

CONTROLO DO PROGRESSO DA MONTAGEM DE PAINÉIS SANDWICH COM O APOIO DE VISÃO COMPUTACIONAL, IA E BIM

Edgar Mendez ⁽¹⁾, Nelson Silva ⁽¹⁾, Diogo Ribeiro ^(2,3), Ricardo Santos ^(2,3), Pedro Oliveira ⁽²⁾

(1) Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, Portugal

(2) iBuilt, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, Portugal

(3) CONSTRUCT – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal

Resumo

O presente trabalho apresenta uma abordagem integrada em ambiente BIM (*Building Information Modelling*) para o controlo do progresso construtivo, recorrendo a técnicas de Inteligência Artificial (IA) e visão computacional (VC). O principal objetivo consiste em desenvolver e validar uma metodologia de monitorização da montagem de painéis *sandwich*, garantindo uma correlação precisa entre o planeamento previsto e o estado efetivo da execução. A proposta assenta na recolha sistemática de imagens de estaleiro, processadas por um algoritmo de deteção baseado na arquitetura YOLOv8, capaz de identificar e classificar etiquetas impressas nos painéis. Os dados obtidos são integrados num modelo BIM através de *scripts* de automação, permitindo a atualização dinâmica da informação e a visualização tridimensional do progresso da obra.

O caso de estudo desenvolvido no âmbito do projeto CRIARTE demonstra a aplicabilidade da metodologia em contexto real, evidenciando a robustez do sistema em ambiente de obra e o seu potencial de integração futura com sistemas de georreferenciação e montagem robotizada. A abordagem contribui para mitigar a escassez de mão de obra qualificada e para reforçar a segurança dos trabalhadores, promovendo a automação inteligente e a modernização do setor da construção civil.

1. Introdução

A indústria da Arquitetura, Engenharia e Construção (AEC) enfrenta desafios crescentes relacionados com a produtividade, a escassez de mão de obra qualificada e a necessidade de digitalização dos processos. Neste contexto, a metodologia BIM (*Building Information Modelling*) afirmou-se como uma ferramenta central para a gestão de informação ao longo do ciclo de vida dos edifícios. Contudo, a monitorização do progresso em obra permanece, frequentemente, um processo manual, sujeito a erros e desfasado da realidade digital do projeto. O surgimento de tecnologias disruptivas, como a Inteligência Artificial (IA) e a Visão Computacional (VC), oferece novas oportunidades para automatizar este controlo. O presente

artigo insere-se no âmbito do Projeto CRIARTE, cujo foco é a construção robotizada com painéis *sandwich* e a arquitetura de tecnologias emergentes. O trabalho propõe um sistema que interliga a captura da realidade (através de imagens) com o modelo BIM, permitindo verificar automaticamente quais os elementos que já foram instalados em obra.

Esta abordagem visa não só otimizar o controlo de gestão, mas também criar as bases digitais necessárias para suportar futuros sistemas robóticos de montagem autónoma [1].

2. Metodologia

A literatura menciona várias experiências de controlo progressivo em obra recorrendo a técnicas semelhantes baseadas em visão computacional [2], [3]. Em poucos exemplos, no entanto, a aplicação da visão computacional se baseia na aquisição de imagens recorrendo a UAV's [4]. A metodologia adotada no presente estudo, assenta numa abordagem aplicada e experimental, com o objetivo de avaliar a viabilidade da integração da metodologia BIM com técnicas de IA para o reconhecimento e acompanhamento da montagem de painéis *sandwich* em edifícios industriais. O estudo articula modelação digital, VC e atualização automática da informação em ambiente BIM, inspirando-se nos desenvolvimentos em curso no âmbito do Projeto CRIARTE.

2.1 Enquadramento

O trabalho desenvolveu-se em quatro fases: (i) conceção e modelação BIM dos objetos de estudo, (ii) desenvolvimento e treino de um algoritmo para deteção numérica do número dos painéis, (iii) validação da metodologia em ambiente controlado com recurso a um protótipo físico, e (iv) adaptação e simulação do processo num contexto virtual de projeto, com atualização automática do modelo BIM.

Esta abordagem permitiu testar a aplicabilidade prática da metodologia fora do ambiente laboratorial, avaliando simultaneamente as suas limitações e potencialidades em contexto de obra [5].

2.2 Modelação BIM do edifício de estudo

Numa primeira fase, procedeu-se à modelação tridimensional de um protótipo de uma pequena torre de pequena dimensão, recorrendo ao *software* Autodesk Revit, amplamente utilizado no setor AEC e compatível com a metodologia BIM (Figura 1). Este modelo foi desenvolvido em consonância com o protótipo desenvolvido no Projeto CRIARTE.

Posteriormente, desenvolveu-se o modelo de um edifício industrial, que serviu de teste e controlo às aplicações com recurso a IA para simulação do contexto progressivo de uma obra (Figura 2Figura 2).

A modelação foi realizada com um nível de desenvolvimento equivalente a LOD 300 considerado adequado à análise pretendida, garantindo a correta representação geométrica dos elementos e a incorporação da informação necessária para a identificação individual dos painéis. Os painéis *sandwich* foram modelados individualmente e numerados através do parâmetro “*Mark*”, condição essencial para permitir a correspondência entre os elementos físicos (ou simulados) e os elementos digitais do modelo BIM [1], [5].



Figura 1: Estrutura protótipo do CRIARTE [1]

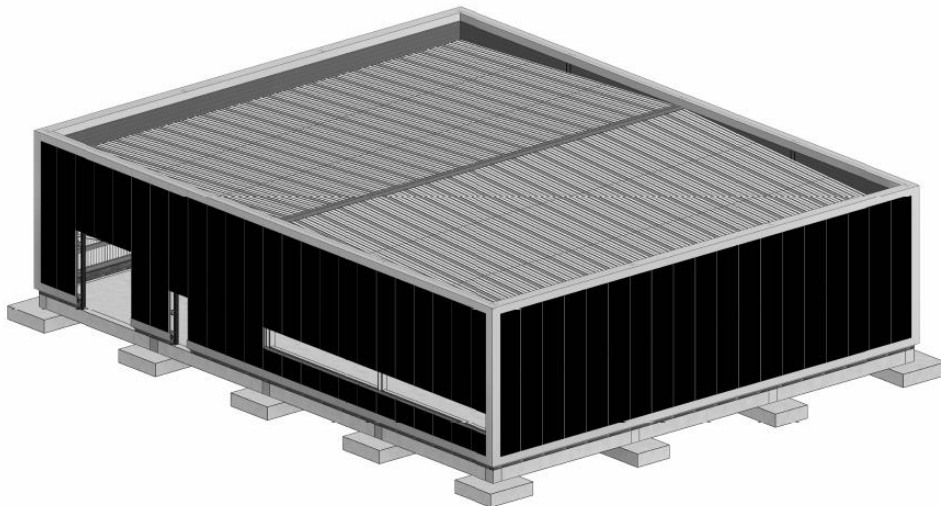


Figura 2: Modelo utilizado para simulação de ambiente de obra [5]

2.3 Aquisição e preparação dos dados para IA

Para o desenvolvimento do sistema de reconhecimento visual, recorreu-se a imagens captadas por um veículo aéreo não tripulado (UAV – *Unmanned Aerial Vehicle*), durante a montagem de painéis *sandwich* no protótipo do Projeto CRIARTE. O registo fotográfico resultou num conjunto de imagens, que inicialmente foram usadas para a criação de um *dataset* de Treino. A anotação das imagens foi realizada manualmente na plataforma Roboflow, através da definição de *bounding boxes* associadas aos algoritmos identificadores dos painéis. Após a anotação, aplicaram-se técnicas de *data augmentation*, com o objetivo de aumentar a robustez do modelo e a diversidade do *dataset*, o que resultou num aumento significativo do número de imagens, distribuídas em conjuntos de treino, validação e teste [6], [7].

2.4 Treino e validação do modelo de IA

O modelo de treino escolhido foi o YOLOv8 (*You Only Look Once*), dada a sua elevada eficiência em tarefas de deteção de objetos em tempo real. O treino foi realizado em ambiente Python, utilizando o editor *Visual Studio Code* (VSCode) e aceleração por GPU.

A avaliação do desempenho do modelo foi efetuada com base em métricas padrão, nomeadamente o *mean Average Precision* (mAP@50), sendo possível determinar uma percentagem de precisão na deteção e classificação dos algoritmos identificadores dos painéis. Posteriormente, realizaram-se inferências em imagens não utilizadas no treino, de modo a validar a generalização do modelo [6], [7], [8], [9].

2.5 Integração dos resultados no modelo BIM

Os resultados das inferências foram exportados para um ficheiro no formato *.csv*, contendo a listagem dos painéis identificados. Este ficheiro serve de base para a atualização automática do modelo BIM.

Para essa integração, foi desenvolvido um *script* em Python, executado através do *add-on* pyRevit, que permite a interação direta com o ambiente do Revit. O *script* compara os identificadores presentes no ficheiro *.csv* com o parâmetro “*Mark*” dos painéis modelados e atualiza um parâmetro adicional, designado “*Montado*”, com valores “*Sim*” ou “*Não*”.

Foram ainda configurados filtros de visualização no Revit, permitindo ocultar os painéis não montados e destacar visualmente os painéis montados, através da aplicação de contornos a verde tal como apresentado na Figura 3. Esta estratégia possibilita a leitura imediata do estado de execução da fachada diretamente no modelo BIM [1], [5].

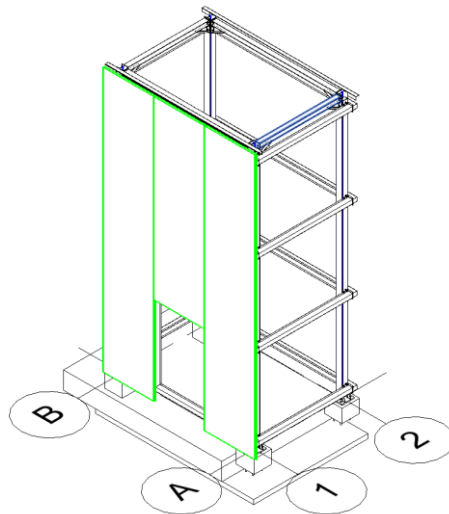


Figura 3: Modelo do CRIARTE atualizado com painéis montados [1]

3. Sistema de Controlo de Progresso com IA

3.1 Construção e caracterização do *dataset*

O desenvolvimento de um sistema fiável de controlo de progresso baseado em IA depende, de forma determinante, da qualidade e adequação do *dataset* utilizado no treino dos modelos de

VC. No presente estudo, o *dataset* foi construído especificamente para o reconhecimento automático de painéis *sandwich*, mais concretamente dos seus identificadores numéricos, aplicados nos elementos construtivos durante a fase de montagem.

A aquisição dos dados foi realizada em ambiente controlado, recorrendo a um UAV para o registo fotográfico do protótipo desenvolvido no âmbito do Projeto CRIARTE. As imagens captadas representam diferentes perspetivas, distâncias e condições de iluminação da estrutura metálica e dos painéis instalados, assegurando diversidade visual suficiente para o treino do modelo (Figura 4). No total, foram recolhidas 431 imagens originais, que constituíram a base inicial do *dataset*.



Figura 4: Painéis *sandwich* montados no demonstrador com identificação numérica visível [1]

Uma vez que não foi identificado um *dataset* público que respondesse adequadamente às especificidades do caso de estudo — nomeadamente a identificação de algarismos aplicados em painéis *sandwich* em contexto real de obra — procedeu-se à anotação manual das imagens. Este processo foi realizado na plataforma Roboflow, através da criação de *bounding boxes* associadas aos algarismos visíveis em cada painel, garantindo uma correspondência rigorosa entre os dados visuais e as respetivas classes.

Com o objetivo de melhorar a capacidade de generalização do modelo e reduzir o risco de *overfitting*, foram aplicadas técnicas de *data augmentation*. Estas incluíam rotações horizontais e verticais, bem como variações de brilho das imagens e das *bounding boxes*, permitindo simular diferentes condições de captura frequentemente encontradas em ambiente de obra. Após este processo, o *dataset* foi ampliado para um total de 1047 imagens, distribuídas em conjuntos de treino (70%), validação (15%) e teste (15%) [1], [5], [9].

3.2 Modelo de IA para reconhecimento visual

Para a deteção automática dos números dos painéis, foi adotado um modelo baseado na arquitetura YOLOv8, reconhecida pela sua elevada eficiência em tarefas de deteção de objetos em tempo real. O modelo foi treinado utilizando a linguagem de programação Python, com suporte de aceleração por GPU e resolução fixa das imagens a 1024x1024px.

O processo de treino decorreu ao longo de aproximadamente 100 épocas, tendo sido monitorizado com a métrica *mean Average Precision* a 50% de intersecção (mAP@50) que apresentou um valor de 99,5%, evidenciando a elevada precisão do modelo na identificação dos algarismos associados aos painéis *sandwich* (Figura 5).



Figura 5: Imagem inferida [1]

Após o treino, o modelo foi submetido a testes de inferência utilizando imagens não incluídas no conjunto de treino, permitindo avaliar a sua capacidade de generalização e confirmar a robustez dos resultados obtidos [1], [5], [6], [8].

3.3 Sistema de controlo de progresso da construção

O sistema de controlo de progresso desenvolvido neste trabalho baseia-se na integração entre os resultados do reconhecimento visual por IA e os modelos BIM do protótipo de um edifício industrial modelado para servir como teste. A lógica do sistema assenta na comparação entre o estado real da obra e o planeamento digital previamente definido no modelo BIM.

Durante o processo de inferência, os painéis identificados pelo modelo YOLO são registados automaticamente e exportados num ficheiro no formato *.csv* (Figura 6), contendo a numeração associada a cada elemento detetado. Este ficheiro constitui o elo entre a camada de VC e o ambiente BIM.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Painel							
2	1							
3	5							
4	6							
5	7							
6	8							
7	12							
8	13							
9	14							
10	15							
11	19							

Figura 6: Registo em ficheiro *.csv* [5]

A atualização do progresso no modelo digital é realizada através de um *script* desenvolvido em Python, executado no Revit com recurso ao *add-on* pyRevit. O *script* procede à leitura do ficheiro *.csv* e compara os identificadores nele contidos com o parâmetro “*Mark*” dos painéis modelados. Em função dessa correspondência, é atualizado um parâmetro adicional, designado “*Montado*”, com valores binários (“Sim” ou “Não”), refletindo o estado de execução de cada painel (Figura 7).

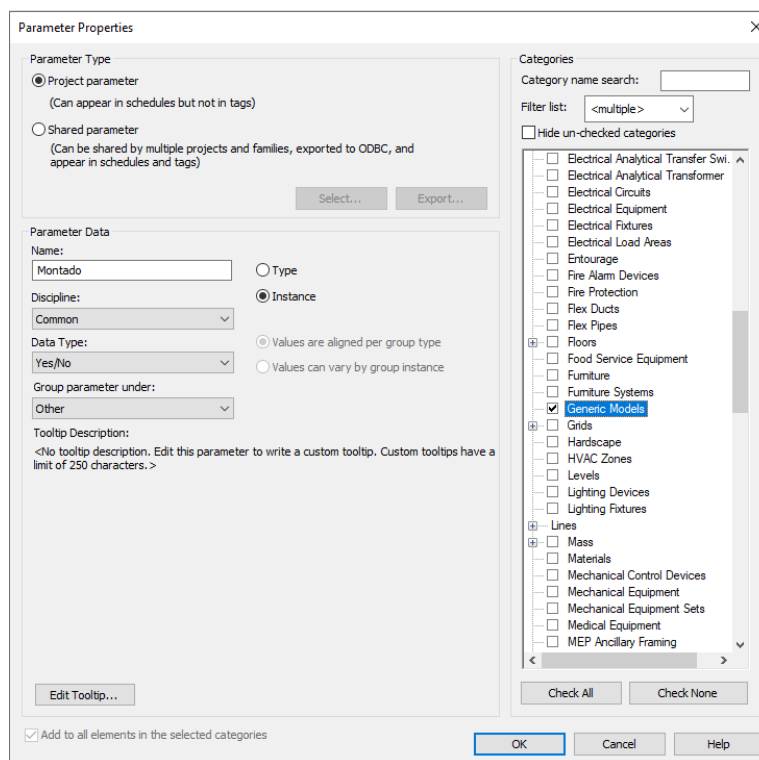


Figura 7: Configuração do parâmetro “Montado” [2]

Para facilitar a interpretação visual do progresso da obra, foram configurados filtros de visualização no Revit, permitindo ocultar automaticamente os painéis não montados e destacar os painéis montados através de contornos de cor diferenciada. Esta abordagem possibilita uma leitura imediata e intuitiva do estado da construção, sem necessidade de consulta de documentação adicional [5].

3.4 Validação e aplicação em contexto simulado

Dado que o edifício em estudo se encontra em fase de projeto, a validação do sistema de controlo de progresso foi realizada através de uma simulação. Para esse efeito, foi criado um ficheiro .csv representativo de um cenário de levantamento em obra, simulando os resultados que seriam obtidos através de campanhas fotográficas com UAV e reconhecimento automático através do modelo YOLO.

A aplicação do sistema ao modelo BIM permitiu confirmar a coerência e funcionalidade da metodologia proposta, demonstrando a capacidade de atualização automática do progresso da construção com base em dados externos. Apesar de não integrar, nesta fase, a componente robótica de montagem, o sistema desenvolvido constitui um passo relevante para a implementação de processos de acompanhamento de obra mais automatizados, precisos e alinhados com os princípios da Construção 4.0 e 5.0. [5]

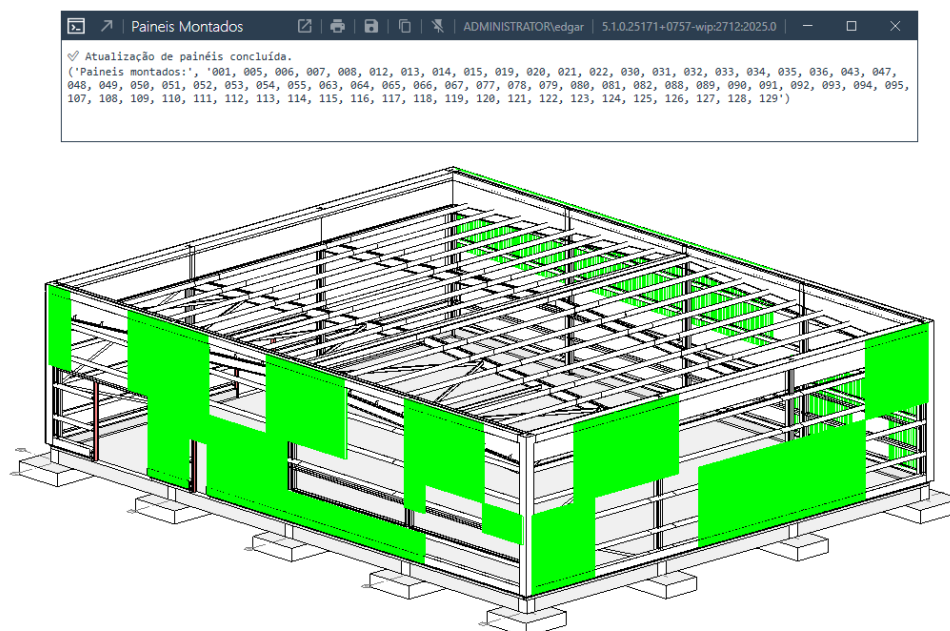


Figura 8: Resultado do modelo após execução da simulação [5]

4. Discussão

O recurso a imagens recolhidas com UAV's para controlo da evolução das construções, assume limitações, nomeadamente no processo de obtenção das imagens, inerentes à dependência de factores externos como condições climáticas e eventuais restrições de voo nos locais ou nas proximidades das construções, entre outras. Por outro lado, o recurso a estes equipamentos permite obter imagens de qualidade a partir dos melhores pontos de vista, não estando dependente de câmaras de vigilância ou outras, instaladas de modo fixo em estaleiro, com os inerentes condicionamentos de qualidade de imagem e limitações na visibilidade integral dos edifícios em processo construtivo. Soluciona-se ainda o problema do desgaste normalmente acelerado deste tipo de câmaras em ambiente de obra. Asseguram-se ainda problemas de escalabilidade no processo de captura de imagens, ao depender de um sistema que, em cada momento, se adapta à realidade evolutiva da construção. Os resultados obtidos ao longo do desenvolvimento do trabalho demonstram o potencial da integração entre a metodologia BIM e técnicas de IA para o controlo automático do progresso da construção, em particular no contexto da montagem de painéis *sandwich* em edifícios industriais. A elevada precisão alcançada pelo modelo de visão computacional, aliada à correta atualização do estado dos elementos no modelo BIM, evidencia a viabilidade técnica da abordagem proposta.

A utilização de um *dataset* específico, construído a partir de imagens reais captadas em ambiente controlado, revelou-se um fator determinante para o sucesso do sistema. A necessidade de proceder à anotação manual das imagens, embora morosa, permitiu garantir uma elevada qualidade dos dados de treino, refletindo-se diretamente no desempenho do modelo YOLOv8. Este resultado reforça a importância de *datasets* devidamente etiquetados em aplicações de IA na construção, onde as condições visuais e os elementos construtivos apresentam grande variabilidade.

No que respeita ao sistema de controlo de progresso, a ligação entre os resultados da inferência e o modelo BIM, através de parâmetros e filtros de visualização, mostrou-se eficaz e intuitiva. A possibilidade de visualizar, em tempo quase real, o estado de execução dos elementos construtivos constitui uma mais-valia significativa para a gestão de obra, reduzindo a dependência de inspeções manuais e relatórios desatualizados. Contudo, esta abordagem pressupõe uma modelação BIM rigorosa e consistente, nomeadamente ao nível da identificação individual dos elementos, o que pode representar um desafio adicional em projetos de maior escala ou com múltiplos intervenientes.

Apesar dos resultados positivos, importa salientar que a validação do sistema foi realizada maioritariamente em ambiente controlado e, no caso do edifício de estudo, através de uma simulação. Assim, fatores como condições atmosféricas adversas, oclusões visuais, variações extremas de iluminação ou interferências em estaleiro real não foram plenamente avaliados e poderão influenciar o desempenho do sistema em contextos reais de obra, devendo ser considerados em trabalhos futuros. [5]

5. Conclusões e trabalho futuro

O presente trabalho permitiu desenvolver e validar uma metodologia integrada para o controlo do progresso da construção, combinando modelação BIM e IA baseada em VC. A abordagem proposta demonstrou ser tecnicamente viável, evidenciando a capacidade de identificar automaticamente painéis *sandwich* e refletir o seu estado de montagem diretamente no modelo BIM, de forma clara e objetiva.

Os resultados obtidos confirmam que a utilização de modelos de deteção de objetos, como o YOLOv8, associada a *datasets* específicos e bem estruturados, constitui uma solução eficaz para aplicações de acompanhamento de obra. A integração com o ambiente BIM, através de *scripts* em Python e ferramentas como o pyRevit, mostrou-se uma estratégia flexível e adaptável, capaz de apoiar processos de tomada de decisão e melhorar a transparência da informação ao longo do ciclo de vida do projeto.

Apesar das limitações associadas ao tempo de desenvolvimento e à ausência de validação em obra real, considera-se que o trabalho realizado representa um contributo relevante para a investigação na área da Construção Digital, evidenciando o potencial da automação e da IA na modernização dos processos construtivos.

Como perspetivas de trabalhos futuros, destaca-se, em primeiro lugar, a aplicação da metodologia em contexto real de obra, permitindo avaliar o desempenho do sistema em condições operacionais mais exigentes. A integração com sistemas de georreferenciação e com o esquema IFC CRS (*Coordinate Reference System*) surge igualmente como um passo fundamental para garantir o alinhamento preciso entre o modelo digital e o ambiente físico, potenciando aplicações em realidade aumentada e robótica autónoma.

Adicionalmente, a extensão do sistema a outros elementos construtivos, bem como a incorporação de métricas temporais e de planeamento (BIM 4D), poderá permitir um controlo de progresso mais abrangente e integrado, de momento ainda não possível devido ao carácter exploratório da metodologia proposta. Espera-se que esta e outras metodologias subjacentes possam mais cabalmente ser confirmadas no decorrer das actividades propostas no âmbito do projecto CRIARTE em que este trabalho se insere. Por fim, a ligação direta entre o sistema de reconhecimento visual e plataformas de gestão de obra ou sistemas robóticos de montagem

representa um caminho promissor para a concretização de processos de construção verdadeiramente automatizados, alinhados com os princípios da Construção 5.0. [5]

Agradecimentos

Os autores agradecem o financiamento obtido no âmbito do projeto CRIARTE – Construção com Robótica Inteligente e Arquitetura Revolucionária de Tecnologias Emergentes (Ref^a COMPETE2030-FEDER-01192200), cofinanciado pelo Programa COMPETE 2030 e pelo Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER). Os autores agradecem igualmente o apoio da unidade de investigação UIDB/04708/2020 (DOI: 10.54499/UIDB/04708/2020) e do financiamento programático - UIDP/04708/2020 (DOI: 10.54499/UIDP/04708/2020), atribuídos ao CONSTRUCT - Instituto de I&D em Estruturas e Construções – financiados por fundos nacionais através da FCT/MCTES (PIDDAC).

Referências

- [1] C. Hsieh, H. Chen, W. Chen, T. Wu, “Automated construction progress monitoring and control through AI-based image recognition and BIM integration”, *Automation in Construction*, 2026, <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2026.106783>
- [2] V. K. Reja, K. Varghese, Q. P. Ha, Computer vision-based construction progress monitoring, *Automation in Construction*, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104245>
- [3] S. Gharib, O. Moselhi, "A review of Computer Vision-Based Techniques for Construction Progress Monitoring", *Proceedings of the 40th ISARC*, 2023, <https://doi.org/10.22260/ISARC2023/0071>
- [4] CRIARTE, "CRIARTE", Criarte. Acedido: 26 de abril de 2025. [Online]. Disponível em: <https://www.p2030criarte.com>
- [5] Edgar Mendez, Nelson Silva, "A Metodologia BIM associada ao progresso da montagem robotizada de painéis *sandwich* com o apoio de IA", ISEP - Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, Relatório Final da u.c. Projeto Integrado, jul. 2025.
- [6] FlyPix AI Team, "Image Recognition Algorithms: CNN, R-CNN, YOLO Explained", Flypix. Acedido: 13 de julho de 2025. [Online]. Disponível em: <https://flypix.ai/blog/image-recognition-algorithms/>
- [7] P. M. Oliveira, "Mapeamento de anomalias na envolvente exterior de edifícios industriais com base em modelos tridimensionais fotogramétricos", Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, 2024. [Online]. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10400.22/26758>
- [8] GeeksforGeeks, "Artificial Neural Networks and its Applications", GeeksforGeeks. Acedido: 13 de julho de 2025. [Online]. Disponível em: <https://www.geeksforgeeks.org/artificial-intelligence/artificial-neural-networks-and-its-applications/>
- [9] "Roboflow: Computer vision tools for developers and enterprises". Acedido: 27 de junho de 2025. [Online]. Disponível em: <https://roboflow.com>