

4^a REVOLUÇÃO INDUSTRIAL E SEUS IMPACTOS NA ENGENHARIA CIVIL: UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

KORZEKWA, Jefferson¹
SCOPEL, Jefferson Luiz²
RODRIGUES, Lucas Albuquerque³

RESUMO

A Quarta Revolução Industrial (4^a RI) tem transformado radicalmente diversos setores produtivos e, em especial, a Engenharia Civil. Este artigo apresenta uma revisão bibliográfica acerca dos principais conceitos, tecnologias e impactos decorrentes da 4^a RI no campo da Engenharia Civil, abordando aspectos relativos à digitalização, automação, integração de sistemas ciberfísicos e sustentabilidade. A metodologia baseou-se em pesquisa de literatura nacional e internacional, selecionando obras clássicas e artigos recentes (2016–2024) que tratam da temática. Identificou-se que a adoção de tecnologias como Internet das Coisas (*Internet of Things - IoT*), Inteligência Artificial (IA), modelagem da Informação da Construção (*Building Information Modeling – BIM*) e manufatura aditiva (impressão 3D) está promovendo maior eficiência, redução de custos, melhorias na segurança de canteiros de obras e na gestão do ciclo de vida dos projetos. Por outro lado, desafios relativos à capacitação profissional, segurança de dados, custos iniciais de implementação e barreiras regulatórias ainda limitam a difusão plena dessas inovações. Conclui-se que, para aproveitar os benefícios da 4^a RI, faz-se necessário investir em formação continuada, adaptabilidade organizacional e políticas públicas que incentivem a pesquisa, desenvolvimento e aplicação de tecnologias emergentes na Engenharia Civil.

PALAVRAS-CHAVE: Quarta Revolução Industrial. Engenharia Civil. BIM. Internet das Coisas. Indústria 4.0. Inteligência Artificial.

ABSTRACT

The Fourth Industrial Revolution has been radically transforming various productive sectors, particularly Civil Engineering. This paper presents a bibliographic review of the main concepts, technologies, and impacts deriving from the Fourth Industrial Revolution in the field of Civil Engineering, addressing aspects related to digitization, automation, integration of cyber-physical systems, and sustainability. The methodology was based on research of national and international literature, selecting classical works and recent (2016–2024) articles dealing with the topic. It was identified that the adoption of technologies such as the Internet of Things (IoT), artificial intelligence (AI), Building Information Modeling (BIM), and additive manufacturing (3D printing) is promoting greater efficiency, cost reduction, improvements in construction site safety, and life-cycle management of projects. On the other hand, challenges related to professional training, data security, initial implementation costs, and regulatory barriers still limit the full dissemination of these innovations. It is concluded that, to leverage the benefits of the Fourth Industrial Revolution, it is necessary to invest in continuous education, organizational adaptability, and public policies that encourage research, development, and application of emerging technologies in Civil Engineering.

¹Engenharia Civil pela Faculdade de Direito de Alta Floresta (FADAF) e especialista em Docência do Ensino Superior pela Faculdade de Alta Floresta (UNIFLOR). E-mail: jeffcadastros@gmail.com

Keywords: Fourth Industrial Revolution. Civil Engineering. BIM. Internet of Things. Industry 4.0. Artificial Intelligence.

1 INTRODUÇÃO

A Quarta Revolução Industrial (4^a RI) caracteriza-se pela convergência de tecnologias digitais, físicas e biológicas, promovendo sistemas ciberfísicos sofisticados, processos produtivos autônomos e interconectividade em tempo real (SCHWAB, 2016). No contexto da Engenharia Civil, tais transformações têm o potencial de otimizar todas as etapas do ciclo de vida das construções – desde o projeto até a demolição –, alterando substancialmente a forma de projetar, executar e gerenciar obras (KALLOF; TAYLOR, 2018). Adicionalmente, a 4^a RI reforça a importância de práticas sustentáveis, manufatura aditiva, materiais inteligentes e digitalização de processos, promovendo eficiência energética e redução de impactos ambientais (EL-MAZRI; ACHERKI, 2020).

Na última década, o avanço de tecnologias como Modelagem da Informação da Construção (BIM), Internet das Coisas (IoT), Inteligência Artificial (IA), Realidade Aumentada (RA), drones e manufatura aditiva (impressão 3D) tem sido amplamente discutido pela comunidade acadêmica e empresarial da Engenharia Civil (SOTIROVSKI et al., 2019; AL-OBAIDI et al., 2021). Essas tecnologias permitem a coleta e o processamento de grandes volumes de dados (*Big Data*), resultando em tomadas de decisão mais assertivas, redução de custos operacionais, otimização de cronogramas e maior segurança em canteiros de obras (ZHANG; LIU, 2022).

Entretanto, a adoção plena da 4^a RI na Engenharia Civil enfrenta desafios significativos, tais como escassez de profissionais qualificados em novas tecnologias, altos investimentos iniciais em hardware e software, dificuldades de integração entre diferentes sistemas legados e barreiras regulatórias (MARTINS; ALMEIDA, 2023). Além disso, é necessária a criação de um arcabouço normativo que regulamente a segurança cibernética e a proteção de dados em ambientes interconectados (SILVEIRA; PEREIRA, 2024).

²Engenharia Civil pela Centro Universitário de Várzea Grande (2019) e especialista em Docência do Ensino Superior pela Faculdade Metodista Conexional. E-mail: eng.jefferson.scope@gmail.com

³Engenheiro Civil, Especialista em MBA em Engenharia de Edifícios até 4 pavimentos, Engenharia de Estruturas. E-mail: lucasalbuqrodri@hotmail.com.

Dante desse cenário, o presente artigo tem por objetivo realizar uma revisão bibliográfica acerca da 4^a RI e de seus impactos na Engenharia Civil, identificando as principais tecnologias envolvidas, benefícios, limitações e perspectivas futuras. A relevância do tema justifica-se não apenas pelo potencial de modernização do setor, mas também pela necessidade de compreender as transformações ocorridas nas práticas de projeto, execução e manutenção de edificações e infraestruturas.

Para tanto, o artigo está estruturado em cinco seções: a Seção 2 apresenta os fundamentos teóricos sobre a 4^a RI e suas tecnologias-chave e aborda aplicações práticas na Engenharia Civil; a Seção 3 descreve a metodologia de pesquisa; a Seção 4 discute os resultados obtidos na revisão e aponta principais desafios e oportunidades; e a Seção 5 apresenta as conclusões e sugestões para pesquisas futuras.

2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 Conceito e características da 4^a Revolução Industrial

O termo “Quarta Revolução Industrial” foi popularizado por Klaus Schwab (2016) para descrever a fase em que tecnologias avançadas se fundem com o mundo físico, criando sistemas ciberfísicos capazes de trocar informações em tempo real. Segundo Schwab (2016, p. 12), a 4^a RI distingue-se das revoluções anteriores (mecânica, elétrica e digital) pela velocidade de difusão, amplitude de transformações e profundidade de impactos nos modelos de negócios, na economia, na sociedade e no meio ambiente.

Os aspectos centrais da 4^a RI incluem:

- Conectividade Ubíqua: dispositivos inteligentes e sensores integrados ao ambiente físico, permitindo a troca de dados em tempo real (SCHIAVON et al., 2018).
- Sistemas Ciberfísicos e *Digital Twin*: criação de réplicas digitais de instalações, máquinas e processos, possibilitando simulações precisas e monitoramento contínuo (GRIEBEL et al., 2020).
- Inteligência Artificial e Aprendizado de Máquina: algoritmos capazes de processar grandes volumes de dados (*Big Data*) para otimizar processos, prever falhas e tomar decisões autônomas (ZHANG; LIU, 2022).

- Manufatura Aditiva (3D *Printing*): impressão de componentes e até edificações completas mediante deposição controlada de materiais, reduzindo desperdícios e tempos de produção (AL-OBAIDI et al., 2021).
- Robótica e Automação Avançada: máquinas autônomas e colaborativas (*cobots*) que executam tarefas repetitivas ou de risco, aumentando a segurança e a produtividade (BRITO; MELO, 2022).
- Internet das Coisas (IoT) e Sensoriamento Inteligente: dispositivos interconectados que coletam e transmitem dados, possibilitando monitoramento em tempo real de condições estruturais, ambientais e de segurança (SILVA; OLIVEIRA, 2020).
- Realidade Aumentada e Virtual (AR/VR): ferramentas que auxiliam na visualização de projetos, treinamento de equipes e inspeções remotas, diminuindo erros e retrabalhos (SOTIROVSKI et al., 2019).

Essas características, quando integradas, resultam em uma cadeia produtiva mais colaborativa, transparente e sustentável, alinhada às demandas de digitalização e eficiência impostas pelo mercado global (SCHWAB, 2016; HENDERSON et al., 2021).

2.1.1 Evolução da indústria 4.0 no contexto global e no Brasil

Enquanto a Quarta Revolução Industrial começou a ganhar força em países como Alemanha, Estados Unidos e China a partir de 2011, com iniciativas como o programa “*Industry 4.0*” do governo alemão, no Brasil o conceito se consolidou gradualmente, sobretudo entre 2017 e 2020, motivado por políticas de inovação e incentivos fiscais (BRASIL, 2018). O Plano Nacional da Indústria 2030 estabeleceu diretrizes para incentivar a digitalização de setores estratégicos, incluindo a construção civil (BRASIL, 2017).

Dados da Confederação Nacional da Indústria – CNI (2022) mostraram que, em 2021, cerca de 15 % das empresas do setor de construção civil brasileiro já utilizavam alguma forma de sistema BIM, enquanto 10 % adotavam soluções de IoT em canteiros de obras. Há, contudo, disparidades regionais: estados do Sudeste apresentam maior índice de adoção do que regiões Norte e Nordeste (CNI, 2022). O desenvolvimento de parques tecnológicos e a parceria entre universidades e instituições de pesquisa têm sido cruciais para acelerar a incorporação de tecnologias emergentes (SILVEIRA; PEREIRA, 2024).

No cenário global, a 4^a RI tem estimulado o surgimento de ecossistemas de inovação, com sinergias entre empresas de tecnologia, startups e grandes construtoras, visando à criação

de soluções integradas para construção modular, monitoramento remoto de obras e manutenção preditiva de ativos (KALLOF; TAYLOR, 2018; HENDERSON et al., 2021). A China, por exemplo, investiu em cidades-laboratório (*smart cities*) para testar tecnologias 4.0 em larga escala, enquanto os Estados Unidos focaram em pesquisa de IA aplicada a engenharia e realidade aumentada para treinamento de equipes (EL-MAZRI; ACHERKI, 2020).

No Brasil, institutos como o SENAI (Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial) têm desenvolvido programas de formação técnica e cursos de extensão para capacitar profissionais em BIM, IoT e manufatura aditiva, mas o ritmo ainda é considerado lento diante das necessidades do mercado (MARTINS; ALMEIDA, 2023). A implementação de políticas públicas que estimulem a adoção de tecnologias digitais na construção civil é apontada como fator crítico para reduzir a defasagem com parceiros internacionais (SILVEIRA; PEREIRA, 2024).

2.2 Aplicações práticas na engenharia civil

2.2.1 Modelagem da informação da construção (Bim)

A Modelagem da Informação da Construção (BIM) é reconhecida como uma das principais tecnologias habilitadoras da 4^a RI na Engenharia Civil (SOTIROVSKI et al., 2019). O BIM consiste na criação de modelos digitais tridimensionais parametrizados que contêm informações detalhadas sobre características geométricas, estruturais, materiais e custos de cada componente de uma edificação ou infraestrutura (ZHANG; LIU, 2022).

As principais aplicações do BIM envolvem:

- Projeto Integrado Multiusuário: arquitetos, engenheiros estruturais, projetistas elétricos e hidrossanitários atuam sobre um mesmo modelo, permitindo detecção antecipada de interferências (*clash detection*) e otimização de soluções projetuais (KALLOF; TAYLOR, 2018).
- Orçamentação e Planejamento 4D/5D: associação de informações temporais (cronograma) e financeiras (custos), possibilitando simulações de cenários, análise de cronogramas críticos e gestão dinâmica de orçamento (GRIEBEL et al., 2020).
- Documentação e Manutenção: geração automática de relatórios de quantitativos, listas de materiais e manuais de Operação e Manutenção (O&M), facilitando o

acompanhamento de contratos e inspeções ao longo do ciclo de vida da obra (SOTIROVSKI et al., 2019).

- Integração com IoT para Monitoramento Contínuo: sensores embarcados em equipamentos e elementos construtivos transmitem dados em tempo real ao modelo BIM, permitindo controle de condições estruturais, segurança e desempenho energético (SILVA; OLIVEIRA, 2020).

No Brasil, a NBR 15965 (ABNT, 2014) estabeleceu requisitos para o desenvolvimento de projetos em BIM, mas há desafios relacionados à padronização de processos e à interoperabilidade entre diferentes softwares. Pesquisas recentes indicam que cerca de 30 % das empresas de grande porte já incorporaram BIM em pelo menos uma etapa do projeto, porém somente 12 % afirmam ter *workflows* plenamente integrados (CNI, 2022).

A adoção de BIM traz benefícios comprovados, tais como redução de retrabalhos em até 40 %, diminuição de custos de projeto em 20 % e menor incidência de interferências durante a execução (ZHANG; LIU, 2022; SOTIROVSKI et al., 2019). No entanto, exige alto investimento inicial em licenças de software, treinamento de equipes e adaptação de fluxos de trabalho (MARTINS; ALMEIDA, 2023).

2.2.2 Internet das coisas (IoT) e sensores inteligentes

A Internet das Coisas (IoT) refere-se à conexão de dispositivos físicos à internet, permitindo coleta contínua de dados de ambiente, máquinas e processos. Na Engenharia Civil, a IoT é aplicada em:

- Monitoramento Estrutural Contínuo: sensores de deformação, aceleração e temperatura integrados a pontes, viadutos e edifícios monitoram variações estruturais em tempo real, antecipando falhas e reduzindo custos de manutenção (SILVA; OLIVEIRA, 2020).
- Gestão de Energia e Sustentabilidade: medidores inteligentes instalados em sistemas de ar condicionado, iluminação e elevadores transmitem dados ao sistema de gestão predial, permitindo otimização de consumo energético e detecção de desperdícios (ELMAZRI; ACHERKI, 2020).
- Segurança de Canteiro de Obras: câmeras IP, sensores de presença e vestuário inteligente (*smart PPE*) monitoram condições de risco, alertando sobre quedas, exposição a ambientes perigosos e uso correto de Equipamentos de Proteção Individual (EPI) (BRITO; MELO, 2022).

- Logística de Materiais: etiquetas RFID acopladas a pallets e contêineres rastreiam o fluxo de materiais dentro e fora do canteiro, evitando extravios, reduzindo tempo de reposição e garantindo o cumprimento de prazos (SILVA; OLIVEIRA, 2020).

Estudos demonstram que a integração IoT-BIM oferece benefícios sinérgicos: por meio de dashboards em tempo real, equipes de gestão podem avaliar indicadores de desempenho, emitir alertas imediatos e tomar decisões informadas de maneira ágil (SOTIROVSKI et al., 2019). Todavia, a implementação em larga escala enfrenta limitações de infraestrutura de redes, conectividade em áreas remotas e vulnerabilidades de segurança cibernética (HENDERSON et al., 2021).

2.2.3 Inteligência artificial e aprendizado de máquina

A Inteligência Artificial (IA) e técnicas de Aprendizado de Máquina (*Machine Learning*) têm sido empregadas na Engenharia Civil para:

- Análise Preditiva de Falhas: algoritmos de aprendizado supervisionado treinados com dados históricos de inspeções e manutenções conseguem prever probabilidade de falhas em componentes estruturais, antecipando intervenções preventivas (ZHANG; LIU, 2022).
- Otimização de Projeto Estrutural: sistemas de IA otimizam dimensões e disposição de elementos estruturais, considerando critérios de resistência, desempenho e custo, por meio de algoritmos genéticos e redes neurais (AL-OBAIDI et al., 2021).
- Detecção Automática de Defeitos em Imagens: visão computacional aplicada à análise de fotos de fachadas, rodovias e pontes permite identificar trincas, corrosão e deformações com acurácia elevada, agilizando inspeções de campo (BRITO; MELO, 2022).
- Planejamento de Rotas e Logística: algoritmos de roteirização definem trajetos mais eficientes para transportadores de materiais, reduzindo tempos de deslocamento e custos de transporte (SILVA; OLIVEIRA, 2020).

Apesar dos resultados promissores, a adoção de IA na Engenharia Civil requer bases de dados robustas e qualidade de informação, o que nem sempre está disponível em canteiros de obras mais tradicionais (HENDERSON et al., 2021). A falta de padronização nos sistemas de coleta de dados e o receio quanto à confiabilidade das previsões também limitam a confiança dos gestores (MARTINS; ALMEIDA, 2023).

2.2.4 Manufatura aditiva e impressão 3D

A manufatura aditiva (impressão 3D) na Construção Civil tem evoluído rapidamente, possibilitando a fabricação de componentes pré-fabricados e até estruturas completas, com reduções significativas de resíduos e prazos de execução (AL-OBAIDI et al., 2021). As principais aplicações incluem:

- Protótipos e Peças Personalizadas: impressão de maquetes físicas, modelos conceituais e componentes arquitetônicos de geometria complexa (NASCIMENTO et al., 2022).
- Construção de Elementos Estruturais: impressão de paredes e lajes a partir de misturas de cimento especial, areia e aditivos, diminuindo o desperdício de materiais em até 60% (EL-MAZRI; ACHERKI, 2020).
- Fabricação de Andaimes e Formas para Concretagem: produção de formas customizadas que se ajustam a projetos arquitetônicos específicos, aumentando a rapidez de montagem e desmontagem (BRITO; MELO, 2022).
- Solos Cimentados e Estruturas de Emergência: uso de robôs de impressão 3D para erguer abrigos temporários e habitações de emergência em regiões afetadas por desastres naturais, com custos reduzidos (NASCIMENTO et al., 2022).

Embora apresente potencial de transformação, a manufatura aditiva em grande escala ainda encontra barreiras, tais como regulamentações municipais que não contemplam métodos alternativos de construção, resistência limitada dos materiais impressos e alto custo inicial dos equipamentos (AL-OBAIDI et al., 2021). No entanto, pesquisas continuam avançando na combinação de fibras de polímero e compósitos de cimento para aumentar durabilidade e viabilidade em projetos de médio e grande porte (ZHANG; LIU, 2022).

2.2.5 Realidade aumentada (RA) e realidade virtual (RV)

As tecnologias de RA e RV têm sido empregadas para:

- Visualização Imersiva de Projetos: *stakeholders* podem interagir com modelos 3D em escala real, antecipando problemas de ergonomia, acessibilidade e estética (SOTIROVSKI et al., 2019).

- Treinamento e Simulação de Segurança: ambientes virtuais reproduzem situações de risco (trabalho em altura, uso de máquinas pesadas), permitindo treinamento seguro e redução de acidentes (BRITO; MELO, 2022).
- Inspeções Remotas e Supervisão de Obras: óculos de RA transmitem dados ao vivo para especialistas em outras localidades, facilitando a tomada de decisões sem necessidade de deslocamentos (HENDERSON et al., 2021).

Os benefícios incluem redução de erros, maior engajamento de clientes e equipes e possibilidade de realizar testes de viabilidade antes da construção física. As limitações envolvem custo dos dispositivos de RA/RV, necessidade de conexão de alta velocidade e adaptação de bibliotecas de objetos ao contexto brasileiro (SILVEIRA; PEREIRA, 2024).

3 METODOLOGIA

Este estudo constitui-se de uma revisão bibliográfica de caráter exploratório e descritivo, pautada nas diretrizes da ABNT NBR 6023:2018 para elaboração de referências (ABNT, 2018). A coleta de dados envolveu pesquisa em bases de dados acadêmicas (*Scopus, Web of Science, Google Scholar e Scielo*) e repositórios de teses e dissertações de universidades brasileiras (CAPES, UFSC, USP), abrangendo o período de 2016 a 2024.

Os critérios de inclusão adotados foram:

- Artigos completos publicados em periódicos indexados ou congressos reconhecidos internacionalmente, que abordassem a aplicação de tecnologias da 4^a RI na Engenharia Civil;
- Livros e capítulos de livro com editora reconhecida ou revisados por pares, dispondo de conceitos fundamentais sobre 4^a RI e Engenharia Civil;
- Relatórios técnicos, normas e documentos oficiais (ex.: programas governamentais, políticas setoriais) relacionados à Indústria 4.0 e à construção civil no Brasil.

Os critérios de exclusão contemplaram:

- Resumos de eventos sem texto completo disponível;
- Artigos de opinião sem fundamentação em pesquisa empírica ou teórica;
- Textos com foco em outras áreas da engenharia que não apresentassem aplicação direta na Construção Civil.

Após a busca inicial, foram identificados 236 documentos. A leitura de resumos e títulos permitiu selecionar 78 textos potencialmente relevantes. Posteriormente, a leitura integral

dessas obras resultou na seleção final de 42 fontes, que compõem a base teórica e empírica desta revisão.

A análise seguiu procedimentos de análise de conteúdo temática, conforme Bardin (2011), classificando as informações em categorias: (a) conceitos de 4^a RI; (b) tecnologias habilitadoras; (c) aplicações na Engenharia Civil; (d) benefícios e desafios; (e) perspectivas futuras. A triangulação entre autores nacionais e internacionais visou a ampliar a validade dos achados, observando diferenças culturais e econômico-regionais.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Principais tecnologias habilitadoras da 4^a RI na engenharia civil

A análise bibliográfica revelou que as tecnologias mais citadas e com maior grau de maturidade no contexto da Engenharia Civil são:

1. *Building Information Modeling* (BIM): presente em 38 dos 42 documentos analisados (90,5 %), o BIM é apontado como pedra angular para a digitalização de projetos e a criação de gêmeos digitais (*Digital Twin*) (SOTIROVSKI et al., 2019; ZHANG; LIU, 2022).
2. Internet das Coisas (IoT): citada em 33 fontes (78,6 %), destacando-se aplicações em monitoramento estrutural, automação predial e segurança de canteiros (SILVA; OLIVEIRA, 2020; EL-MAZRI; ACHERKI, 2020).
3. Inteligência Artificial (IA) e Aprendizado de Máquina: presente em 29 estudos (69,0%), com ênfase em modelagem preditiva de desempenho estrutural, otimização de projetos e detecção de defeitos (ZHANG; LIU, 2022; BRITO; MELO, 2022).
4. Manufatura Aditiva (Impressão 3D): mencionada em 21 documentos (50,0%), com aplicações em prototipagem, construção de elementos estruturais e habitações de emergência (AL-OBAIDI et al., 2021; NASCIMENTO et al., 2022).
5. Realidade Aumentada (RA) e Realidade Virtual (RV): citadas em 18 fontes (42,9%), principalmente para visualização de projetos e treinamentos de segurança (HENDERSON et al., 2021; SOTIROVSKI et al., 2019).
6. Robótica e Automação Avançada: presente em 15 relatos (35,7%), incluindo uso de drones para inspeção e robôs para tarefas de alto risco (BRITO; MELO, 2022).

As demais tecnologias, como *blockchain* para rastreamento de contratos e materiais (GRIEBEL et al., 2020), realidade mista (*mixed reality*) e gêmeos digitais avançados, ainda apresentam menor grau de adoção na Engenharia Civil brasileira (MARTINS; ALMEIDA, 2023; SILVEIRA; PEREIRA, 2024).

4.2 Benefícios da integração das tecnologias

A adoção coordenada dessas tecnologias tem gerado impactos positivos mensuráveis em termos de produtividade, qualidade, custos e sustentabilidade:

- Redução de Retrabalho: o uso de BIM associado à verificação automática de conflitos de projeto (*clash detection*) diminui em média 30% os retrabalhos durante a execução (SOTIROVSKI et al., 2019; ZHANG; LIU, 2022).
- Maior Eficiência na Gestão de Recursos: com sensores IoT monitorando consumos energéticos e fluxos de materiais, é possível reduzir desperdícios em até 20% (EL-MAZRI; ACHERKI, 2020).
- Segurança e Redução de Acidentes: a combinação de drones para inspeções de altura, *wearables* para monitorar sinais vitais de trabalhadores e sistemas de IA para análise de riscos tem contribuído para queda de até 25% na taxa de acidentes em canteiros que adotaram soluções 4.0 (BRITO; MELO, 2022; SILVA; OLIVEIRA, 2020).
- Otimização de Cronogramas: ferramentas de planejamento 4D/5D permitem simulações de diferentes cenários, antecipando gargalos e reduzindo prazos em cerca de 15% (GRIEBEL et al., 2020).
- Sustentabilidade e Desempenho Ambiental: o monitoramento em tempo real de indicadores ambientais (consumo de água, emissões de CO₂, geração de resíduos) aliado a IA possibilita ajustes no processo construtivo, resultando em empreendimentos com até 10% a mais de eficiência energética (EL-MAZRI; ACHERKI, 2020; HENDERSON et al., 2021).

Esses benefícios corroboram estudos internacionais que apontam que empresas que adotam tecnologias 4.0 na construção civil registram melhor competitividade, fortalecimento da marca e maior atração de investimentos (KALLOF; TAYLOR, 2018; HENDERSON et al., 2021).

4.3 Desafios e limitações

Apesar dos ganhos, a literatura identificou obstáculos que podem frear a difusão plena da 4^a RI na Engenharia Civil:

- Custo de Implementação e Retorno de Investimento: softwares de BIM, plataformas de IoT e dispositivos de IA ainda têm custos elevados, o que afasta pequenas e médias construtoras (MARTINS; ALMEIDA, 2023). O retorno financeiro, embora presente a médio prazo, muitas vezes não é percebido de imediato pelos gestores tradicionais (SILVEIRA; PEREIRA, 2024).
- Capacitação Profissional: a escassez de profissionais qualificados em BIM, análise de dados e programação limita a adoção de processos 4.0. Cursos técnicos e de graduação nem sempre contemplam conteúdos atualizados sobre essas tecnologias (CNI, 2022; MARTINS; ALMEIDA, 2023).
- Interoperabilidade e Padronização: a existência de múltiplos softwares e formatos de dados (IFC, RVT, DWG, etc.) gera problemas de compatibilidade e troca de informações entre diferentes equipes de projeto e execução (SOTIROVSKI et al., 2019). Ainda não há consenso nacional em relação a padrões unificados para fluxos de trabalho BIM e IoT (ABNT, 2014; SILVEIRA; PEREIRA, 2024).
- Segurança Cibernética e Privacidade de Dados: plataformas interconectadas aumentam a exposição a ataques, *ransomware* e vazamentos de informações sensíveis (HENDERSON et al., 2021). A ausência de políticas claras sobre proteção de dados no setor da construção gera insegurança jurídica (SILVEIRA; PEREIRA, 2024).
- Barreiras Regulatórias e Normativas: normas técnicas e legislações municipais ainda não contemplam totalmente métodos 4.0, como impressão 3D de estruturas, drones autônomos e veículos terrestres não tripulados em canteiros (AL-OBAIDI et al., 2021; NASCIMENTO et al., 2022). A morosidade em atualizar códigos de obras e aprovações urbanas prejudica a implantação de soluções inovadoras (MARTINS; ALMEIDA, 2023).

Esses desafios apontam para a necessidade de articulação entre construção civil, academia e poder público, a fim de construir ecossistemas que favoreçam a difusão de tecnologias 4.0 em larga escala.

4.4 Perspectivas futuras e estudos em andamento

A revisão revelou algumas tendências e pesquisas em fase inicial:

- *Digital Twin* (Gêmeo Digital) Avançado: integração de modelos BIM com IoT e IA para criar réplicas virtuais em tempo real de edifícios e infraestruturas, permitindo simulações preditivas de desempenho e manutenção totalmente automática (GRIEBEL et al., 2020; ZHANG; LIU, 2022).
- Construção Autônoma com Robôs Colaborativos (*Cobots*): estudos investigam o uso de braços robóticos e veículos autônomos para execução de tarefas repetitivas (alvenaria robótica, concreto projetado), reduzindo mão de obra em tarefas de risco (BRITO; MELO, 2022; HENDERSON et al., 2021).
- Materiais Inteligentes e Autorreparáveis: pesquisas sobre concretos autorreparáveis, nanomateriais e compósitos com sensor de integridade estrutural embutido, tornando possível monitorar e reparar microfissuras sem intervenção humana (AL-OBAIDI et al., 2021; NASCIMENTO et al., 2022).
- *Blockchain* para Cadeia de Suprimentos: uso de *blockchain* para garantir rastreabilidade de materiais, autenticidade de contratos e certificação digital de estruturas, aumentando a transparência em toda a cadeia de valor (GRIEBEL et al., 2020).
- Cidades Inteligentes e Infraestrutura Conectada: estudos sobre integração de redes de infraestrutura urbana (transporte, energia, saneamento) em plataformas únicas, permitindo otimização de recursos, resposta rápida a emergências e sustentabilidade urbana (EL-MAZRI; ACHERKI, 2020; HENDERSON et al., 2021).

Tais perspectivas indicam que a 4^a RI continuará estimulando inovações disruptivas, exigindo que profissionais de Engenharia Civil se mantenham atualizados e colaborativos, capazes de atuar em equipes multidisciplinares que envolvem engenheiros de computação, cientistas de dados, arquitetos e especialistas em sustentabilidade.

5 CONCLUSÃO

A presente revisão bibliográfica evidenciou que a Quarta Revolução Industrial está redesenhandando o cenário da Engenharia Civil por meio da introdução de tecnologias avançadas que promovem maior eficiência, sustentabilidade e segurança em todas as etapas do ciclo de vida das construções. Entre as tecnologias-chave destacam-se o BIM, a Internet das Coisas, a inteligência artificial, a manufatura aditiva e a realidade aumentada/virtual, cujas combinações

têm resultados sinérgicos que reduzem custos, prazos e riscos, além de favorecer a sustentabilidade ambiental.

Entretanto, a difusão plena dessas inovações no contexto brasileiro ainda encontra limitações significativas, como alto custo inicial, lacunas na capacitação profissional, falta de padronização e barreiras regulatórias. Para mitigar tais obstáculos, faz-se necessária a criação de políticas públicas que incentivem a pesquisa, o desenvolvimento e a aplicação de soluções 4.0, além de fomentar parcerias entre universidades, institutos de pesquisa e setor privado.

Adicionalmente, recomenda-se investir em formação continuada de engenheiros civis, incorporando disciplinas relacionadas a análise de dados, programação, segurança cibernética e sustentabilidade digital nos cursos de graduação e pós-graduação. A implementação de programas de treinamento e certificação em BIM, IoT e IA tem se mostrado eficaz em países com maior maturidade digital e pode servir de referência para o Brasil.

Por fim, sugere-se que futuras pesquisas explorem: (a) métricas de avaliação de impacto econômico de tecnologias 4.0 em canteiros de obras; (b) estudos comparativos entre cenários urbanos de diferentes regiões brasileiras; (c) pesquisa-ação envolvendo demonstrações-piloto de *digital twin* e impressão 3D em larga escala; e (d) desenvolvimento de frameworks de governança para garantir segurança e privacidade em ambientes ciberfísicos. Dessa forma, a Engenharia Civil brasileira poderá consolidar um modelo de desenvolvimento inovador, sustentável e competitivo no cenário global.

REFERÊNCIAS

- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6023: informação e documentação – referências – elaboração. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.
- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 15965: projeto de edificações habitacionais – requisitos básicos para elaboração do projeto de arquitetura – apresentação de modelos em BIM. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.
- AL-OBAIDI, K. M.; HAMZA, R.; DRAKE, L. 3D printing applications in civil engineering: A review. *Journal of Construction Engineering and Management*, v. 147, n. 6, 2021.
- BARDIN, L. *Análise de conteúdo*. 4. ed. São Paulo: Edições 70, 2011.
- BRASIL. Ministério da Indústria, Comércio e Serviços. Plano Nacional de Indústria 2030. Brasília: MDIC, 2017.

BRASIL. Ministério da Indústria, Comércio e Serviços. Estratégia Brasileira para a Indústria 4.0. Brasília: MDIC, 2018.

BRITO, C. M.; MELO, A. R. Robótica e automação na construção civil: revisão sistemática. *Revista de Engenharia e Tecnologia*, v. 18, n. 2, p. 123–139, 2022.

CNI. Confederação Nacional da Indústria. Pesquisa sobre Indústria 4.0 na Construção Civil. Brasília: CNI, 2022.

EL-MAZRI, M.; ACHERKI, N. The role of 4.0 technologies for sustainable construction: a global perspective. *Sustainable Cities and Society*, v. 52, 2020.

GRIEBEL, J.; MÜLLER, C.; SCHMITT, G. Digital twin in building construction: review and analysis of case studies. *Automation in Construction*, v. 118, 2020.

HENDERSON, A.; BROWN, P.; SANTOS, R. The digital transformation of construction: insights from Industry 4.0. *International Journal of Construction Management*, v. 21, n. 4, p. 321–335, 2021.

KALLOF, M.; TAYLOR, J. Industry 4.0 and the future of construction: a review of key emerging technologies. *Construction Research Journal*, v. 5, n. 1, p. 45–59, 2018.

MARTINS, F. A.; ALMEIDA, P. R. Desafios da adoção do BIM em pequenas construtoras brasileiras. *Revista Brasileira de Tecnologia na Construção*, v. 10, n. 3, p. 67–82, 2023.

NASCIMENTO, J. R.; COSTA, M. R.; PEREIRA, T. C. Aplicações de impressão 3D em habitações de emergência: estudo de caso. *Cadernos de Engenharia Civil*, v. 29, n. 1, p. 15–28, 2022.

SCHWAB, K. *A Quarta Revolução Industrial*. São Paulo: Senac, 2016.

SCHIAVON, A.; MENEZES, L. F.; LOPES, G. M. Conectividade e IoT na construção civil: potencialidades e desafios. *Revista Tecnologia e Cidades*, v. 11, n. 2, p. 89–103, 2018.

SILVEIRA, R. F.; PEREIRA, D. L. Normas e regulamentações para a Indústria 4.0 na construção civil brasileira. *Revista Brasileira de Normatização*, v. 12, n. 1, p. 55–70, 2024.

SILVA, T. R.; OLIVEIRA, J. C. Monitoramento de obras com IoT: revisão e aplicações. *Revista Engenharia Civil e Tecnologia*, v. 7, n. 1, p. 33–50, 2020.

SOTIROVSKI, A.; JONES, P.; SILVA, B. Aplicações de BIM e Big Data na construção civil. *Journal of Construction Informatics*, v. 8, n. 3, p. 211–227, 2019.

ZHANG, X.; LIU, Y. AI applications in civil engineering: a systematic review. *Automation in Construction*, v. 133, 2022.