

## MONITORAMENTO DIGITAL DE PROGRESSO EM OBRAS DE INFRAESTRUTURA: REVISÃO DO ESTADO DA ARTE, DESAFIOS E OPORTUNIDADES DE AUTOMAÇÃO

Digital progress monitoring in infrastructure projects: state-of-the-art review, challenges, and automation opportunities

**Rafaela Oliveira Rey**

Universidade Federal da Bahia | Salvador, Bahia | rafaelarey2@gmail.com

**Reymard Sávio Sampaio de Melo**

Universidade Federal da Bahia | Salvador, Bahia | reymard.savio@ufba.br

**Dayana Bastos Costa**

Universidade Federal da Bahia | Salvador, Bahia | dayanabcosta@ufba.br

### RESUMO

Este artigo investiga como tecnologias digitais podem aprimorar o monitoramento de progresso em obras de infraestrutura, superando limitações dos métodos tradicionais baseados em medições manuais e registros fragmentados. O objetivo é identificar métodos atuais, compreender desafios práticos e propor oportunidades de automação do processo. O método de pesquisa adotado foi o Design Science Research (DSR), com foco na etapa de conscientização do problema. Foram realizados dois procedimentos: (i) uma revisão sistemática da literatura sobre monitoramento digital de progresso; e (ii) um estudo exploratório em uma obra de infraestrutura rodoviária, com análise documental, entrevistas e observação direta. Os resultados apontam limitações no uso de dados fragmentados, dificuldades na validação do progresso físico e baixa integração entre planejamento e execução. A partir desses achados, são propostas melhorias com base na integração de BIM 4D, técnicas de fotogrametria e dashboards interativos. Conclui-se que há potencial para um fluxo de Planejamento e Controle da Produção (PCP) mais confiável, automatizado e alinhado à realidade do canteiro. Esta pesquisa contribui ao apresentar um diagnóstico prático que orienta o desenvolvimento de artefatos tecnológicos na etapa seguinte da DSR.

**Palavras-chave:** Monitoramento de progresso; Tecnologias digitais; Infraestrutura.

### ABSTRACT

*This paper investigates how digital technologies can enhance progress monitoring in infrastructure projects by overcoming the limitations of traditional manual and fragmented methods. The main objective is to identify current methods, understand practical challenges, and propose opportunities for automating the process. The research follows the Design Science Research (DSR) methodology, focusing on the problem awareness phase. Two procedures were carried out: (i) a systematic literature review on digital construction progress monitoring; and (ii) an exploratory study in a highway infrastructure project, involving document analysis, interviews, and direct observation. The results revealed key challenges: fragmented information flows, difficulties in validating physical progress, and poor integration between planning and execution. Based on these findings, improvements are proposed through the integration of 4D BIM, photogrammetry, and interactive dashboards. The study concludes that digital automation can support a more reliable, integrated, and agile Production Planning and Control (PPC) process aligned with on-site conditions. This research contributes by offering a practical diagnosis that informs the design of digital artifacts in the next stage of the DSR.*

**Keywords:** Progress monitoring; Digital technologies; Infrastructure.

## 1 INTRODUÇÃO

O monitoramento eficaz do avanço físico das obras é essencial para assegurar o cumprimento de prazos e orçamentos, ao fornecer uma representação precisa do progresso em relação ao planejamento inicial e subsidiar decisões estratégicas (Pal *et al.*, 2024). Trata-se de uma das tarefas mais complexas da gestão de projetos, dada a interdependência entre atividades e a elevada variabilidade da construção (Musarat *et al.*, 2024). Tradicionalmente, esse processo baseia-se em medições manuais e relatórios suscetíveis a erros, lentos e pouco eficazes na comunicação entre os agentes do projeto (Pal *et al.*, 2024; Musarat *et al.*, 2024). À medida que a complexidade dos empreendimentos cresce, os métodos convencionais tornam-se ainda mais limitados em termos de eficiência, segurança e competitividade.

Nesse cenário, tecnologias emergentes têm sido exploradas para automatizar o monitoramento, integrando sensores, imagens aéreas, conectividade sem fio e modelos BIM, com o objetivo de aumentar a acurácia, reduzir o esforço humano e melhorar a colaboração entre os envolvidos (Golparvar-Fard *et al.*, 2009; Duarte-Vidal *et al.*, 2021; Braun *et al.*, 2020; Vincke & Vergauwen, 2020; Sgrenzaroli *et al.*, 2022; Pal *et al.*, 2024; Davletshina *et al.*, 2024).

Embora diversas tecnologias estejam sendo testadas na construção civil, a adoção efetiva no contexto das obras de infraestrutura ainda enfrenta desafios. Faltam estudos que combinem uma visão sistêmica sobre o estado da arte com a análise prática do fluxo de informações e das limitações reais enfrentadas em campo. Este trabalho busca preencher essa lacuna ao integrar uma revisão sistemática com um estudo de caso aplicado. Assim, este artigo responde à seguinte questão de pesquisa: quais são os principais desafios e oportunidades de automação no monitoramento digital do progresso físico em obras de infraestrutura?

## 2 MÉTODO DE PESQUISA

A pesquisa está inserida na abordagem do Design Science Research (DSR), conforme proposta por Van Aken (2004) e Van Aken & Romme (2009), por sua orientação à resolução de problemas reais por meio da construção de artefatos. Na etapa de conscientização do problema, foram utilizados dois procedimentos metodológicos complementares:

- Uma revisão sistemática da literatura, com delineamento baseado em Osadcha *et al.* (2023), nas bases *Web of Science* e *ScienceDirect*, visando mapear métodos e lacunas atuais.
- Um estudo exploratório de campo, realizado em uma obra rodoviária no Rio de Janeiro, envolvendo análise documental, entrevistas semiestruturadas com as equipes de planejamento e produção, e observação participante.

Esses dados foram analisados qualitativamente para identificar barreiras e oportunidades práticas para a aplicação de sistemas automatizados de monitoramento de progresso. Com base nessa abordagem, o estudo estrutura-se em quatro etapas: (1) conscientização do problema; (2) concepção e desenvolvimento do método; (3) implementação e teste; e (4) avaliação e conclusão. Este artigo apresenta os resultados parciais da pesquisa, com foco na etapa de conscientização.

Figura 1: Delineamento da Pesquisa.

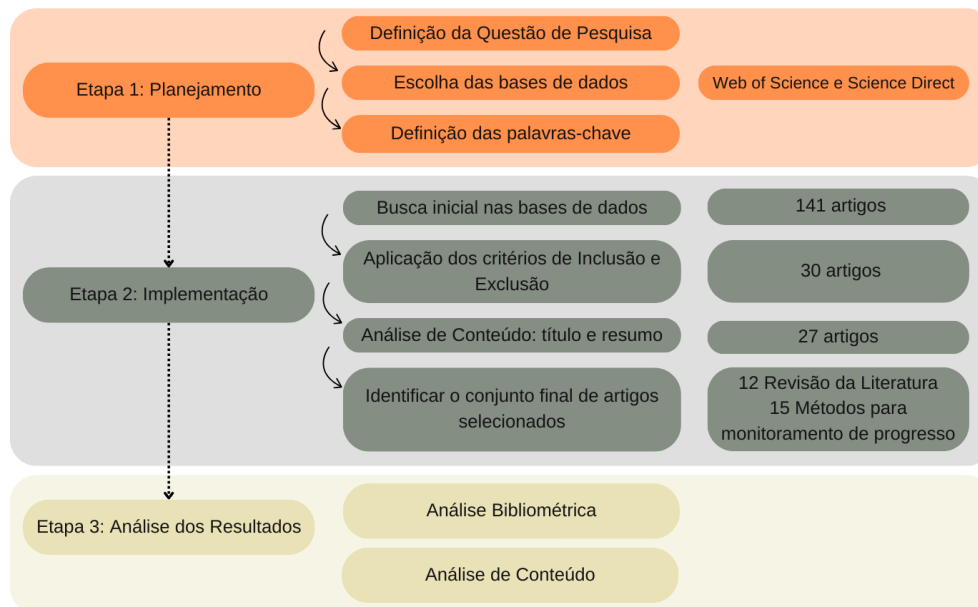


Fonte: autores

## 2.1 REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

A Revisão Sistemática da Literatura foi realizada seguindo três etapas: Planejamento, Implementação e Análise de Resultados, conforme apresentado na Figura 2.

Figura 2: Etapas da Revisão Sistemática da Literatura



Para a revisão sistemática, utilizaram-se os seguintes descritores: “Construction progress monitoring” OR “Progress monitoring” AND “Digital technology” OR “Building Information Modeling (BIM)” OR “Artificial Intelligence” OR “Machine Learning” OR “Image processing” OR “Photogrammetry”.

Na etapa de busca, identificaram-se 107 artigos na *Web of Science* e 34 na *ScienceDirect*. Após aplicação dos critérios de inclusão (artigos completos, em periódicos ou congressos relevantes) e exclusão (documentos indisponíveis, de áreas não relacionadas como saúde e geografia, ou duplicados), restaram 30 publicações. Após análise de conteúdo, três artigos foram excluídos por não abordarem o monitoramento de progresso, resultando em um *corpus* final de 27 artigos, sendo 12 revisões de literatura e 15 estudos com propostas metodológicas ou soluções automatizadas. A análise foi estruturada em duas etapas: análise bibliométrica e análise de conteúdo, sendo esta última o foco dos resultados apresentados neste artigo.

## 2.2 ESTUDO EXPLORATÓRIO

Para a condução do estudo de caso, foi selecionada uma empresa com atuação consolidada em obras de infraestrutura e já inserida no contexto do uso de ferramentas digitais de monitoramento. A Empresa A, escolhida para o estudo, é uma das maiores concessionárias da América Latina, com atuação nas áreas de rodovias, transporte sobre trilhos, barcas e mobilidade urbana, incluindo 11 concessões estaduais e federais no setor rodoviário.

A obra analisada localiza-se na Via Dutra (BR-116), no estado do Rio de Janeiro, abrangendo um trecho de 16 km (8 km por sentido), que inclui a construção de 93 contenções e 24 obras de arte especiais. A execução está sob responsabilidade da Empresa B, contratada pela Empresa A, com mais de duas décadas de experiência em infraestrutura.

O estudo teve início em fevereiro de 2025, com a coleta de dados estruturada em três fontes principais: análise documental, entrevistas semiestruturadas e observação participante. Inicialmente, foram analisados documentos como relatórios de progresso, planilhas de medição e cronogramas. Em seguida, realizaram-se entrevistas remotas com as equipes de planejamento e produção da Empresa A, visando compreender o sistema de Planejamento e Controle da Produção (PCP) adotado.

Durante visita ao canteiro, foi validado o fluxo atual do PCP por meio de reuniões com a equipe da Empresa A e observação direta dos processos. Também foi conduzida uma reunião com representantes da Empresa

B, com o objetivo de identificar os principais desafios enfrentados pela construtora no monitoramento da obra e levantar oportunidades de melhoria.

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 3.1 ANÁLISE DE CONTEÚDO DA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

A automatização do monitoramento do progresso segue lógica semelhante ao processo tradicional: inicia-se com a geração de uma linha de base de desempenho, o modelo planejado (*as-planned*); posteriormente, registra-se o progresso real por meio do modelo construído (*as-built*), geralmente obtido a partir de nuvens de pontos; por fim, ambos os modelos são comparados para identificar desvios de execução (Mahami *et al.*, 2019; Qureshi *et al.*, 2023; Pal *et al.*, 2024).

Diversas pesquisas vêm propondo soluções voltadas à automação dessas etapas, com o uso de sensores, imagens aéreas não tripuladas, conectividade sem fio e ferramentas BIM (Qureshi *et al.*, 2023). De forma sintética, o processo de monitoramento digital baseia-se em três fases: (1) elaboração do modelo *as-planned*; (2) geração do modelo *as-built*; e (3) comparação entre ambos. As tecnologias empregadas em cada uma dessas fases são discutidas nas seções seguintes, com base nos achados da revisão sistemática da literatura.

#### Etapa 1: Gerar o modelo planejado

A literatura aponta o BIM como a metodologia central na automação dos processos da Construção 4.0 (Qureshi *et al.*, 2023; Sacks *et al.*, 2020). Sacks *et al.* (2020) o definem como uma tecnologia de modelagem integrada a processos para produzir, comunicar e analisar modelos construtivos. Em uma aplicação ideal, o modelo BIM consolida informações de materiais, métodos executivos e cronograma, indo além da representação geométrica ao incorporar dados semânticos que promovem a gestão da informação, a colaboração e a integração digital (Braun *et al.*, 2020; Rahimian *et al.*, 2020).

No contexto do monitoramento de progresso, o modelo BIM é utilizado para gerar o modelo do estado planejado da obra (*as-planned*), quando vinculado ao cronograma (Rahimian *et al.*, 2020). Esse modelo constitui a base de comparação com o modelo construído (*as-built*), permitindo a avaliação do desempenho por meio de sobreposição ou análise de desvios (Mahami *et al.*, 2019; Qureshi *et al.*, 2023). Todos os estudos analisados nesta revisão que propõem sistemas de monitoramento digital utilizam o modelo BIM como referência do modelo *as-planned* (Maalek *et al.*, 2015; Mahami *et al.*, 2019; Rahimian *et al.*, 2020; Braun & Borrmann, 2019; Braun *et al.*, 2020; Vincke & Vergauwen, 2020; Sgrenzaroli *et al.*, 2022; Pal *et al.*, 2024).

Apesar de sua presença recorrente, há escassa discussão sobre os requisitos operacionais ou tecnológicos que viabilizem a comparação eficaz entre modelos *as-planned* e *as-built*. A principal limitação identificada refere-se ao nível de detalhamento ou *Level of Development* (LoD) dos modelos BIM, fator crítico para associar as atividades do cronograma aos elementos do modelo e, por consequência, para detectar o progresso (Han *et al.*, 2015; Pal *et al.*, 2024). O LoD varia de 100 a 500, sendo que os níveis mais elevados (400–500), adequados para controle operacional, são raramente adotados em projetos convencionais (Han *et al.*, 2015).

Para mitigar essa limitação, Han *et al.* (2015) propõem uma ontologia formalizada para o sequenciamento construtivo, que permite estimar o progresso mesmo em modelos incompletos, por meio da inferência de relações entre atividades e elementos representados. Pal *et al.* (2024), por sua vez, destacam a dificuldade de realizar o monitoramento em nível de atividade quando múltiplas tarefas do cronograma são vinculadas a um único elemento BIM — situação comum devido ao baixo nível de detalhamento dos elementos nos modelos. Essa prática compromete a precisão do acompanhamento, que frequentemente só pode ser realizado após a finalização de todas as atividades relacionadas (Pal *et al.*, 2024; Han *et al.*, 2015).

Do ponto de vista gerencial, a obtenção de informações binárias de progresso (“concluído” ou “não concluído”) compromete a identificação precoce de atrasos e a tomada ágil de decisões (Pal *et al.*, 2024). Assim, embora pouco discutido na literatura, o ajuste do nível de detalhamento dos elementos no modelo BIM às necessidades do monitoramento de obra se apresenta como etapa essencial para a eficácia dos sistemas automatizados de controle de progresso.

## **Etapa 2: Gerar o modelo construído**

A segunda etapa crucial no monitoramento automatizado do progresso de obras envolve a criação do modelo construído (*as-built*) através da coleta e processamento de dados de campo para gerar uma nuvem de pontos 3D. Esta representação temporal específica do progresso é, subsequentemente, comparada ao modelo BIM (*as-planned*). Diversas tecnologias são empregadas para a coleta de dados, incluindo vídeo, imagens digitais, escaneamento 3D e sensoriamento, cada uma com fatores que impactam a qualidade do monitoramento.

A fotogrametria, utilizando câmeras digitais ou drones, é amplamente aplicada, reconstruindo nuvens de pontos 3D a partir de múltiplas imagens. A qualidade da reconstrução é influenciada pelo número e sobreposição das imagens, e a resolução da escala é um desafio comum, frequentemente resolvido manualmente. Mahami *et al.* (2019) propuseram soluções baseadas em fotogrametria de curta distância e visão computacional para automatizar a detecção de alvos e otimizar o processo, alcançando alta precisão. Vincke e Vergauwen (2020) também buscaram aprimorar o georreferenciamento, propondo um método semiautomatizado com um módulo de referência para reduzir o tempo de processamento e eliminar problemas de obstrução de pontos de controle.

Outro desafio significativo na geração de modelos *as-built* é a oclusão de elementos. Braun *et al.* (2020) sugerem o uso da relação de precedência entre atividades, inferindo a existência de elementos não visíveis com base em atividades sucessoras detectadas e informações do cronograma.

Embora a fotogrametria seja a técnica predominante, a varredura a laser também é utilizada para obter nuvens de pontos 3D de alta precisão. Contudo, essa técnica é mais cara, requer operadores qualificados e possui um processo de coleta e processamento mais demorado em comparação com a fotogrametria aérea. A revisão da literatura não identificou o uso de rastreamento e sensoriamento ou videogrametria para a coleta de dados no contexto da geração de modelos *as-built* para monitoramento de progresso de obras.

Em suma, a literatura explora diversas técnicas e desafios na geração de modelos *as-built* para o monitoramento automatizado do progresso de obras, com foco significativo na fotogrametria e na busca por soluções para otimizar a precisão, a eficiência e lidar com as limitações como a oclusão.

## **Etapa 3: Comparar modelo BIM planejado com modelo construído**

A terceira e última etapa do monitoramento automatizado do progresso de obras consiste na comparação entre os modelos *as-planned* e *as-built* para extrair informações sobre o avanço da construção. Pal *et al.*, 2024 apontam duas lacunas metodológicas principais: a falta de métodos para monitorar o progresso em nível de atividade e a ausência de métodos para relatar a conclusão parcial do progresso. Essas lacunas estão intrinsecamente ligadas ao nível de detalhamento do modelo BIM *as-planned* e às técnicas empregadas na etapa de comparação.

Analisando estudos recentes (Rahimian *et al.*, 2020; Braun *et al.*, 2020; Sgrenzaroli *et al.*, 2022; Pal *et al.*, 2024), observa-se um crescente uso de algoritmos informados e treinados, combinados com métodos de classificação, para identificar atividades executadas ou em andamento. Contudo, apenas Pal *et al.* (2024) propuseram um método para estimar o percentual de avanço das atividades.

Rahimian *et al.* (2020) apresentaram um protótipo de sistema que integra BIM e realidade virtual para processar imagens do canteiro, remover objetos indesejados e reconhecer características da edificação, sobrepondo essas informações ao modelo BIM em um ambiente virtual. A técnica *Random Sample Consensus* (RANSAC) é utilizada para inferir a presença de elementos em ambas as realidades. Embora represente um avanço na integração de visão computacional, processamento de imagens, BIM e realidade virtual, o sistema não reporta o progresso em nível de atividade nem define percentuais parciais de progresso.

Braun *et al.* (2020) propuseram uma abordagem baseada em aprendizado de máquina para detecção de objetos, verificando o estado dos elementos (construído, planejado, em construção). Além do método de Estrutura a partir do Movimento ou *Structured-from-Motion* (SfM) para geração da nuvem de pontos, eles empregam algoritmos com informações de dependência e cronograma para facilitar a identificação de elementos esperados, considerando também a cor e utilizando uma Rede Neural Convolutiva ou *Convolutional Neural Network* (CNN) treinada para reconhecimento de padrões em imagens 2D. Embora combinem técnicas baseadas em ocupação e aparência (conforme categorizado por Pal *et al.*, 2024), o método ainda não quantifica o avanço parcial das atividades.

Em contrapartida, Pal *et al.* (2024) propuseram um método para medir precisamente o percentual de conclusão das atividades, implementado em um sistema de monitoramento de progresso em nível de atividade. O método utiliza um modelo BIM 4D, alinha a nuvem de pontos *as-built* com o modelo *as-planned*, e compara-os usando uma abordagem baseada em ocupação para verificar o início das atividades. Vistas ortográficas são geradas,

seguidas por segmentação semântica treinada para detecção de progresso, criando máscaras de segmentação por atividade. O percentual de progresso é calculado pela razão entre a área da máscara e a área total da face do elemento na imagem ortográfica, transferindo as informações semânticas de progresso para os modelos as-built e as-planned para visualização 3D.

A revisão sistemática revelou que a maioria dos estudos se concentra em aspectos tecnológicos, com forte ênfase em fotogrametria, nuvens de pontos e integração com modelos BIM. Entretanto, poucos trabalhos abordam as exigências operacionais para aplicação dessas soluções em obras reais, especialmente no nível de atividade. Persistem lacunas quanto à definição de critérios para quantificação parcial de progresso e à adaptação dos modelos BIM ao nível de detalhamento necessário (LoD 400 ou superior).

## 3.2 ESTUDO EXPLORATÓRIO

### Estado atual do sistema de Planejamento e Controle

O atual processo de PCP da obra em análise envolve a colaboração entre a empresa contratante (Empresa A) e a contratada (Empresa B), operando em dois níveis: planejamento de longo e curto prazo. A análise deste estudo se concentra na perspectiva da contratante.

O processo se inicia com a elaboração da linha de base do planejamento de longo prazo pela Empresa A, com aprovação da Empresa B. Semanalmente, a Empresa B define as atividades de curto prazo, comunicando-as à contratante por e-mail às segundas-feiras. Reuniões de planejamento ocorrem às terças-feiras, envolvendo equipes de planejamento e produção de ambas as empresas para discutir resultados da semana anterior e o plano da semana corrente. Paralelamente, a equipe de inspeção de qualidade da Empresa A realiza o acompanhamento em campo, registrando informações em fichas de verificação no sistema *Fulcrum*, utilizando *tablets*. A Empresa B atualiza semanalmente o planejamento de longo prazo com base nos resultados da produção, utilizando-o como referência para o planejamento da semana seguinte e enviando-o à Empresa A. Mensalmente, a Empresa B envia uma planilha de medição para análise, aprovação e pagamento pela Empresa A, sendo as fichas de verificação utilizadas para conferência.

As principais ferramentas empregadas no PCP incluem: relatórios semanais em PDF com a lista de atividades, o sistema *Fulcrum* para fichas de verificação segmentadas, imagens aéreas e nuvem de pontos para visualização do progresso, planilhas eletrônicas para medição mensal e o *MSPProject* para o cronograma de longo prazo.

A equipe aponta como principal problema a baixa aderência entre o planejamento de curto prazo e a execução real, comprometendo a confiabilidade do plano e a tomada de decisão. A falta de validação objetiva das atividades planejadas e executadas pode contribuir para essa inconsistência. A análise do fluxo de trabalho revela três desafios importantes:

- Fragmentação das informações: O uso de múltiplas ferramentas não integradas, com informações circulando principalmente por e-mail em arquivos independentes, dificulta a rastreabilidade, a análise automatizada e o controle em tempo real.
- Dificuldade na validação do progresso físico: A validação depende de uma checagem cruzada manual e trabalhosa entre a planilha de medição e as fichas de verificação, sendo suscetível a divergências.
- Limitação na visualização e tomada de decisão: Apesar do uso de drones e nuvens de pontos, estes são utilizados principalmente para visualização em relatórios, sem integração com o cronograma ou modelos BIM para análises automatizadas. A ausência de uma interface unificada que compare o progresso físico com o planejado dificulta ações corretivas rápidas.

### Oportunidades de melhoria

A análise evidenciou um processo de PCP colaborativo, porém limitado por três fatores principais: fragmentação da informação, dificuldade na validação do progresso físico e baixa integração dos dados de apoio à decisão. Com base nesses desafios, foram identificadas oportunidades de melhoria alinhadas às diretrizes de digitalização e automação da construção civil, com foco nas tecnologias investigadas nesta pesquisa.

#### 1. Integração da informação:

Atualmente, os dados circulam em plataformas desconectadas, dificultando a rastreabilidade e a análise em tempo real. Recomenda-se a adoção de um Ambiente Comum de Dados ou *Common Data Environment* (CDE) centralizando documentos de planejamento, registros de campo e medições. O uso do modelo BIM 4D como

eixo integrador entre cronograma e elementos físicos da obra permite vincular diretamente o planejado ao executado.

## 2. Automação da validação do progresso físico:

O processo atual, baseado em checagens manuais, pode ser automatizado com técnicas de fotogrametria e modelagem 3D por drones, que geram periodicamente nuvens de pontos do canteiro. A comparação automatizada entre essas nuvens e o modelo planejado, por meio de algoritmos específicos, permite identificar e quantificar divergências em nível de atividade, reduzindo o esforço manual e aumentando a confiabilidade dos dados.

## 3. Aprimoramento da visualização do progresso:

Apesar do uso de imagens e nuvens de pontos, sua aplicação permanece restrita a relatórios estáticos. A integração de *dashboards* interativos com o modelo BIM 4D, o cronograma e os registros de campo podem oferecer uma visualização dinâmica e atualizada do avanço físico, facilitando a detecção de desvios e a tomada de decisão em tempo hábil.

Além das melhorias tecnológicas, destaca-se a necessidade de fortalecer o vínculo entre o planejamento de curto prazo e a execução. A adoção de abordagens colaborativas, como o *Sistema Last Planner*, integrada a ferramentas digitais baseadas em BIM, pode ampliar o compromisso das equipes com os planos e promover ciclos de *feedback* mais frequentes e baseados em dados consistentes.

Essas propostas respondem aos entraves identificados na prática e apontam caminhos para um processo de planejamento e controle mais integrado, automatizado e confiável, alinhado aos princípios da transformação digital na construção civil.

No Quadro 1 são apresentados os desafios, oportunidades de automatização e ganhos esperados identificados a partir do estudo exploratório e da revisão da literatura.

**Quadro 1:** Desafios, oportunidades de melhoria e ganhos esperados na automatização do PCP.

Desafios	Oportunidades	Ganhos esperados
Integração das informações	Uso de modelos BIM 4D como núcleo central do sistema integrado.  Implantação de um CDE para centralizar documentos, cronogramas, medições, registros e imagens.	Maior rastreabilidade
		Padronização dos dados
		Análises automatizadas do avanço físico
Validação do progresso físico	Automatizar a comparação entre o planejado ( <i>as-planned</i> ) e o executado ( <i>as-built</i> ) usando inteligência computacional.	Redução da subjetividade
		Menor esforço manual
		Maior confiabilidade na tomada de decisão
Limitação na visualização e tomada de decisão	Criar <i>dashboards</i> interativos integrando cronograma, modelo 4D e registros de campo.	Detecção rápida de desvios
		Comunicação mais clara
		Apoio a decisões com base em dados
Aderência entre planejamento e execução	Adotar o <i>Sistema Last Planner</i>  Monitorar o cumprimento dos pacotes semanais com dados reais capturados e processados automaticamente	Maior compromisso das equipes
		Melhor previsibilidade
		Ciclos de <i>feedback</i> mais eficientes

## 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A principal contribuição deste trabalho é oferecer um diagnóstico prático, fundamentado em evidências empíricas e literatura científica, sobre os obstáculos e potenciais de automação do monitoramento de progresso. A revisão da literatura revelou que o uso do BIM como modelo de referência do planejamento está consolidado, e que a fotogrametria se destaca como a principal técnica para a captura do executado. No entanto, persistem dificuldades na comparação entre os modelos, sobretudo em nível de atividade. Foram identificadas também lacunas importantes na automação da medição parcial das atividades e na aplicação desses métodos em contextos reais de obra.

O estudo de campo confirmou os desafios identificados na literatura, como a fragmentação de dados e a dificuldade de validação do progresso. Porém, também revelou especificidades do contexto brasileiro, como o uso de múltiplas ferramentas não integradas, ausência de rotinas para validação automatizada e resistência à adoção de novos sistemas por parte das equipes. Tais achados reforçam a necessidade de um fluxo digital contínuo, centrado no uso de um CDE e no modelo BIM 4D como elo entre planejamento e execução.

Os achados oferecem insumos valiosos para o desenvolvimento de um artefato digital orientado à realidade do canteiro, que será detalhado nas próximas etapas da pesquisa DSR. Como desdobramento, recomenda-se investigar modelos híbridos que combinem fotogrametria, classificação semântica e dashboards integrados, aplicáveis em diferentes tipos de obra.

## 5 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES pela concessão de bolsa de estudos, e à empresa MOTIVA pelo suporte financeiro ao projeto e pela disponibilização do canteiro de obras que possibilitou o desenvolvimento deste estudo.

## REFERÊNCIAS

BRAUN, Alex; BORRMANN, André. Combining Inverse Photogrammetry and BIM for Automated Labeling of Construction Site Images for Machine Learning. **Automation in Construction**, v. 106, 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2019.103135>.

BRAUN, Alex; TUTTAS, Sebastian; BORRMANN, André; STILLA, Uwe. Improving Progress Monitoring by Fusing Point Clouds, Semantic Data and Computer Vision. **Automation in Construction**, v. 114, 2020. DOI: [10.1016/j.autcon.2020.103128](https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103128).

GOLPARVAR-FARD, Mani; PEÑA-MORA, Feniosky; ARBOLEDA, Carlos A.; LEE, SangHyun. Visualization of Construction Progress Monitoring with 4D Simulation Model Overlaid on Time-Lapsed Photographs. **Journal of Computing in Civil Engineering**, v. 23, n. 6, p. 391-404, 2009. DOI: [10.1061/\(ASCE\)0887-3801\(2009\)23:6\(391\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0887-3801(2009)23:6(391)).

HAN, Kevin K.; CLINE, David; GOLPARVAR-FARD, Mani. Formalized Knowledge of Construction Sequencing for Visual Monitoring of Work-In-Progress via Incomplete Point Clouds and Low-LoD 4D BIMs. **Journal of Advanced Engineering Informatics**, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aei.2015.09.004>.

KEYVANFAR, Ali; SHAFAGHAT, Arezou. Emerging Dimensions of Unmanned Aerial Vehicle's (UAV) 3D Reconstruction Modeling and Photogrammetry in Architecture and Construction Management. **ACE: Architecture, City and Environment**, v. 16, n. 48, 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.5821/ace.16.48.10492>.

MAALEK, R.; LICHTI, D. D.; RUWANPURA, J. Robust Classification and Segmentation of Planar and Linear Features for Construction Site Progress Monitoring and Structural Dimension Compliance Control. **ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. II-3/W5, 2015. DOI: <https://doi.org/10.5194/isprsannals-II-3-W5-129-2015>.

MAHAMI, Hadi et al. Automated progress controlling and monitoring using daily site images and building information modelling. **Buildings**, v. 9, n. 3, p. 70, 2019.

MUSARAT, M. A.; KHAN, A. M.; ALALOUL, W. S.; BLAS, N.; AYUB, S. Automated monitoring innovations for efficient and safe construction practices. **Results in Engineering**, v. 22, 2024, p. 102057. DOI: [10.1016/j.rineng.2024.102057](https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102057).

OSADCHA, I.; JURELIONIS, A.; FOKAIDES, P. Geometric parameter updating in digital twin of built assets: A systematic literature review. **Journal of Building Engineering**, v. 73, 2023. DOI: [10.1016/j.job.2023.106704](https://doi.org/10.1016/j.job.2023.106704).

PAL, Aritra; LIN, Jacob J.; HSIEH, Shang-Hsien; GOLPARVAR-FARD, Mani. Activity-level construction progress monitoring through semantic segmentation of 3D-informed orthographic images. **Automation in Construction**, v. 157, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.105157>.

QURESHI, A. H.; ALALOUL, W. S.; WONG, K. W.; SAAD, S.; MUSARAT, M. A.; AMMAD, S.; KINEBER, A. F. Automated progress monitoring technological model for construction projects. *Ain Shams Engineering Journal*, v. 14, 2023, p. 102165. DOI: [10.1016/j.asej.2023.102165](https://doi.org/10.1016/j.asej.2023.102165).

RAHIMIAN, Farzad Pour; SEYEDZADEH, Saleh; OLIVER, Stephen; RODRIGUEZ, Sergio; DAWOOD, Nashwan. On-Demand Monitoring of Construction Projects through a Game-Like Hybrid Application of BIM and Machine Learning. **Automation in Construction**, 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103332>.

SACKS, Rafael; GIROLAMI, Mark; BRILAKIS, Ioannis. Building Information Modelling, Artificial Intelligence and Construction Tech. **Developments in the Built Environment**, v. 4, p. 100011, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2020.100011>.

SGRENZAROLI, Matteo; ORTIZ BARRIENTOS, Juan; VASSENA, Giorgio; SANCHEZ, Alberto; CIRIBINI, Angelo; MASTROLEMBO VENTURA, Silvia; COMAI, Sara. Indoor Mobile Mapping Systems and (BIM) Digital Models for Construction Progress Monitoring. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, v. XLIII-B1-2022, 2022. DOI: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B1-2022-121-2022>.

VINCKE, Stan; VERGAUWEN, Maarten. Geo-Registering Consecutive Construction Site Recordings Using a Pre-Registered Reference Module. **Remote Sensing**, v. 12, n. 1928, 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/rs12121928>.