Indústria 5.0: Oportunidades e Desafios para Arquitetura e Construção

13º Simpósio Brasileiro de Gestão e Economia da Construção e 4º Simpósio Brasileiro de Tecnologia da Informação e Comunicação na Construção

ARACAJU-SE | 08 a 10 de Novembro

[1]APLICAÇÕES DE BIM, RPA E VISÃO COMPUTACIONAL DE FORMA INTEGRADA PARA O PLANEJAMENTO E CONTROLE DA SEGURANÇA EM CANTEIROS DE OBRAS

BIM, RPA, and computer vision integrated applications for safety planning and control at construction sites

Hugo Sefrian Peinado
Universidade Federal da Bahia | Salvador, BA | hugospeinado@gmail.com

Dayana Bastos Costa
Universidade Federal da Bahia | Salvador, BA | dayanabcosta@ufba.br

RESUMO

Há diversas aplicações de tecnologias digitais associadas ao paradigma da Construção 4.0 no contexto da segurança. No entanto, as implementações ocorrem muitas vezes de forma individual, não sendo aproveitado o potencial de aplicação integrada dessas tecnologias. Nesse sentido, esse artigo tem como objetivo analisar as aplicações integradas de modelagem da informação da construção (BIM), aeronaves remotamente pilotadas (RPA) e visão computacional no planejamento e controle da segurança (PCS) em canteiros de obras. A estratégia metodológica adotada foi a Revisão Sistemática de Literatura. A partir dos 14 estudos considerados elegíveis, foram identificados modelos, métodos e *frameworks* que tratam da implementação de BIM, RPA e visão computacional em duplas ou trio destinadas ao PCS. As contribuições observadas dão indícios do potencial de uso dessas tecnologias integradas aplicadas ao PCS. No entanto, considerando o estágio inicial de amadurecimento das propostas de integração, sugere-se o desenvolvimento de modelos/*frameworks* validados mais robustos que integrem BIM, RPA e visão computacional aproveitando as potencialidades individuais dessas tecnologias.

Palavras-chave: Construção 4.0; Drone; Aprendizado de Máquina; Modelagem da Informação da Construção; Revisão Sistemática de literatura.

ABSTRACT

There are several applications of digital technologies associated with the Construction 4.0 paradigm in the context of safety. However, implementations often occur individually, not exploiting the potential of integrated applications of these technologies. Thus, this paper aims to analyze the integrated applications of building information modeling (BIM), remotely piloted aircraft (RPA), and computer vision in safety planning and control (SPC) at construction sites. The methodological strategy adopted was the Systematic Literature Review. From the 14 studies considered eligible, models, methods, and frameworks were identified regarding the implementation of BIM, RPA, and computer vision in pairs or trio destined for the SPC. The observed contributions indicate the potential use of these integrated technologies applied to the SPC. However, considering the initial stage of the maturation of the integration proposals, the development of more robust validated models/frameworks that integrate BIM, RPA, and computer vision is suggested, benefiting from the individual potential of these technologies.

Keywords: Construction 4.0; Drone; Machine Learning; Building Information Modelling; Systematic literature review.

1 INTRODUÇÃO

Um dos desafios para a implementação da transformação digital no contexto da construção consiste na ampla adoção da abordagem “take-one-at-a-time” pelas organizações (SAWHNEY; ODEH, 2020). Essa abordagem é entendida como a implementação de uma tecnologia por vez, não aproveitando os benefícios do uso de tecnologias integradas entre si (SAWHNEY; ODEH, 2020). Wang *et al.* (2022) destacam que o foco das organizações na implementação de tecnologias individuais, não em um conjunto de tecnologias, é uma das barreiras para a implementação de tecnologias digitais e, portanto, para a transformação digital do setor rumo à Construção 4.0.

No que se refere à segurança no trabalho, a complexidade e a variabilidade dos canteiros de obras resultam em maior dificuldade para implementação da gestão da segurança nesses locais em comparação a outras indústrias (GUO; YU; SKITMORE, 2017). A gestão da segurança desempenha dois papeis fundamentais na

[1] PEINADO, H. S.; COSTA, D. B. Aplicações de BIM, RPA e visão computacional de forma integrada para o Planejamento e Controle da Segurança em canteiros de obras. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GESTÃO E ECONOMIA DA CONSTRUÇÃO, 13., 2023, Aracaju. **Anais [...].** Porto Alegre: ANTAC, 2023.

prevenção de acidentes na construção: o planejamento da segurança e o monitoramento ou controle da segurança (MARTINEZ; GHEISARI; ALARCÓN, 2020). Choe e Leite (2017) ressaltam que um desafio para o planejamento da segurança nos canteiros de obras consiste na pouca utilização de recursos tecnológicos voltados à segurança, que limita a habilidade dos profissionais na identificação de riscos ainda na etapa de projeto. Em relação à etapa de controle, Guo, Yu e Skitmore (2017) destacam que sem o suporte tecnológico necessário, o monitoramento de todo o canteiro de uma vez se torna inviável em função de suas dimensões e do caráter dinâmico das atividades desenvolvidas nele. Nesse sentido, Kolar, Chen e Luo (2018) destacam a necessidade de abordagens mais eficientes para as inspeções de segurança a partir do envolvimento de tecnologias digitais.

Asadzadeh *et al.* (2020) fizeram ampla sistematização das contribuições de tecnologias (principalmente a base de sensores) e Modelagem da Informação da Construção (*Building Information Modelling* - BIM) para a segurança no trabalho na construção. Entre as tecnologias mais utilizadas nos artigos analisados, encontram-se o BIM e visão computacional em primeiro e segundo lugar, respectivamente, e aeronaves remotamente pilotadas (RPA) em quinto lugar. Dobrucali *et al.* (2023) conduziram uma análise bibliométrica do uso de tecnologias digitais para a segurança e saúde do trabalhador na construção, destacando que tecnologias a base de sensores, inteligência artificial (técnicas de visão computacional, por exemplo) e BIM estão entre as tecnologias de maior tendência na pesquisa científica atual. Os autores reforçam ainda que as tecnologias utilizadas de forma integrada são ainda mais eficazes que quando utilizadas individualmente, destacando nesse contexto a integração entre BIM e RPA para gestão da segurança.

Há um número significativo de pesquisas que investigam o uso integrado de BIM com outras tecnologias digitais (ASADZADEH *et al.*, 2020; DOBRUCALI *et al.*, 2023). A partir das sistematizações realizadas por Asadzadeh *et al.* (2020) e Dobrucali *et al.* (2023), observa-se que não é documentado pelos autores aplicações que envolvam BIM e RPA, BIM e visão computacional, RPA e visão computacional ou a integração entre BIM, RPA e visão computacional no âmbito da segurança na construção. Nesse sentido, consiste como objetivo desse trabalho analisar as aplicações integradas de BIM, RPA e visão computacional no PCS em canteiros de obras. A identificação das propostas existentes que envolvem o uso integrado dessas tecnologias no PCS se caracteriza como uma etapa importante na elaboração de novas propostas que venham a contribuir com o avanço da transformação digital da construção no contexto da segurança no trabalho.

2 BIM, RPA E VISÃO COMPUTACIONAL PARA GESTÃO DA SEGURANÇA NO TRABALHO NA CONSTRUÇÃO

BIM é definido por Sacks *et al.* (2018) como uma tecnologia de modelagem e um conjunto associado de processos com a finalidade de produzir, comunicar e analisar modelos de construção. Asadzadeh *et al.* (2020) apresentam quatro subconjuntos de aplicações de BIM para apoio à gestão da segurança na construção: Planejamento da segurança, Prevenção através do projeto (*Pevention through Design* - PtD), Monitoramento da segurança (com a integração de outras tecnologias) e Gestão do conhecimento. Mesmo com o expressivo crescimento da implementação de BIM para gestão da segurança na construção na última década, a maior parte da produção científica é destinada à etapa pré-construção, que compreende o projeto e o planejamento da construção (MARTÍNEZ-AIRES; LÓPEZ-ALONSO; MARTÍNEZ-ROJAS, 2018; ASADZADEH *et al.,* 2020). Nesse sentido, ainda há espaço para investigações que considerem a utilização do BIM durante a etapa da construção, principalmente, com a integração de outras tecnologias.

RPA, também tratadas como drones, consistem em aeronaves sem um piloto humano a bordo (COSTA; GHEISARI; ALÁRCON, 2023). As aplicações de RPA no contexto da segurança tem sido mais direcionadas à etapa de controle envolvendo a identificação de locais de risco e de comportamentos inseguros dos trabalhadores, além do monitoramento de conformidade da obra e dos trabalhadores com as normas e procedimentos de segurança (MELO; COSTA, 2019; MARTINEZ; GHEISARI; ALARCÓN, 2020; REY; MELO; COSTA, 2021). No entanto, Melo e Costa (2019), Martinez, Gheisari e Alarcón (2020) e Lima e Costa (2023) buscaram sugerir práticas que utilizem o RPA também no planejamento da segurança. Apesar das aplicações de RPA para o PCS existentes, estudos de integração de RPA a outras tecnologias relacionados ao paradigma da Construção 4.0 são ainda necessários para explorar maiores potencialidades de aplicação dessa tecnologia no contexto da segurança.

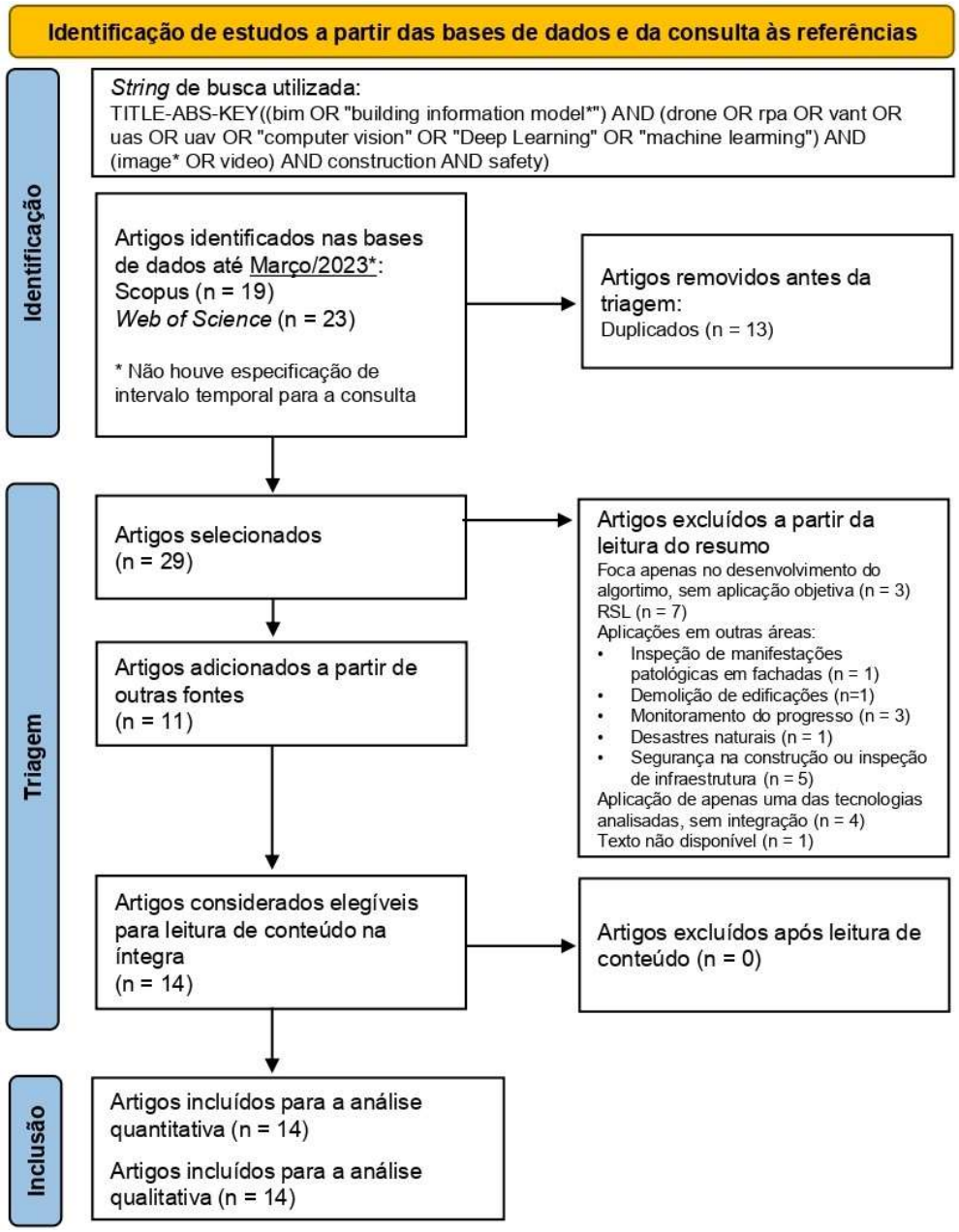
A visão computacional é um campo da inteligência artificial que tem a finalidade de replicar a funcionalidade da visão humana por meio de tecnologia e algoritmos, de modo que possam ser interpretadas e extraídas informações significativas de imagens e vídeos (PANERU; JEELANI, 2021). Ottoni, Novo e Costa (2022)

ressaltam as seguintes aplicações de visão computacional no contexto da segurança: a detecção de equipamentos de proteção individual e sistemas de proteção coletiva, reconhecimento de máquinas e identificação de atos inseguros dos trabalhadores. Conforme destacam Baduge *et al.* (2022), o monitoramento da segurança nos canteiros de obras de forma automatizado utilizando inteligência artificial alcançará eficiência e acurácia superior se comparados ao monitoramento realizado de forma manual, o que potencializa a busca por explorar essa área do conhecimento.

3 MÉTODO DE PESQUISA

A estratégia metodológica adotada para a condução do presente estudo foi a Revisão Sistemática de Literatura (RSL) (DRESH; LACERDA; ANTUNES, 2016). A RSL foi conduzida de acordo com as diretrizes do *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses* (PRISMA) (LIBERATI *et al.*, 2009). A formatação do diagrama se baseou no estabelecido por PRISMA (2020) (Figura 1).

Figura 1: Protocolo da RSL



Fonte: os autores.

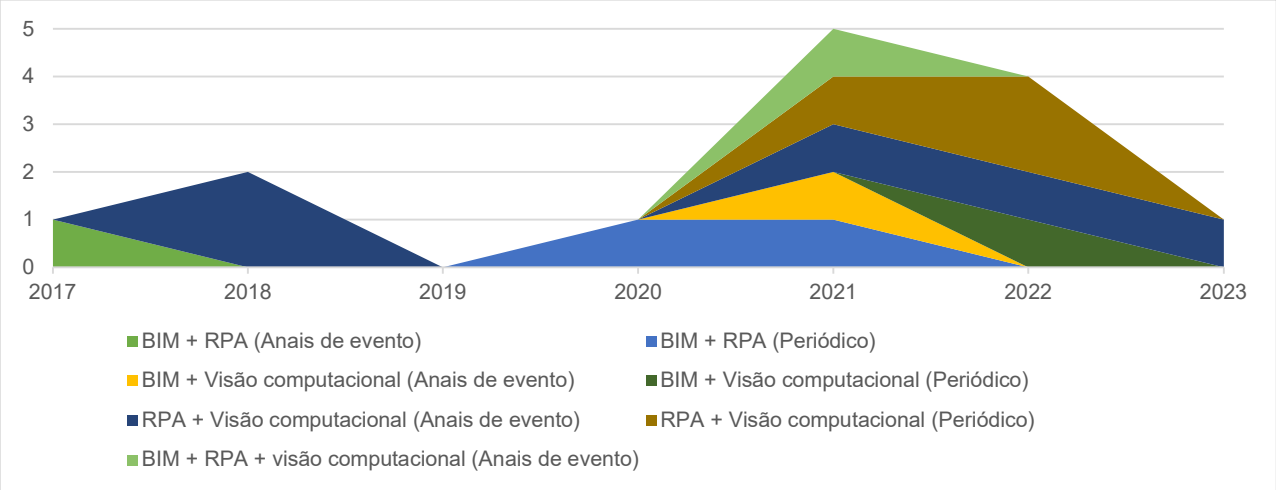
A consulta foi realizada na Scopus e *Web of Science*, duas bases de dados amplamente utilizadas na elaboração de RSL no âmbito da gestão da segurança na construção, como por exemplo em Asadzadeh *et*

al. (2020), Paneru, Jeelani (2021) e Pham *et al.* (2021). Considerando o baixo retorno de estudos resultantes das bases de dados, procedeu-se também à busca por outros trabalhos que tenham sido omitidos ao utilizar a *string* de busca ou que são oriundos de anais de evento não indexados nas bases de dados, estratégia também adotada por Asadzadeh *et al.* (2020). Foram consultadas principalmente a lista de referências dos artigos que tratam sobre a temática. Os critérios de exclusão são indicados na Figura 1. Foram considerados elegíveis os trabalhos que tratam de aplicações ou proposições de métodos, modelos, sistemas ou *frameworks* a partir da integração BIM, RPA e visão computacional para o PCS.

4 RESULTADOS E ANÁLISES

Entre os 14 trabalhos identificados, oito são publicações em anais de evento e seis em periódicos. Dois artigos identificados foram publicados nos anais de um mesmo evento (*38th International Symposium on Automation and Robotics in Construction* - ISARC 2021), enquanto os demais trabalhos foram publicados cada um em um evento ou periódico distinto, que podem ser consultados na lista de referências. A produção ao longo do tempo pode ser observada na Figura 2.

Figura 2: Produção de artigos publicados em anais de evento e periódicos ao longo do tempo



Fonte: os autores.

Entre os trabalhos identificados, três trataram da integração de BIM e RPA, dois sobre BIM e visão computacional, oito sobre RPA e visão computacional e um sobre BIM, RPA e visão computacional. A seguir, são analisados os estudos identificados e destacadas as contribuições para o PCS.

4.1 BIM e RPA

Alizadehsalehi *et al.* (2020) propuseram um modelo que integra BIM 4D e RPA para a melhoria do desempenho da segurança em canteiros de obras. O modelo prevê a identificação manual de áreas de risco e a proposição de medidas de prevenção a partir do modelo BIM 4D na etapa de planejamento do empreendimento. Na etapa de construção, são capturados dados por meio de RPA em canteiros de obras. O RPA é utilizado para monitoramento das áreas de risco determinadas na etapa de projeto e, ainda, para detecção de outras situações de risco no canteiro de obras. A partir da coleta de recursos visuais, é feito o comparativo manual desses dados com os requisitos de segurança e definidas ações de prevenção. O modelo proposto foi avaliado por 118 profissionais de segurança no trabalho por meio de questionário. Alizadehsalehi *et al.* (2017) propõem uma versão preliminar do modelo apresentado em detalhes e validado por Alizadehsalehi *et al.* (2020).

Manzoor *et al.* (2021) construíram um *framework* com foco na gestão da segurança a partir da integração de BIM com outras tecnologias digitais, entre elas o RPA. Os autores sugerem o uso de imagens coletadas por RPA para construção de nuvens de pontos a partir de técnicas de fotogrametria, para então comparar o que está executado com o planejado (no modelo BIM). A proposta foi avaliada por 45 profissionais de gestão da segurança.

As principais contribuições da integração de BIM e RPA para o PCS indicadas pelos gestores de segurança que avaliaram as propostas consistiu na identificação ainda que manual de riscos em modelo BIM 4D

(ALIZADEHSALEHI *et al.*, 2020), redução de número de pessoas para coleta de dados sobre segurança em canteiros de obras (ALIZADEHSALEHI *et al.*, 2020), rapidez nas inspeções de segurança e na obtenção de informações sobre condições de trabalho (ALIZADEHSALEHI *et al.*, 2020), captura de informações de segurança em pontos de difícil acesso (ALIZADEHSALEHI *et al.*, 2020), aperfeiçoamento da compreensão dos riscos durante as etapas de planejamento e controle (ALIZADEHSALEHI *et al.*, 2020) e comparação do executado em relação ao planejado (MANZOOR *et al.*, 2021). O estudo de Alizadehsalehi *et al.* (2020) também registrou limitações destacadas pelos gestores na utilização dessas tecnologias integradas para o PCS, como a falta de verificação das regras de segurança de forma automatizada no modelo BIM e a falta de confiança na comparação entre o planejado e o executado.

4.2 BIM e visão computacional

Tran, Nguyen e Park (2021) propuseram um método com uso de BIM e técnica de costura de imagens (*image stitching*) para registro de zonas de risco na construção. A partir do planejamento da segurança em BIM, são determinadas as zonas de risco em canteiro de obras e as posições da câmera sugeridas para visualização dessas áreas de risco. Durante a construção, imagens a partir do modelo BIM e dos respectivos locais no canteiro de obras são vinculadas (costuradas) entre si, de modo a permitir a identificação automática dos riscos naquele local. Foi desenvolvido estudo de caso na detecção de riscos em local com um andaime, que apresentou resultados satisfatórios.

Yang *et al.* (2022) propuseram um *framework* para gestão da segurança contra queda de altura em canteiros de obras integrando visão computacional baseada em algoritmo de aprendizado profundo (AP), imagens obtidas a partir de câmera de monitoramento e BIM. As imagens capturadas em tempo real são utilizadas por algoritmos de AP para detecção da localização da fonte do risco de queda de altura, dos equipamentos e sistemas de proteção e dos trabalhadores da construção. Essas informações são comparadas àquelas resultantes do planejamento de segurança em BIM de forma automática. O método proposto foi implementado em um estudo de caso. Os mesmos vídeos utilizados pelo algoritmo para detecção no estudo de caso foram submetidos à avaliação de dois profissionais da gestão da segurança. As indicações de risco a partir do algoritmo e da avaliação dos gestores da segurança convergiram nas áreas inspecionadas próximas à câmera e divergiram significativamente nas áreas de visualização mais distantes da câmera.

As contribuições do uso integrado de BIM e visão computacional ao PCS destacadas pelos autores foram a identificação e registro de zonas de risco em BIM (TRAN; NGUYEN; PARK, 2021), a comparação automática de recursos visuais coletados em canteiros de obras com o planejamento da segurança em BIM (YANG *et al.*, 2022) e a possibilidade de armazenar conhecimento a partir da detecção automática (YANG *et al.*, 2022). Com base no estudo de caso conduzido por Yang *et al.* (2022), uma limitação identificada foi a diferença de julgamento entre profissionais de segurança e o sistema de detecção automatizada em relação a eventos inseguros.

4.3 RPA e visão computacional

Guo, Niu e Li (2018), Sharma *et al.* (2021) e Yan *et al.* (2021) desenvolveram sistemas a partir de técnicas de visão computacional e RPA para detecção de trabalhadores e se eles estavam ou não utilizando capacetes. Nesse mesmo contexto, Shanti *et al.* (2022) propuseram um sistema que integra RPA e AP para a detecção de cinto de segurança, linha de vida para ancoragem do cinto e capacete de segurança. O desempenho dos algoritmos para detecção desenvolvidos foi satisfatório nos estudos de Sharma *et al.* (2021), Yan *et al.* (2021) e Shanti *et al.* (2022). Gheisari, Rashidi e Esmaeili (2018) elaboraram um sistema automatizado para identificação de locais com riscos de queda na construção baseado em RPA e técnicas de processamento de imagens. Não houve processo de avaliação objetiva dos resultados.

Awolusi *et al.* (2022) e Li *et al.* (2022) propõem um *framework* com a utilização de RPA e técnicas de aprendizado de máquina (AM) para monitoramento da segurança na construção. Apenas a proposta de Li *et al.* (2022) foi implementada em um estudo de caso em canteiro de obras. Além de ter focado exclusivamente na detecção de montantes de sistemas de GcR, o algoritmo de AM utilizado por Li *et al.* (2022) apresentou baixo desempenho. Por fim, Peinado *et al.* (2023) propuseram um conjunto de critérios para coleta e processamento de dados utilizando RPA e algoritmos de AP para inspeções de segurança de sistemas de guarda-corpo e rodapés (GcR) em obras verticais de paredes de concreto moldadas no local com base em um estudo de caso exploratório.

Todos os estudos identificados são destinados exclusivamente à etapa de monitoramento da segurança. Nenhum dos estudos validou o sistema proposto com a participação de gestores de segurança. Assim, as contribuições indicadas nesses trabalhos para a etapa de monitoramento da segurança foram baseadas exclusivamente na experiência e percepção de seus autores. As contribuições dos sistemas propostos foram facilitar e agilizar as atividades de gestores de segurança na identificação de riscos na construção e no monitoramento do uso de EPI entre os trabalhadores. Em relação às limitações, Li *et al.* (2022) destacam algumas barreiras específicas ao uso de RPA no monitoramento da segurança já bem documentadas na literatura, como a criação de novos riscos ocupacionais que precisarão ser observados no PCS.

4.4 BIM, RPA e visão computacional

Johansen *et al.* (2021) propuseram um sistema com a integração de BIM, RPA e técnicas de visão computacional para detecção de sistemas de GcR na periferia de pavimentos e comparação automática com o previsto no modelo BIM. O sistema tem a finalidade de identificar desvios da execução em relação ao planejado para esses sistemas. As imagens coletadas por RPA são utilizadas para criação de nuvem de pontos. A partir disso, técnicas de visão computacional combinadas são utilizadas para processamento da nuvem de pontos e detecção dos sistemas de GcR. A nuvem de pontos é posteriormente comparada com o modelo BIM para identificação de falhas. O sistema foi aplicado em uma simulação de canteiro de obras.

No estudo de Johansen *et al.* (2021), as contribuições do uso das tecnologias integradas para o PCS também foram limitadas à percepção dos autores, uma vez que não houve envolvimento de gestores de segurança no processo de validação do sistema. As contribuições indicadas foram a identificação automatizada de riscos em modelo BIM 4D, a comparação automática entre o executado e o planejado e a potencial redução das atividades dos gestores da segurança em inspeções, redirecionando seus esforços para outras atividades (JOHANSEN *et al.*, 2021).

5 DISCUSSÕES E DIRECIONAMENTO PARA PESQUISAS FUTURAS

Apesar do número crescente de estudos direcionados à integração de tecnologias digitais para gestão da segurança na construção (ASADZADEH *et al.*, 2020; DOBRUCALI *et al.*, 2023), observa-se ainda número reduzido de artigos voltados ao uso integrado de BIM, RPA e visão computacional para o PCS.

Os estudos apresentam modelos, métodos, sistemas e *frameworks* para a integração dessas tecnologias com foco na gestão da segurança, indicando algumas contribuições e limitações. No entanto, em nenhum dos trabalhos analisados houve a implementação dessas propostas em estudo de caso em canteiro de obras seguido da avaliação de gestores de segurança sobre suas contribuições e limitações. Ainda, apenas Alizadehsalehi *et al.* (2020), Manzoor *et al.* (2021) e Yang *et al.* (2022) tiveram a participação de gestores na validação das propostas com base em suas experiências anteriores com as tecnologias. Nesse sentido, as contribuições indicadas nos artigos para o PCS são, em sua maioria, baseadas na percepção dos próprios autores, excetuando aquelas indicadas nos três artigos supracitados.

A implementação dos modelos/métodos/sistemas/*frameworks* apresentados pelos autores em estudos de caso em canteiro de obras possibilitaria a identificação de potencialidades do uso dessas propostas e dificuldades na implementação, o que poderia contribuir significativamente com o aperfeiçoamento das propostas (LIMA; COSTA, 2023; REY; MELO; COSTA, 2021). Ainda, a participação de gestores de modo a validar as propostas também é etapa importante (MELO; COSTA, 2019; REY; MELO; COSTA, 2021), principalmente com a finalidade de aperfeiçoa-las e atestar, na perspectiva desses profissionais, se os sistemas desenvolvidos têm aplicabilidade nas etapas de PCS em canteiro de obras e como eles podem ser integrados a essas etapas de modo a dar suporte à tomada de decisão. Extrapolando o especificado por Melo e Costa (2019) e Lima e Costa (2023) para o contexto mais amplo do paradigma da Construção 4.0, a melhoria do desempenho da segurança considerando o uso de tecnologias digitais somente será possível se as informações geradas por essas tecnologias forem incorporadas ao processo de tomada de decisão de gestores, além de outras etapas do PCS.

A partir dos resultados e das discussões, são sugeridas algumas perspectivas para pesquisas futuras considerando a integração de BIM, RPA e visão computacional para o PCS. Essas sugestões de pesquisas são apresentadas na forma de questões, como segue:

- De que outras formas o RPA e técnicas de visão computacional podem ser integradas ao BIM para aperfeiçoamento do PCS?

- Dado o estágio ainda inicial das aplicações e desenvolvimento de modelos/*frameworks* que integram BIM, RPA e visão computacional para a gestão da segurança, como as potencialidades individuais dessas tecnologias podem contribuir para o aperfeiçoamento do PCS a partir do seu uso integrado?
- Como as informações geradas a partir de coletas e processamento dos dados podem ser convertidas em conhecimento para uso na própria obra ou em obras futuras?
- Como o BIM integrado às demais tecnologias pode dar suporte à gestão do conhecimento a partir dos dados coletados nas inspeções automatizadas?

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho contribui para o campo do conhecimento ao sistematizar aplicações de BIM, RPA e visão computacional destinadas ao planejamento e ao controle da segurança em canteiros de obras observadas em 14 estudos, uma vez que essa sistematização não foi identificada em estudos anteriores. As contribuições observadas dão indícios do potencial de uso dessas tecnologias integradas aplicadas ao PCS. No entanto, essas implementações ainda estão em estágio inicial de amadurecimento, carecendo de novas propostas mais elaboradas e validadas. Nesse sentido, enquanto sugestão de trabalho futuro, recomenda-se o desenvolvimento de *framework* robusto considerando a integração de BIM, RPA e visão computacional, explorando as potencialidades individuais de cada uma dessas tecnologias destacadas na literatura. Ainda, sugere-se que esse *framework* seja validado por meio de estudos de caso, questionários e/ou entrevistas, de modo a atestar sua aplicabilidade, contribuições e limitações.

Ainda, considerando que RPA e visão computacional são entendidos como sensores que captam as informações da camada física (canteiro de obras) para a camada digital (modelo BIM, por exemplo), o foco do estudo apenas na interface de sensoriamento é caracterizado como uma limitação do presente estudo. Pesquisas futuras devem endereçar esforços também em atuadores buscando aperfeiçoar a comunicação entre as camadas digital e física, de modo a compor o gêmeo digital para segurança.

7 AGRADECIMENTOS

Ao Ministério da Educação por meio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão de bolsa de doutorado ao primeiro autor. Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão de recursos financeiro (Projeto 402380/2021-5).

REFERÊNCIAS

ALIZADEHSALEHI, S.; ASNAFI, M.; YITMEN, I.; CELIK, T. UAS-BIM based Real-time Hazard Identification and Safety Monitoring of Construction Projects. In: NORDIC CONFERENCE ON CONSTRUCTION ECONOMICS AND ORGANIZATION, 9, 2017. **Anais [...]**, 2017.

ALIZADEHSALEHI, S.; YITMEN, I.; CELIK, T.; ARDITI, D. The effectiveness of an integrated BIM/UAV model in managing safety on construction sites. **International Journal of Occupational Safety and Ergonomics**, vol. 26, no. 4, p. 829–844, 1 Oct. 2020. https://doi.org/10.1080/10803548.2018.1504487.

ASADZADEH, A.; ARASHPOUR, M.; LI, H.; NGO, T.; BAB-HADIASHAR, A.; RASHIDI, A. Sensor-based safety management. **Automation in Construction**, vol. 113, 1 May 2020. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103128.

AWOLUSI, I.; AKINSEMOYIN, A.; CHAKRABORTY, D.; AL-BAYATI, A. Worker Safety and Health Activity Monitoring in Construction Using Unmanned Aerial Vehicles and Deep Learning. 2022. In: CONSTRUCTION RESEARCH CONGRESS, 2022. **Anais [...]**. 2022. p. 463–473.

BADUGE, S. K.; THILAKARATHNA, S.; PERERA, J. S.; ARASHPOUR, M.; SHARAFI, P.; TEODOSIO, B.; SHRINGI, A.; MENDIS, P. Artificial intelligence and smart vision for building and construction 4.0: Machine and deep learning methods and applications. **Automation in Construction**, vol. 141, 1 Sep. 2022. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104440.

CHOE, S.; LEITE, F. Construction safety planning: Site-specific temporal and spatial information integration. **Automation in Construction**, vol. 84, p. 335–344, 1 Dec. 2017. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.09.007.

COSTA, D.B.; GHEISARI, M.; ALARCÓN, L.F. UAS applications to support Lean Construction implementarion. In: GONZÁLEZ, V. A.; HAMZEH, F.; ALARCÓN, L.F. (Eds.) **Lean Construction 4.0**: Driving a Digital Revolution of Production Management in the AEC Industry. New York: Routledge, 2023.

DOBRUCALI, E.; SADIKOGLU, E.; DEMIRKESEN, S.; ZHANG, C.; TEZEL, A.; KIRAL, I. A. A bibliometric analysis of digital technologies use in construction health and safety. **Engineering, Construction and Architectural Management**, 20 Mar. 2023. https://doi.org/10.1108/ecam-08-2022-0798.

DRESH, A. LACERDA, D.P.; ANTUNES JR., J.A.V. **Design Science Research**: a Method for Science and Technology Advances. Springer, 2015.

GHEISARI, M.; RASHIDI, A.; ESMAEILI, B. Using Unmanned Aerial Systems for Automated Fall Hazard Monitoring. 2018. In: Construction Research Congress 2018, 2018. **Anais [...]** 2018. p. 62–2.

GUO, H.; YU, Y.; SKITMORE, M. Visualization technology-based construction safety management: A review. **Automation in Construction**, vol. 73, p. 135–144, 1 Jan. 2017. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.10.004.

GUO, Y.; NIU, H.; LI, S. Safety Monitoring in Construction Site based on Unmanned Aerial Vehicle Platform with Computer Vision using Transfer Learning Techniques. 2018. In: ASIA-PACIFIC WORKSHOP ON STRUCTURAL HEALTH MONITORING, 7, 2018. **Anais [...]** 2018. p. 1–9. Available at: http://www.ndt.net/?id=24114.

JOHANSEN, K.; FIGUEIREDO, R.; GOLOVINA, O.; TEIZER, J.. Autonomous Safety Barrier Inspection in Construction: An Approach Using Unmanned Aerial Vehicles and SafeBIM. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON AUTOMATION AND ROBOTICS IN CONSTRUCTION (ISARC 2021), 38, 2021. **Anais [...]** 2021. p. 629–636.

KOLAR, Z.; CHEN, H.; LUO, X. Transfer learning and deep convolutional neural networks for safety guardrail detection in 2D images. **Automation in Construction**, vol. 89, p. 58–70, 1 May 2018. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.01.003.

LIMA, M. I. S. C.; COSTA, D. B. Recomendações e boas práticas para a integração do monitoramento da segurança com drone ao planejamento e controle da segurança de obras. **Ambiente Construído**, vol. 23, no. 1, p. 213–231, Jan. 2023. https://doi.org/10.1590/s1678-86212023000100659.

LI, Y.; ESMAEILI, B.; GHEISARI, M.; KOSECKA, J.; RASHIDI, A. Using Unmanned Aerial Systems (UAS) for Assessing and Monitoring Fall Hazard Prevention Systems in High-rise Building Projects. **arXiv**, 2022. https://doi.org/10.3390/xxxxx.

LIBERATI, A.; ALTMAN, D.G.; TETZLAFF, J.; MULROW, C.; GOTZSCHE, P.C.; IOANNIDIS, J.P.A.; CLARKE,M; DEVEREAUX, P.J.; KLEIJNEN, J; MOHER, D. The PRISMA statement for reporting systematic reviews and meta-analyses of studies that evaluate health care interventions: explanation and elaboration. **Journal of clinical epidemiology**, v. 62 (10), p.1-34, 2009.

MANZOOR, B.; OTHMAN, I.; POMARES, J. C.; CHONG, H. Y. A research framework of mitigating construction accidents in high-rise building projects via integrating building information modeling with emerging digital technologies. **Applied Sciences (Switzerland)**, vol. 11, no. 18, 1 Sep. 2021. https://doi.org/10.3390/app11188359.

MARTÍNEZ-AIRES, M. D.; LÓPEZ-ALONSO, M.; MARTÍNEZ-ROJAS, M. Building information modeling and safety management: A systematic review. **Safety Science**, vol. 101, p. 11–18, 1 Jan. 2018. https://doi.org/10.1016/j.ssci.2017.08.015.

MARTINEZ, J. G.; GHEISARI, M.; ALARCÓN, L. F. UAV Integration in Current Construction Safety Planning and Monitoring Processes: Case Study of a High-Rise Building Construction Project in Chile. **Journal of Management in Engineering**, vol. 36, no. 3, May 2020. https://doi.org/10.1061/(asce)me.1943-5479.0000761.

MELO, R. R. S.; COSTA, D. B. Integrating resilience engineering and UAS technology into construction safety planning and control. **Engineering, Construction and Architectural Management**, vol. 26, no. 11, p. 2705–2722, 5 Nov. 2019. https://doi.org/10.1108/ECAM-12-2018-0541.

MELO, R. R. S.; COSTA, D. B.; ÁLVARES, J. S.; IRIZARRY, J. Applicability of unmanned aerial system (UAS) for safety inspection on construction sites. **Safety Science**, vol. 98, p. 174–185, 1 Oct. 2017. https://doi.org/10.1016/j.ssci.2017.06.008.

OTTONI, A. L C; NOVO, M. S; COSTA, D. B. Deep Learning for Vision Systems in Construction 4.0: A Systematic Review. **Signal, image and video processing**, 2022. Available at: http://www.scopus.com.

PANERU, S.; JEELANI, I. Computer vision applications in construction: Current state, opportunities & challenges. **Automation in Construction**, vol. 132, 1 Dec. 2021. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103940.

PEINADO, H.S.; MELO, R.R.S.; SANTOS, M.C.F; COSTA, D.B. Potential application of Deep Learning and UAS for guardrail safety inspections. In: ANNUAL CONFERENCE OF THE INTERNATIONAL GROUP FOR LEAN CONSTRUCTION, 31., 2023, Lille. **Anais [...]** IGLC, 2023.

PHAM, H. T.T.L.; RAFIEIZONOOZ, M.; HAN, S.; LEE, D. E. Current status and future directions of deep learning applications for safety management in construction. **Sustainability (Switzerland)**, vol. 13, no. 24, 1 Dec. 2021. https://doi.org/10.3390/su132413579.

PRISMA. **PRISMA 2020 flow diagram for new systematic reviews which included searches of databases and registers only**, 2020. Disponível em: https://prisma-statement.org//PRISMAStatement/FlowDiagram Acesso em: 02 fev. 2023.

REY, R. O.; MELO, R. R. S.; COSTA, D. B. Design and implementation of a computerized safety inspection system for construction sites using UAS and digital checklists – Smart Inspecs. **Safety Science**, vol. 143, 1 Nov. 2021. https://doi.org/10.1016/j.ssci.2021.105430.

SACKS, R.; EASTMAN, C.; LEE, G.; TEICHOLZ, P. **BIM Handbook**: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers, Contractors, and Facility Managers. Hoboken: Wiley, 2018.

SHANTI, M. Z.; CHO, C. S.; DE SOTO, B. G.; BYON, Y. J.; YEUN, C. Y.; KIM, T. Y. Real-time monitoring of work-at-height safety hazards in construction sites using drones and deep learning. **Journal of Safety Research**, vol. 83, p. 364–370, 1 Dec. 2022. https://doi.org/10.1016/j.jsr.2022.09.011.

SHARMA, S.; VENKATA SUSMITHA, A. V.; VAN, L. D.; TSENG, Y. C. An Edge-Controlled Outdoor Autonomous UAV for Colorwise Safety Helmet Detection and Counting of Workers in Construction Sites. In: IEEE VEHICULAR TECHNOLOGY CONFERENCE, 2021. **Anais [...]** Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2021 https://doi.org/10.1109/VTC2021-Fall52928.2021.9625393.

TRAN, S. V.-T.; NGUYEN, T. L.; PARK, C. A BIM Integrated Hazardous Zone Registration Using Image Stitching. 2021. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON AUTOMATION AND ROBOTICS IN CONSTRUCTION (ISARC2021), 38, 2021. **Anais [...].** 2021. p. 176–181.

WANG, K.; GUO, F.; ZHANG, C.; SCHAEFER, D. From Industry 4.0 to Construction 4.0: barriers to the digital transformation of engineering and construction sectors. **Engineering, Construction and Architectural Management**, 2022. https://doi.org/10.1108/ECAM-05-2022-0383.

YANG, B.; ZHANG, B.; ZHANG, Q.; WANG, Z.; DONG, M.; FANG, T. Automatic detection of falling hazard from surveillance videos based on computer vision and building information modeling. **Structure and Infrastructure Engineering**, vol. 18, no. 7, p. 1049–1063, 2022. https://doi.org/10.1080/15732479.2022.2039217.

YAN, G.; SUN, Q.; HUANG, J.; CHEN, Y. Helmet detection based on deep learning and random forest on UAV for power construction safety. **Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics**, vol. 25, no. 1, p. 40–49, 20 Jan. 2021. https://doi.org/10.20965/JACIII.2021.P0040.