PRECISÃO E POTENCIAL DA IA NA DEFINIÇÃO DE RELAÇÕES DE PROXIMIDADE EM CANTEIROS DE OBRAS

The Accuracy and Potential of AI in Defining Proximity Relationships for Construction Site Layouts

Maria Luiza Abath Escorel Borges
Universidade Estadual de Campinas | Campinas, São Paulo | mluizabath@gmail.com

Henrique Sérgio Rêgo de Holanda Sá Sobrinho
Nes't Construtora e Incorporadora | João Pessoa, Paraíba | henriquehsobrinho@gmail.com

RESUMO

Este estudo propõe uma análise comparativa entre avaliações humanas e de inteligência artificial (IA) para a definição das relações de proximidade entre elementos do canteiro de obras, com o objetivo de mensurar a assertividade da IA no planejamento de *layouts*. A partir de critérios como fluxo de trabalho, segurança e estratégias de gestão, foram avaliados dois canteiros de obras, confrontando as decisões de profissionais experientes com as sugestões geradas por um modelo de IA treinado para otimizar a disposição espacial. Os resultados demonstram que a IA apresenta um alto nível de precisão na definição das relações de proximidade, alinhando-se às decisões humanas na maioria dos casos. No entanto, em situações que demandam maior subjetividade ou contextualização específica, a IA revela limitações, reforçando a importância da integração entre *expertise* humana e ferramentas tecnológicas. Este trabalho contribui para o debate sobre a aplicabilidade da IA na construção civil, destacando seu potencial para aumentar a eficiência e a segurança, ao mesmo tempo em que reconhece a necessidade de aprimoramentos para lidar com cenários complexos e dinâmicos.

Palavras-chave: Inteligência artificial; Planejamento de canteiros de obras; Relações de proximidade; Otimização de layout; Construção civil.

ABSTRACT

This study proposes a comparative analysis between human and artificial intelligence (AI) evaluations for defining proximity relationships between elements of construction sites, aiming to measure the accuracy of AI in layout planning. Based on criteria such as workflow, safety, and management strategies, two construction site scenarios were assessed, comparing the decisions of experienced professionals with suggestions generated by an AI model trained to optimize spatial arrangements. The results demonstrate that AI exhibits a high level of precision in defining proximity relationships, aligning with human decisions in most cases. However, in situations requiring greater subjectivity or specific contextualization, AI reveals limitations, reinforcing the importance of integrating human expertise with technological tools. This work contributes to the debate on the applicability of AI in civil construction, highlighting its potential to enhance efficiency and safety while recognizing the need for improvements to handle complex and dynamic scenarios.

Keywords: Artificial intelligence; Construction site planning; Proximity relationships; Layout optimization; Civil construction.

1 INTRODUÇÃO

O planejamento do *layout* de canteiros de obras é uma etapa crítica na gestão de projetos de construção, influenciando diretamente a produtividade, a segurança e a eficiência operacional do empreendimento (Zhang *et al*., 2020). A disposição adequada dos elementos no canteiro visa minimizar deslocamentos desnecessários, facilitar o fluxo de trabalho e garantir a conformidade com as normas de segurança. No entanto, essa tarefa frequentemente envolve julgamentos subjetivos, baseados na experiência e no conhecimento tácito dos profissionais envolvidos (Faniran *et al*., 1998; Sadeghpour *et al*., 2006).

Entre os métodos desenvolvidos para auxiliar na organização espacial de elementos em ambientes produtivos, destaca-se o *Systematic Layout Planning* (SLP), proposto originalmente por Muther (1961) no contexto da indústria manufatureira. O método estrutura o processo de definição de l*ayouts* a partir da identificação e análise das relações de proximidade entre setores, com base em critérios como fluxo de materiais, segurança, conforto e comunicação. Embora tenha sido concebido para ambientes industriais, o SLP tem sido adaptado com sucesso para o setor da construção, contribuindo para o planejamento mais racional de canteiros de obras (Sanad *et al*., 2008; Elbeltagi *et al*., 2004). Estudos indicam que sua aplicação em projetos de construção pode melhorar significativamente o desempenho logístico e reduzir o retrabalho associado à alocação inadequada de instalações temporárias (Zhang *et al*., 2020).

Nos últimos anos, a adoção de tecnologias baseadas em inteligência artificial (IA) tem ganhado destaque como estratégia para apoiar decisões complexas no ambiente da construção civil (Bock; Linner, 2015). Modelos de IA, especialmente aqueles voltados para otimização multiobjetivo e aprendizado de máquina, vêm sendo explorados para resolver problemas espaciais, incluindo a alocação de instalações em canteiros (Zhou *et al*., 2012; Vahidi *et al*., 2020). Dentre as abordagens desenvolvidas, destacam-se os modelos que buscam simular decisões humanas ao considerar múltiplos critérios, como fluxo de trabalho, segurança e requisitos logísticos (Zhou *et al*., 2012).

Tais abordagens permitem processar grandes volumes de dados e identificar padrões eficientes de organização, reduzindo o tempo e o esforço demandado por análises manuais. No entanto, a efetividade desses sistemas depende da sua capacidade de interpretar relações espaciais e operacionais com o mesmo grau de sensibilidade contextual que um profissional experiente apresenta. Apesar dos avanços, um desafio persistente refere-se à capacidade da IA em replicar decisões que dependem de variáveis qualitativas, como preferências de gestão, conhecimento contextual e estratégias específicas de obra (Abioye *et al*., 2021). Ainda que sistemas automatizados possam oferecer sugestões eficazes, a interpretação e aplicação desses resultados requerem uma integração cuidadosa com a expertise humana (Chen *et al*., 2022). Isso levanta questionamentos sobre a real assertividade dessas tecnologias quando confrontadas com julgamentos humanos em diferentes contextos de projeto.

Diante desse cenário, este estudo propõe uma análise comparativa entre avaliações humanas e de IA na definição das relações de proximidade entre elementos do canteiro de obras. A investigação busca mensurar o grau de alinhamento entre as decisões humanas e as recomendações de um modelo treinado com base em critérios como fluxo de trabalho, segurança e estratégias de gestão. Assim, pretende-se avaliar o potencial da IA como ferramenta de apoio no planejamento de *layouts*, ao mesmo tempo em que se reconhecem suas limitações em contextos complexos e dinâmicos. Ao integrar análise técnica e julgamento humano, o estudo visa contribuir para o avanço de métodos híbridos de planejamento que conciliem eficiência computacional com sensibilidade contextual.

2 METODOLOGIA

Este estudo adota a estratégia metodológica de estudo de caso, com abordagem quali-quantitativa e caráter comparativo, conforme recomendação de Yin (2018) para investigações que envolvem fenômenos contemporâneos em contextos reais. O objetivo principal é analisar o grau de alinhamento entre decisões humanas e as geradas por um modelo de inteligência artificial (IA), treinado para definir relações de proximidade entre diferentes instalações em canteiros de obras.

A abordagem quantitativa foi empregada para mensurar a concordância entre os julgamentos humanos e os da IA, por meio de uma matriz de relacionamentos que representa o grau de necessidade de proximidade entre pares de elementos do canteiro. Essa matriz foi construída com base em três critérios principais: fluxo de trabalho e segurança no canteiro. Para expressar essas relações, foi utilizada uma escala ordinal com quatro níveis de proximidade, conforme mostra o Quadro 1.

Quadro 1: Necessidade de proximidade

VALOR	PROXIMIDADE
3	Alta importância
2	Média importância
1	Baixa importância
0	Irrelevante

Fonte: Borges *et al.* (2024)

O modelo de IA criado no ChatGPT foi previamente alimentado com dados históricos e diretrizes extraídas da literatura técnica e prática profissional. A saída da IA foi uma matriz com os mesmos pares de instalações avaliados pelo gestor humano. Para verificar o grau de alinhamento entre as decisões, foi calculado um índice de similaridade, considerando todos os pares possíveis entre as instalações analisadas. Para cada par, compararam-se os valores atribuídos pela IA e pelo gestor, e atribuiu-se uma pontuação de similaridade conforme a diferença entre esses valores, conforme apresenta o Quadro 2.

Quadro 2: Pontuação para o cálculo do índice de similaridade

PONTUAÇÃO DE SIMILARIDADE	
Igualdade exata	1
Diferença de 1 ponto	0,5
Diferença de 2 ou mais pontos	0

Fonte: Autoria própria

A soma das pontuações obtidas foi então dividida pelo total de pares, resultando em um índice entre 0 e 1, interpretado como o percentual de similaridade entre as decisões.

A abordagem qualitativa foi utilizada para interpretar os casos em que houve divergência entre os julgamentos humanos e automatizados. Essas divergências foram analisadas considerando aspectos subjetivos, como a experiência do profissional, estratégias particulares de gestão, peculiaridades do terreno e cronograma da obra. Além disso, a validação das decisões feitas pela IA foi realizada pelo próprio gestor, para indicar se considera coerente a lógica geral das recomendações, mesmo nos casos em que defiram de sua preferência inicial. Os resultados foram interpretados com base no grau de correspondência entre as decisões, nos padrões de divergência observados e na viabilidade das sugestões geradas pela IA.

3 RESULTADOS

Considerando a fase de construção de um prédio residencial de 4 andares, dentre áreas de produção, armazenamento e vivência, e ainda locais de acesso à obra, o gestor elencou 16 itens a serem posicionados no canteiro, conforme apresenta o Quadro 3. A escolha dos itens foi realizada com base na sua experiência anterior em planejamento e execução de obras.

Quadro 3: Itens presentes no canteiro

ITEM	ABREVIATURA	ITEM	ABREVIATURA
Acesso de pessoas ao canteiro	ACP	Guincho de elevação	GUI
Acesso de materiais ao canteiro	ACM	Baía de resíduos	RES
Betoneira	BET	Almoxarifado	ALM
Depósito de cimento	CIM	Dormitório	DOR
Brita e areia	BRA	Refeitório	REF
Depósito de fôrmas	FOR	Cozinha	COZ
Central de armação	ARM	Escritório	ESC
Depósito de tijolos	TIJ	Sanitário	SAN

Fonte: Autoria própria

3.1 TOMADA DE DECISÃO

Em seguida, o gestor tomou a decisão quanto à necessidade de proximidade entre os itens, preenchendo a seguinte matriz ilustrada na Figura 1.

Figura 1: Matriz gerada pela decisão humana

Proximidade	ACP	ACM	BET	CIM	BRA	FOR	ARM	TIJ	GUI	RES	ALM	DOR	REF	COZ	ESC	SAN
ACP																
ACM	0															
BET	0	0														
CIM	0	2	3													
BRA	0	1	3	2												
FOR	0	1	0	0	0											
ARM	0	0	0	0	0	1										
TIJ	0	2	0	0	0	1	1									
GUI	0	0	3	0	0	2	2	3								
RES	0	3	0	0	0	0	0	0	0							
ALM	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0						
DOR	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0					
REF	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1				
COZ	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2			
ESC	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
SAN	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	

Fonte: Autoria própria

Posteriormente, foi solicitado à IA que indicasse a necessidade de proximidade para os mesmos itens, gerando a matriz ilustrada na Figura 2.

Figura 2: Matriz gerada pela decisão da IA

Proximidade	ACP	ACM	BET	CIM	BRA	FOR	ARM	TIJ	GUI	RES	ALM	DOR	REF	COZ	ESC	SAN
ACP																
ACM	0															
BET	0	0														
CIM	0	3	3													
BRA	0	3	3	0												
FOR	0	0	0	0	0											
ARM	0	3	0	2	0	3										
TIJ	0	3	0	0	0	0	0									
GUI	0	0	2	0	0	0	3	3								
RES	0	3	0	0	0	0	0	0	3							
ALM	0	2	0	2	2	2	0	0	0	0						
DOR	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0					
REF	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0				
COZ	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
ESC	2	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0		
SAN	2	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

Fonte: Autoria própria

Visando garantir que a tomada de decisão da inteligência artificial não ocorresse de forma aleatória ou arbitrária, estabeleceu-se a exigência de que cada categorização atribuída às relações entre os elementos do canteiro viesse acompanhada de uma justificativa técnica. Dessa forma, a IA foi programada para basear suas decisões em critérios funcionais e operacionais coerentes com a dinâmica de um canteiro de obras.

Para as relações classificadas com valor 3 (alta importância de proximidade), foram identificados 11 pares. Esses casos envolvem, majoritariamente, conexões diretas entre insumos e seu uso imediato, ou entre frentes produtivas e seus meios de abastecimento — situações que demandam deslocamentos frequentes e impactam diretamente na produtividade diária. Por exemplo, a betoneira precisa estar próxima tanto do depósito de cimento quanto de brita e areia, pois esses materiais são utilizados continuamente no preparo do concreto. A central de armação, por sua vez, deve estar próxima ao depósito de formas e ao guincho de elevação, dado o volume de elementos estruturais a serem movimentados verticalmente. O guincho, nesse contexto, também deve manter proximidade com os depósitos de materiais pesados ou volumosos, como tijolos e resíduos.

As relações com valor 2 (importância média de proximidade), somando 8 pares, representam ligações que, embora não críticas, contribuem para a eficiência geral do canteiro. Exemplo disso são os vínculos entre o almoxarifado e pontos de recebimento de materiais, como o acesso de materiais e os depósitos. O almoxarifado tem função de suporte e armazenamento secundário, portanto sua proximidade é desejável, mas não essencial. O mesmo raciocínio se aplica à relação entre o acesso de pessoas e espaços como o escritório ou sanitários — ainda que relevantes para a circulação e conforto dos trabalhadores, essas ligações não exigem posicionamento imediato.

Já as relações atribuídas com valor 1 (pouca importância de proximidade), em um total de 7 pares, dizem respeito a interações ocasionais, de baixa frequência ou de caráter administrativo. Por exemplo, o escritório pode manter certa conexão com o guincho de elevação ou o almoxarifado, mas essas relações não envolvem fluxo direto de materiais ou pessoas de maneira constante. A proximidade, nesses casos, pode ser benéfica, mas não é determinante para o desempenho do canteiro.

Por fim, as relações classificadas com valor 0 foram justificadas por não apresentarem necessidade de proximidade funcional. A maioria desses pares envolve interações entre áreas de vivência (como dormitório, refeitório ou sanitários) e zonas de produção ou armazenamento. Nessas situações, a separação física não apenas é aceitável como pode ser desejável, considerando critérios de segurança, conforto dos trabalhadores e organização do espaço. Assim, a IA considerou essas relações como sem relevância para o posicionamento estratégico no *layout*.

3.2 ÍNDICE DE SIMILARIDADE

3.2.1 Total de pares analisados

Como há 16 elementos, o número total de combinações únicas entre dois elementos é 120.

3.2.2 Classificação dos pares

A Figura 3 apresenta a matriz comparativa com a diferença entre a pontuação atribuída pelo gestor e pela pontuação gerada pela IA.

Figura 3: Matriz comparativa

Proximidade	ACP	ACM	BET	CIM	BRA	FOR	ARM	TIJ	GUI	RES	ALM	DOR	REF	COZ	ESC	SAN
ACP																
ACM	0															
BET	0	0														
CIM	0	1	0													
BRA	0	2	0	2												
FOR	0	1	0	0	0											
ARM	0	3	0	2	0	2										
TIJ	0	1	0	0	0	1	1									
GUI	0	0	1	0	0	2	1	0								
RES	0	0	0	0	0	0	0	0	3							
ALM	0	2	0	2	2	2	0	0	0	0						
DOR	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0					
REF	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1				
COZ	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2			
ESC	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0		
SAN	2	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	

Fonte: Autoria própria

Com base na análise de todas as 120 relações comparadas:

- Mesma nota atribuída (diferença = 0): 90 pares → 90 × 1 = 90 pontos
- Diferença de 1 ponto: 16 pares → 16 × 0,5 = 8 pontos
- Diferença de 2 ou 3 pontos: 39 pares → 14 × 0 = 0 pontos

3.2.3 Soma dos pontos obtidos

90 (iguais) + 8 (diferença de 1) + 0 = 98 pontos

3.2.4 Cálculo do índice de similaridade

Índice de similaridade = (Pontuação obtida) / (Pontuação máxima possível) = 98 / 120 = 0,817 (ou 81,7%)

O índice de similaridade entre as decisões da IA e do gestor foi de **0,817**, ou **81,7%**.

Isso mostra que, há divergências relevantes em quase 20% das relações, mas também que boa parte das decisões possuem convergências.

4 DISCUSSÃO

4.1 CONVERGÊNCIAS E DIVERGÊNCIAS

Ao comparar as decisões tomadas por uma inteligência artificial e por um profissional humano no planejamento do *layout* do canteiro de obras, é possível observar convergências e divergências claras. Uma primeira observação relevante é que todas as relações classificadas pelo gestor com valor 3 (alta importância de proximidade) também receberam a mesma nota por parte da IA, com exceção de Betoneira e Guincho, que a IA considerou como importância média. Isso indica uma convergência nas decisões em casos em que há consenso técnico evidente, como nas ligações entre equipamentos e insumos diretamente relacionados, ou entre frente de serviço e ferramentas fundamentais. O Quadro 4 apresenta tais relações.

Quadro 4: Relações convergentes

RELAÇÕES DE ALTA IMPORTÂNCIA DE PROXIMIDADE CONVERGENTES	
Betoneira	Depósito de cimento
Betoneira	Brita e areia
Depósito de tijolos	Guincho de elevação
Baía de resíduos	Acesso de materiais

Fonte: Autoria própria

No entanto, houve situações em que a IA atribuiu valor 3, mas o gestor optou por notas consideravelmente menores, como 1 ou até 0. Foram os casos das seguintes relações apresentadas no Quadro 3

Quadro 5: Relações mais divergentes

RELAÇÕES COM MAIOR DIVERGÊNCIA ENTRE IA E GESTOR	
Central de armação	Acesso de materiais
Central de armação	Depósito de fôrmas
Baía de resíduos	Guincho de elevação
Brita e areia	Acesso de materiais

Fonte: Autoria própria

Esses pares evidenciam que, embora a IA tenha interpretado como relações críticas para o fluxo e logística da obra, o gestor pode ter considerado que a distância entre esses elementos não impactaria significativamente o desempenho ou que haveria formas alternativas de suprir a demanda (por exemplo, por meio de transporte interno). As demais relações de alta importância para a IA foram classificadas pelo gestor como valor 2, indicando média importância.

Uma segunda observação refere-se ao tratamento das áreas de vivência (refeitório, dormitório, sanitários, etc.). A IA atribuiu diversas relações com valores positivos envolvendo esses elementos, ainda que, de forma mais flexível, geralmente com nota 1. Por outro lado, o gestor atribuiu valor 0 à maioria delas. Isso sugere que, na visão prática do gestor, as áreas de vivência devem se adaptar ao espaço disponível restante no canteiro, sem necessidade de proximidade estratégica com áreas de produção ou armazenamento. A priorização do gestor esteve voltada claramente para a eficiência operacional da obra, com foco em deslocamentos produtivos e na logística de materiais e equipamentos.

Essas diferenças reforçam o papel complementar entre abordagens computacionais e a experiência prática. Enquanto a IA considera o conjunto de relações possíveis de maneira abrangente e sistemática, o gestor traz uma leitura contextual, baseada em critérios subjetivos, mas ajustados à realidade e às prioridades específicas da obra.

4.2 ÍNDICE DE SIMILARIDADE

Ao realizar a comparação entre as decisões de categorização de proximidade feitas pela IA e pelo gestor humano, considerando os 120 pares possíveis entre os elementos do canteiro, observa-se que:

- 90 pares (75,0%) receberam a mesma nota de ambos, refletindo um alinhamento significativo entre IA e gestor. No entanto, 84 destes receberam o valor 0 de ambas as partes, indicando que a maior parte das convergências totais é de relações de menor ou nenhuma importância de proximidade.

- 14 pares (11,7%) apresentaram diferenças de 2 ou 3 pontos, indicando divergências relevantes em parte das decisões.

- Os demais 16 pares apresentaram diferença de 1 ponto, o que pode ser considerado uma variação aceitável dada a subjetividade envolvida na análise (13,3%).

Essa distribuição mostra que, embora haja uma base comum de entendimento entre a IA e o gestor, especialmente nas decisões mais críticas, existem divergências importantes.

Um fator que pode ter contribuído para uma similaridade menor do que a esperada foi a postura do gestor em atribuir valor zero à maior parte das relações envolvendo áreas de vivência e áreas produtivas/armazenamento, enquanto a IA seguindo critérios de lógica funcional, atribuiu valores a essas relações com base em conforto, segurança e frequência de uso. Essa diferença de abordagem tem impacto direto na quantidade de coincidências entre os julgamentos.

No entanto, é importante destacar que quase todas as relações que o gestor atribuiu como sendo de alta importância também foram classificadas com a mesma nota pela IA. Isso sugere que a IA é capaz de identificar com precisão os pares que realmente demandam proximidade elevada, mesmo que haja divergências em relações de menor peso. Isso pode significar que a IA tem potencial para apoiar o planejamento ao identificar as relações essenciais com consistência, servindo como uma base técnica a ser complementada pela experiência e contexto do gestor humano.

4.3 COERÊNCIA DAS SUGESTÕES AUTOMATIZADAS

Um ponto relevante a ser destacado refere-se à coerência percebida nas sugestões fornecidas pela IA. Todas as decisões automatizadas foram avaliadas individualmente pelo gestor humano, que, mesmo identificando algumas divergências em relação às suas próprias escolhas, como a atribuição de alguma importância nas relações envolvendo áreas de vivência, o mesmo considerou o resultado como válido e justificado. Isso demonstra que, apesar de não reproduzir exatamente o julgamento humano, a IA apresentou uma lógica consistente e plausível em suas recomendações, reforçando seu potencial como uma ferramenta de apoio à tomada de decisão no planejamento do *layout* de canteiros de obras.

5 CONSIDERAÇÃO FINAIS

Este estudo propôs uma abordagem comparativa entre decisões tomadas por um gestor humano e uma inteligência artificial no contexto do planejamento de *layout* de canteiros de obras. A estratégia adotada consistiu em atribuir níveis de importância para a proximidade entre diferentes elementos do canteiro, utilizando uma escala de quatro níveis, e posteriormente analisar as semelhanças e divergências entre as

decisões humanas e automatizadas. A inteligência artificial, além de gerar essas relações, foi programada para justificar cada escolha, conferindo maior transparência e rastreabilidade ao processo de decisão.

A análise revelou que houve forte convergência nas decisões consideradas mais críticas. Todas as relações que o gestor classificou como de alta importância de proximidade foram igualmente reconhecidas como prioritárias pela IA, o que indica que o modelo automatizado é capaz de identificar com precisão os elementos que exigem maior atenção no arranjo físico. Essa convergência em decisões de maior impacto sugere um alto potencial da IA como ferramenta de apoio à tomada de decisão no planejamento de canteiros, funcionando como um suporte técnico confiável e replicável.

No entanto, observou-se que a IA foi mais abrangente e sistemática na atribuição de valores, considerando também relações que o gestor julgou irrelevantes, particularmente entre espaços de vivências áreas produtivas ou de armazenamento. Esse comportamento da IA de atribuir valor mesmo a relações consideradas secundárias pode ser interpretado tanto como uma limitação quanto como uma vantagem. Por um lado, ela não filtra automaticamente o que poderia ser considerado supérfluo. Por outro, garante que nenhuma relação potencialmente relevante seja ignorada.

A aplicação do método simples de análise da necessidade de proximidade mostrou-se eficaz para estruturar e comparar decisões, servindo como uma base objetiva e de fácil implementação tanto para humanos quanto para algoritmos. Essa simplicidade operacional é especialmente importante no contexto da construção civil, onde ferramentas de planejamento precisam ser acessíveis e compreensíveis para que sejam amplamente adotadas.

Entre as limitações identificadas, destaca-se o fato de que a IA ainda depende fortemente das regras e parâmetros pré-estabelecidos, sendo sensível às diretrizes inseridas para justificar sua lógica decisória. Além disso, o modelo não substitui a experiência de campo do gestor, que pode captar nuances situacionais, culturais e operacionais não evidentes para a máquina.

Como **p**erspectiva para pesquisas futuras, recomenda-se o aprimoramento dos critérios de decisão da IA, com a introdução de parâmetros dinâmicos, adaptáveis ao tipo de obra, fase do projeto e cultura organizacional. Além disso, seria relevante explorar abordagens híbridas, nas quais a IA forneça uma proposta inicial de *layout* baseada em múltiplos critérios (produtividade, segurança, conforto, logística), a ser posteriormente ajustada por profissionais experientes. Outro caminho promissor seria investigar como diferentes perfis de gestores tomam decisões em relação ao *layout* e comparar seus julgamentos com os da IA contribuindo para o desenvolvimento de modelos mais personalizados ou configuráveis.

Em suma, os resultados deste estudo reforçam que a inteligência artificial, quando bem orientada, pode atuar como um agente facilitador da racionalidade no planejamento físico de canteiros, contribuindo para decisões mais transparentes, justificadas e passíveis de revisão crítica. Ao mesmo tempo, evidencia-se a importância do julgamento humano e da integração equilibrada entre tecnologia e experiência profissional.

REFERÊNCIAS

ABIOYE, S. A.; OLANREWAJU, O. I.; OYEKAN, J. Applications of artificial intelligence in construction: A review. ***Journal of Building Engineering***, v. 38, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102200.

BOCK, T.; LINNER, T. *Robot-Oriented Design: Design and Management Tools for the Deployment of Automation and Robotics in Construction*. Cambridge: Cambridge University Press, 2015.

CHEN, K. *et al*. Explainable Artificial Intelligence (XAI): Advances, challenges and opportunities for the construction industry. ***Automation in Construction***, v. 142, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104530.

ELBELTAGI, E.; HOSNY, O.; HAGAREY, M.; ABD ELRAZEK, M. Layout planning of construction sites using computer simulation. ***International Journal of Project Management***, v. 22, n. 7, p. 515–521, 2004.

FANIRAN, O. O.; LOVE, P. E. D.; LI, H. Optimal allocation of construction planning resources. ***Construction Management and Economics***, v. 16, n. 4, p. 483–495, 1998.

MUTHER, R. *Systematic Layout Planning*. Boston: Cahners Books, 1961.

SADEGHPOUR, F.; LI, H.; AL-HUSSEIN, M. Optimal layout planning for construction sites. ***Automation in Construction***, v. 15, n. 5, p. 554–570, 2006.

SANAD, H.; IBRAHIM, M. E.; EL-HABASHI, A. A comparative study of site layout planning standards for construction projects. ***Ain Shams Engineering Journal***, v. 43, n. 4, p. 525–538, 2008.

VAHIDI, M.; ZOLFAGHARI, S.; ABDELMAGUID, T. F. Optimizing construction site layout using a simulation-based multi-objective optimization algorithm. ***Automation in Construction***, v. 113, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103122.

YIN, Robert K. **Case study research and applications: design and methods**. 6. ed. Thousand Oaks: Sage Publications, 2018.

ZHANG, J. *et al*. A hybrid genetic algorithm for multi-objective construction site layout optimization. ***Journal of Cleaner Production***, v. 250, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119517.

ZHOU, W.; DING, L.; ZHOU, C. Application of GIS and multi-criteria decision analysis in construction site selection. ***Automation in Construction***, v. 19, n. 4, p. 512–519, 2012.