

ANÁLISE CRÍTICA DO PAPEL DO BIM NA GESTÃO DA SEGURANÇA DO TRABALHO NA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO

CRITICAL ANALYSIS OF THE ROLE OF BIM IN SAFETY MANAGEMENT IN THE CONSTRUCTION INDUSTRY

 Igor Alencar Rodrigues¹

 Bianca Maria Vasconcelos²

¹ Universidade de Pernambuco, Recife, PE, Brasil, iar@poli.br

² Universidade de Pernambuco, Recife, PE, Brasil, bianca.vasconcelos@upe.br

Resumo

Devido à sua natureza migratória, a indústria da construção ainda sofre anualmente com altas taxas de lesões ocupacionais e de fatalidades quando comparada a outras indústrias. A gestão tradicional da segurança depende da experiência humana e de processos manuais, com isso, nos últimos anos, vários estudos se dedicam a investigar o uso da modelagem da informação da construção (BIM) para otimizar a gestão da segurança. O objetivo principal deste estudo foi investigar o potencial do BIM na gestão da segurança do trabalho no setor da construção. Para tal propósito, uma revisão sistemática foi realizada, classificando os artigos encontrados em cinco categorias: Checagem automática de regras, *Feedback* proativo, Treinamento e educação, Sistemas baseados no conhecimento e Planejamento e visualização. Os resultados mostram um crescimento de aplicações práticas do BIM, apesar das limitações ainda encontradas, e um avanço tecnológico quando comparado aos cenários anteriores. O BIM serve como uma plataforma central e tem o potencial de uso expandido quando combinado com tecnologias habilitadoras. Pode-se constatar um estágio inicial das aplicações práticas em alguns estudos, com limitações de riscos mitigados, de parâmetros monitorados e de funcionários envolvidos. Além disso, nota-se que o principal risco mitigado, eliminado ou monitorado é o risco de queda em altura. Ainda que o BIM possibilite uma melhora na gestão da segurança tradicional, é necessário que sua utilização seja mais estudada e aplicada em maior escala. Uma das recomendações para estudos futuros é a otimização do processo de atualização do modelo BIM por meio do uso de tecnologias habilitadoras.

Palavras-chave: gerenciamento de riscos, modelos paramétricos, indústria da construção, revisão sistemática da literatura.

Abstract

Due to its migratory nature, the construction industry still suffers annually from high rates of occupational injuries and fatalities when compared to other industries. Traditional safety management relies on human experience and manual processes. Consequently, several recent studies have investigated building information modeling (BIM) to optimise safety management within the construction sector. For this purpose, a systematic review was conducted, categorising the articles found into five categories: Automatic rule checking, proactive feedback, training and education, knowledge-based systems, and planning and visualisation. The results reveal growth in practical BIM applications despite the limitations still found and technological advancements compared to previous scenarios. BIM serves as a central platform and has the potential to expand when combined with enabling technologies. An initial stage of practical applications can be observed in some studies, with limitations on mitigated risks, monitored parameters and involved employees. In addition, it is noteworthy that the main risk mitigated, eliminated, or monitored is the risk of falling from a height. Although BIM improves traditional safety management, its use must be further studied and applied on a larger scale. One of the recommendations for future studies is optimising the BIM model update process using enabling technologies.

Keywords: risk management, parametric models, construction industry, systematic literature review.

Contribuição dos autores:

IAR: conceituação, curadoria de dados, análise formal, investigação, metodologia, visualização, escrita - rascunho original, escrita - revisão e edição. **BMV:** conceituação, administração de projetos, supervisão, validação, escrita - revisão e edição.

Fomento: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior

Declaração de conflito: nada foi declarado.

Editora Responsável:

Regina Coeli Ruschel 

How to cite this article:

RODRIGUES, I. A.; VASCONCELOS, B. M. Análise crítica do papel do BIM na gestão da segurança do trabalho na indústria da construção. **PARC Pesq. em Arquit. e Constr.**, Campinas, SP, v. 15, p. e024004, 2024. DOI: <https://doi.org/10.20396/parc.v15i00.8674162>

Submitted 31.07.2023 – Approved 10.01.2024– Published 11.04.2024

e024004-1 | **PARC Pesq. em Arquit. e Constr.**, Campinas, SP, v. 15, p. e024004, 2024, ISSN 1980-6809



Introdução

Devido as características dinâmicas do ambiente da construção, a taxa de fatalidades e de lesões ocupacionais no setor é considerada alta (Lu *et al.*, 2021). Um estudo realizado pela Occupational Safety and Health Administration (OSHA) em 2023 demonstrou que dos 5.486 acidentes fatais de trabalho, ocorridos nos Estados Unidos em 2022, a indústria da construção foi responsável por 18% (OSHA, 2023). Na China, a média de fatalidades por ano, no setor da construção, foi maior que 2.500 mortes entre 1997 e 2014 (Guo; Yu; Skitmore, 2017). Apesar de existir uma atuação governamental, através de legislações de segurança, e um esforço dos profissionais de segurança, ainda não existe uma redução mundial significativa das taxas de acidentes e de fatalidades neste setor (Azhar, 2017).

Os métodos tradicionais para a gestão da segurança são implementados após a fase de projeto, são baseados em operações manuais, gastam muito tempo e são pouco eficientes no setor da construção (Yuan *et al.*, 2019). Em razão da complexidade dos canteiros de obras e da natureza migratória da indústria da construção, obter e coordenar a informação se torna um desafio complexo (Yang *et al.*, 2022). A modelagem da informação da construção (BIM) oferece uma plataforma para armazenagem e troca de informação de forma visual (Li; Yu; Liu, 2018).

Estudos mostram que a aplicação do BIM permite identificar risco de segurança com eficácia e reduzi-los ainda na fase de planejamento e projeto (Bao *et al.*, 2022; Xu; Ran; Rao, 2022). O BIM associado com tecnologias habilitadoras também permite um monitoramento contínuo de riscos durante a fase de construção (Park; Kim; Cho, 2016; Yang *et al.*, 2022). Comparado com o modelo tradicional, a utilização do BIM melhora a qualidade e eficiência do trabalho, pois permite a redução de riscos, de erros e de custos (Liu; Zou, 2021).

Em virtude da indústria da construção necessitar de melhorias nos processos de gestão da segurança do trabalho, e do BIM ser apontado por pesquisas como uma ferramenta e uma metodologia capaz de melhorar esse cenário, esse estudo tem o propósito de realizar uma revisão sistemática da literatura (RSL) sobre o uso do BIM, no setor da construção, com foco na gestão da segurança do trabalho, discutir a evolução das metodologias e das soluções existentes, analisar as associações com tecnologias habilitadoras e compreender os benefícios e as limitações quando aplicadas. No entanto, para que este objetivo seja plenamente alcançado, é fundamental mapear e analisar revisões sistemáticas antecedentes sobre o tema para tecer discussões que demonstrem uma mudança de cenário ao longo dos últimos anos.

A primeira revisão sistemática mapeada foi realizada por Zou, Kiviniemi e Jones (2017) sobre o gerenciamento de risco, de acordo com o conceito do Project Management Institute (PMI), através do BIM e tecnologias relacionadas. O estudo focou em segurança, mas também deu ênfase para outras áreas como cronograma, custos e qualidade. Os artigos encontrados foram categorizados como: i) BIM; ii) sistemas baseados em conhecimento; iii) checagem automática de regras; iv) gestão de risco através de tecnologias de informações reativas; e v) gestão de risco através de tecnologias de informações proativas.

Taype e Dezen-Kempter (2020) estruturaram uma RSL com foco exclusivo sobre as contribuições do BIM para a segurança laboral na indústria da construção com buscas entre os anos de 2007 e 2019. Os artigos foram classificados de acordo com quinze categorias de problemas: i) identificação de riscos; ii) desenho para segurança; iii) quedas; iv) monitoramento de segurança; v) verificação de regras; vi) espaços de trabalho; vii) reutilização do conhecimento de risco; viii) comportamento inseguros; ix)

estruturas temporárias; x) maquinários; xi) produtividade; xii) equipamento de proteção individual; xiii) fatores de riscos; xiv) capacitação e xv) espaços confinados.

Martínez-Aires, López-Alonso e Martínez-Rojas (2018) também elaboraram uma revisão sistemática da literatura com foco sobre a utilização do BIM para a gestão da segurança, mas com período de busca diferente, entre 1981 até 2016. Os artigos foram revisados por meio do método PRISMA e classificados de acordo com os seguintes critérios: i) construção ou gerenciamento de segurança; ii) cronograma e planejamento 4D; iii) visualização e simulação; iv) colaboração e comunicação e v) identificação de perigos.

Fagnoli e Lombardi (2020) desenvolveram uma revisão sistemática, por meio do método PRISMA, sobre o uso do BIM para aprimorar as atividades de segurança do trabalho no setor da construção e classificaram os artigos publicados na última década de acordo com seus objetivos: i) sistemas baseados no conhecimento; ii) checagem automática de regras; iii) informações de planejamento; iv) sobreposição e detecção de conflitos; v) *feedback* proativo; vi) treinamento; vii) percepção das partes interessadas e viii) comportamento do trabalhador.

Ainda que diante dessa trajetória, as tecnologias de informação e comunicação (TIC) necessitam de uma atualização ou mudança completa a cada três anos (Ganah; John, 2015). Além disso, houve um grande aumento na produção científica sobre o tema, que pode ser observado na sessão dos resultados e discussões (Fig. 2), onde mais de 50% dos artigos encontrados neste estudo foram publicados a partir de 2021. Com base nessas considerações, foi observada a necessidade de atualizar o estado da arte existente sobre o tema em questão.

Metodologia

A revisão sistemática da literatura foi realizada por meio da metodologia “Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses” (PRISMA). A revisão foi desenvolvida em quatro etapas: identificação, seleção, elegibilidade e inclusão.

Na fase de identificação, com o objetivo de auxiliar na definição das palavras-chave utilizadas na pesquisa, utilizou-se a estratégia PICO (Jidong *et al.*, 2021). Com isso, as palavras-chave combinadas com os operadores booleanos “AND” e “OR” forneceram a *string* de busca: (BIM OR "Building Information Modeling" OR "Building Information Modeling" OR "Building Information Model") AND ("Safety at Work" OR "Risk Management" OR "Safety Management") AND (Construction OR "Construction Management"). As bases de dados utilizadas foram a Engineering Village, a Scopus e a Web of Science, pois são bases relevantes em nível internacional nas áreas de Engenharia Civil e da Segurança do Trabalho.

Na etapa de seleção, primeiramente foram selecionados apenas artigos de periódicos, visto que são estudos que passam por um maior rigor científico para serem publicados. Em seguida, foram considerados apenas artigos publicados na língua inglesa, uma vez que nenhum artigo na língua portuguesa foi detectado e, por último, foram removidos os artigos duplicados encontrados em mais de uma base de dados. Logo após, por meio da leitura do título e do resumo, artigos de análise estrutural e de segurança contra incêndio foram desconsiderados devido ao foco desta revisão ser em segurança do trabalho. Também, foram descartados os artigos que realizaram pesquisas de opiniões das partes interessadas e artigos de revisão sistemática da literatura, pois o interesse do presente artigo é analisar a evolução e limitações das metodologias e tecnologias aplicadas.

Na fase de elegibilidade, foi feita uma leitura integral dos artigos para garantir que os critérios de inclusão e exclusão foram respeitados. Após essa etapa, os artigos remanescentes foram incluídos para análise quantitativa e qualitativa.

O BIM pode ser usado na gestão da segurança para atingir objetivos diversos por meio de metodologias diferentes (Fargnoli; Lombardi, 2020). Por esse motivo, para facilitar a análise, os artigos dessa revisão sistemática foram classificados com base nos seus objetivos e métodos (Quadro 1). A partir de uma adaptação dos critérios de classificação elaborados por Zou, Kiviniemi e Jones (2017) e Fargnoli e Lombardi (2020), os artigos foram classificados como: (1) Checagem automática de regras, (2) *Feedback* proativo, (3) Treinamento e educação, (4) Sistemas baseados no conhecimento e (5) Planejamento e visualização.

Quadro 1 - Classificação dos artigos

Código	Classificação	Descrição
C1	Checagem automática de regras	Regras são implantadas no modelo BIM para que a detecção e a mitigação de riscos possam ocorrer de forma automática.
C2	<i>Feedback</i> proativo	A Integração do BIM com tecnologias de monitoramento contínuo possibilita alertas em tempo real aos gestores.
C3	Treinamento e educação	O BIM é combinado com outras tecnologias para propósitos educacionais e treinamentos.
C4	Sistemas baseados em conhecimento	A gestão do conhecimento alimenta o modelo virtual para identificar e prevenir os riscos de segurança.
C5	Planejamento e visualização	Modelos BIM 3D e 4D aumentam a visualização dos requisitos de segurança.

Fonte: os autores.

Resultados e discussões

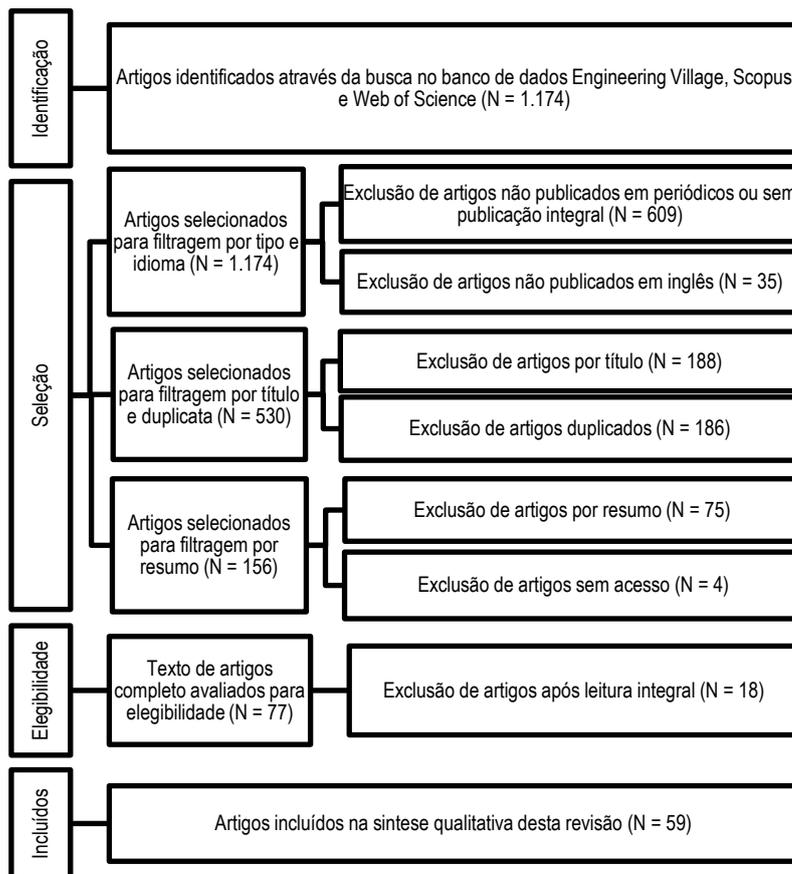
Na etapa de identificação, foram coletados 1.174 artigos, conforme ilustrado na Figura 1. Em seguida, ao restringir apenas artigos em inglês e artigos de periódicos com publicação integral, ficaram 530 artigos. Com a exclusão de artigos duplicados, seleção pelo título e seleção pelo resumo, restaram 77 artigos para avaliação de elegibilidade. Após a leitura integral destes artigos, 18 foram excluídos por serem relacionados à pesquisa de opinião, revisões de literatura e análise estrutural, então, 59 artigos foram incluídos nessa revisão de literatura.

É possível observar na Figura 2 um crescimento na publicação dos artigos incluídos nesta pesquisa durante os últimos anos, com um destaque de maior produção para os anos de 2021 e 2022, com 9 e 17 artigos publicados respectivamente.

A Figura 3 indica o número de publicações por países, considerando o país do primeiro autor. O destaque da China é evidente, com um total de 19 artigos publicados, seguida por Estados Unidos e Coréia do Sul, ambos com 7 artigos publicados.

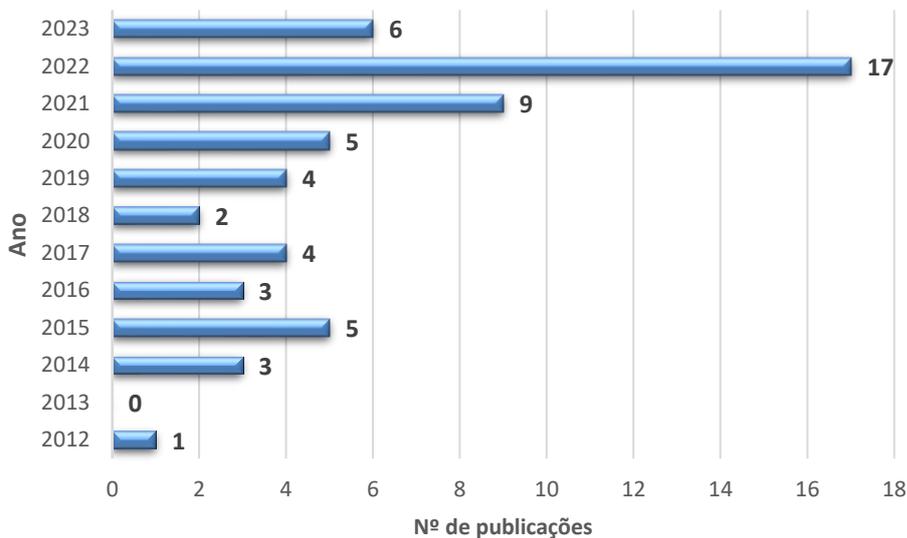
Através da Figura 04, nota-se que todos os artigos desta revisão tiveram aplicações na fase de planejamento e projeto, na fase de construção ou em ambas as fases. Também é perceptível que todos os 21 estudos de *Feedback* proativo foram aplicados exclusivamente na fase de construção devido à essência de monitorar pessoas, máquinas e parâmetros do ambiente construtivo. Já os sistemas baseados em conhecimentos tiveram grande parte dos seus estudos aplicados exclusivamente na etapa de planejamento e projeto, pois, muitos desses estudos compartilham a ideia da prevenção por meio do *design* (PtD) (Fargnoli; Lombardi, 2020).

Figura 1 – Diagrama de fluxo para revisão da literatura



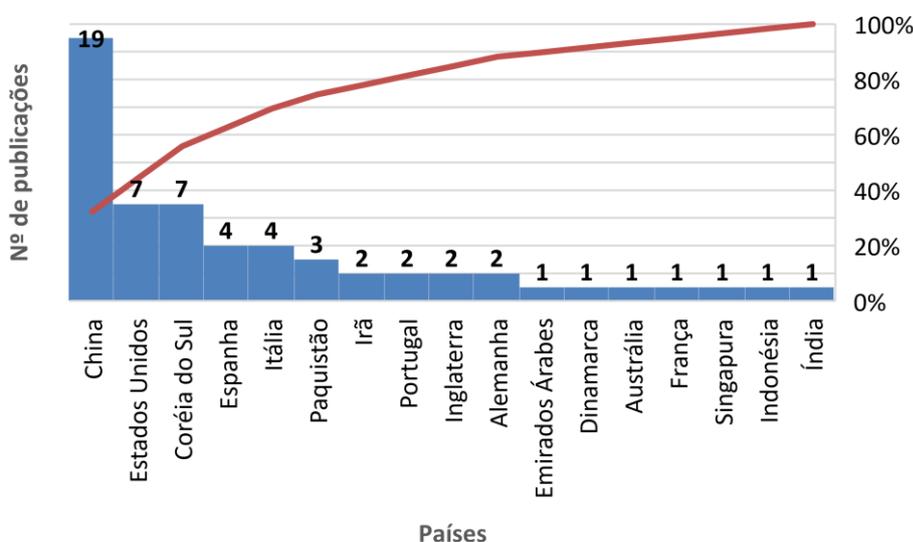
Fonte: os autores.

Figura 2 – Número de publicações por ano



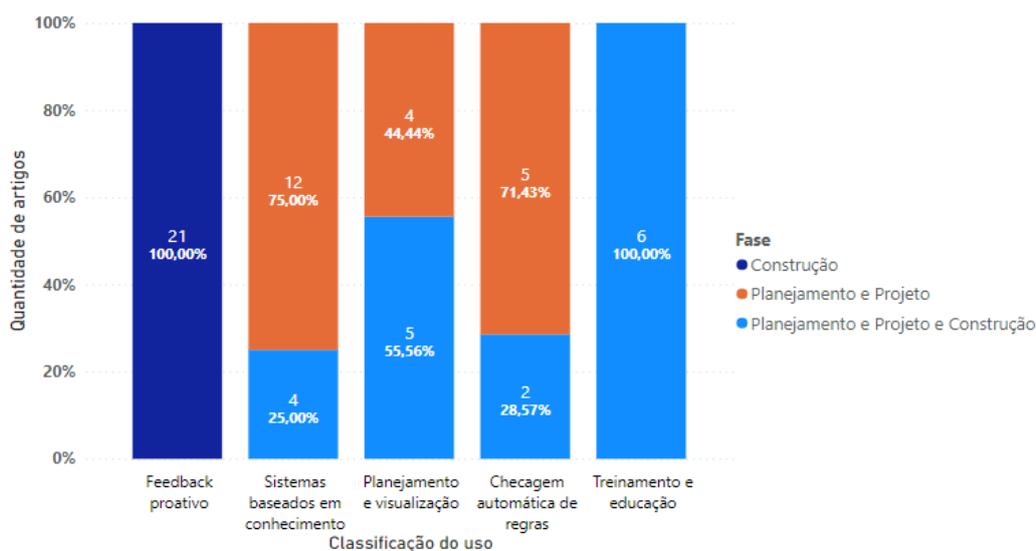
Fonte: os autores.

Figura 3 – Número de publicações por países



Fonte: os autores.

Figura 4 – Utilizações do BIM de acordo com a etapa do empreendimento



Fonte: os autores.

Checagem automática de regras

Lee et al. (2019) aplicaram a segurança baseada em comportamento (BBS) e identificaram que um dos comportamentos chave para acidentes de segurança do trabalho é a falta de atenção do trabalhador enquanto caminha. Em seguida, um modelo 3D foi desenvolvido para prevenir o risco de queda, de forma que a detecção do perigo e a utilização de sistemas de segurança, para mitigar o risco, ocorressem automaticamente. Rodrigues, Antunes e Matos (2021) também utilizaram um modelo 3D para a prevenção de risco de queda em altura de forma automática, porém se basearam no conceito de prevenção através do *design* (PtD). Zhang et al. (2015) tiveram o mesmo objetivo de identificar e prevenir o risco de queda, no entanto o planejamento da obra foi considerado como um fator adicional. Pham, Vu, Hong e Park (2020) também automatizaram o processo de detecção de perigo e utilização de instalações

temporárias de segurança em um modelo 4D, mas o estudo não se limitou ao risco de queda e incluiu também risco de quedas de objetos, choque elétrico e esmagamento, conhecido como “*fatal four*”.

Outras pesquisas utilizaram metodologias diferentes, por exemplo, Li *et al.* (2021) propuseram um método baseado em BIM e voxelização, ou seja, representação de objetos tridimensionais baseada em voxel, elemento volumétrico análogo ao pixel, para identificar automaticamente o risco de queda em altura. Já Bao *et al.* (2022), introduziram topologia no modelo BIM, também para checar e mitigar situações de risco de queda em altura de forma automática.

Ao comparar os benefícios do planejamento automático da segurança do trabalho ao invés de realizar uma modelagem manual, é notável o potencial para diminuição de tempo gasto neste processo (Zhang *et al.*, 2015). Os resultados mostram que um método dinâmico de verificação de segurança baseado, em regras, pode ajudar a identificar com precisão os riscos de segurança ainda na fase de planejamento e projeto (Bao *et al.*, 2022). Porém, deve-se ressaltar que, dos 6 estudos apresentados nesta seção, 5 deles se restringiram exclusivamente a mitigar apenas o risco de queda em altura, enquanto existem diversos outros riscos envolvidos no canteiro de obra. Rodrigues, Antunes e Matos (2021) e Lee *et al.* (2019), sugerem como desenvolvimentos em trabalhos futuros à inclusão de outros riscos. Outra limitação encontrada é que todos os trabalhos de checagem automática de regras foram aplicados apenas em edificações verticais.

Feedback proativo

A filosofia central por trás dos sistemas proativos é desenvolver um modelo virtual em que objetos e condições ambientais possam ser monitorados, por meio de dados coletados e processados por algoritmos de segurança formalizados, entregando informações sobre situações de riscos em tempo hábil para que medidas efetivas possam ser tomadas (Zou; Kiviniemi; Jones, 2017).

Riaz, Arslan, Kiani e Azhar (2014) desenvolveram um sistema de monitoramento para espaços confinados (CosMos) para acompanhar a variação de temperatura e oxigênio através de uma rede de sensores sem fio. Similarmente, Cheung, Lin e Lin (2018) utilizaram uma rede de sensores sem fio para monitorar, em tempo real, gases perigosos, condições de temperatura e umidade do ar durante a construção de um metrô. Por meio de uma escala de cores do modelo BIM era possível monitorar os ambientes, com o objetivo de auxiliar situações de evacuação humana, nas regiões em que um *status* anormal fosse detectado, um sistema de alarme e ventilação era ativado. Em ambos os casos, foi relatado como uma limitação do sistema a baixa vida útil da bateria dos sensores. Xu, Ran e Rao (2022), também objetivaram monitorar gases perigosos em tempo real, porém utilizaram computação de borda, onde dispositivos de computação são colocados mais próximos à fonte de dados, eliminando a necessidade de dispositivos intermediários, para alcançar uma detecção de maneira mais rápida e eficaz.

Fang, Cho, Zhang e Perez (2016) desenvolveram um sistema de alerta em tempo real caso os funcionários se aproximassem de uma zona com risco de queda. Baseado em identificação por rádio frequência (RFID), visualização no modelo BIM e computação em nuvem, o sistema mostrou alta confiabilidade, porém, foram obtidos alguns resultados falso-positivos devido a fatores como o alcance e posicionamento das antenas. Golovina, Teizer, Johansen e König (2021) propuseram um método para o rastreamento de quase acidentes entre trabalhadores e máquinas pesadas baseado em dados. Através da coleta da localização dos funcionários e das máquinas, foi possível visualizar no

modelo BIM um mapa de calor para identificar as áreas mais críticas. Um ponto de atenção citado pelos autores é a utilização de baterias dos transmissores, considerada uma tarefa fatigante, além disso, em alguns locais de trabalho é proibido o uso de bateria.

Liu *et al.* (2022) utilizaram um modelo de construção virtual, a internet das coisas (IoT) e o armazenamento de *big data* para criar um gêmeo digital com o intuito de prever os riscos envolvidos no içamento de pré-fabricados. O gêmeo digital coletava informações como velocidade e aceleração do içamento, ângulo de suspensão, velocidade do vento, materiais e dimensões dos componentes que eram içados. Outro gêmeo digital foi desenvolvido por Hong, Zhang e Chen (2022) com o objetivo de um monitoramento inteligente dos poços de fundação em uma estação de metrô. Aprendizado de máquina foi utilizado para prever os parâmetros-chave e tecnologias de detecção de múltiplas fontes foram incorporadas, englobando veículo aéreo não tripulado (VANT), detecção de domínio de frequência óptica, detecção de sistema micro eletromecânico e visão de máquina para supervisionamento, sem fio e de alta precisão, em tempo real da fundação. Por ter vários tipos de sensores, foi relatado um alto custo para o desenvolvimento do gêmeo digital. Tang *et al.* (2021), também focaram em um *feedback* proativo para parâmetros do solo na fundação de uma estação de metrô e, através de tecnologias como *scanner* a laser 3D e internet das coisas, o nível de risco era alertado por uma escala de cores no modelo BIM.

Yang *et al.* (2022) aplicaram o aprendizado profundo em um sistema de visão computacional, com o objetivo de detectar automaticamente o risco de queda no canteiro de obras e visualizá-lo no modelo BIM. O resultado obtido foi similar ao de um profissional de segurança do trabalho, porém, a técnica baseada em imagem ainda é instável devido a problemas de oclusão.

Um estudo desenvolvido por Carpio de los Pinos, González-Garcia, Baptista e Rodrigues (2023) englobou, além dos riscos citados acima, os riscos psicossociais. Foi implementado um método teórico-prático de avaliação de risco na construção de um edifício residencial, conhecido como Nível de Ação Preventiva (Lpac), em conjunto com um modelo BIM, e foram obtidos resultados mais visuais e intuitivos a partir de uma interpretação geométrica dos riscos. Além de avaliar os riscos de queda em altura, quedas de objetos, estresse térmico e fadiga física, foram analisadas as relações interpessoais dos trabalhadores através de pesquisas psicossociais e observações técnicas realizadas em campo. Porém, para uma integração totalmente prática da metodologia, é necessária a utilização de sensores inteligentes que monitorem o nível de estresse dos trabalhadores em conjunto com um sistema de rastreamento de localização em tempo real.

Treinamento e educação

Park e Kim (2013) exploraram o uso do BIM, realidade aumentada (AR) e um sistema de rastreamento de localização (SRL) para treinamento dos trabalhadores e inspeção de segurança. A partir de informações de riscos aumentadas, os funcionários da obra podem reconhecer quais são os riscos envolvidos naquele espaço de trabalho em um curto período e, com isso, ocorre uma melhora em tempo real na comunicação entre os gestores de obras e os funcionários.

Um dos fatores mais limitantes à expansão do uso do BIM e realidade virtual (RV) para o treinamento de trabalhadores na segurança do trabalho é a ausência de objetos estruturados e dedicados à criação de cenários em RV. Por isso, foi desenvolvida uma biblioteca inteligente com um total de 168 objetos para os treinamentos dos trabalhadores, com o foco em simulações de emergências (Getuli; Capone; Bruttini;

Sorbi, 2022). Os objetos modelados contavam com conteúdo de áudio, aumentando ou diminuindo o som de acordo com a proximidade entre a pessoa e o objeto. Além disso, Getuli, Capone e Bruttini (2021) elaboraram um protocolo de treinamento de segurança baseado em simulações das atividades realizadas pelos funcionários, integrando realidade virtual (RV) com um modelo de construção virtual.

Afzal e Shafiq (2021) elaboraram um modelo BIM 4D e utilizaram a realidade virtual para simular diversos cenários do canteiro de obras com o objetivo de treinar uma equipe multilíngue para identificar riscos de queda, com isso, a qualidade da troca de informações entre a equipe e os gestores foi aperfeiçoada. Além disso, em comparação com o método de treinamento tradicional, o BIM em conjunto com a RV aumenta a capacidade da equipe de reconhecer um perigo, de entender os protocolos de segurança e de ter uma resposta proativa na mitigação dos riscos. Porém, foi observado neste estudo que o treinamento individual para cada trabalhador por imersão em RV não era eficaz em termos de recursos de tempo.

Em contrapartida, um estudo mais recente feito por Zhang, Wong e Pan (2023) estruturou uma colaboração multifuncional em RV para o treinamento de operários envolvidos no içamento de peças de construção modular. Simultaneamente, o operador da grua, o sinaleiro e o montador trabalhavam em conjunto no ambiente virtual. Quando comparado com um treinamento tradicional, o sistema aprimorou o trabalho colaborativo, o reconhecimento dos riscos de segurança e aumentou em 30% a estabilidade da memória dos trabalhadores.

Sistemas baseados em conhecimento

Durante todo o ciclo de vida de um empreendimento, conhecimentos são adquiridos através de experiências e, quando estruturados e repassados para projetos futuros, podem contribuir significativamente para melhores resultados na gestão da segurança.

Através da ontologia, representação formal e explícita de um domínio de conhecimento, Shen *et al.* (2022) estruturaram uma biblioteca de riscos baseada em normas técnicas de segurança e em um banco de dados de acidentes em construções de edifícios pré-fabricados. Por meio de um *plug-in* no modelo BIM, era possível identificar, ainda na etapa de planejamento e projeto, se os requisitos estavam sendo atendidos. Para superar as lacunas de interoperabilidade na gestão da segurança, Farghaly *et al.* (2022) desenvolveram uma ontologia composta por termos e relacionamentos e vincularam ao Industrial Foundation Class - Web Ontology Language (IfcWOL).

Collinge *et al.* (2022) desenvolveram uma biblioteca de riscos de queda em edifícios baseada na ideia de prevenção através do *design* (PtD), porém, além de utilizar o conhecimento explícito, buscou integrar o conhecimento tácito de especialistas na área. Tariq, Ali, Ullah e Alqahtani (2023) também focaram em mitigar o risco de queda em altura, e, por meio de um *plug-in* no ambiente BIM, os gestores acessavam as cláusulas específicas de normas de segurança de acordo com a altura do objeto selecionado, otimizando o processo fatigante de consulta às legislações locais.

Outros estudos foram desenvolvidos além de obras verticais, Collado-Mariscal, Cortés-Pérez, Cortés-Pérez e Cuevas-Murillo (2022a) aplicaram o conceito do PtD em projetos rodoviários, estando o conhecimento de normas e diretrizes embutidos no modelo BIM. Xiahou *et al.* (2022) quantificaram os riscos nos poços de fundações profundas em uma estação de metrô por meio da teoria de causalidade do acidente e teoria do cruzamento de trajetória para esclarecer a relação entre acidentes e o processo de projeto, em conjunto com um banco de dados de acidentes do trabalho. Dadashi Haji e Behnam

(2023) introduziram 10 indicadores antecedentes de segurança no modelo virtual de uma estação de transferência de água e consideraram a interação entre os indicadores, calculando o impacto final de acordo com a influência de cada indicador sobre o outro durante a construção, gerando um mapa de calor no modelo 4D.

Os sistemas baseados em conhecimento permitem que riscos sejam calculados e incorporados no modelo, ainda na etapa de projeto, dessa forma, arquitetos e projetistas podem adotar soluções de *design* que ofereçam um menor risco durante a construção do empreendimento (Lu et al., 2021). A prevenção através do *design* é aprimorada quando combinada com os sistemas baseados em conhecimento, visto que, arquitetos e engenheiros projetistas normalmente não são especialistas na área e necessitam de um embasamento em segurança do trabalho.

Planejamento e visualização

A utilização do BIM para planejar e visualizar a segurança do trabalho ainda na fase de planejamento e projeto capacita as partes envolvidas para analisar os potenciais riscos de segurança e identificar quais medidas devem ser implantadas (Rodrigues; Baptista; Pinto, 2022). Com esse objetivo, por meio de programação visual feita em Dynamo, Singh, Mansuri, Patel e Chauhan (2023) associaram, de forma automática no modelo BIM, o cronograma das atividades de um edifício em concreto armado com os maiores perigos envolvidos. A classificação foi elaborada por especialistas, de acordo com a técnica de Análise de Modo e Efeito de Falha (FMEA), que priorizava o risco a ser mitigado de acordo com a ocorrência, severidade e capacidade de detecção.

Yi, Zhang e Calvo (2015) desenvolveram um modelo BIM 4D para planejar e simular a atuação simultânea entre guias e verificar a existência de possíveis conflitos entre si. Hu, Fang e Moehler (2023), foram além e utilizaram um algoritmo de localização de caminho para estimar os perigos envolvidos na operação de guias e visualizá-los através de mapas de calor 3D. O mapa de calor era composto por três granularidades, para uma única elevação, para várias elevações em um dia de trabalho ou para um ciclo de operação de vários dias.

Rodrigues, Baptista e Pinto (2022) utilizaram o BIM 4D para integrar medidas de segurança contra o risco de queda em altura ao longo do planejamento da obra, como guarda-corpo, andaime fachadeiro e cobertura temporária para aberturas em lajes. Deng et al. (2019) também integraram medidas de segurança no modelo 3D, porém não conectaram com o planejamento da obra, focando apenas na simulação de acidentes de trabalho para embasar planos de gerenciamento de emergências em projetos de engenharia.

Através de uma abordagem orientada para segurança, Getuli, Capone, Bruttini e Isaac (2020) planejaram e aprimoraram o espaço de trabalho de atividades realizadas em obra, utilizando a modelagem da informação, a realidade virtual, o conhecimento e o *feedback* de trabalhadores e gestores mais experientes. Choe e Leite (2017), aplicaram o conceito de zonas de trabalho para o planejamento da segurança em construção 4D, em que os riscos das atividades desenvolvidas eram calculados de acordo com a função e a quantidade de trabalhadores necessários para realizar os serviços daquela zona.

Collado-Mariscal, Cortés-Pérez, Cortés-Péres e Cuevas-Murillo (2022b) avaliaram o risco produzido por linhas aéreas de energias em construções de estradas, considerando como parâmetros de risco a corrente elétrica que passa no cabo, as zonas de risco de arco voltaico não visíveis e as zonas de atuações máquinas envolvidas no projeto. A modelagem paramétrica 3D permitiu uma melhor definição das zonas de riscos,

fornecendo rastreabilidade das decisões desde a etapa de projeto, dessa forma, os erros de gestão foram minimizados.

Comparação com estudos antecedentes

Martínez-Aires, López-Alonso e Martínez-Rojas (2018) observaram que a aplicação do BIM na gestão da segurança ainda estava em seus primeiros estágios. Porém, a utilização do BIM em conjunto com tecnologias habilitadoras como realidade virtual, *scanner* a laser, sistemas de rastreamento de localização, visão computacional e aprendizado de máquina demonstra uma aceleração tecnológica nesta área quando comparado ao cenário de 2018. Mas, deve-se ressaltar que alguns estudos ainda estão em fase inicial na escala de aplicação, com restrições de espaços, de pessoas envolvidas e de riscos monitorados. Por ser tratar de implantação de novas tecnologias, o investimento de recursos financeiros e de tempo pode ser um fator limitante para uma aplicação em maior escala, porém, poucos estudos discutiram de maneira qualitativa e quantitativa o tempo e o dinheiro investido. Por isso, sugere-se que em pesquisas futuras esses fatores sejam abordados com maior clareza.

Taype e Dezen-Kempton (2020) sugeriram como principais demandas a serem desenvolvidas em estudos futuros: a implementação de tecnologias em casos reais para identificar riscos, o planejamento 4D da segurança do trabalho, o monitoramento automático para reconhecer um comportamento inseguro dos trabalhadores, a avaliação da checagem automática de regras e a investigação dos motivos que induzem os trabalhadores a não utilizarem o EPI. Este último item foge do escopo desta RSL, porém pode-se observar que todas as outras sugestões de pesquisas foram desenvolvidas nos últimos anos, o que reforça a evolução dos processos e das tecnologias empregadas nesta área.

Fagnoli e Lombardi (2020) constataram poucas aplicações práticas do BIM em gestão de segurança devido a uma transição tecnológica insuficiente entre pesquisa e prática, no entanto, nesta revisão pode-se observar uma grande quantidade de aplicações práticas com a ressalva de que as tecnologias utilizadas nos estudos ainda possuem limitações, que serão discutidas no tópico a seguir.

Além da aplicação tradicional do BIM em projetos de construções verticais, foi possível observar uma boa quantidade de aplicações em projetos de infraestrutura metroviária, o que mostra a expansão do BIM para a gestão da segurança quando comparado aos estudos antecedentes, porém, poucas pesquisas foram realizadas em projetos de infraestrutura rodoviária. Para superar essa lacuna, sugere-se que pesquisas futuras concentrem esforços para desenvolver aplicações práticas nesta área.

Por fim, a partir do quadro 2, é possível observar as descobertas dos estudos antecedentes. O primeiro destaque é a identificação precoce de perigos e riscos (Zou; Kiviniemi; Jones, 2017; Martínez-Aires; López-Alonso; Martínez-Rojas, 2018; Fagnoli; Lombardi, 2020; Taype; Dezen-Kempton, 2020). Além disso, a checagem automática de regras, o planejamento 4D da segurança e a utilização RA e RV são temáticas em evidência. Também deve-se ressaltar que os sistemas de rastreamento de localização, utilizando o BIM em conjunto com sensores e IoT, são destaques nas pesquisas mais recentes. Perrier *et al.* (2024) enfatizam que a crescente utilização dessas tecnologias está associada à Construção 4.0 e que permite uma melhoria na segurança do trabalho nos canteiros de obras, porém, Fagnoli e Lombardi (2020) e Taype e Dezen-Kempton (2020) relataram uma pequena quantidade de estudos práticos nos canteiros.

Quadro 2 – Descobertas das revisões sistemáticas antecedentes

DESCOBERTAS	Zou, Kiviniemi e Jones	Martínez-Aires, López-Alonso e Martínez-Rojas	Fagnoli e Lombardi	Taype e Dezen-Kempter
	2017	2018	2020	
Indicação de perigos nos estágios iniciais				
Checagem automática de regras				
Planejamento 4D da segurança				
Sistemas de segurança proativos				
BIM como plataforma central geradora de dados				
Projetos mais lucrativos				
Estágio conceitual dos estudos ou prototipagem				
Visualização e simulação				
Colaboração e comunicação				
Uso de RA e RV				
Estágio inicial de aplicação prática				
Baixa interoperabilidade				
Ausência de <i>expertise</i> dos envolvidos				
Planejamento e visualização dinâmicos				
Prevenção por meio do <i>Design</i>				
Monitoramento de comportamentos inseguros				
Sistemas de rastreamento de conhecimento				
Sistemas de rastreamento de localização				
Falta de testes práticos nos canteiros				
Reutilização do conhecimento de risco				
Risco de queda				
Ligação entre segurança e produtividade				

Fonte: os autores.

Limitações do uso do BIM na gestão

A maioria dos artigos classificados em planejamento e visualização utilizaram *softwares* já consolidados no mercado, por isso, as limitações tecnológicas encontradas foram poucas. Atingir um nível de detalhamento adequado das atividades inseridas no cronograma foi uma limitação observada (Choe; Leite, 2017). Nos artigos dedicados ao treinamento e educação das partes interessadas, a sua aplicabilidade permanece baixa (Fagnoli; Lombardi, 2020). Uma das possíveis justificativas para isto pode ser encontrada no estudo feito por Getuli, Capone, Bruttini e Sorbi (2022), no qual a criação de conteúdos digitais dedicados à produção de cenários em realidade virtual é uma tarefa desgastante. Além disso, o treinamento de uma equipe de obra com novas tecnologias consome uma quantidade significativa de tempo (Afzal; Shafiq, 2021). Os estudos categorizados como checagem automática de regras geram equipamentos de proteção coletiva no modelo de forma automática, como guarda-corpos e bandejas de proteção, porém é fundamental uma supervisão humana para identificar possíveis erros do modelo como detectado no estudo realizado por Li *et al.* (2021). Ademais, o nível de detalhamento dos equipamentos gerados precisa ser aprimorado para atender às necessidades práticas dos profissionais em escritórios e nos canteiros de obras (Zhang *et al.*, 2015).

Para os sistemas baseados em conhecimento, inserir esse conhecimento no modelo é uma tarefa complexa. A maioria dos estudos se concentraram em um cenário específico dentro de uma tipologia de construção, com isso, o principal desafio é expandir a gestão da segurança para diferentes riscos envolvidos (Shen *et al.*, 2022). E nos artigos com foco em *feedback* proativo, as tecnologias de rastreamento de localização têm como principal restrição a vida útil das baterias dos sensores e transmissores utilizados. Outro ponto de melhoria é na precisão e na acurácia nas leituras de localização, que muitas vezes são prejudicadas por materiais presentes nos canteiros de obras, especialmente por vergalhões de ferro (Kim *et al.*, 2016).

Enfoque no risco de queda

Os artigos desta revisão focaram em mitigar ou eliminar diversos tipos de riscos, porém deve-se destacar que o risco de queda foi o principal risco gerenciado nos estudos. O gerenciamento desse risco através do BIM é uma alternativa para otimizar a eficiência do método tradicional de gestão da segurança, visto que pesquisas realizadas em diversos países do mundo apontam que os acidentes por queda em altura são uma das principais causas de lesões e mortes no setor da construção civil nos últimos anos (Oliveira; Soares; Vasconcelos, 2023). O BIM combinado com tecnologias de sistema de rastreamento de localização permite que o gestor da obra receba alertas em tempo real caso os funcionários ultrapassem uma zona segura contra o risco de queda em altura (Fang; Cho; Zhang; Perez, 2016). Esse tipo de solução permite que um único gestor monitore, por meio de um modelo virtual, todos os funcionários da obra, enquanto no método tradicional essa é uma tarefa complexa devido às características de canteiros de obras verticais ou canteiros horizontais com grandes áreas.

Redução de custos como consequência do BIM na segurança

A modelagem da informação da construção aumenta a capacidade e a qualidade da comunicação entre as partes interessadas na gestão da segurança devido à natureza colaborativa do BIM (Rodrigues; Baptista; Pinto, 2022). Informações sobre riscos podem ser transmitidas, de forma visual por métricas qualitativas (Golovina, Teizer, Johansen e König, 2021) e quantitativas (Kim; Lee; Choi, 2020), com isso, todos os envolvidos no processo se tornam mais capacitados para identificar e mitigar riscos.

De modo abrangente, a utilização do BIM reduz a probabilidade de ocorrência de acidentes nos canteiros de obras devido à mitigação e eliminação de diversos riscos. Consequentemente, a saúde financeira das empresas é protegida, pois os acidentes na indústria da construção têm impactos significativos nos custos de obras e na produtividade das empresas do setor (Alkaissy *et al.*, 2020). Além disso, observou-se nos estudos a inclusão do planejamento da segurança desde a etapa de planejamento e projeto, dessa forma, projetos podem ser modificados para atender os requisitos de segurança. Essa possibilidade de alteração no *design*, ainda na etapa de planejamento e projeto, permite que o custo da modificação seja mais baixo quando comparado às etapas subsequentes de construção e operação do empreendimento (Rodrigues; Antunes; Matos, 2021).

Lacunas a serem preenchidas por pesquisas futuras

A partir de uma análise dos artigos incluídos nesta RSL, foram observadas lacunas (Quadro 3) a serem desenvolvidas por trabalhos futuros, para que o papel do BIM na segurança do trabalho seja cada vez mais relevante e indispensável nos canteiros de obras.

Conclusões

A complexidade dos canteiros de obras, ambientes dinâmicos e de constante mudança, faz com que a gestão da segurança do trabalho por métodos tradicionais, baseada em processos manuais e dependente da supervisão e experiência de gestores, esteja demasiadamente sujeita às limitações e às falhas humanas. Por isso, é possível perceber nos últimos anos a crescente aplicação do BIM, no setor de Arquitetura, Engenharia e Construção (AEC), com o objetivo de aprimorar a gestão da segurança do trabalho.

Quadro 3 – Direcionamento para trabalhos futuros de acordo com a classificação dos artigos

Classificação	Direcionamento futuro
Checagem automática de regras	Aumentar o número de riscos a serem checados no modelo, além do risco de queda.
	Otimizar o nível de detalhamento dos equipamentos de proteção coletiva de acordo com a legislação local.
	Eliminar possíveis erros gerados pelo modelo, nos quais situações de riscos de queda são identificadas incorretamente ou deixam de ser identificadas.
Feedback proativo	Otimizar o processo de atualização entre o canteiro de obras e o modelo BIM por meio do uso de tecnologias habilitadoras.
	Melhorar o nível de assertividade dos sistemas de rastreamento de localização.
	Ampliar pesquisas na temática de riscos fisiológicos.
	Desenvolver um sistema de rastreamento de localização em conjunto com a detecção do uso do cinto de segurança.
Treinamento e educação	Ampliar o uso de colaboração multifuncional em RV para outras atividades.
	Utilizar programação avançada para otimizar a criação de cenários virtuais.
Sistemas baseados em conhecimento	Expandir a modelagem do conhecimento, considerando a influência simultânea de múltiplos riscos em um único cenário.
Planejamento e visualização	Retratar de forma mais realista a dinâmica do canteiro de obras, planejando a movimentação das máquinas e instalações provisórias do canteiro ao longo da evolução da obra.
	Aprimorar o nível de detalhamento das atividades consideradas no planejamento da obra.

Fonte: os autores.

Através da revisão da literatura, foi possível analisar os estudos e classificá-los em cinco áreas de pesquisa (Apêndice, Quadro A): Checagem automática de regras, Feedback proativo, Treinamento e educação, Sistemas baseado no conhecimento e Planejamento e visualização. Todos esses estudos, exceto o Feedback proativo, foram aplicados na fase de planejamento e projeto, isso mostra que uma das filosofias da utilização do BIM na gestão da segurança é a prevenção através do projeto (PtD), que possibilita identificar perigos e eliminar ou mitigar os riscos ainda na fase pré-construção. Nas pesquisas de Feedback proativo, é possível perceber a versatilidade do BIM na gestão da segurança quando combinado com outras tecnologias, monitorando riscos de queda em altura, de queda de objetos, de colisão entre humanos e máquinas, de soterramento e químicos. Todos esses riscos são monitorados em tempo real, permitindo aos gestores de obras um poder de ação quase que imediato para evitar que acidentes de trabalho aconteçam.

Acerca das limitações do estudo, esta revisão não levou em consideração o fator de impacto das revistas responsáveis pelos estudos publicados, pois esse critério teria reduzido o tamanho da amostra, além de desfavorecer as revistas mais recentes. Porém, é válido ressaltar que apenas artigos publicados em periódicos foram incluídos nesta pesquisa para garantir uma maior qualidade nas publicações. Além disso, como o foco do estudo foi na gestão da segurança do trabalho, o escopo desse estudo não envolveu a utilização do BIM para a segurança durante a fase de operação e manutenção do empreendimento.

Ainda que esta revisão não tenha encontrado nenhum estudo primário sobre o uso de BIM para a gestão da segurança do trabalho desenvolvido no Brasil, pôde-se observar boas práticas a serem implementadas nacionalmente. Sugere-se, como um primeiro esforço para utilizar o BIM na gestão da segurança no Brasil, que pesquisas sejam desenvolvidas na categoria de planejamento e visualização, visto que estes estudos utilizam softwares consolidados no mercado e que, muitas vezes, já são utilizados para o próprio planejamento da obra. Além disso, é fundamental que estas pesquisas continuem a focar nos riscos com as maiores taxas de mortalidade na indústria da

construção, como os riscos de queda em altura, de quedas de objetos, de choque elétrico e de esmagamento.

Apesar da crescente utilização do BIM na gestão da segurança no cenário global, que possibilita vários benefícios já citados, esta revisão permitiu observar as lacunas e entender a necessidade das pesquisas futuras, sendo a otimização do processo de atualização do modelo BIM por meio do uso de tecnologias habilitadoras a principal delas, visto que o processo de modelagem da informação ainda é uma tarefa que requer bastante energia para ser desenvolvida e que o canteiro de obras é um ambiente extremamente mutável. Por fim, é válido ressaltar que o BIM em conjunto com tecnologias habilitadoras para gestão da segurança ainda está em processo de desenvolvimento e, por isso, deve ser combinado com os métodos tradicionais de gestão da segurança ao invés de tentar substituí-los.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Referências

- AFZAL, M.; SHAFIQ, M. T. Evaluating 4D-BIM and VR for effective safety communication and training: A case study of multilingual construction job-site crew. **Buildings**, v. 11, n. 8, p. 319, July 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings11080319>.
- ALKAISSY, M.; ARASHPOUR, M.; ASHURI, B.; BAI, Y.; HOSSEINI, R. Safety management in construction: 20 years of risk modeling. **Safety Science**, v. 129, p. 104805, Sept. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2020.104805>.
- AZHAR, S. Role of visualization technologies in safety planning and management at construction jobsites. **Procedia Engineering**, v. 171, p. 215-226, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.01.329>.
- BAO, Q.; ZHOU, J.; ZHAO, Y.; LI, X.; TAO, S.; DUAN, P. Developing a rule-based dynamic safety checking method for enhancing construction safety. **Sustainability**, v. 14, n. 21, p. 14130, Oct. 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/su142114130>.
- CARPIO DE LOS PINOS, A. J.; GONZÁLEZ-GARCÍA, M. N.; BAPTISTA, J. S.; RODRIGUES, F. Geometric Interpretation of risk and prevention, by Implementation of the “Level of Preventive Action” risk assessment method. **Safety Science**, v. 167, p. 106259, Nov. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2023.106259>.
- CHEUNG, W.-F.; LIN, T.-H.; LIN, Y.-C. A real-time construction safety monitoring system for hazardous gas integrating wireless sensor network and building information modeling technologies. **Sensors**, v. 18, n. 2, p. 436, 2018. DOI: <https://doi.org/10.3390/s18020436>.
- CHOE, S.; LEITE, F. Construction safety planning: Site-specific temporal and spatial information integration. **Automation in Construction**, v. 84, p. 335-344, Dec. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.09.007>.
- COLLADO-MARISCAL, D.; CORTÉS-PÉREZ, J. P.; CORTÉS-PÉREZ, A.; CUEVAS-MURILLO, A. Proposal for the Integration of Health and Safety into the Design of Road Projects with BIM. **Buildings**, v. 12, n. 10, p. 1753, Oct. 2022a. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings12101753>.
- COLLADO-MARISCAL, D.; CORTÉS-PÉREZ, J. P.; CORTÉS-PÉREZ, A.; CUEVAS-MURILLO, A. Proposal for the integration of the assessment and management of electrical risk from overhead power lines in BIM for road projects. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 19, n. 20, p. 13064, Oct. 2022b. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph192013064>.

- COLLINGE, W. H.; FARGHALY, K.; MOSLEH, M. H.; MANU, P.; CHEUNG, C. M.; OSORIO-SANDOVAL, C. A. BIM-based construction safety risk library. **Automation in Construction**, v. 141, p. 104391, Sept. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104391>.
- DADASHI HAJI, M.; BEHNAM, B. An automated BIM and system dynamics tool for assessing safety leading indicators in construction projects. **International Journal of Building Pathology and Adaptation**, 2023. No prelo. DOI: <https://doi.org/10.1108/IJBPA-05-2022-0072>.
- DENG, L.; ZHONG, M.; LIAO, L.; PENG, L.; LAI, S. Research on safety management application of dangerous sources in engineering construction based on BIM technology. **Advances in Civil Engineering**, Special, v. 2019, Special Issue: Advances in Life Environmental Sustainability of Civil Infrastructure Systems, 10 p., Dec. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1155/2019/7450426>.
- FANG, Y.; CHO, Y. K.; ZHANG, S.; PEREZ, E. Case study of BIM and Cloud-Enabled Real-Time RFID Indoor Localization for Construction Management Applications. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 142, n. 7, July 2016. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0001125](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001125).
- FARGHALY, K.; SOMAN, R. K.; COLLINGE, W.; MOSLEH, M. H.; MANU, P.; CHEUNG, C. M. Construction safety ontology development and alignment with industry foundation classes (IFC). **Journal of Information Technology in Construction**, v. 27, p. 94-108, Jan. 2022. DOI: <https://doi.org/10.36680/j.itcon.2022.005>.
- FARGNOLI, M.; LOMBARDI, M. Building information modelling (BIM) to Enhance Occupational Safety in Construction Activities: Research trends emerging from one decade of studies. **Buildings**, v. 10, n. 6, p. 98, May 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings10060098>.
- GANAH, A.; JOHN, G. A. Integrating building information modeling and health and safety for onsite construction. **Safety and Health at Work**, v. 6, n. 1, p. 39-45, Mar. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.shaw.2014.10.002>.
- GETULI, V.; CAPONE, P.; BRUTTINI, A. Planning, management and administration of HS contents with BIM and VR in construction: an implementation protocol. **Engineering, Construction and Architectural Management**, v. 28, n. 2, p. 603-623, Apr. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1108/ECAM-11-2019-0647>.
- GETULI, V.; CAPONE, P.; BRUTTINI, A.; ISAAC, S. BIM-based immersive Virtual Reality for construction workspace planning: A safety-oriented approach. **Automation in Construction**, v. 114, p. 103160, June 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103160>.
- GETULI, V.; CAPONE, P.; BRUTTINI, A.; SORBI, T. A smart objects library for BIM-based construction site and emergency management to support mobile VR safety training experiences. **Construction Innovation**, v. 22, n. 3, p. 504-530, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1108/CI-04-2021-0062>.
- GOLOVINA, O.; TEIZER, J.; JOHANSEN, K. W.; KÖNIG, M. Towards autonomous cloud-based close call data management for construction equipment safety. **Automation in Construction**, v. 132, p. 103962, Dec. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103962>.
- GUO, H.; YU, Y.; SKITMORE, M. Visualization technology-based construction safety management: A review. **Automation in Construction**, v. 73, p. 135-144, Jan. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.10.004>.
- HONG, C.; ZHANG, J.; CHEN, W. An Integrated Intelligent Approach for Monitoring and Management of a Deep Foundation Pit in a Subway Station. **Sensors**, v. 22, n. 22, p. 8737, Nov. 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/s22228737>.
- HU, S.; FANG, Y.; MOEHLER, R. Estimating and visualizing the exposure to tower crane operation hazards on construction sites. **Safety Science**, v. 160, p. 106044, Apr. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2022.106044>.
- JIDONG, D. E.; HUSAIN, N.; ROCHE, A. LOURIE, G.; IKE, T. J.; MURSHED, M.; PARK, M. S.; KARICK, H.; DAGONA, Z. K.; PWAJOK, J. L.; GUMBER, A.; FRANCIS, C.; NYAM, P. P.; MWANKON, S. B. Psychological interventions for maternal

depression among women of African and Caribbean origin: a systematic review. **BMC women's health**, v. 21, p. 83, Feb. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12905-021-01202-x>.

KIM, H.; LEE, H.-S.; PARK, M.; CHUNG, B.; HWANG, S. Automated hazardous area identification using laborers' actual and optimal routes. **Automation in Construction**, v. 65, p. 21-32, May 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.01.006>.

KIM, I.; LEE, Y.; CHOI, J. BIM-based hazard recognition and evaluation methodology for automating construction site risk assessment. **Applied sciences**, v. 10, n. 7, p. 2335, Mar. 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/app10072335>.

LEE, P.-C.; WEI, J.; TING, H.-I.; LO, T.-O.; LONG, D.; CHNAG, L.-M. Dynamic analysis of construction safety risk and visual tracking of key factors based on behavior-based safety and building information modeling. **KSCE Journal of Civil Engineering**, v. 23, p. 4155-4167, Sept. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12205-019-0283-z>.

LI, M.; YU, H.; LIU, P. An automated safety risk recognition mechanism for underground construction at the pre-construction stage based on BIM. **Automation in Construction**, v. 91, p. 284-292, July 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.03.013>.

LI, P.; WANG, Q.; GUO, Z.; MEI, T.; LI, Q.; QIAO, S.; ZUO, W. Identifying Falling-from-Height Hazards in Building Information Models: A Voxelization-Based Method. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 148, n. 2, Dec. 2021. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0002236](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0002236).

LIU, J.; ZOU, Z. Application of BIM technology in prefabricated buildings. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**. v. 787, p. 012151. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/787/1/012151>.

LIU, Z.-S.; MENG, X.-T.; XING, Z.-Z.; CAO, C.-F.; JIAO, Y.-Y.; LI, A.-X. Digital twin-based intelligent safety risks prediction of prefabricated construction hoisting. **Sustainability**, v. 14, n. 9, p. 5179, Apr. 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/su14095179>.

LU, Y.; GONG, P.; TANG, Y.; SUN, S.; LI, Q. BIM-integrated construction safety risk assessment at the design stage of building projects. **Automation in Construction**, v. 124, p. 103553, Apr. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103553>.

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

OLIVEIRA, S. S.; SOARES, W. A.; VASCONCELOS, B. M. Fatal fall-from-height accidents: Statistical treatment using the Human Factors Analysis and Classification System–HFACS. **Journal of Safety Research**, v. 86, p. 118-126, Sept. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsr.2023.05.004>.

OSHA. OCCUPATIONAL SAFETY AND HEALTH ADMINISTRATION. Commonly Used Statistics, Occupational Safety and Health Administration, 2023. Disponível em: <https://www.osha.gov/data/commonstats>. Acesso em: 10 jan. 2024.

PARK, C.-S.; KIM, H.-J. A framework for construction safety management and visualization system. **Automation in Construction**, v. 33, p. 95-103, Aug. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2012.09.012>.

PARK, J.; KIM, K.; CHO, Y. K. Framework of automated construction-safety monitoring using cloud-enabled BIM and BLE mobile tracking sensors. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 143, n. 2, Aug. 2016. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0001223](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001223).

PERRIER, N.; BLED, A.; BOURGAULT, M.; COUSIN, N.; DANJOU, C.; PELLERIN, R.; ROLAND, T. Construction 4.0: A comparative analysis of research and practice. **Journal of Information Technology in Construction (ITcon)**, v. 29, n. 2, p. 16-39, Feb. 2024. DOI: <https://doi.org/10.36680/j.itcon.2024.002>.

PHAM, K.-T.; VU, D.-N.; HONG, P. L. H.; PARK, C. 4D-BIM-based workspace planning for temporary safety facilities in construction SMES. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 17, n. 10, p. 3403, May 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph17103403>.

RIAZ, Z.; ARSLAN, M.; KIANI, A. K.; AZHAR, S. CoSMoS: A BIM and wireless sensor based integrated solution for worker safety in confined spaces. **Automation in construction**, v. 45, p. 96-106, Sept. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2014.05.010>.

RODRIGUES, F.; ANTUNES, F.; MATOS, R. Safety plugins for risks prevention through design resourcing BIM. **Construction Innovation**, v. 21, n. 2, p. 244-258, Mar. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1108/CI-12-2019-0147>.

RODRIGUES, F.; BAPTISTA, J. S.; PINTO, D. BIM approach in construction safety—A case study on preventing falls from height. **Buildings**, v. 12, n. 1, p. 73, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings12010073>.

SHEN, Y.; XU, M.; LIN, Y.; CUI, C.; SHI, X.; LIU, Y. Safety risk management of prefabricated building construction based on ontology technology in the BIM environment. **Buildings**, v. 12, n. 6, p. 765, June 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings12060765>.

SINGH, S. P.; MANSURI, L. E.; PATEL, D. A.; CHAUHAN, S. Harnessing BIM with risk assessment for generating automated safety schedule and developing application for safety training. **Safety science**, v. 164, p. 106179, Aug. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2023.106179>.

TANG, Q.; LEI, M.; ZHU, B.; PENG, L.; WU, W.; SHI, C. Design and application of risk early warning system for subway station construction based on building information modeling real-time model. **Advances in Civil Engineering**, v. 2021, p. 8898893, Mar. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1155/2021/8898893>.

TARIQ, A.; ALI, B.; ULLAH, F.; ALQAHTANI, F. K. Reducing Falls from Heights through BIM: A Dedicated System for Visualizing Safety Standards. **Buildings**, v. 13, n. 3, p. 671, Mar. 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings13030671>.

TAYPE, L. E.; DEZEN-KEMPTER, E. Contribuição de BIM para a segurança laboral na construção civil: uma revisão sistemática de literatura. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, v. 11, p. e020002, mar. 2020. DOI: <https://doi.org/10.20396/parc.v11i0.8653811>

XIAHOU, X.; LI, K.; LI, F.; ZHANG, Z.; LI, Q.; GAO, Y. Automatic identification and quantification of safety risks embedded in design stage: a BIM-enhanced approach. **Journal of Civil Engineering and Management**, v. 28, n. 4, p. 278–291, Mar. 2022. DOI: <https://doi.org/10.3846/jcem.2022.16560>.

XU, Z.; RAN, Y.; RAO, Z. Design and integration of air pollutants monitoring system for emergency management in construction site based on BIM and edge computing. **Building and Environment**, v. 211, p. 108725, Mar. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108725>

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**, v. 18, n. 7, p. 1049-1063, Feb. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1080/15732479.2022.2039217>.

YI, S. L.; ZHANG, X.; CALVO, M. H. Construction safety management of building project based on BIM. **Journal of Mechanical Engineering Research and Developments**, v. 38, n. 1, p. 97-104, 2015. Disponível em: [https://jmerd.net/Paper/Vol.%2038,%20No.%201%20\(2015\)/14%20J006.pdf](https://jmerd.net/Paper/Vol.%2038,%20No.%201%20(2015)/14%20J006.pdf). Acesso em: 20 jan. 2023.

YUAN, J.; LI, X.; XIAHOU, X.; TYMVIOS, N.; ZHOU, Z.; LI, Q. Accident prevention through design (PtD): Integration of building information modeling and PtD knowledge base. **Automation in construction**, v. 102, p. 86-104, June 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.02.015>.

ZHANG, S.; SULANKIVI, K.; KIVINIEMI, M.; ROMO, I.; EASTMAN, C. M.; TEIZER, J. BIM-based fall hazard identification and prevention in construction safety planning. **Safety Science**, v. 72, p. 31-45, Feb. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2014.08.001>.

ZHANG, Zhiqian; WONG, Mun On; PAN, Wei. Virtual reality enhanced multi-role collaboration in crane-lift training for modular construction. **Automation in Construction**, v. 150, p. 104848, June 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.104848>.

ZOU, Y.; KIVINIEMI, A.; JONES, S. W. A review of risk management through BIM and BIM-related technologies. **Safety Science**, v. 97, Special issue: Risk and law-use, p. 88-98, Aug. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2015.12.027>.

Apêndice

Quadro A – Artigos classificados de acordo com seus objetivos e métodos.

Código	Fonte	País	Revista
C1	Bao <i>et al.</i> (2022)	China	Sustainability
C1	Lee <i>et al.</i> (2019)	China	KSCE Journal of Civil Engineering
C1	Li <i>et al.</i> (2021)	China	Journal of Construction Engineering and Management
C1	Pham, Vu, Hong e Park (2020)	Coréia do Sul	International Journal of Environmental Research and Public Health
C1	Rodrigues, Antunes e Matos (2021)	Portugal	Construction Innovation
C1	Zhang <i>et al.</i> (2015)	EUA	Safety Science
C2	Cheung, Lin e Lin (2018)	China	Sensors
C2	Fang, Chen, Zhang e Perez (2016)	EUA	Journal of Construction Engineering and Management
C2	Golovina, Teizer e Pradhananga (2016)	Alemanha	Automation in Construction
C2	Golovina, Teizer, Johansen e König (2021)	Alemanha	Automation in Construction
C2	Hong, Zhang e Chen (2022)	China	Sensors
C2	Kim <i>et al.</i> (2016)	EUA	Automation in Construction
C2	Liu <i>et al.</i> (2021)	China	Sensors
C2	Liu <i>et al.</i> (2022)	China	Sustainability
C2	Park, Kim e Cho (2016)	EUA	Journal of Construction Engineering and Management
C2	Riaz, Arslan, Kiani e Azhar (2014)	Paquistão	Automation in Construction
C2	Tang <i>et al.</i> (2021)	China	Advances in Civil Engineering
C2	Xu, Ran e Rao (2022)	China	Building and Environment
C2	Yang <i>et al.</i> (2022)	China	Structure and Infrastructure Engineering
C2	Carpio de los Pinos, González-García, Baptista e Rodrigues (2023)	Espanha	Safety Science
C3	Afzal e Shafiq (2021)	E.A.	Buildings
C3	Getuli, Capone e Bruttini (2021)	Itália	Engineering, Construction and Architectural Management
C3	Getuli, Capone, Bruttini, Sorbi, (2022)	Itália	Construction Innovation
C3	Park e Kim (2013)	Coréia do Sul	Automation in Construction
C3	Zhang, Wong e Pan (2023)	China	Automation in Construction
C4	Collado-Mariscal, Cortés-Pérez, Cortés-Pérez e Cuevas-Murillo (2022a)	Espanha	Buildings
C4	Collinge <i>et al.</i> (2022)	Inglaterra	Automation in Construction
C4	Cortés-Pérez J., Cortés-Pérez A. e Prieto-Muriel (2020)	Espanha	Automation in Construction
C4	Farghaly <i>et al.</i> (2022)	Inglaterra	Journal of Information Technology in Construction
C4	Dadashi Haji e Behnam (2023)	Irã	International Journal of Building Pathology and Adaptation
C4	Kim, Lee e Choi (2020)	Coréia do Sul	Applied Sciences
C4	Li <i>et al.</i> (2021)	Dinamarca	Advanced Engineering Informatics
C4	Lu <i>et al.</i> (2021)	China	Automation in Construction
C4	Shen <i>et al.</i> (2022)	China	Buildings
C4	Xiahou <i>et al.</i> (2022)	China	Journal of Civil Engineering and Management
C4	Tariq, Ali, Ullah e Alqahtani (2023)	Itália	Buildings
C5	Choe e Leite (2017)	Coréia do Sul	Automation in Construction
C5	Collado-Mariscal, Cortés-Pérez, Cortés-Pérez e Cuevas-Murillo (2022b)	Espanha	International Journal of Environmental Research and Public Health
C5	Deng <i>et al.</i> (2019)	China	Advances in Civil Engineering
C5	Getuli, Capone, Bruttini e Isaac (2020)	Itália	Automation in Construction
C5	Hu, Fang e Moehler (2023)	Austrália	Safety Science
C5	Park e Kim (2013)	Coréia do Sul	International Journal of Architectural Research
C5	Rodrigues, Baptista e Pinto (2022)	Portugal	Buildings

RODRIGUES, I. A.; VASCONCELOS, B. M.

Análise crítica do papel do BIM na gestão da segurança do trabalho na indústria da construção

Código	Fonte	País	Revista
C5	Singh, Mansuri, Patel e Chauhan (2023)	Índia	Safety Science
C5	Yi, Zhang e Calvo (2015)	China	Journal of Mechanical Engineering Research and Developments

Fonte: os autores.

1 Igor Alencar Rodrigues

Engenheiro Civil. Mestrando em Engenharia Civil pela Universidade de Pernambuco. Endereço Postal: R. Benfica, 455, Recife, PE – Brasil. CEP 50720-001.

2 Bianca M. Vasconcelos

Arquiteta e Urbanista. Doutora em Engenharia Civil pela Universidade do Porto/Portugal. Professora Adjunta da Universidade de Pernambuco. Endereço postal: R. Benfica, 455, Recife, PE – Brasil. CEP 50720-001.