

APRENDIZAGEM AUTOMÁTICA PARA DETEÇÃO DE NÃO-CONFORMIDADES EM SEGURANÇA NA CONSTRUÇÃO: REVISÃO SISTEMÁTICA

Sabrina S. Oliveira ⁽¹⁾, João Poças Martins ⁽²⁾ e Alfredo Soeiro ⁽³⁾

(1) Construct-Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, ORCID 0000-0003-3930-4135.

(2) Construct-Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, ORCID 0000-0001-9878-3792.

(3) Construct-Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, ORCID 0000-0003-4784-959X.

Resumo

A construção civil destaca-se como uma das indústrias mais perigosas. A gestão de segurança tradicional, baseada em inspeções manuais, mostra-se insuficiente para lidar com os riscos associados à natureza dinâmica e complexa dos ambientes de construção. Este artigo tem como objetivo revisar o estado da arte dos sistemas inteligentes baseados em aprendizagem automática aplicados para avaliar e monitorar as não-conformidade com as normas de segurança do trabalho em estaleiros de construção. Foi realizada uma revisão sistemática de literatura que seguiu o método PRISMA. De um total de 144 artigos, obtidos através das bases de dados SCOPUS e Web of Science, foram selecionados 18 artigos relevantes a esta pesquisa. Os estudos mostraram um crescimento significativo das publicações nos últimos anos, com destaque para a utilização de técnicas de deep learning e visão computacional. A análise comparativa revelou que a maioria dos trabalhos se concentra na identificação automática de não-conformidades relacionadas ao uso de equipamentos de proteção individual, sobretudo capacetes e coletes de segurança. Conclui-se que futuras investigações devem priorizar áreas de maior risco ocupacional e desenvolver abordagens mais robustas, capazes de ultrapassar as limitações do ambiente real de obra.

1. Introdução

A construção civil destaca-se como uma das indústrias mais perigosas para os trabalhadores. Apesar de representar apenas 7% da força de trabalho mundial, cerca de 35% das fatalidades relacionadas ao trabalho ocorrem neste setor [1]. As causas destes acidentes são multifacetadas e incluem frequentemente deficiências na gestão de riscos, inadequação na supervisão dos trabalhadores e comportamentos inseguros associados a falhas na formação e sensibilização para os riscos existentes [2].

As metodologias tradicionais de monitoração da segurança em construções, baseadas em inspeções manuais, apresentam limitações significativas, tais como o elevado tempo exigido para cobrir grandes áreas, a exposição direta dos técnicos de segurança a ambientes perigosos e a frequência insuficiente de avaliações [3-6]. Isto sublinha a necessidade de automatizar a monitorização de segurança. A verificação automatizada de não-conformidade em campo ajuda a detetar e corrigir esses problemas de forma mais rápida e eficaz [3,7]. O campo emergente da inteligência artificial (IA) vem transformando a indústria da construção civil há vários anos e o uso intensivo da IA tem impulsionado o setor rumo à automação e aos sistemas autônomos. [8]. Além disso, técnicas baseadas em Visão Computacional (VC) combinadas com paradigmas de informação, como o *Building Information Modeling* (BIM), estão a ser adotadas para automatizar mecanismos de monitorização do progresso, medição da produtividade e rastreamento de atividades, visando melhorias na gestão da construção [9]. Com a integração de algoritmos de VC e de robótica, há uma oportunidade crescente de elevar os padrões globais de segurança no trabalho e reduzir o número de mortes por acidentes neste setor [6,10]. Com isso, o objetivo deste estudo é revisar o estado da arte dos sistemas inteligentes baseados em aprendizagem automática aplicados para avaliar e monitorar as não-conformidades com as normas de segurança do trabalho em estaleiros de construção.

2. Materiais e Método

A metodologia deste artigo é formada por uma revisão sistemática de literatura, que visa explorar as publicações científicas sobre avanços tecnológicos relacionados à aprendizagem automática para a segurança do trabalho no setor da construção civil.

A Revisão Sistemática de Literatura (RSL) foi conduzida de acordo com as diretrizes do método PRISMA (Transparent Reporting of Systematic Reviews and Meta-Analyses), desenvolvido por Liberati et al. [11]. As pesquisas foram realizadas, em outubro de 2025, utilizando as bases de dados SCOPUS e Web of Science, selecionadas por agregarem artigos de revistas científicas e conferências, utilizando uma *string* de busca, em inglês, por motivo de abrangência: (“construction”) AND (“safety compliance” OR “regulatory compliance” OR “norm compliance” OR “safety standards”) AND (“intelligent system” OR “machine learning” OR “ML” OR “deep learning” OR “artificial intelligence” OR “AI”) AND (“safety”).

A seleção dos artigos baseou-se em critérios de inclusão e exclusão previamente definidos. Inicialmente, foram feitas as buscas nas bases de dados selecionadas, utilizando as palavras-chave descritas acima, para obtenção dos manuscritos científicos vinculados ao tema em questão. Em seguida, procedeu-se à primeira fase de triagem dos artigos por meio da leitura dos títulos, de modo a identificar os trabalhos alinhados com o objetivo desta investigação.

Após a primeira triagem, os artigos foram importados para o software EndNote 21.5 [12], que constituiu a plataforma central para a gestão bibliográfica e para as etapas subsequentes. Nele, implementaram-se os critérios de exclusão a partir da leitura e análise dos resumos. Além disso, no software, foi realizada uma ordenação preliminar, de modo a classificar estes artigos de acordo com o seu grau de relevância, utilizando uma escala de 0 a 5 estrelas, e categorizá-los por tags temáticas, permitindo a identificação dos principais subtemas abordados.

Por fim, a última triagem dos artigos foi realizada após a leitura integral dos estudos remanescentes, com o objetivo de aprofundar a análise e selecionar apenas os trabalhos diretamente relacionados com o tema desta investigação, bem como extrair os dados relevantes

para a presente revisão sistemática de literatura. O Diagrama PRISMA com os resultados pode ser visto na Figura 1.

2.1 Critérios de Inclusão

Os critérios de inclusão foram definidos para assegurar o alinhamento direto dos estudos ao objetivo desta investigação. Foram incluídos apenas artigos que propuseram ou desenvolveram modelos computacionais baseados em aprendizagem automática para a identificação e/ou monitorização de não-conformidades com as normas de segurança do trabalho em estaleiros de construção.

2.2 Critérios de exclusão

Foram excluídos desta revisão os artigos de conferência, por frequentemente serem versões preliminares de estudos, bem como as publicações anteriores a 2020, para assegurar a atualidade do estudo. Também foram excluídos artigos de revisão de literatura, estudos puramente teóricos e que não apresentavam validação ou aplicação prática dos modelos desenvolvidos.

3. Resultados e Discussões

3.1 Seleção dos Artigos

Tendo como base as diretrizes do método PRISMA, ao realizar a pesquisa inicial, utilizando a *string* de buscas nas bases de dados SCOPUS e Web of Science, foram encontrados 144 artigos, como ilustrado na Figura 1. No momento da busca, não foram aplicados filtros de restrição para a obtenção dos artigos.

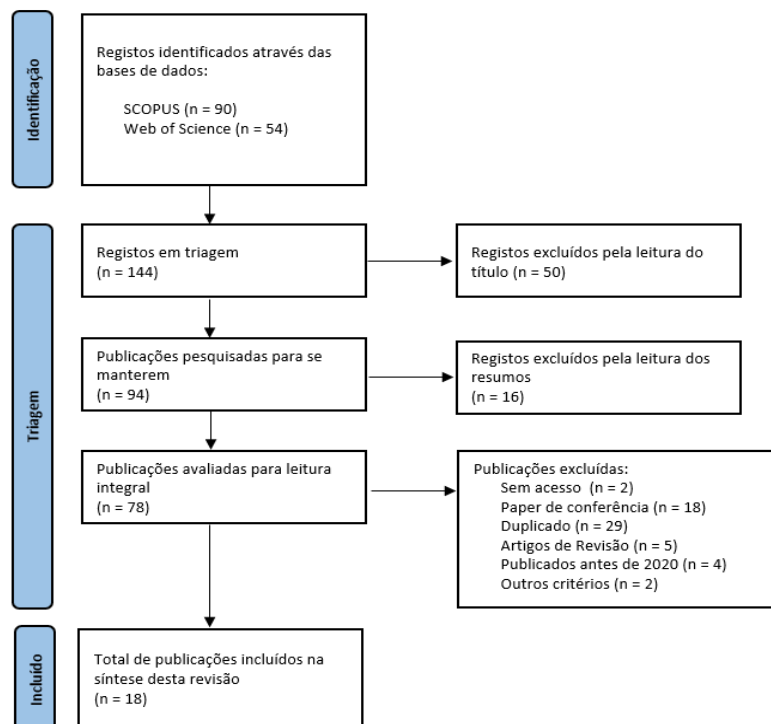


Figura 1: Diagrama PRISMA desta Revisão Sistemática de Literatura.

Conforme se representa na Figura 1, após a leitura dos títulos, permaneceram 94 artigos na triagem. Ao finalizar a leitura dos resumos, mais 16 artigos foram excluídos deste estudo, permanecendo 78 para a leitura integral. Contudo, após a aplicação de critérios de exclusão, remoção de artigos duplicados, artigos sem acesso ao texto completo, publicações anteriores a 2020, estudos de revisão de literatura, artigos de conferências e que não atendiam aos critérios de elegibilidade, restaram 18 artigos para serem analisados e incluídos neste estudo.

3.2 Características dos Estudos Analisados

Esta revisão objetivou determinar quais as não conformidades que estavam a ser identificadas a partir de sistemas inteligentes baseados em aprendizagem automática. A análise dos artigos seleccionados revelou um crescimento significativo do número de publicações sobre o tema nos últimos anos, conforme ilustrado na Figura 2.

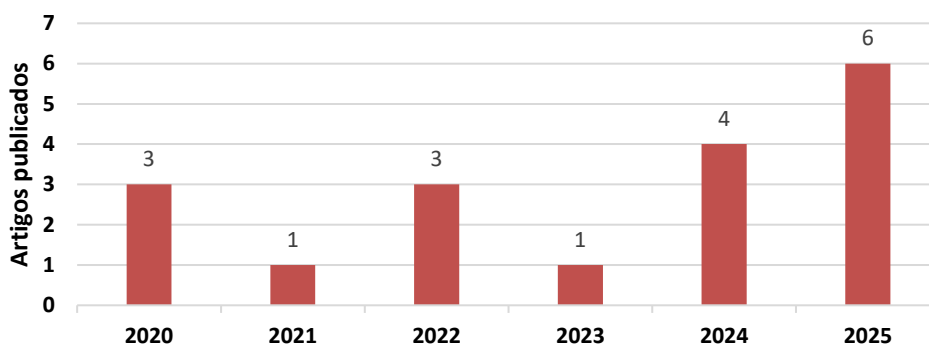


Figura 2: Número de publicações por ano

O pico de publicações ocorreu em 2025, com 6 artigos publicados. Regista-se também o aumento crescente das publicações nos últimos anos, com 1 artigo em 2023 e 4 em 2024. A Figura 3 apresenta uma nuvem de palavras-chave identificadas a partir dos artigos, desenvolvida utilizando o software VOSviewer [13].

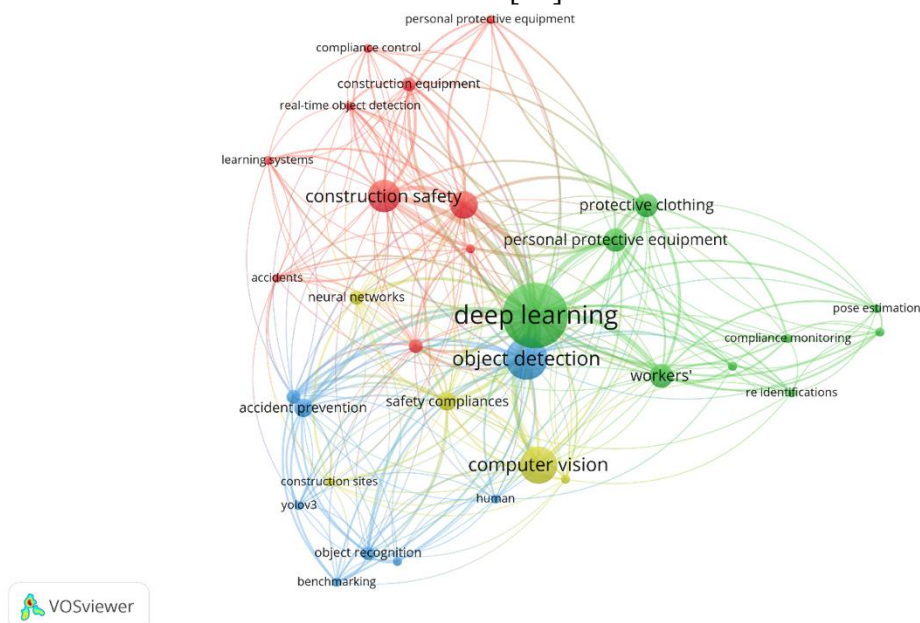


Figura 3: Nuvem de palavras-chave

Na Figura 3 é possível identificar que as palavras-chave de a maior frequência encontrada nos artigos são “deep learning”, “object detection” e “computer vision”. Isso demonstra a importância destes métodos no auxílio da segurança do trabalho de modo a manter os locais de construções mais seguros para seus trabalhadores.

A Tabela 1 apresenta uma síntese dos estudos incluídos nesta Revisão de Literatura, destacando, para cada artigo, o tipo de dado analisado e as não-conformidades de segurança identificadas por meio de sistemas baseados em aprendizagem automática, de modo a auxiliar a interpretação da análise comparativa dos trabalhos a partir dos seus objetivos principais, independente das técnicas ou arquiteturas computacionais utilizadas.

Ao analisar os estudos, foi possível identificar que o foco principal dos artigos está na identificação automática de não-conformidades relacionadas ao uso de EPI's. Os estudos de Delhi et al. [14], Nath et al. [8], Cheng et al. [7], Azizi et al. [6], Elesawy et al. [18], Hassan et al. [22], Jassim et al. [23], Kumar et al. [20] e Wang et al. [26] focam essencialmente na detecção da ausência de capacete e/ou colete de segurança, mostrando uma centralização destes estudos nas normas ligadas aos EPIs.

Além dos estudos relacionados aos EPIs, há dois artigos que se concentram na detecção de riscos de queda e sistemas de proteção coletiva, Shanti et al. [16] e Chen & Hu [21]. Estes trabalhos focam na identificação de arnês de segurança, linhas de vida, guarda-corpos, coberturas de aberturas e redes de segurança. A presença reduzida deste tipo de abordagem na literatura indica uma lacuna significativa. Principalmente considerando que o acidente por queda em altura é uma das principais causas de lesões e mortes na construção civil nos últimos anos [16, 27].

Durante a análise dos artigos, verificou-se também que dois estudos exploram a automação da segurança em estaleiros através de tecnologia aérea. Os trabalhos de Jassim et al. [23] e Kumar et al. [20] utilizam drones como plataforma principal para a detecção automática do uso de capacetes de segurança nas obras, visando auxiliar as inspeções manuais. Esses estudos demonstram como a integração da IA em sistemas de drones e sua convergência com outras ferramentas digitais, como o BIM, potencializam a identificação de perigos e a gestão de segurança no setor da construção.

Adicionalmente, observa-se uma tendência emergente de integração de Processamento de Linguagem Natural (PLN) nos estudos analisados. Dentre eles, quatro recorrem a esta abordagem com dois propósitos distintos: Chen, Demachi & Dong [10], Wang & El-Gohary [5] e Chen & Hu [21] utilizam o PLN para traduzir e estruturar textos regulamentares em formatos computáveis, possibilitando o emparelhamento semântico e a comparação automatizada entre a norma e imagem do campo; já Mohy et al. [25] aplicam o PLN para avaliar relatórios de lesões Graves da *Occupational Safety and Health Administration* (OSHA), identificando perigos críticos a partir de evidências históricas para priorizar o treino dos modelos de visão computacional. Em conjunto, estes estudos indicam que a IA está a evoluir para sistemas capazes de interpretar o contexto operacional através da união de dados visuais e linguísticos, utilizando fontes normativas e históricas como base de decisão.

Tabela 1: Características dos estudos analisados

Artigo	Tipo de dado analisado	Tipo de não-conformidade identificada com aprendizagem automática
Delhi et al. (2020) [14]	Imagens e vídeos	Uso de Equipamento de Proteção Individual (EPI), ausência de capacete e colete de segurança.
Nath & Behzadan (2020) [8]	Imagens	Trabalhadores, equipamentos e estruturas, com foco na identificação de proximidade de trabalhadores com máquinas e equipamentos.
Nath et al. (2020) [15]	Imagens e vídeos	Uso de EPI (capacete e colete). O sistema identifica o trabalhador e os componentes de EPI.
Shanti et al. (2021) [16]	Imagens	Sistemas de proteção contra quedas, incluindo ausência ou uso incorreto de arnês, linha de vida e capacete.
Chen, Demachi & Dong (2022) [10]	Imagens e textos regulamentares	Uso de EPI's, comportamentos inseguros associados a equipamentos e verificação automática nas normas. Aplica integração de informação visual e linguística.
Cheng et al. (2022) [7]	Vídeos	Uso de EPI ao longo do tempo, combina reidentificação de trabalhadores e classificação de EPI.
Otgonbold et al. (2022) [17]	Imagens e vídeos	Ausência de capacete de segurança após a reorganização de uma base de dados robusta pré-existente.
Wang & El-Gohary (2023) [5]	Textos regulamentares	Requisitos de proteção contra queda de altura e potenciais violações em normas de segurança através do Processamento de Linguagem Natural.
Azizi et al. (2024) [6]	Imagens	Uso de EPI, especificamente capacetes, coletes e rosto (pessoa). Comparação de desempenhos de diferentes modelos de deteção de objetos.
Elesawy et al. (2024) [18]	Imagens	Pessoas, capacete e colete de segurança para identificação de ausência ou uso incorreto.
Khan et al. (2024) [19]	Vídeos	Identificação e rastreio contínuo de trabalhadores individuais em diversas câmaras de vigilância, de modo a permitir a deteção contínua de comportamentos inseguros.
Kumar et al. (2024) [20]	Imagens aéreas	Ausência de capacetes de segurança através do processamento de imagens capturadas por veículos aéreos não tripulados (UAVs/Drones).
Chen & Hu (2025) [21]	Imagens e textos regulamentares	Riscos de queda em altura (guarda-corpos, coberturas de aberturas, redes de segurança e estruturas provisórias de proteção) e verificação da conformidade regulamentar nas normas.
Hassan et al. (2025) [22]	Imagens e vídeos	Violações do uso de capacete e colete de segurança em ambientes dinâmicos da construção.
Jassim et al. (2025) [23]	Imagens e vídeos	Uso de capacete de segurança em estaleiros de construção através de imagens capturadas por drones.
López et al. (2025) [24]	Imagens	Trabalhadores e uso de EPI's (capacete, colete, luvas, botas e vestuário de proteção).
Mohy et al. (2025) [25]	Imagens e textos de relatórios	Ausência de EPI, perigos no ambiente, ações inseguras, andaimes, materiais e equipamentos. E identificação de características dos acidentes em relatórios de lesões Graves.
Wang et al. (2025) [26]	Imagens tiradas de vídeos	Uso e ausência de capacetes de segurança, utilizando imagens de câmaras de vigilância e corporais.

De modo geral, a comparação entre os artigos mostra que, embora existam avanços significativos na identificação automática de não-conformidades, a maioria dos estudos foca em elementos isolados, sobretudo capacete e colete de segurança. Os motivos que podem explicar isso decorrem da complexidade da deteção de objetos em estaleiros de construção, das dificuldades em cenários como oclusão, iluminação variável, reflexos ou desfoque, bem como da distância do objeto para a câmara, que tornam a identificação desses objetos menos precisa. Além disso, para o desenvolvimento e treinamento desses modelos, é necessária uma grande quantidade de dados (imagens e/ou vídeos) de todos os objetos a serem identificados; contudo, a quantidade destes dados disponíveis normalmente não é suficiente para desenvolver modelos com bons parâmetros de precisão.

4. Conclusões

Esta Revisão Sistemática de Literatura permitiu analisar o estado da arte dos sistemas inteligentes baseados em aprendizagem automática aplicados à identificação e monitorização de não-conformidades com normas de segurança em estaleiros de construção. Os resultados mostram um crescente interesse científico no tema nos últimos dois anos, refletindo o potencial desta abordagem para o apoio da gestão de segurança do trabalho no setor da construção civil. A análise dos estudos revelou uma predominância do investimento em pesquisas ligadas a deteção de não-conformidades relativa ao não uso de EPIs nos estaleiros, principalmente capacetes e coletes de segurança, enquanto outros tipos de não-conformidades, como as ligadas aos riscos de queda em altura, permanecem pouco explorados.

Contudo, apesar dos avanços nesta linha de investigação, a literatura ainda se caracteriza por limitações ligadas à complexidade dos ambientes de obra, à variabilidade das condições visuais e à escassez de dados representativos para o desenvolvimento dos modelos. Neste contexto, os estudos apontam a necessidade de direcionar os esforços de investigação para a deteção de objetos que possam auxiliar na prevenção de acidentes em áreas de maior risco ocupacional e para o desenvolvimento de abordagens capazes de ultrapassar as limitações impostas pelo ambiente real de obra, promovendo sistemas mais alinhados com as exigências práticas da gestão da segurança na construção.

Deste modo, como trabalho futuro, poderá ser explorada a integração de modelos de visão computacional com sistemas de UAV e BIM, visando identificar os perigos por meio do uso do modelo digital como mapa de referência para patrulhas automatizadas. Essa abordagem poderia permitir a comparação do estado real, captado por sensores e IA, com o estado planeado no modelo, possibilitando uma verificação automática de conformidades.

Agradecimentos

Este trabalho foi financiado por: Financiamento - UID/04708 da Unidade de Investigação CONSTRUCT - Instituto de I&D em Estruturas e Construções - financiada pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia, I.P./ MCTES, através de fundos nacionais; A autora Sabrina S. Oliveira agradece à Fundação para a Ciência e a Tecnologia I.P./MCTES pelo apoio recebido no âmbito da bolsa de doutoramento com a referência “2025.04615.BDANA”.

Referências

- [1] Q. Shuang and Z. Zhang, “Determining Critical Cause Combination of Fatality Accidents on Construction Sites with Machine Learning Techniques,” *Buildings*, vol. 13, issue 2, pp. 345, 2023. doi: 10.3390/buildings13020345.
- [2] W. Zhang, S. Zhu, X. Zhang and T. Zhao, “Identification of critical causes of construction accidents in China using a model based on system thinking and case analysis,” *Safety Science*, vol. 121, pp. 606-618, 2020. doi: 10.1016/j.ssci.2019.04.038.
- [3] J. Han, C. Hsu and C. Huang, “Automated progress monitoring of land development projects using unmanned aerial vehicles and machine learning,” *Automation in Construction*, vol. 168, pp. 105827, 2024. doi: 10.1016/j.autcon.2024.105827.
- [4] K. W. Johansen, C. Schultz and J. Teizer, “Automated performance assessment of prevention through design and planning (PtD/P) strategies in construction,” *Automation in construction*, vol. 157, pp. 105159, 2024. doi: 10.1016/j.autcon.2023.105159
- [5] X. Wang and N. El-Gohary, “Deep Learning-Based Named Entity Recognition and Resolution of Referential Ambiguities for Enhanced Information Extraction from Construction Safety Regulations,” *Journal of Computing in Civil Engineering*, Vol. 37 issue 5, 2023. doi: 10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0001064.
- [6] R. Azizi, M. Koskinopoulou and Y. Pétillet, “Comparison of Machine Learning Approaches for Robust and Timely Detection of PPE in Construction Sites,” *Robotics*, vol. 13, issue 2, 2024. doi: 10.3390/robotics13020031.
- [7] J. P. Cheng, P. K. Y. Wong, H. Luo, M. Wang and P. H. Leung, “Vision-based monitoring of site safety compliance based on worker re-identification and personal protective equipment classification,” *Automation in Construction*, vol. 139, 2022. doi: 10.1016/j.autcon.2022.104312.
- [8] N. D. Nath and A. H. Behzadan, “Deep Convolutional Networks for Construction Object Detection Under Different Visual Conditions,” *Frontiers in Built Environment*, vol. 6, 2020. doi: 10.3389/fbuil.2020.00097.
- [9] M. Wang, P. Wong, H. Luo, S. Kumar, V. Delhi, and J. Cheng, “Predicting Safety Hazards Among Construction Workers and Equipment Using Computer Vision and Deep Learning Techniques”, *Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction*, vol. 36, pp. 399–406, 2019. doi: 10.22260/ISARC2019/0054.
- [10] S. Chen, K. Demachi and F. Dong, “Graph-based linguistic and visual information integration for on-site occupational hazards identification,” *Automation in Construction*, vol. 137, 2022. doi: 10.1016/j.autcon.2022.104191
- [11] A. Liberati, D. G. Altman, J. Tetzlaff, C. Mulrow, P. C. Gøtzsche, J. P. A. Ioannidis, M. Clarke, P. J. Devereaux, J. Kleijnen and D. Moher, “Annals of Internal Medicine Academia and Clinic The PRISMA Statement for Reporting Systematic Reviews and Meta-Analyses of Studies That Evaluate Health Care Interventions,”. *Annals of Internal Medicine*, vol. 151, issue 4, 2009. doi: 10.1136/bmj.b2700.
- [12] Clarivate, EndNote 21, Clarivate Analytics, Philadelphia, PA, USA, 2023. [Software]. Available: <https://endnote.com>
- [13] N. J. van Eck and L. Waltman, VOSviewer, version 1.6.20, Centre for Science and Technology Studies (CWTS), Leiden University, Leiden, The Netherlands, 2024. [Software]. Available: <https://www.vosviewer.com>

- [14] V. S. K. Delhi, R. Sankarlal and A. Thomas, "Detection of Personal Protective Equipment (PPE) Compliance on Construction Site Using Computer Vision Based Deep Learning Techniques," *Frontiers in Built Environment*, vol. 6, 2020. doi: 10.3389/fbuil.2020.00136.
- [15] N. D. Nath, A. H. Behzadan and S. G. Paal, "Deep learning for site safety: Real-time detection of personal protective equipment," *Automation in Construction*, vol. 112, 2020. doi: 10.1016/j.autcon.2020.103085.
- [16] M. Z. Shanti, C. S. Cho, Y. J. Byon, C. Y. Yeun, T. Y. Kim, S. K. Kim and A. Altunaiji, "A Novel Implementation of an AI-Based Smart Construction Safety Inspection Protocol in the UAE," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 166603-166616, 2021. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3135662.
- [17] M. E. Otgonbold, M. Gochoo, F. Alnajjar, L. Ali, T. H. Tan, J. W. Hsieh and P. Y. Chen, "SHEL5K: An Extended Dataset and Benchmarking for Safety Helmet Detection," *Sensors*, vol. 22, issue 6, 2022. doi: 10.3390/s22062315.
- [18] A. Elesawy, E. Mohammed Abdelkader and H. Osman, "A Detailed Comparative Analysis of You Only Look Once-Based Architectures for the Detection of Personal Protective Equipment on Construction Sites," *Eng*, vol. 5, issue 1, pp. 347-366, 2024. doi: 10.3390/eng5010019.
- [19] N. Khan, S. F. A. Zaidi, M. S. Abbas, D. Lee and D. Lee, "Tracking multiple construction workers using pose estimation and feature-assisted re-identification model," *Automation in Construction*, vol. 168, 2024. doi: 10.1016/j.autcon.2024.105771.
- [20] S. Kumar, M. Mukilan, B. Balasubramanian, N. Narayanamoorthi, R. Alroobaea and W. Nureldeen, "Investigation of Unsafe Construction Site Conditions Using Deep Learning Algorithms Using Unmanned Aerial Vehicles," *Sensors*, vol. 24, issue 20, 2024. doi: 10.3390/s24206737.
- [21] Y. T. Chen and T. C. Hu, "Automated Detection of Construction Opening Safety Risks Using Computer Vision," *International Journal of Safety and Security Engineering*, vol. 15, issue 5, pp. 859-871, 2025. doi: 10.18280/ijssse.150501.
- [22] A. Hassan, A. H. Hassan, Y. Christensen and H. Alsadiq, "Advanced AI-Driven Safety Compliance Monitoring in Dynamic Construction Environment," *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, vol. 16, issue 6, pp. 426-436, 2025. doi: 10.14569/IJACSA.2025.0160641.
- [23] S. Jassim, K. Mirfaei, A. Alkim, H. Al-Nuaimi, A. Bin Khalifa and L. B. Ahmed. "AI-Based Decision Support for Helmet Detection and Safety Monitoring in Construction Sites," *International Journal of Combinatorial Optimization Problems and Informatics*, vol. 16, issue 3, pp. 323-333, 2025. doi: 10.61467/2007.1558.2025.v16i3.715.
- [24] L. López, J. Suárez-Ramírez, M. Alemán-Flores and N. Monzón, "Automated PPE compliance monitoring in industrial environments using deep learning-based detection and pose estimation," *Automation in Construction*, vol. 176, 2025. doi: 10.1016/j.autcon.2025.106231.
- [25] A. A. Mohy, H. A. Bassioni, E. O. Elgendi and T. M. Hassan, "Deep Learning Enabled Computer Vision Model for Automated Safety Compliance in Construction Environments," *Journal of Information Technology in Construction*, vol. 30, pp. 1398-1430, 2025. doi: 10.36680/j.itcon.2025.057.
- [26] S. Wang, S. Park, J. Kim and J. Kim, "Safety Helmet Monitoring on Construction Sites Using YOLOv10 and Advanced Transformer Architectures with Surveillance and Body-

- Worn Cameras,” *Journal of Construction Engineering and Management*, vol. 151, issue 11, 2025. doi: 10.1061/JCEMD4.COENG-16760.
- [27] Z. F. Olcay, A. E. Sakalli, S. Temur and A. Yazici, “A study of the shift in fatal construction work-related accidents during 2012–2019 in Turkey,” *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, vol. 28, issue 3, pp. 1522–1532, 2022. doi: 10.1080/10803548.2021.1900503.