XXI ENTAC – Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído
14 a 16 de outubro de 2026 | Goiânia-Brasil
DOI: https://doi.org/10.46421/entac.v21i1.8869

Automação do monitoramento do progresso físico na construção civil: revisão sistemática da literatura e do panorama de patentes na integração BIM-IA

Automated physical progress monitoring in construction: systematic review of the literature and patent landscape in BIM-AI integration

Raquel Figueiredo Alves
Universidade de São Paulo | São Paulo | Brasil | raquel.figueiredo@usp.br
Fabiano Rogério Corrêa
Universidade de São Paulo | São Paulo | Brasil | fabiano.correa@usp.br
Luiz Fernando Heidrich Duarte
Webphy Tecnologia S.A (Syncker) | Timbó | Brasil | luizfernando@webphy.systems
Celso Berri Neto
Webphy Tecnologia S.A (Syncker) | Timbó | Brasil | celsoberri@webphy.systems

Resumo

Este artigo analisa o estado da arte da automação do monitoramento do progresso físico na construção civil, ainda marcado por medições subjetivas, baixa rastreabilidade e fragmentação entre canteiro, *Building Information Modeling* (BIM) e planejamento. A pesquisa consiste na revisão sistemática da literatura, segundo PRISMA 2020, combinada com a análise patentária no período 2009-2026. Os resultados indicam a convergência entre literatura e patentes em captura sensorial e comparação *as-built x as-planned*, a emergência da Inteligência Artificial (IA) aplicada ao BIM e ambientes 3D, e uma lacuna na integração autônoma do ciclo completo de Planejamento e Controle da Produção (PCP). A contribuição da pesquisa está no diagnóstico integrado entre a maturidade científica, reivindicações técnicas protegidas e necessidades operacionais para obras edificadas.

Palavras-chave: Monitoramento de progresso da construção; BIM; Visão computacional; IA; Análise patentária. Construção 4.0.

Abstract

This paper analyzes the state of the art in automated construction progress monitoring, a field still marked by subjective measurement, limited traceability and fragmentation between site data, Building Information Modeling (BIM) and planning. The research consists of a PRISMA 2020-based systematic literature review combined with a patent analysis from 2009 to 2026. Results show convergence between literature and patents in sensor-based capture and as-built versus as-planned comparison, the emergence of Artificial Intelligence (AI) applied to BIM and 3D environments, and a gap in the autonomous integration of the full Production Planning and Control cycle. The contribution of the research lies in the integrated assessment of scientific maturity, protected technical claims, and operational needs for building construction projects.

Keywords: Construction *progress monitoring; BIM; Computer vision; AI; Patent analysis; Construction 4.0.*

1 INTRODUÇÃO

A construção civil enfrenta desafios históricos de baixa produtividade, atrasos contratuais, desperdícios e falhas de comunicação entre agentes da cadeia de produção [1]. O monitoramento do progresso físico ainda opera, em grande medida, com critérios subjetivos e informação fragmentada entre quem mede o canteiro e quem planeja a produção [2, 3]. A ausência de critérios padronizados e a baixa rastreabilidade das causas de desvio reduzem a previsibilidade do controle de riscos, tornando a gestão mais reativa e ampliando retrabalhos, atrasos e descumprimento de prazos [2].

Em resposta a esse quadro, a digitalização associada à Construção 4.0 articula BIM, Internet das Coisas (Internet of Things - IoT), inteligência artificial, visão computacional, conectividade e análise de dados [2, 3]. A combinação de sensores, técnicas de time-lapse, fotogrametria, escaneamento à laser, referências geométricas e temporais do BIM e aprendizado profundo busca aumentar a precisão dos registros, reduzir o esforço humano e melhorar a colaboração entre equipes [4,5,6]. Sistemas que integram dados de monitoramento, BIM 4D, simulação, análise de cenários aproximam-se do conceito de gêmeo digital (Digital Twin - DT) aplicado ao canteiro e ao processo produtivo [7,8]. Apesar dos avanços, permanece a distância entre o conceito de gêmeo digital e sua implementação prática, especialmente pela atualização descontínua do modelo, interoperabilidade limitada e escassez de conjuntos de dados representativos [5,7,8].

No Brasil, a transformação digital das construtoras ainda se encontra em estágio inicial [9]. Em particular, o ciclo completo do Planejamento e Controle da Produção (PCP) - captura, comparação, atualização do cronograma e retroalimentação da decisão - segue pouco endereçado de forma autônoma e contínua.

Diante desse quadro, este artigo investiga o estado da arte da automação do monitoramento de progresso na construção civil, sob a perspectiva tecnológica, identificando quais abordagens estão consolidadas na literatura e em patentes recentes, quais frentes emergem na integração entre BIM-IA e quais lacunas ainda persistem para integrar o ciclo completo do PCP em obras edificadas. A associação entre revisão sistemática e análise patentária permite relacionar o conhecimento científico às soluções reivindicadas pela indústria da construção.

2 FUNDAMENTAÇÃO

O problema central do monitoramento do progresso da construção (Construction Progress Monitoring - CPM) é a ineficiência no fluxo de informação entre o que é observado em campo e o que será planejado em seguida [10,11,12]. Nesse contexto, o BIM atua como base integrativa desde a concepção do projeto até o acompanhamento

da execução, mas sua utilidade para controle depende da vinculação entre modelo, progresso físico e decisões de produção [13].

Quanto maior a fidelidade desse fluxo, maior a aderência do plano à realidade produtiva. Inversamente, subjetividade na medição, atraso entre observação e registro e fragmentação entre ferramentas degradam o ciclo de planejamento e induzem decisões reativas. O monitoramento automatizado de progresso é, neste enquadramento, uma intervenção dirigida ao fluxo de informação.

A literatura recente evidencia avanços na adoção de tecnologias digitais para monitoramento do progresso físico da construção, especialmente pela integração entre BIM, visão computacional (Computer Vision - CV), Inteligência Artificial (IA) e gêmeos digitais [7,14]. Essas abordagens procuram transformar evidências de campo em informação vinculável a elementos, atividades, espaços e pacotes de trabalho.

O BIM articula representação geométrica, semântica e temporal do empreendimento, oferecendo referência para cálculo de progresso, simulação 4D e armazenamento de dados *as-built* [13]. No recorte deste estudo, o modelo planejado funciona como base de comparação, enquanto os registros de campo alimentam medições e atualizações orientadas ao PCP.

Abordagens de time-lapse, escaneamento à laser, fotogrametria e *Structure from Motion* (SfM), *Simultaneous Localization and Mapping* (SLAM), sensors, IoT e visão computacional capturam ou reconstroem o canteiro; IA, aprendizado profundo (Deep Learning - DL), modelos semânticos, grandes modelos de linguagem (Large Language Model - LLMs) e modelos fundacionais apoiam identificação de elementos, atividades e desvios [4,6,15,16,17,18,19,20,21,22]. O valor técnico dessas tecnologias depende de sua capacidade de converter registros visuais, espaciais ou sensoriais em informação estruturada, rastreável e acionável.

Os avanços tecnológicos se manifestam de forma desigual. Centros de pesquisa, startups e fornecedores avançam em provas de conceito e soluções protegidas, enquanto muitas construtoras ainda operam em estágio inicial de digitalização [9]. As patentes assumem papel estratégico ao permitir a avaliação do estágio de desenvolvimento das soluções, evidenciando sua transição do ambiente acadêmico para aplicações no mercado. Além disso, ao validar sistemas aplicáveis em cenários reais de obra, reforçam a importância da cooperação entre academia e startups para viabilizar sua implementação e escalabilidade.

Uma lacuna recorrente é a integração contínua entre BIM e dados do ambiente real. Embora haja métodos para comparar o estado planejado e executado por nuvens de pontos, imagens e sensores, eles ainda exigem processamento, calibração, cobertura visual e intervenção humana [7,14]. Em ambientes internos, oclusões, iluminação variável, movimentação de pessoas e complexidade dos elementos reduzem a confiabilidade da visão computacional [14].

3 MÉTODO

Este artigo apresenta resultados obtidos por dois procedimentos complementares: revisão sistemática da literatura (SLR), segundo PRISMA 2020 [22], e análise patentária. A literatura registra problemas de pesquisa, métodos, validações e limitações empíricas; as patentes registram soluções técnicas reivindicadas como aplicáveis industrialmente. A análise não trata patente como validação em obra, mas como indicador de direção tecnológica, maturidade de proteção e interesse de mercado em campo situado entre pesquisa acadêmica e desenvolvimento aplicado.

A SLR foi conduzida nas bases Scopus, WoS e ScienceDirect no período 2009-2026, adotando 2009 como marco inicial em razão do trabalho de Golparvar-Fard *et al.* [4]. Foram aplicadas quatro famílias de descritores no campo título-resumo-palavras-chave: S-A, monitoramento de progresso da construção, BIM e visão computacional ou deep learning; S-B, Construção 4.0 ou indústria da construção, BIM, IoT e gêmeo digital; S-C, monitoramento de progresso da construção, BIM e revisão sistemática ou bibliométrica; S-D, monitoramento ou análise de processos construtivos, BIM, knowledge graph ou ontologia. Foram aplicados os critérios de inclusão I1-I5 e exclusão E1-E6 - sintetizados no Quadro 1.

Quadro 1: Critérios de inclusão e exclusão para a revisão sistemática

Categoria	Código	Descrição condensada
Inclusão	I1	Artigo peer-reviewed em Scopus, WoS, ScienceDirect ou anais relevantes
	I2	Português ou inglês
	I3	2009-2026
	I4a	Aborda a automação do monitoramento de progresso da construção (núcleo)
	I4b	Aborda contexto sócio-técnico (Construção 4.0, IoT, AI-BIM, datasets)
	I5	Aplicação predominante em construção edificada
Exclusão	E1-E6	Editorial, construção de infraestrutura linear, apenas para operação ou manutenção de construções, IA genérica, duplicata, literatura cinzenta, sem texto completo

Fonte: os autores.

A triagem operou em três etapas: remoção de duplicatas, leitura de título-resumo e leitura integral, com discordâncias resolvidas por consenso. Itens não recuperados diretamente pelas strings foram admitidos somente por snowballing a partir de referências elegíveis, especialmente revisões do próprio *corpus*, com revalidação pelos critérios I1-I5 e E1-E6.

A análise patentária foi conduzida no Google Patents, USPTO, WIPO PatentScope e Espacenet no mesmo período. Foram usadas quatro famílias de busca: P-A, monitoramento de progresso da construção, BIM e visão computacional ou deep learning; P-B, progresso construtivo, BIM ou modelo 3D ou canteiro, e comparação *as-built x as-planned*; P-C, progresso construtivo, BIM e LLM; P-D, busca por número de

publicação, titular ou inventor para conferência de famílias, continuações e citações cruzadas - sintetizadas no Quadro 2.

Quadro 2: Critérios de inclusão e exclusão patentária

Categoria	Código	Descrição condensada
Inclusão	IP1	Patente concedida ou pedido publicado
	IP2	2009-2026
	IP3a	Núcleo: monitoramento de progresso (CPM) ou atualização *as-built*
	IP3b	Captura/posicionamento aplicado a BIM/canteiro
	IP3c	LLM/IA generativa aplicada a IFC/BIM/3D estruturado
	IP4	Pelo menos um elemento técnico relevante (BIM, CV, DL, DT, IA, 3D, 4D)
	IP5	Bases consultadas
Exclusão	EP1-EP6	Construção de infraestrutura linear, IA genérica, facility management, duplicata, sem extrato, status impeditivo

Fonte: os autores.

Patentes fora do conjunto retornado diretamente pelas strings P-A a P-D foram incluídas por snowballing (famílias, continuações ou citações cruzadas a partir de documentos já elegíveis), com confirmação nas mesmas bases e triagem por IP1–IP5 e EP1–EP6.

Os resultados foram interpretados por categorias tecnológicas e por aderência ao ciclo de PCP. Na literatura, considerou granularidade, técnica de captura, tipo de dado, limitação e evidência de validação. Nas patentes, considerou-se a etapa técnica reivindicada, distinguindo ciclo completo, ciclo parcial, captura/posicionamento auxiliar, atualização semântica e LLM/IA generativa.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

PANORAMA DA REVISÃO DA LITERATURA

A SLR resultou em 23 artigos: 11 revisões bibliométricas e sistemáticas da literatura [1,3,5,7,8,14,23,24,25,26,27], 5 propostas metodológicas [4,18,19,28,29], 6 soluções automatizadas [6,15,16,17,20,30] e 1 contribuição sociotécnica [2]. Foram mantidos trabalhos de contexto sociotécnico pelo eixo complementar de inclusão. A produção concentra-se a partir de 2020, com trabalhos anteriores como base conceitual e técnica [4,15,24].

A análise das revisões bibliométricas e sistemáticas da literatura do *corpus* revela que as abordagens conhecidas de automação do monitoramento de progresso da construção fundamentam-se no uso combinado de Visão Computacional (CV), Deep Learning (DL) e BIM. No entanto, essa abordagem ainda se encontra em fase experimental, enfrentando limitações severas no uso *indoor*, desconexão entre modelos 3D e cronogramas, e falta de integração com o Planejamento e Controle da Produção (PCP). Paralelamente, os gêmeos digitais emergem no contexto da Construção 4.0, com foco na atualização geométrica por fotogrametria e escaneamento a laser. Contudo, essa vertente também apresenta restrições críticas, caracterizadas pela baixa frequência de atualização dos dados e pela persistente desconexão com o PCP, conforme exposto no Quadro 3.

Quadro 3: Revisões bibliométricas e sistemáticas da literatura

Categoria	**Tendências e Limitações identificadas**	**Artigos considerado nas análises subsequentes**
Automação do monitoramento de progresso da construção	Uso combinado de CV, DL e BIM; limitações severas no uso indoor; fase experimental; desconexão entre modelos 3D e cronogramas; falta de integração com o PCP	[1,14,23,24,25,26,27]
Gêmeos digitais na construção	Construção 4.0; atualização geométrica por fotogrametria e escaneamento a laser; baixa frequência de atualização; desconexão com o PCP	[3,5,7, 8, 27]

A análise das propostas metodológicas, soluções automatizadas e contribuições empíricas ou sociotécnicas do *corpus*, por sua vez, organiza as abordagens pela granularidade da observação e o tipo de abordagem utilizada para inferir progresso. Em conjunto analisa-se o uso do BIM como uma camada de integração que pode receber dados de reconstruções 3D globais, medições por elemento BIM ou evidências discretas de atividade, conforme exposto no Quadro 4.

Esse rearranjo evidencia que o problema técnico inicial não é apenas capturar a obra, mas decidir em que escala o avanço será observado. Reconstruções 3D globais representam melhor o estado físico agregado e favorecem comparações *as-built* x *as-planned*; abordagens por componente, elemento BIM ou atividade são mais discretas,

mas se aproximam da lógica operacional de pacotes de trabalho. A escolha da granularidade condiciona frequência de atualização, custo de coleta e automação da etapa seguinte de análise.

Quadro 4: Abordagens de captura e análise por granularidade

Granularidade	**Família tecnológica**	**Princípio**	**Limitação principal**	**Evidência de validação**	**Artigos Relacionados**
Obra como um todo	*Timelapse*	Sobreposição de imagens capturadas a partir de uma pose conhecida sobre o modelo *as-planned* 4D	Cobertura incompleta insuficiente para contabilizar progresso a um nível gerencial	Obras reais	[4]
	Laser scanning + BIM	Reconstrução por nuvem de pontos e comparação com modelo *as-planned*	Custo elevado; tempo de processamento; dificuldade em correlacionar instalações	Obras reais	[4, 15, 16]
	Fotogrametria / SfM + BIM	Reconstrução 3D a partir de registros fotográficos e comparação com BIM	Depende de superfícies com textura, iluminação constante, cobertura visual e ausência de movimentação	Obras reais	[4, 17, 20]
Componente ou atividade	Visão computacional + *Deep Learning*	Detecção de objetos, elementos ou fases construtivas em imagens	Necessidade de datasets representativos	Ambientes controlados	[6, 18, 14, 20, 23,28]
	IoT e sensores	Evidências indiretas de execução por sensores e dispositivos móveis	Interoperabilidade; manutenção em canteiro; baixa confiabilidade	Obras reais	[2, 30]
	LLM + BIM	Conversão de relatos ou dados não padronizados em atualizações de progresso	Baixa acurácia, rastreabilidade e confiabilidade	Sem casos registrados	[19]
Camada semântica transversal	Knowledge graph + visão computacional	Conversão de dados visuais em entidades, relações e eventos vinculados ao BIM	Ontologias e integração com cronograma	Sem casos registrados	[28, 29]

Fonte: os autores.

As barreiras recorrentes são interoperabilidade entre IoT, IA, BIM e PCP [5,28,29], escassez de conjuntos de dados representativos [17,20], distância entre modelo digital e gêmeo digital operacional [8,31] e limitações de LLMs para atualização de progresso [19]. Oclusões, iluminação variável e complexidade de ambientes internos reduzem a confiabilidade da captura visual; datasets sintéticos apoiam o treinamento, mas a transferência para condições reais permanece desafio aberto [14,18,20]. A fronteira de modelos fundacionais e *Physical-AI* permanecem prospectivos para esse recorte, mas relevante para monitoramento contínuo pela possível convergência futura com BIM, robótica e gêmeos digitais [21]. O Quadro 5 organiza a análise da integração captura-análise-BIM-PCP via gêmeo digital.

Quadro 5: Integração captura-análise-BIM-PCP via gêmeo digital

Dimensão	**Achado no *corpus***	**Implicação para PCP**
Captura e análise	Predominam soluções baseadas em laser-scan, fotogrametria e visão computacional	Predominam abordagens sem análise de conformidade com o projeto minimamente suficiente para a contabilização automática de progresso a nível de elemento construtivo, e com frequência de captura e tempo de análise incompatíveis com a tomada de decisão diária e semanal
Integração com BIM / gêmeo digital	BIM aparece como referência geométrica, semântica e temporal, mas raramente como gêmeo digital bidirecional completo	É comum o uso de técnicas de sobreposição de dados de campo sobre o modelo digital da construção, mas a atualização automatizada de cronograma ainda se encontra em fase experimental
Conexão com planejamento	Poucos estudos fecham o ciclo entre medição, atualização de cronograma e ação gerencial	A automação permanece mais forte na captura/comparação do que no controle da produção propriamente dito

Fonte: os autores.

PANORAMA DAS PATENTES

O panorama patentário foi lido como evidência complementar à literatura: artigos indicam problemas, métodos e validações; patentes revelam soluções técnicas reivindicadas com novidade, atividade inventiva e aplicação industrial. Foram identificadas 16 patentes elegíveis [31-46], distribuídas entre titulares acadêmicos, empresas de tecnologia para construção, provedores de software e construtoras, com predominância de jurisdição norte-americana e chinesa, além de documentos europeus e tratado de cooperação em matéria de patentes (Patent Cooperation Treaty - PCT).

A trajetória das patentes, apresentada no Quadro 6, reforça a estrutura problema-solução observada na literatura, com ênfase na proteção de etapas operacionalizáveis. Um primeiro bloco concentra-se no posicionamento de capturas em relação ao modelo BIM correspondente [31, 32], na captura e análise para obter nuvens de pontos, imagens, posições ou evidências de campo e compará-las a uma referência digital [33,34,35,36,37], e na captura, análise e atualização de cronograma [38,39,40,41].

Um segundo bloco associa dados do canteiro a modelos BIM ou knowledge graphs para atualização do cronograma, controle de produtividade e integração com o PCP, sem e com aplicação de LLMs [42,43,44,45,46].

Quadro 6: Trajetória patentária por categoria tecnológica

Categoria	Característica	Patentes representativas
Captura/posicionamento auxiliar	Posicionamento, visão geométrica	[31,32]
Ciclo parcial desconectado do PCP	Captura → comparação	[33,34,35,36,37]
Ciclo completo de PCP	Captura → comparação → cronograma	[38,39,40,41]
Atualização semântica/relacional	Knowledge graph → associação de dado ao modelo	[42,43,44]
LLM/IA generativa	LLM aplicado a BIM e CPM	[45,46]

Fonte: os autores.

A leitura cruzada evidencia que o ciclo completo de PCP é endereçado por poucas patentes, predominantemente da Doxel e Procore [38,39,40,41]. A maior parte opera em ciclo parcial ou em capacidades isoladas, incluindo o posicionamento de capturas ou a geração de modelos *as-built* para comparação com modelos BIM *as-designed* ou *as-planned* [31,32,33,34,35,36,37]. Assim, o espaço para a proteção intelectual de sistemas e métodos relacionados com a captura automatizada já se encontra tecnicamente saturado, enquanto o espaço de soluções para a integração contínua com BIM e sua conversão em decisão de PCP encontra-se menos ocupado.

ANÁLISE INTEGRADA LITERATURA-PATENTES

A análise integrada revela convergência em torno de captura e análise. Fotogrametria mais BIM, escaneamento à laser mais BIM, visão computacional mais deep learning e gêmeos digitais aparecem tanto no estado da arte científico [4,6,14,15,16,17,20] quanto em famílias patentárias maduras [38,39,40,41]. A trajetória associada a Golparvar-Fard *et al.* [4,17] exemplifica esse percurso entre pesquisa acadêmica e patente [33,36] com aplicação industrial.

A literatura registra prova de conceito com LLMs para atualização de progresso em BIM [19], enquanto patentes recentes tratam de interação por linguagem com ambientes 3D e geração de modelos padronizados a partir de dados não estruturados [45,46]. Não foram identificadas aplicações consolidadas de *World Models* ou *Physical-*

AI diretamente ao monitoramento BIM-PCP; essa frente é adjacente e prospectiva [21].

A lacuna mais relevante é a persistência de soluções pontuais em detrimento da integração do ciclo completo de PCP. A literatura documenta fragmentação entre captura, comparação e decisão [1,5,8], e o panorama patentário confirma que poucas soluções conectam medição física em campo com cronograma, custo, produtividade e risco [38,39,40,41]. O campo avançou mais na percepção do canteiro do que na transformação da evidência capturada em atualização confiável do BIM e ação sobre o planejamento.

Essa dificuldade não reside apenas na acurácia dos sensores ou algoritmos, mas na vinculação escalável entre evidências de campo e elementos individualizados do modelo BIM. Para produzir efeito no PCP, cada inferência de avanço precisa ser associada a elementos, estruturas espaciais, pacotes de trabalho, atividades ou cronograma. Essa associação depende de semântica consistente, ontologias e interoperabilidade entre dados visuais, BIM, sensores e sistemas de planejamento [5,28,29].

No contexto brasileiro, essa lacuna se agrava pela digitalização ainda inicial [9], mesmo quando há modelos BIM, sem vínculo operacional com planejamento, pacotes de trabalho e rotinas de controle [10,11,12,13]. A captura automatizada precisa produzir dados interpretáveis pelo modelo, associáveis ao cronograma e úteis para decisões de curto prazo, com regras de correspondência, representação de atividades e mecanismos de rastreabilidade.

5 CONCLUSÃO

Em resposta à pergunta de pesquisa, a revisão sistemática da literatura combinada à análise patentária mostra que a automação do monitoramento de progresso da construção está consolidada em soluções de captura, comparação e visualização, disponíveis tanto na literatura quanto em famílias patentárias maduras. A integração do ciclo completo de PCP, a interoperabilidade entre sistemas e a operação contínua em canteiros reais permanecem como lacunas significativas.

A integração dos dados revela três achados centrais: (i) há uma convergência ciência-patente em torno de CV-IA-BIM; (ii) emergem modelos fundacionais aplicados a modelos BIM, ambientes 3D, modelos de mundo e de IA física; e (iii) persiste a lacuna no fechamento autônomo do ciclo de PCP. Essa perspectiva integrada constitui o aporte principal do artigo.

A contribuição se materializa em duas dimensões: síntese metodológica com expressões de busca, critérios de seleção, inclusão e exclusão e checagem de recuperação declarados; e diagnóstico estruturado que orienta a conscientização sobre o problema da automação do monitoramento de progresso físico na construção civil.

Como desdobramento, as etapas seguintes deverão enfrentar a integração do ciclo completo de PCP em ambiente produtivo brasileiro, contemplando pesquisa de campo, formulário diagnóstico aplicado a empresas de referência e avaliação empírica em obras edificadas. Recomenda-se monitorar a fronteira de LLMs, *World Models* e *Physical-AI*, pois sua eventual convergência com BIM, robótica e gêmeos digitais pode alterar o horizonte técnico da automação do PCP.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Construinova-Poli/USP, à Webphy Tecnologia (Syncker), ao CNPq (processo: 443766/2024-0) e à Tecnisa pelo suporte ao projeto piloto.

DECLARAÇÃO

Durante a preparação deste artigo, os autores utilizaram as ferramentas Cursor, ChatGPT, Gemini, NotebookLM para tradução, revisão, melhoria de coesão e interpretação de dados. Após a utilização das ferramentas, os autores revisaram e editaram o conteúdo conforme necessário e assumem total responsabilidade pelo conteúdo do artigo publicado.

REFERÊNCIAS

[1] PATEL, T.; GUO, B. H. W. A scientometric review of construction progress monitoring studies. Engineering, Construction and Architectural Management, [s. l.], v. 29, n. 9, p. 3237–3266, out. 2022. DOI: https://doi.org/10.1108/ECAM-10-2020-0799.

[2] CALVETTI, D.; MÊDA, P.; GONÇALVES, M. C.; SOUSA, H. Worker 4.0: the future of sensored construction sites. Buildings, Basel, v. 10, n. 9, art. 169, set. 2020. DOI: https://doi.org/10.3390/buildings10100169.

[3] BAGHALZADEH SHISHEHGARKHANEH, M.; KEIVANI, A.; MOEHLER, R. C.; JELODARI, N.; ROSHDI LALEH, S. Internet of Things (IoT), Building Information Modeling (BIM), and Digital Twin (DT) in Construction Industry: a review, bibliometric, and network analysis. Buildings, Basel, v. 12, n. 10, p. 1503, set. 2022. DOI: https://doi.org/10.3390/buildings12101503.

[4] GOLPARVAR-FARD, M.; PEÑA-MORA, F.; ARBOLEDA, C. A.; LEE, S. Visualization of construction progress monitoring with 4D simulation model overlaid on time-lapsed photographs. **Journal of Computing in Civil Engineering**, [s. l.], v. 23, n. 6, p. 391–404, nov. 2009. DOI: https://doi.org/10.1061/(ASCE)0887-3801(2009)23:6(391).

[5] DALIR, A. H.; PEZESHKI, Z.; RAVANSHADNIA, M.; KRINITSKY, E.; SULTANGUZIN, I. A. Automatic monitoring in construction projects: scientometric analysis and visualization of research activities. **Human-Centric Intelligent Systems**, [s. l.], v. 5, n. 1, p. 21–43, 3 fev. 2025. DOI: https://doi.org/10.1007/s44230-025-00089-3

[6] HSIEH, C.-C.; CHEN, H.-M.; CHEN, W.-Y.; WU, T.-Y. Automated construction progress monitoring and control through AI-based image recognition and BIM integration. **Automation**

in Construction, [s. l.], v. 183, art. 106783, mar. 2026. DOI: https://doi.org/10.1016/j.autcon.2026.106783.

[7] OSADCHA, O.; JURELIONIS, A.; FOKAIDES, P. Geometric parameter updating in digital twin of built assets: a systematic literature review. **Journal of Building Engineering**, [s. l.], v. 73, art. 106704, 15 ago. 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106704.

[8] WANG, Y.; REZAEI, A.; HICKS, S. Digital twins in the construction industry: a systematic review of current practices and future directions. **Journal of Information Technology in Construction**, Oslo, v. 31, p. 149–179, 2026. DOI: https://doi.org/10.36680/j.itcon.2026.007.

[9] LIMA, M. G. T.; CUNHA, T. d. M.; CÂNDIDO, L. F.; BARROS NETO, J. d. P. Digital Transformation in the Construction Industry: Lessons and Challenges from the Journey of Brazilian Construction Companies. **Sustainability**, Basel, v. 18, n. 1, art. 407, 2026. DOI: https://doi.org/10.3390/su18010407.

[10] KOSKELA, L. **Application of the new production philosophy to construction**. Stanford, CA: CIFE, Stanford University, 1992. (CIFE Technical Report, n. 72).

[11] KOSKELA, L. **An exploration towards a production theory and its application to construction**. Espoo: VTT Publications, 2000.

[12] BALLARD, H. G. **The Last Planner System of Production Control**. 2000. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - School of Civil Engineering, The University of Birmingham, Birmingham, 2000.

[13] EASTMAN, C.; TEICHOLZ, P.; SACKS, R.; LISTON, K. **BIM Handbook**: a guide to building information modeling for owners, managers, designers, engineers and contractors. 2. ed. Nova Iorque: John Wiley & Sons, 2011.

[14] EKANAYAKE, B.; WONG, J. K.-W.; FINI, A. A. F.; SMITH, P. Computer vision-based interior construction progress monitoring: a literature review and future research directions. **Automation in Construction**, Amsterdam, v. 127, art. 103705, jul. 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103705.

[15] TURKAN, Y.; BOSCHÉ, F.; HAAS, C. T.; HAAS, R. Automated progress tracking using 4D schedule and 3D sensing technologies. **Automation in Construction**, Amsterdam, v. 22, p. 414–421, mar. 2012. DOI: https://doi.org/10.1016/j.autcon.2011.10.003.

[16] VASSENA, G. P. M.; PERFETTI, L.; COMAI, S.; MASTROLEMBO VENTURA, S.; CIRIBINI, A. L. C. Construction progress monitoring through the integration of 4D BIM and SLAM-based mapping devices. **Buildings**, Basel, v. 13, n. 10, art. 2488, 2023. DOI: https://doi.org/10.3390/buildings13102488.

[17] PAL, A.; LIN, J. J.; HSIEH, S.-H.; GOLPARVAR-FARD, M. Automated vision-based construction progress monitoring in built environment through digital twin. **Developments in the Built Environment**, [s. l.], v. 16, art. 100247, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.dibe.2023.100247.

[18] BARRERA-ANIMAS, A. Y.; DAVILA DELGADO, J. M. Generating real-world-like labelled synthetic datasets for construction site applications. **Automation in Construction**, Amsterdam, v. 155, art. 104850, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.104850.

[19] JIN, X.; LIN, X.; YU, X.; GUO, H. Construction progress updating method based on BIM and large language models. **Journal of Tsinghua University (Science and Technology)**, Beijing, v. 65, n. 1, p. 35–44, jan. 2025. DOI: https://doi.org/10.16511/j.cnki.qhdxxb.2025.22.006.

[20] REJA, V. K.; VARGHESE, K.; HA, Q. P. Computer vision-based construction progress monitoring. **Automation in Construction**, Amsterdam, v. 138, art. 104245, jun. 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104245.

[21] NVIDIA. **Cosmos World Foundation Model Platform for Physical AI**. arXiv preprint, arXiv:2501.03575, 2025. DOI: https://doi.org/10.48550/arXiv.2501.03575.

[22] PAGE, M. J.; MCKENZIE, J. E.; BOSSUYT, P. M. *et al*. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. **BMJ**, London, v. 372, art. n71, mar. 2021. DOI: https://doi.org/10.1136/bmj.n71.

[23] REHMAN, M. S. U.; SHAFIQ, M. T.; ULLAH, F. Automated computer vision-based construction progress monitoring: a systematic review. **Buildings**, Basel, v. 12, n. 7, art. 1037, 2022. DOI: https://doi.org/10.3390/buildings12071037.

[24] KOPSIDA, M.; BRILAKIS, I.; VELA, P. A. A review of automated construction progress monitoring and inspection methods. In: **Proceedings of the 32nd International Conference of CIB W78**. Eindhoven: CIB W78, 2015. p. 421-431. Disponível em: https://itc.scix.net/paper/w78-2015-paper-044. Acesso em: 24 abr. 2026.

[25] ALALOUL, W. S.; QURESHI, A. H.; MUSARAT, M. A.; SAAD, S. Evolution of close-range detection and data acquisition technologies towards automation in construction progress monitoring. **Journal of Building Engineering**, [s. l.], v. 43, art. 102877, nov. 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102877.

[26] SAMSAMI, R. A systematic review of automated construction inspection and progress monitoring (ACIPM): applications, challenges, and future directions. **CivilEng**, Basel, v. 5, n. 1, p. 265-287, mar. 2024. DOI: https://doi.org/10.3390/civileng5010014.

[27] AWE, M.; MALHI, A.; BUDKA, M.; MAVENGERE, N.; DAVE, B. Towards 4D BIM: a systematic literature review on challenges, strategies and tools in leveraging AI with BIM. **Buildings**, Basel, v. 15, n. 7, art. 1072, mar. 2025. DOI: https://doi.org/10.3390/buildings15071072.

[28] PFITZNER, F.; BRAUN, A.; BORRMANN, A. From data to knowledge: construction process analysis through continuous image capturing, object detection, and knowledge graph creation. **Automation in Construction**, Amsterdam, v. 164, art. 105451, ago. 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105451.

[29] PFITZNER, F.; HU, S.; BRAUN, A.; BORRMANN, A.; FANG, Y. Monitoring concrete pouring progress using knowledge graph-enhanced computer vision. **Automation in Construction**, Amsterdam, v. 174, art. 106117, jun. 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.autcon.2025.106117.

[30] WANG, K.; ZHANG, Z.; DENG, R.; MAO, Y. Automated construction progress monitoring and controlling framework based on computer vision and Internet of Things system. In: **2023 6th International Conference on Electronics Technology (ICET)**. Piscataway: IEEE, 2023. p. 1045-1051. DOI: https://doi.org/10.1109/ICET58434.2023.10211573.

[31] TRIMBLE INC. **Self positioning camera system to 3D CAD/BIM model**. Inventores: KAHLE, K.; LEE, Y. J. United States Patent n. US10347008B2, concessão em 9 jul. 2019. Disponível em: https://patents.google.com/patent/US10347008B2. Acesso em: 16 abr. 2026.

[32] BUILDOTS LTD. **Determining position of an image capture device**. Inventores: SUDRY, Y.; DANON, R. J. United States Patent n. US12505575B2. Prioridade: 2 abr. 2020. Status: ativa (Google Patents). Disponível em: https://patents.google.com/patent/US12505575B2. Acesso em: 16 abr. 2026.

[33] RECONSTRUCT INC. **Computation of point clouds and joint display of point clouds and building information models with project schedules for monitoring construction progress, productivity, and risk for delays**. Inventores: GOLPARVAR-FARD, M.; HOIEM, D.; LIN, J. J.-C.; HAN, K. I.; DEGOL, J. M. United States Patent n. US11288412B2, concessão em 29 mar. 2022. Disponível em: https://patents.google.com/patent/US11288412B2. Acesso em: 16 abr. 2026.

[34] UNIVERZA V MARIBORU. **A system, a method and a computer program for construction progress monitoring**. Inventores: PUCKO, Z.; REBOLJ, D. Pedido internacional PCT n. EP4437445A1. Prioridade: 25 nov. 2021. Status: pendente (pending, Google Patents). Disponível em: https://patents.google.com/patent/EP4437445A1. Acesso em: 16 abr. 2026.

[35] UNIVERSITY OF FLORIDA RESEARCH FOUNDATION INC. **Streamlined single software workflow with ML-based point cloud clustering for virtual reality building inspection**. Inventores: RAVI, J. G.; SRINIVASAN, S. Pedido de patente dos Estados Unidos n. US20240203054A1. Prioridade: 20 dez. 2022. Publicação: 20 jun. 2024. Status: pendente (Google Patents). Disponível em: https://patents.google.com/patent/US20240203054A1. Acesso em: 24 abr. 2026.

[36] BOARD OF TRUSTEES OF THE UNIVERSITY OF ILLINOIS. **Four-dimensional augmented reality models for interactive visualization and automated construction progress monitoring**. Inventores: GOLPARVAR-FARD, M.; PEÑA-MORA, F. A.; SAVARESE, S. United States Patent n. US9070216B2, concessão em 30 jun. 2015. Disponível em: https://patents.google.com/patent/US9070216B2. Acesso em: 16 abr. 2026.

[37] DALUX APS. **Method for tracking construction site progress**. Inventores: RONG, A. European (patent) application n. EP4550260A1. Prioridade: 3 nov. 2023. Depósito: 31 out. 2024. Publicação: 7 mai. 2025. Status: pendente (Google Patents). Disponível em: https://patents.google.com/patent/EP4550260A1. Acesso em: 16 abr. 2026.

[38] DOXEL INC. **Monitoring construction of a structure**. Inventores: LADHA, S.; SINGH, R. United States Patent n. US11526744B2, concessão em 13 dez. 2022. Disponível em: https://patents.google.com/patent/US11526744B2. Acesso em: 16 abr. 2026.

[39] DOXEL INC. **Generating status of construction site based on hierarchical modeling that standardizes physical relationships of elements of a structure**. Inventores: SAHA, A.; MONTAUK, D. V.; TURNER, R. W.; ORBAN, M. P. United States Patent n. US12254429B2, concessão em 18 mar. 2025. Disponível em: https://patents.google.com/patent/US12254429B2. Acesso em: 16 abr. 2026.

[40] DOXEL INC. **Tracking an ongoing construction by using fiducial markers**. Inventores: TRESKUNOV, A.; SINGH, R. United States Patent n. US11348322B1, concessão em 31 mai. 2022. Disponível em: https://patents.google.com/patent/US11348322B1. Acesso em: 16 abr. 2026.

[41] PROCORE TECHNOLOGIES INC. **Verification of progression of construction-related activity at given location**. Inventores: SOLTANI, M. M.; PARK, D.; MCKEE, K.; MAN, M. United States Patent n. US12136052B2, concessão em 5 nov. 2024. Disponível em: https://patents.google.com/patent/US12136052B2. Acesso em: 16 abr. 2026.

[42] CHINA CONSTRUCTION FIFTH BUREAU THIRD CONSTRUCTION CO LTD. **Construction progress real-time monitoring system based on BIM and Internet of things**. Inventores: conforme registo CNIPA (múltiplos; nomes em caracteres chineses na fonte). Patente chinesa n. CN120655245B, concessão em 6 mar. 2026 (pedido publicado como CN120655245A em 16 set. 2025). Disponível em: https://patents.google.com/patent/CN120655245B. Acesso em: 16 abr. 2026.

[43] PROCORE TECHNOLOGIES INC. **Construction knowledge graph**. Inventores: JAIN, M.; SOTO, A. J.; JILANI, A. S.; GOYAL, R. P. United States Patent n. US12373613B2, concessão em 29 jul. 2025. Disponível em: https://patents.google.com/patent/US12373613B2. Acesso em: 16 abr. 2026.

[44] STECOL SHANDONG ENGINEERING CO LTD. **A construction progress management method and system based on BIM**. Inventores: conforme registo CNIPA (múltiplos; ver fonte). Patente chinesa n. CN118521161B, concessão em 12 nov. 2024. Disponível em: https://patents.google.com/patent/CN118521161B. Acesso em: 16 abr. 2026.

[45] POLYUP INC. **Systems and methods for language-based three-dimensional interactive environment construction and interaction**. Inventores: ZARKESH, A. M.; ELAHIAN, K.; KESHMIRIAN, A.; ZAKHARENKOV, A.; ELAHIAN, Z.; VALENCIA, J. United States Patent n. US12229913B2, concessão em 18 fev. 2025 (pedido publicado como US20250029348A1 em 23 jan. 2025). Disponível em: https://patents.google.com/patent/US12229913B2. Acesso em: 16 abr. 2026.

[46] MAINTAINX INC. **LLM agent that generates a standardized data model from non standardized data**. Inventores: TURLICA, S. C.; DOZOIS-CAOUETTE, H.; MARENGERE-GOSSELIN, M.; RUEL, M.-A.; LACHANCE, M.; GUAY, P.; KURDI-TEYLOUNI, S. Pedido internacional PCT n. WO2025235716A1. Prioridade: 9 mai. 2024. Depósito internacional: 8 mai. 2025. Publicação internacional: 13 nov. 2025. Status: pendente (Google Patents). Disponível em: https://patents.google.com/patent/WO2025235716A1. Acesso em: 16 abr. 2026.