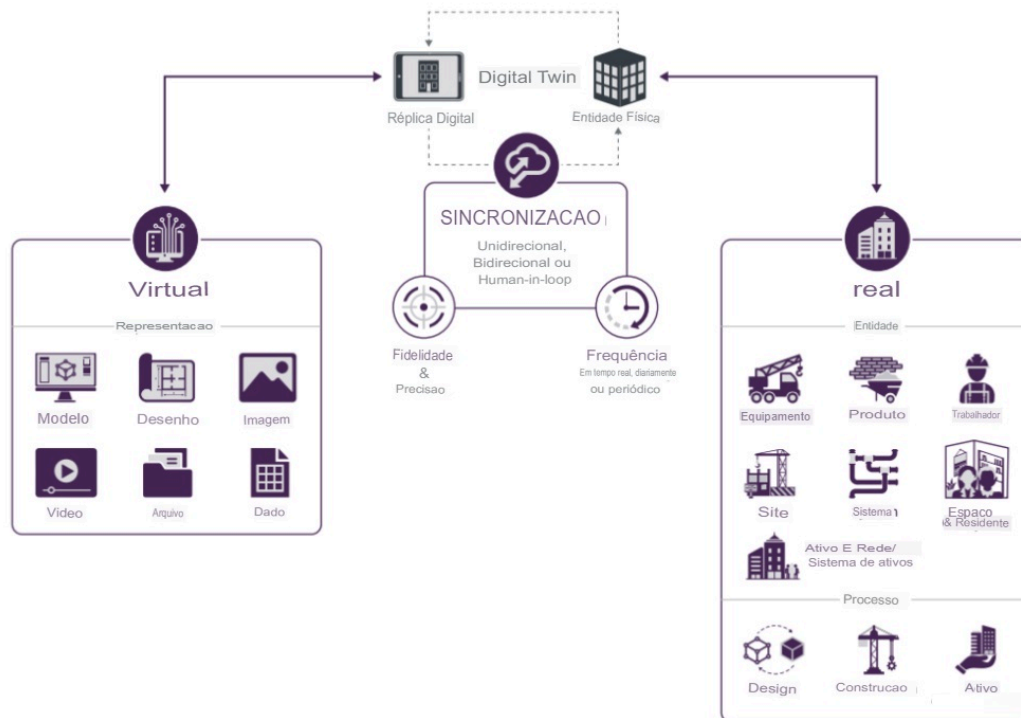


Figura 2 – Elementos fundamentais de um *digital twin* – Fonte: Keen (2022)

Juntos, esses componentes permitem o monitoramento de objetos em tempo real, visualização e análise de dados e simulação de hipóteses a fim de evitar possíveis problemas antes que eles ocorram. Apesar de ter sido aplicado pela primeira vez no contexto da indústria aeronáutica e aeroespacial, para espelhar as condições do veículo, o *digital twin* tem sido utilizado em diversas áreas, como robótica, monitoramento de saúde e manufatura (Lee & Lee, 2021).

2.3 *Digital Twin* Aplicado à Construção Civil

Embora a tecnologia da informação (TI) seja amplamente utilizada no gerenciamento de construções com pré-fabricados, a aplicação do *digital twin* neste segmento é pouco estudada (Zhao, Cao, & Liu 2022). Um importante benefício do DT na construção é complementar o BIM para o compartilhamento de informações de forma simultânea. O DT utiliza o BIM como o principal suporte do modelo, mas também emprega ativos físicos, como trabalhadores, materiais, equipamentos, e processos.

O DT permite a visualização de ativos em tempo real, monitorando o comportamento e desempenho da operação e simulando os possíveis riscos. Os sensores são parte fundamental desse processo, pois estes detectam um ou mais condições de ativos físicos, convertendo essas condições em sinais legíveis por pessoas e/ou máquinas. Através da conexão com a internet, o *digital twin* é sincronizado com as informações recebidas pelos sensores, atualizando o estágio atual dos ativos físicos. Esses equipamentos estão classificados no conceito de *Internet of Things* (IOT). Existem muitos tipos diferentes de sensores conectados à internet: GPS, sensores de imagem, sensores de proximidade, sensores de identificação de radiofrequência, sensores de

movimento e biossensores. Todos eles são amplamente utilizado na construção (Lee & Lee, 2021).

3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O objetivo desta pesquisa é sintetizar o conhecimento do *digital twin* e verificar como este recurso vem sendo aplicado em construções com pré-fabricados na indústria da construção.

Quanto à forma de abordagem do problema e à análise dos dados, esta pesquisa é caracterizada como qualitativa e quantitativa, pois utiliza a estatística descritiva para traduzir em números as informações obtidas na base de dados e, posteriormente, analisá-las e organizá-las qualitativamente (Silva & Menezes, 2005). Já no tocante aos procedimentos técnicos, é uma revisão sistemática, com pontos de análise bibliométrica da literatura por meio de recursos tecnológicos de busca on-line, para a obtenção das referências em artigos, em língua inglesa, acessados por meio do Portal *Web of Science*, publicados no período de 2012 a 2022.

Uma busca foi realizada em junho de 2022 no *Web of Science* e, para identificar as tecnologias digitais mais recentes relatadas na literatura, os artigos publicados se limitam aos últimos 10 anos, de 2012 a 2022. Os artigos considerados para este estudo foram encontrados em periódicos e anais de conferências considerando a escrita em inglês, pois nas bases consultadas e período considerado não foram encontrados artigos em língua portuguesa. Primeiramente, “*prefabricated construction*” e “*digital twin*” foram pesquisadas como palavras-chave no *Web of Science*, depois as palavras-chave relacionadas à construção pré-fabricada foram adicionadas como restrições nos resultados. O algoritmo de busca por palavras chave é: (“*off-site construction*” OR “*prefabricated construction*” OR “*on-site assembly*” OR “*Modular Construction*” OR “*prefabricated building*”) AND (“*digital twin*”).

A busca resultou em 14 trabalhos e, após ler o título e resumo, foram descartadas aqueles que fugiam dos objetivos desta pesquisa ou que eram muito semelhantes a outros artigos já escolhidos. Ao todo foram selecionadas 11 artigos.

Depois da busca inicial, deu-se início à revisão bibliométrica, em que foram destacadas algumas variáveis para análise, como: quantidade de artigos publicados e citações em cada ano e a quantidade de artigos por país. Em seguida, a leitura dos artigos foi norteadada em relação às seguintes questões: (A) Como do *digital twin* pode interferir nos custos e prazos da obra?; (B) Quais são as aplicações diretas do DT no canteiro de obras?; (C) Como o *digital twin* é integrado com outras tecnologias?; (D) Quais os benefícios do DT para a sustentabilidade?; (E) quais são os principais desafios encontrados para a aplicação do *digital twin* na construção pré-fabricada?

Por fim, a partir da seleção dos trabalhos e formulação das perguntas, foi desenvolvida a Tabela 1. Nela é feita a relação entre os questionamentos, anteriormente apresentados, trazidos pelo estudo (A, B, C, D, E) relacionando-os aos materiais científicos escolhidos. Foi marcado com um “x” os textos que, de alguma forma, abordaram cada um dos questionamentos.

Todo o processo de identificação e análise dos resultados é detalhado no fluxograma a seguir (Figura 3):

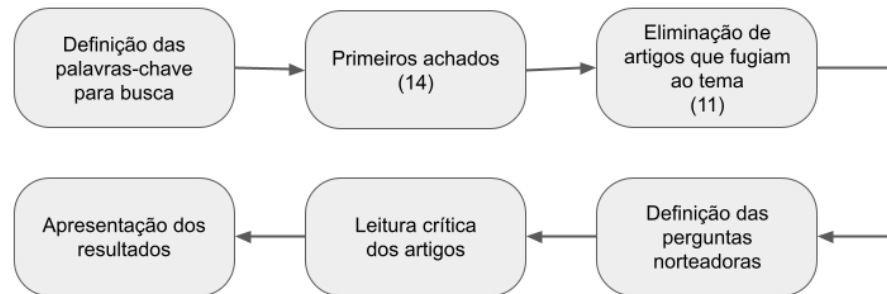


Figura 3 – Fluxograma detalhando a metodologia

ARTIGOS			QUESTÕES				
REF.	TÍTULO	ANO	A	B	C	D	E
WoS01	<i>BIM-Based End-of-Lifecycle Decision Making and Digital Deconstruction: Literature Review</i>	2020		x		x	x
WoS02	<i>A digital twin approach for geometric quality assessment of as-built prefabricated façades</i>	2021		x	x		x
WoS03	<i>Circular Economy and Virtual Reality in Advanced BIM-Based Prefabricated Construction</i>	2021			x	x	
WoS04	<i>Deploying 3D scanning based geometric digital twins during fabrication and assembly in offsite manufacturing</i>	2021			x		x
WoS05	<i>Digital Twin-Based Safety Risk Coupling of Prefabricated Building Hoisting</i>	2021		x	x		
WoS06	<i>Digital Twin for Supply Chain Coordination in Modular Construction</i>	2021	x		x		
WoS07	<i>The Modelling of Digital Twin Technology in the Construction Process of Prefabricated Buildings</i>	2021		x	x		x
WoS08	<i>A Framework for Prefabricated Component Hoisting Management Systems Based on Digital Twin Technology</i>	2022		x	x		
WoS09	<i>Digital Twin-Based Risk Control during Prefabricated Building Hoisting Operations</i>	2022		x	x		x
WoS10	<i>An Off-Site Construction Digital Twin Assessment Framework Using Wood Panelized Construction as a Case Study</i>	2022			x	x	
WoS11	<i>Digital twin-enabled smart modular integrated construction system for on-site assembly</i>	2022		x			

Tabela 1 – Relação entre questionamentos e artigos

4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Como dito no capítulo anterior, foram encontrados 11 artigos associando o *digital twin* com a construção pré-fabricada. Através da própria ferramenta de busca do *Web Of Science*, foi possível identificar algumas informações importantes sobre os trabalhos e gerar infográficos a fim de analisar melhor os resultados. A Figura 4 apresenta a quantidade de artigos publicados e citações em cada ano:

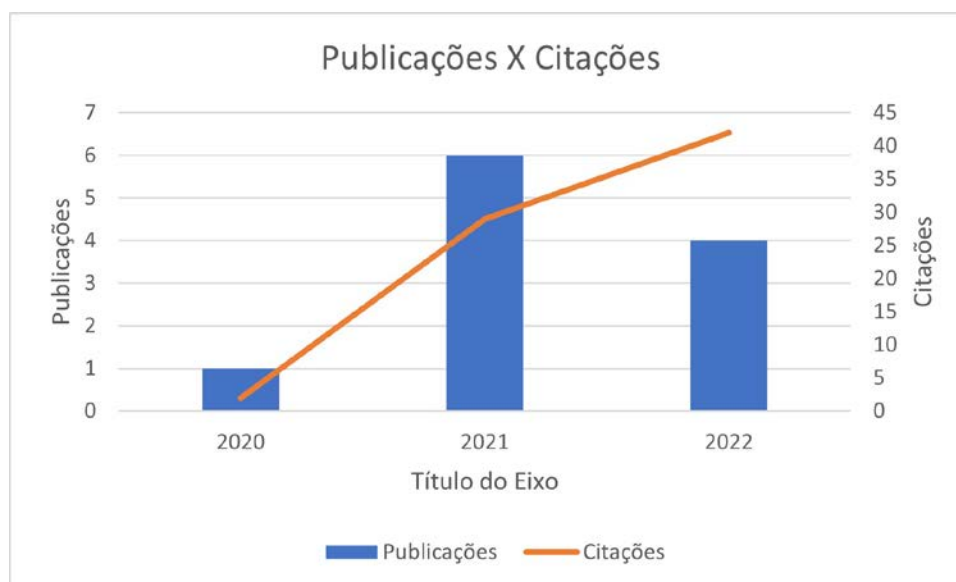


Figura 4 – Quantidade de citações e artigos publicados por ano

Observa-se que, apesar da pesquisa bibliométrica abordar todos os artigos dos últimos 10 anos (2012 a 2022), as publicações sobre o tema estudado começaram a aparecer somente a partir de 2020, o que caracteriza a presente pesquisa como bastante atual. Percebe-se também o crescimento do interesse pelo tema, visto a tendência de crescimento do número de citações. Com relação ao número de publicações, também é possível dizer que exista uma tendência de crescimento visto que a quantidade de artigos publicados até a junho de 2022 já é quase igual à quantidade publicada em todo o ano de 2021.

Na Figura 5, há as informações a respeito dos principais países nos quais as pesquisas foram realizadas, quando da publicação dos trabalhos. A China se destaca com a maior quantidade de trabalhos publicados, sendo cinco ao todo, seguida por Austrália com dois artigos publicados. Canadá, Inglaterra, Luxemburgo e Estados Unidos aparecem com 1 artigo cada.

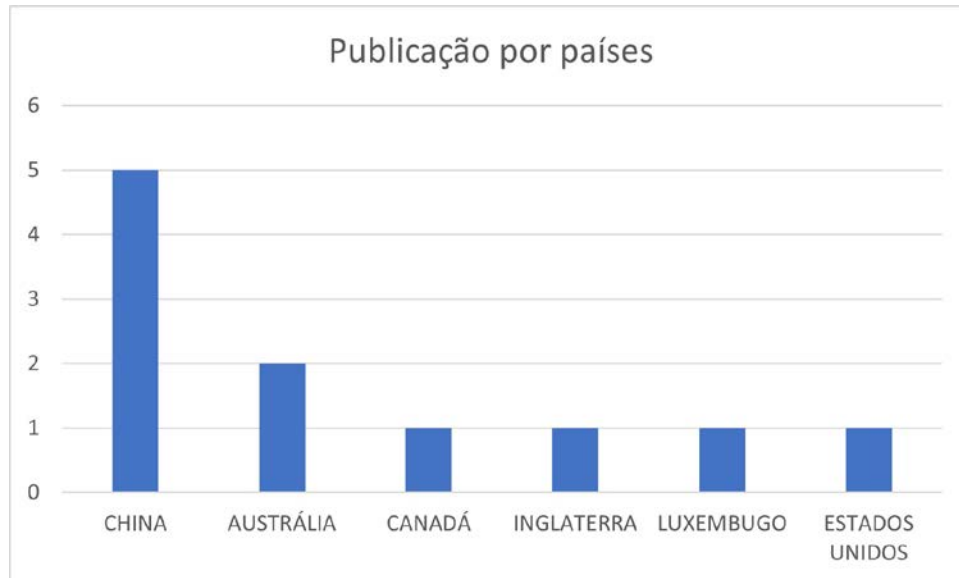


Figura 5 – Quantidade de publicações sobre o tema em cada país

É importante notar que todos os países listados são popularmente reconhecidos pelo alto grau de industrialização e inovação na construção civil.

4.1 Custos e Prazos

O *digital twin* pode reduzir os custos do ciclo de vida de uma edificação, o que pode ajudar a melhorar o desempenho do projeto e dos ativos. Graças a uma melhor mitigação de riscos e previsões, certos custos ou desperdícios podem ser evitados. Neste sentido, no artigo WoS06, Lee e Lee (2021) desenvolveram um *digital twin* com um ativo virtual baseado em BIM e simularam diferentes cenários de logística com base em um aplicativo de navegação habilitado para GIS. Após a realização de testes, os autores concluíram que o DT pode prever vários riscos possíveis durante o processo logístico e calcular uma previsão de chegada precisa dos componentes.

Visto isso, a possibilidade de prever riscos e calcular a chegada dos módulos pode facilitar a coordenação eficaz da cadeia de suprimentos e permitir a entrega dos elementos no canteiro através do sistema *just-in-time*. Por este motivo, o emprego do *digital twin* pode contribuir com a redução do tempo e do custo na construção pré-fabricada, ajudando na difusão desse modelo dentro da indústria da construção civil.

4.2 Uso no Canteiro de Obras

Em qualquer obra da construção civil, a segurança dos trabalhadores deve ser sempre uma prioridade para as empresas. Visto isso o *digital twin* pode ajudar a identificar, prever e analisar o risco existente em determinada operação. Além de reduzir o risco em um local de trabalho, o DT pode ajudar os gerentes de instalações a identificar riscos potenciais para ocupantes e usuários.

Zhansheng Liu et al. (2021), como demonstrado no artigo WoS05, promoveram o desenvolvimento de DT no campo da gestão de segurança de içamento de edifícios pré-fabricados e possibilitaram a melhora do mecanismo orientado por dados da estrutura de gerenciamento de riscos de segurança de içamento com base em *digital twin*. Já Zhou, Wei e Peng (2021), no texto WoS07, concluíram que a tecnologia *digital twin* associada ao BIM pode monitorar de forma eficaz os indicadores de risco no processo construtivo de edifícios pré-fabricados. O monitoramento pode orientar o projetista sobre potenciais perigos à segurança dos trabalhadores durante o processo de montagem.

4.3 Integração com Outras Tecnologias

O *digital twin* pode integrar várias tecnologias. Com base no estabelecimento de um modelo virtual, os dados coletados do canteiro de obras são fundidos com esse modelo e os resultados da análise são avaliados em tempo real para constantemente atualizar as condições de trabalho e ajudar as equipes de projeto a entender melhor o estado do ativo construído. Na investigação de Tran et al. (2021), demonstrada no artigo WoS02, foi utilizada a tecnologia de varredura a laser, que captura uma representação 3D da fachada do edifício como uma nuvem de pontos. Segundo os autores, em comparação com outras tecnologias de sensoriamento de captura de realidade, como fotogrametria ou videogrametria, a solução de escaneamento a laser pode produzir dados 3D com um nível mais alto de precisão (alguns milímetros), oferecendo flexibilidade nas medições em canteiros de obras com alto nível de complexidade, e é menos suscetível a condições de iluminação e defeitos nas texturas de componentes estruturais.

Já a pesquisa de Rausch et al. (2021), com base nas precisões observadas dos métodos de coleta de dados para *digital twin* e nas especificações europeias toleradas para muitos elementos de construção pré-fabricada, apresentadas no texto WoS04, concluíram que, mesmo usando o mais preciso scanner a laser disponível, podem ser necessárias tecnologias adicionais mais precisas. Os autores citam como exemplo dessas tecnologias os lasers rastreadores, estações totais robóticas, entre outras. Tais artifícios são úteis em determinadas tarefas de controle de qualidade a depender da geometria dos objetos mapeados.

Por fim, Lee e Lee (2021), no texto WoS06, a fim de resolver problemas relacionados ao transporte de elementos pré-fabricados, desenvolveram e testaram uma estrutura de DT que permite a simulação logística em tempo real na construção modular. Os autores detalharam bem as tecnologias utilizadas no sistema. O *digital twin* desenvolvido por eles usa informações de modelo de construção (BIM) e sistema de informações geográficas (GIS) como espinha dorsal. Neste sentido, o BIM pode incluir geometria detalhada, programação, quantidades e propriedades do módulo, enquanto o GIS fornece dados geográficos com informações de transporte (por exemplo, tráfego e pedágios etc.). Em seguida, o digital twin coleta dados do GPS (tecnologia classificada no conceito de IOT) para simular e analisar os dados a fim de prever possíveis riscos logísticos, encontrando rotas de entrega alternativas com tempos de chegada estimados mais precisos.

4.4 Sustentabilidade

Em média, o ciclo de vida de um edifício dura cerca de 50 a 100 anos. Após esse período são necessárias revisões e melhorias nas condições estruturais. Muitas vezes, por questões variadas, os edifícios são demolidos ou desmontados para dar lugar a um novo projeto. Neste sentido, quando as peças do prédio podem ser reaproveitadas ao invés de apenas destruídas ou recicladas, existe menor emissão de carbono e poluentes, revelando uma importante qualidade da pré-fabricação para a sustentabilidade. Entretanto, há uma forte probabilidade de que os agentes responsáveis pela desconstrução ou desmontagem não tenham participado da fase de construção do edifício, por exemplo, proprietários ou novos empreiteiros. Esses agentes precisam localizar diferentes elementos, estimar as quantidades reutilizáveis, verificar a qualidade das peças e realizar as medidas necessárias antes da desconstrução, o que pode ser facilmente atendido pelo BIM em um ambiente digital virtual.

A utilização de um modelo virtual tem poucas vantagens competitivas para as atividades de demolição, pois todo o edifício é demolido e não há necessidade de localizar previamente os materiais dentro deste. Para atividades de desconstrução, no entanto, ter um *digital twin* ajuda a monitorar o status geral e a integridade dos componentes, bem como as diretrizes de desconstrução previstas. Neste sentido, através de uma revisão de literatura apresentada no texto WoS01, Akbarieh et al. (2020) investigaram a tomada de decisão no fim de ciclo de vida das edificações baseadas em BIM e Desconstrução Digital. Nesta, os autores concluíram que existe um enorme potencial na desconstrução de edifícios para promover a sustentabilidade, mas ainda é necessária uma melhor adaptação do mercado para isso, com a elaboração de peças reutilizáveis pela indústria e maior detalhamento construtivo pelos projetistas. Esse processo pode ser facilitado com o uso de tecnologia.

Por fim, no intuito de complementar a pesquisa anteriormente citada, O'Grady et al. (2021) realizaram um estudo com foco na possibilidade de potenciais compradores das peças desmontadas visitarem o local para conhecer o edifício, através de um modelo compartilhado online, possibilitando que este seja vivenciado globalmente. A pesquisa foi apresentada no texto WoS03. Com isso é possível visualizar o estoque atual de materiais disponíveis para compra no fim de vida da edificação e mostrar a sequência de montagem da edificação para auxiliar na reutilização das peças, preenchendo as lacunas apresentadas na literatura por Akbarieh et al. (2020).

4.5 Dificuldades Encontradas

Uma das principais dificuldades encontradas na operação de um *digital twin* está justamente na coleta de dados. No artigo WoS04, Rausch et al. (2022) relatam que, uma vez que a precisão é baseada em vários fatores que são difíceis ou inviáveis de equalizar (alguns fatores estão disponíveis apenas como valores médios, enquanto outros são absolutos), muitas vezes não é viável obter um valor global de recursos no *digital twin*. Além disso, outra limitação importante trata da forma como as atualizações paramétricas são executadas no BIM. Dependendo da geometria da peça, são necessárias alterações nos levantamentos. Podem ocorrer erros, como ligações fora do eixo, resultando em perda ou incongruência de informações.

Além disso, um *digital twin* deve ser conectado e integrado para que todos os dados apropriados sejam registrados de forma precisa e correta no repositório digital. Garantir o fluxo de dados entre as diversas equipes e fases do projeto através de conexões e sistemas corretos é essencial. Liu et al. (2022), no artigo WoS09, apontam algumas limitações encontradas em seu estudo sobre a análise visual das decisões de controle de riscos de segurança de içamento em edifícios pré-fabricados. Segundo os autores, ainda existem algumas limitações para o método. O modelo analisado por eles é limitado e o sistema de decisão inteligente, que suporta o controle de risco de segurança de içamento, ainda é ausente. Visto isso, os autores apontam a necessidade de explorar melhores formas de integrar esse método com métodos de avaliação e previsão de riscos de segurança de içamento de edifícios pré-fabricados.

CONCLUSÃO

A necessidade de monitorar e acompanhar o andamento do ciclo de vida dos ativos, seja na fase de projeto ou do próprio ambiente construído, movimentou diversos campos de pesquisa. A construção civil, que muitas vezes é classificada como uma indústria atrasada em relação às demais, está ganhando o auxílio de diversas tecnologias. Uma das mais recentes é o *Digital Twin* (DT). Muitos dos usos do *digital twin* estão logo abaixo do campo BIM, mas com o uso do DT, o nível de detalhe e precisão aumentou. Visto isso, os “gêmeos” têm aplicações promissoras na construção civil industrializada. Possui muita utilidade dentro da construção com pré-fabricados por este conseguir recriar um edifício digitalmente antes da concretização da construção, levando a melhores decisões de projeto. Além disso, com ele também é possível auxiliar no processo de desmontagem de uma edificação.

Entretanto, embora se espere que o *digital twin* obtenha muitos benefícios no ambiente do projeto e da construção, existem obstáculos para sua adoção bem-sucedida. Adotar um *digital twin* requer uma gama de tecnologias e *softwares* auxiliares que ainda não são acessíveis para a maioria dos usuários. Em primeiro lugar, deve haver um investimento de tempo e custo para criar e gerenciar um digital twin. Em segundo lugar, mesmo que se construa o modelo, é difícil reunir e manter consistentemente as informações para alimentar o DT de forma eficiente. Neste sentido, proprietários dos meios de construção e empreiteiros podem se sentir desmotivados a adotar esta tecnologia devido a necessidade de evolução das técnicas auxiliares.

Por fim, a partir dos resultados obtidos por essa pesquisa, percebe-se que o principal desafio para a consolidação do *digital twin* em meio a construção com pré-fabricados e o aprimoramento da tecnologia disponível. Para o modelo virtual funcionar com eficiências, todas as tecnologias de suporte devem ser eficientes. Muitos avanços já podem ser percebidos, como, por exemplo, a popularização de sensores (laser scanner, fotogrametria), e o maior uso do BIM na construção civil, desde o projeto até a manutenção de edifícios. Mas ainda é necessário investir na integração entre essas tecnologias. Além disso, é preciso aprimorar o nível de detalhe dos sensores, a fim de evitar erros de leitura e propiciar uma melhor atualização do DT em relação ao ativo físico.

REFERÊNCIAS

ABNT. (1985). NBR 9062: Projeto e execução de estruturas de concreto pré-moldado. Rio de Janeiro.

- Akbarieh, A., Jayasinghe, L. B., Waldmann, D., & Teferle, F. N. (2020). BIM-based end-of-lifecycle decision making and digital deconstruction: Literature review. *Sustainability*, 12(7), 2670.
- Batty, M (2018) Digital twins. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science* 45(5): 817–820.
- Boje, C., Guerriero, A., Kubicki, S., & Rezgui, Y. (2020). Towards a semantic Construction Digital Twin: Directions for future research. *Automation in Construction*, 114, 103179.
- Bolton, A., Butler, L., Dabson, I., Enzer, M., Evans, M., Fenemore, T., ... & Makri, C. (2018). Gemini Principles. (CDBB_REP_006).
- Cunha, J. C. B. da; Palha, R. P. (2020) *Lean* aplicado em uma linha de produção de estruturas pré-fabricadas de concreto. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 18., 2020, Porto Alegre. Anais. Porto Alegre: ANTAC.
- De Vasconcelos, Augusto Carlos. (2002) O concreto no Brasil: pré-fabricação, monumentos, fundações. Studio Nobel.
- Florio, W. (2007). Contribuições do Building Information Modeling no processo de projeto em arquitetura. Encontro de tecnologia da informação e comunicação na construção civil, 3, 1-12.
- Grieves, M. (2014). Digital twin: manufacturing excellence through virtual factory replication. White paper, 1(2014), 1-7.
- Horta, B. A. (2018). Construção modular tridimensional: pré-fabricação, tecnologia, trabalho, obsolescência e arquitetura. Orientador: Clécio Magalhães do Vale. 2018. 155 f. v. 1, Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia das Construções, MECON, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.
- Jiang, Y., Li, M., Guo, D., Wu, W., Zhong, R. Y., & Huang, G. Q. (2022). Digital twin-enabled smart modular integrated construction system for on-site assembly. *Computers in Industry*, 136, 103594.
- Keen, M. (2022, maio 11). What Is a Digital Twin? Acesso em 21 de maio de 2022, de Autodesk website: <https://constructionblog.autodesk.com/digital-twin/>
- Lee, D., & Lee, S. (2021). Digital twin for supply chain coordination in modular construction. *Applied Sciences*, 11(13), 5909.
- Liu, Z., Li, A., Sun, Z., Shi, G., & Meng, X. (2022). Digital Twin-Based Risk Control during Prefabricated Building Hoisting Operations. *Sensors*, 22(7), 2522.
- Liu, Z., Meng, X., Xing, Z., & Jiang, A. (2021). Digital twin-based safety risk coupling of prefabricated building hoisting. *Sensors*, 21(11), 3583.
- Negri, E., Fumagalli, L., & Macchi, M. (2017). A review of the roles of digital twin in CPS-based production systems. *Procedia manufacturing*, 11, 939-948.
- O'Grady, T. M., Brajkovich, N., Minunno, R., Chong, H. Y., & Morrison, G. M. (2021). Circular economy and virtual reality in advanced BIM-based prefabricated construction. *Energies*, 14(13), 4065.
- Ordonéz, J. A. F. (1974) Pre-fabricacion: teoría y práctica. Barcelona: Editores Técnicos Asociados. v.1

- Rausch, C., Lu, R., Talebi, S., & Haas, C. (2021). Deploying 3D scanning based geometric digital twins during fabrication and assembly in offsite manufacturing. *International Journal of Construction Management*, 1-14.
- Rosen, R., Von Wichert, G., Lo, G., & Bettenhausen, K. D. (2015). About the importance of autonomy and digital twins for the future of manufacturing. *Ifac-papersonline*, 48(3), 567-572.
- Silva, E. L., & Menezes, E. M. (2005). *Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação* (4a ed.). Florianópolis: UFSC.
- Smith, R. E. (2010). *Prefab architecture: A guide to modular design and construction*. John Wiley & Sons.
- Tran, H., Nguyen, T. N., Christopher, P., Bui, D. K., Khoshelham, K., & Ngo, T. D. (2021). A digital twin approach for geometric quality assessment of as-built prefabricated façades. *Journal of Building Engineering*, 41, 102377.
- Wei, Y., Lei, Z., & Altaf, S. (2022). An Off-Site Construction Digital Twin Assessment Framework Using Wood Panelized Construction as a Case Study. *Buildings*, 12(5), 566.
- Zhao, Y., Cao, C., & Liu, Z. (2022). A Framework for Prefabricated Component Hoisting Management Systems Based on Digital Twin Technology. *Buildings*, 12(3), 276.
- Zhou, Y., Wei, X., & Peng, Y. (2021). The modelling of digital twin technology in the construction process of prefabricated buildings. *Advances in Civil Engineering*, 2021.