ENTAC 2024
XX ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO
Maceió, Brasil, 9 a 11 de outubro de 2024

Otimização do canteiro de obras através de Planejamento Sistemático do Layout, algoritmo genético e BIM

Construction Site Optimization through Systematic Layout Planning, Genetic Algorithm and BIM

Maria Luiza Abath Escorel Borges
Universidade Estadual de Campinas| Campinas | Brasil | mluizabath@gmail.com
Ariovaldo Denis Granja
Universidade Estadual de Campinas | Campinas | Brasil | adgranja@m.unicamp.br
Ari Monteiro
Universidade de São Paulo | São Paulo | Brasil | ari_mont@yahoo.com.br

Resumo

Estudos anteriores propuseram abordagens de otimização para gerar o layout do canteiro de obras, como modelos matemáticos e algoritmos computacionais. Porém, estas são pouco adotadas na prática devido às limitações técnicas, custos excessivos e a falta de flexibilidade em tais soluções automatizadas. Esta pesquisa assume que envolver tomadores de decisão no em uma abordagem de otimização garante soluções mais assertivas no planejamento. O Planejamento Sistemático do Layout (PSL) é utilizado para planejar o arranjo de instalações na indústria manufatureira, aplicando regras para avaliar a necessidade de proximidade entre as instalações. Já a Modelagem da Informação da Construção (BIM), fornece uma estrutura adequada para apoiar o processo de tomada de decisão. Através da Design Science Research, esta pesquisa visa desenvolver uma ferramenta para apoio à tomada de decisão no planejamento e logística de canteiro de obras, integrando BIM, PSL e um algoritmo genético. A sua principal contribuição é a proposição de uma abordagem eficiente e precisa para o planejamento do canteiro, promovendo a otimização dos recursos disponíveis e melhorando a qualidade e produtividade no processo construtivo.

Palavras-chave: Otimização. BIM. PSL. Algoritmo Genético. Minimização de distâncias. Regras baseadas no conhecimento.

Abstract

Previous studies have proposed optimization approaches to generate construction site layouts, such as mathematical models and computational algorithms. However, these are seldom adopted in practice due to technical limitations, excessive costs, and lack of flexibility in such automated solutions. This research assumes that involving decision-makers in an optimization approach ensures more assertive solutions in planning. Planejamento Sistemático do Layout (PSL) is used to arrange facilities in the manufacturing industry, applying rules to assess the need for proximity between facilities. Building Information Modeling (BIM) provides a suitable framework to support the decision-making process. Through Design Science Research, this study aims to develop a tool to support decision-making in construction site planning and logistics,

Como citar:
BORGES, M.; GRANJA, A.; MONTEIRO, A. Otimização do canteiro de obras através de Planejamento Sistemático do Layout, algoritmo genético e BIM. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 20., 2024, Maceió. **Anais**... Maceió: ANTAC, 2024.

integrating BIM, PSL, and a genetic algorithm. Its main contribution is proposing an efficient and precise approach to site planning, promoting optimization of available resources, and enhancing quality and productivity in the construction process.

Keywords: Optimization. BIM. PSL. Genetic Algorithm. Distance minimization. Knowledge-based reasoning.

INTRODUÇÃO

Embora o planejamento do layout do canteiro de obras (PLCO) seja crucial, ele frequentemente é negligenciado ou tratado como algo secundário pelos profissionais da construção. Na prática, os componentes do canteiro geralmente são posicionados conforme a ordem de chegada, deixando o layout detalhado para ser decidido pelos supervisores e gerentes durante a rotina diária [1]. Mesmo quando há um planejamento prévio, ele é frequentemente baseado em regras empíricas ou na experiência adquirida em projetos anteriores. Esses métodos são tradicionalmente preferidos pelos profissionais em vez de modelos de otimização avançados, devido à sua simplicidade [2].

Os principais obstáculos para a adoção de abordagens mais sofisticadas incluem, em primeiro lugar, a falta de realismo dos modelos matemáticos, que geralmente são baseados em heurísticas [3]. A literatura atual sobre soluções de layout oferece uma abordagem fragmentada e não captura adequadamente a dinâmica e as incertezas de um canteiro de obras [4]. Além disso, os algoritmos enfrentam desafios significativos relacionados ao tempo de processamento computacional necessário para encontrar uma solução [5].

Uma ferramenta destinada a apoiar o planejamento do layout do canteiro de obras (PLCO) deve ser de fácil utilização, requerer um mínimo de dados de entrada, gerar soluções rapidamente e permitir que os usuários apliquem em diversos projetos de construção. Além disso, deve considerar adequadamente as preocupações com distâncias de deslocamento, segurança e custos, sem exigir grande esforço na busca de uma solução ideal [3].

Nas últimas décadas, pesquisadores têm trabalhado para desenvolver sistemas especializados que automatizem a geração de layouts, combinando software de modelagem com programação [6]. O principal benefício de utilizar essas técnicas e tecnologias no PLCO é a capacidade de visualizar a área do canteiro, identificar os locais disponíveis e alocar com precisão as instalações temporárias relevantes, que armazenam materiais ou realizam tarefas específicas de maneira eficaz e segura. Isso facilita a tomada de decisões dos gestores ao fornecer soluções inteligentes e aceitáveis [7].

Dentro desse contexto, o Planejamento Sistemático do Layout (PSL) é um método procedimental amplamente adotado para criar layouts eficientes para a organização de instalações na indústria manufatureira e de serviços [8]. O PSL facilita a aplicação sistemática de regras baseadas no conhecimento para a avaliação qualitativa das relações entre os elementos, posicionando-os conforme a necessidade de proximidade [9]. Paralelamente, o BIM oferece uma estrutura adequada para apoiar o

processo de tomada de decisão, agregando informações precisas em formato digital e esclarecendo detalhes e condições existentes [10].

Diante dos desafios mencionados, a presente pesquisa enfatiza a importância de envolver os tomadores de decisão no planejamento, assumindo que um método baseado em regras de conhecimento, integrado a uma abordagem de otimização, proporciona maior flexibilidade e soluções mais assertivas. Assim, o objetivo desta pesquisa é estruturar um método para otimizar a tomada de decisão (MOTD) no planejamento do canteiro de obras, através do desenvolvimento de uma ferramenta computacional baseada no Planejamento Sistemático de Layout.

PLANEJAMENTO DO LAYOUT DO CANTEIRO DE OBRAS

O planejamento é um processo de tomada de decisão que facilita a compreensão dos objetivos do empreendimento e fornece informações que servem como referência básica para monitorar e controlar a execução de empreendimentos de construção [11]. Nesse contexto, o termo gerenciamento do espaço de trabalho engloba uma série de processos para coordenar e organizar o canteiro de obras, visando um planejamento mais preciso e eficiente [12]. Este consiste em planejar, controlar e monitorar espaços em canteiros de obras, incluindo os processos de geração e alocação de espaços de trabalho, detecção e resolução de conflitos [13].

Quanto aos trabalhos nesse domínio para resolução de conflitos, estes se diferem pelo uso de modelos matemáticos, isto é, programação linear e programação inteira [14], métodos de inteligência artificial, como algoritmos evolutivos e genéticos [12] e regras heurísticas baseadas em banco de dados [15].

Por fim, as pesquisas voltadas para a geração de espaços de trabalho se diferenciam entre as que consideram ambientes 2D/3D [16] e as que vinculam os espaços com atividades do cronograma em ambientes 4D [13]. O processo de geração e alocação de espaço de trabalho está associado com o PLCO. Esta abordagem tenta gerar um plano de layout do local que envolve dois processos: decidir sobre a localização das instalações e projetar rotas no local para conectar as instalações [17].

Tendo isso em vista, o PLCO pode ser considerado como um método de otimização do uso do espaço de construção, atribuindo instalações do canteiro ao espaço de construção disponível, com o cumprimento de uma série de funções-objetivo conflitantes e/ou congruentes, sob um conjunto de restrições de layout [18].

DIMENSÃO ESPACIAL DO LAYOUT

A visualização do planejamento é fundamental para permitir que as equipes de projeto desenvolvam uma compreensão compartilhada dele. Esse entendimento mútuo, quando desenvolvido para o PLCO do canteiro antes do início da execução da obra, pode melhorar fluxos logísticos por meio da minimização de perdas durante as atividades de construção [19].

Devido à natureza complexa dos canteiros de obras, um grande número de parâmetros está envolvido na modelagem do planejamento do canteiro, ou seja, na representação

do layout [1]. Três abordagens são usadas na literatura para representar o espaço no canteiro.

A abordagem de locais predeterminados é uma maneira simplificada de representar o espaço no canteiro, pois reduz a complexidade do PLCO a um problema de atribuição. Também chamada de “alocação de locais”, o seu objetivo é estabelecer a melhor atribuição de n objetos para n (ou n+) locais predeterminados [20].

A representação através de sistema de rede consiste em fracionar o espaço em células de uma grade ortogonal, as quais possuem uma referência de localização para identificar a posição dos objetos [21].

Já a representação do espaço pela abordagem de espaço contínuo segue de que os elementos podem ser posicionados em qualquer espaço disponível, e portanto, é a que mais se aproxima das condições reais de um projeto [22].

DIMENSÃO TEMPORAL DO LAYOUT

Três abordagens foram utilizadas em estudos anteriores para representar as mudanças de tempo no PLCO do canteiro de obras: estático, faseado e dinâmico. Na primeira, não se leva em consideração as mudanças que ocorrem no canteiro ao longo do tempo, assumindo que todos os elementos são necessários do início ao fim do projeto [23].

No planejamento de layout faseado, a duração do projeto é dividida em vários intervalos de tempo, gerando layouts parciais para cada um deles [24]. No layout totalmente dinâmico, a geração dos layouts acompanha as mudanças reais que acontecem no canteiro [1].

Isso mostra que os modelos totalmente dinâmicos refletem as mudanças dos requisitos de espaço de forma mais realista, utilizando melhor o espaço do canteiro, [25]. No entanto, envolvem complexidade consideravelmente maior e longos tempos de processamento [26].

ABORDAGENS DE OTIMIZAÇÃO DO LAYOUT

As principais abordagens relatadas para PLCO são modelos matemáticos, regras baseadas no conhecimento e algoritmos. Modelos matemáticos buscam modelar o problema por métodos quantitativos de pesquisa operacional, como programação linear, programação inteira e programação mista [27]. Esta técnica é limitada pela inviabilidade de encontrar uma solução global ótima para projetos maiores [28].

As regras baseadas no conhecimento usam experiência pessoal e informações para criar diretrizes que apoiam os planejadores, ao invés de executarem o processo baseado em metas de otimização específicas [5]. Esse tipo de abordagem pode ser utilizado para buscar uma solução com base em aspectos qualitativos, como a funcionalidade do layout e segurança [21].

Os algoritmos de otimização são técnicas de busca para encontrar soluções ótimas ou satisfatórias para problemas de otimização. Devido ao rápido desenvolvimento de

técnicas computacionais, algoritmos de otimização são amplamente utilizados na resolução de problemas de PLCO [9].

Dentre as abordagens de otimização mais utilizadas, destaca-se a relevância do algoritmo genético (GA), por sua capacidade em resolver problemas de tal complexidade, o que justifica ser a escolha majoritária em estudos anteriores [11].

Alguns estudos fazem uso de tecnologias avançadas para criar plataformas de coleta, processamento e análise de dados para o PLCO [29]. Nesse contexto, destacam-se o desenho assistido por computador (CAD), modelos BIM, sistemas rastreamento de localização e simulações [9].

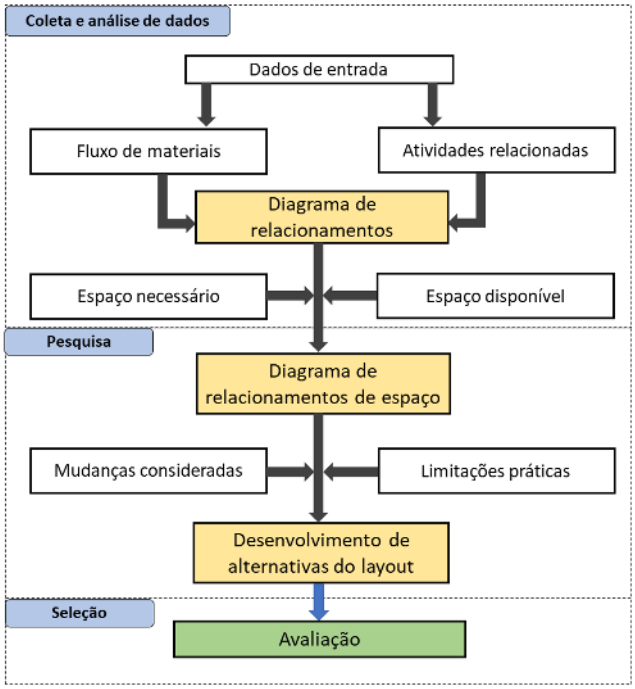
PLANEJAMENTO SISTEMÁTICO DO LAYOUT

O PSL destaca-se como método para o planejamento do layout amplamente utilizado na indústria manufatureira e serviços, principalmente por sua praticidade de aplicação e fácil entendimento, além de que também proporciona soluções ótimas para o problema e abrange aspectos qualitativos e quantitativos, sendo sustentado por várias ferramentas de apoio à tomada de decisão [30].

A abordagem procedimental do PSL é construída com base em três conceitos fundamentais. O primeiro é o de relações, o qual remete a dados de entrada, fluxo de materiais, relações de atividade e diagrama de relacionamento. O segundo é o de espaço, relacionado a requisitos de espaço, espaço disponível e diagrama de relacionamento espacial. E por fim, o de ajuste, associado a restrições de modificação, limitações práticas, desenvolvimento do layout e avaliação [31].

De maneira geral, esses conceitos são atrelados às seguintes etapas sequenciais de construção do PSL: coleta e análise de dados; pesquisa entre as possíveis soluções de layout; avaliação das alternativas e seleção do melhor layout. A Figura 1 ilustra a sequência de procedimentos do PSL, com a identificação dos diagramas gerados em cada etapa.

Figura 1: Procedimentos do PSL



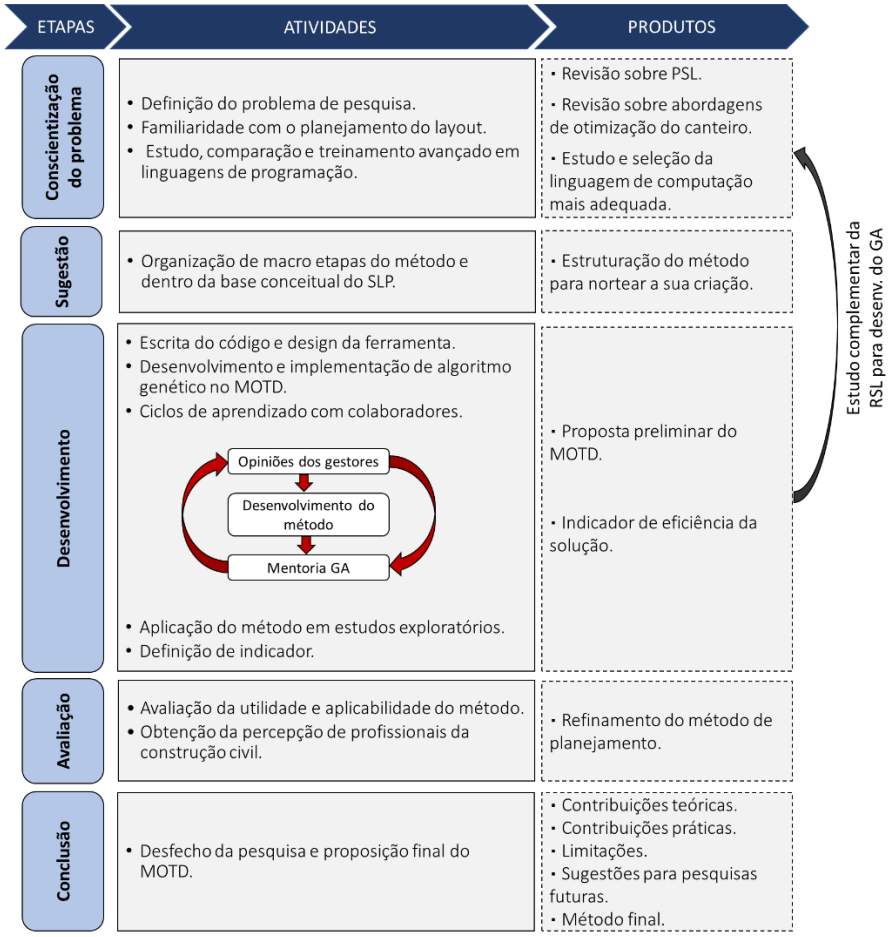
Fonte: Adaptado de Tompinks et al. (2010).

MÉTODO DE PESQUISA

Devido à natureza prescritiva deste estudo, a Design Science Research (DSR) foi escolhida como método de pesquisa. Os produtos gerados pela DSR são avaliados de acordo com critérios de valor ou utilidade. Esses artefatos construídos podem ser classificados em quatro tipos: constructos, modelos, métodos e instanciações, podendo resultar ainda em um aprimoramento de teorias [32]. O artefato desenvolvido nesta pesquisa consiste em um método.

A Figura 2 apresenta o delineamento escolhido para esta pesquisa, envolvendo cinco etapas distintas: conscientização do problema, sugestão, desenvolvimento, avaliação e conclusão [33].

Figura 2: Ilustração do método de pesquisa



Fonte: os autores.

Na etapa de conscientização do problema, foi realizada uma revisão da literatura sobre o PLCO para identificar a abordagens de otimização mais apropriada para resolver o problema. A ferramenta computacional foi desenvolvida utilizando a integração do Dynamo com o Revit, envolvendo a linguagem de programação Python e um algoritmo genético.

Visando não gerar uma solução totalmente automatizada, decidiu-se propor um método híbrido alinhando a mecanização do Dynamo com uma abordagem de regras baseadas no conhecimento. Portanto, optou-se pela metodologia do PSL como entrada de dados da ferramenta, envolvendo o usuário na tomada de decisões a respeito do planejamento.

Na etapa de sugestão foram propostas macro etapas para orientar a criação do método, baseado nos procedimentos do PSL e da organização de um GA, com o apoio da base de conhecimento existente, tanto teórico quanto empírico.

Na etapa de desenvolvimento foram realizados ciclos de aprendizado com diferentes colaboradores. Os profissionais A e B tiveram o papel de potenciais usuários do método. Estes possuem vasta experiência no planejamento e execução de obras e ocupam cargos de gestão em empresas construtoras.

Foi realizado um estudo exploratório com o método proposto para coleta e análise de dados, visando o aprimoramento constante da ferramenta computacional. Assim, o projeto de uma edificação já executado foi utilizado para fazer os testes do funcionamento da ferramenta computacional a partir das decisões de um dos colaboradores.

A etapa de avaliação ocorreu ao longo de todo o desenvolvimento, com os dois potenciais usuários constantemente avaliando e sugerindo melhorias para o método.

Na etapa de conclusão, foi realizada a síntese das principais contribuições práticas e teóricas do artefato desenvolvido, bem como as limitações e sugestões para pesquisas futuras.

RESULTADOS

Os resultados obtidos na etapa de desenvolvimento do artefato referem-se às percepções do usuário da ferramenta a respeito das configurações e interface de sistema, bem como à proposta do MOTD.

ADAPTAÇÕES DO PSL PARA O MOTD

A ferramenta foi desenvolvida de forma que o usuário não precisa fazer nenhum ajuste no código ou entender de programação. Primeiramente o usuário informa em uma planilha as instalações que deseja alocar no canteiro de obras e suas respectivas áreas mínimas requeridas, conforme mostra a Figura 3. A terceira coluna refere-se à categoria da instalação, diferenciação feita para distinguir por cores no resultado final.

Figura 3: Dados de entrada da ferramenta

N	Departamentos	Área (m²)	Categoria
1	Portão de entrada	3	Produção
2	Depósito de brita e areia	25	Produção
3	Depósito de cimento	10	Produção
4	Betoneiras	15	Produção
5	Depósito de cerâmicas	12	Estoque
6	Depósito de tijolos	15	Estoque
7	Depósito de instalações	20	Estoque
8	Central de fôrmas e armação	20	Estoque
9	Central de armação	15	Estoque
10	Almoxarifado	10	Estoque
11	Escritório	10	Vivência
12	Refeitório	40	Vivência
13	Sanitário	10	Vivência

Fonte: os autores.

Quanto às convenções das regras de proximidade oriundas do PSL, foram feitas as alterações apresentadas na Figura 4.

Figura 4: Adaptação das convenções do PSL

PSL	
Código	Proximidade
A	Absolutamente importante
E	Especialmente importante
I	Importante
O	Pouco importante
U	Desnecessária
X	Indesejável



MOTD	
Código	Necessidade de proximidade
3	Alta
2	Média
1	Baixa
0	Irrelevante

Fonte: os autores.

Foram eliminados dois níveis, pois concluíram que a categorização das relações se tornaria mais rápida e eficiente. Ressalta-se a crítica feita pelos gestores a respeito da nomeação das relações no PSL em virtude da falta de clareza na diferenciação destas, bem como à utilização de letras para sua representação. Portanto, optou-se pela classificação em ordem numérica decrescente, de acordo com o seu grau de importância.

Ainda em colaboração com os gestores, foi criado um modelo de avaliação da relação entre duas instalações com base em três itens: fluxo de trabalho, preocupações com segurança e preferências do gestor. Para cada par de instalações, deve-se atribuir os valores “baixo”, “médio” ou “alto”. São geradas 27 condições a partir da combinação dos valores, conforme mostra a Figura 5.

Figura 5: Quadro de regras de proximidade adotadas

Condição	Fluxo de trabalho	Preocupações de segurança	Preferências do gestor	Relação de proximidade
C1	B	B	B	0
C2	B	B	M	1
C3	B	B	A	1
C4	B	M	B	0
C5	B	M	M	1
C6	B	M	A	2
C7	B	A	B	0
C8	B	A	M	0
C9	B	A	A	1
C10	M	B	B	1
C11	M	B	M	2
C12	M	B	A	3
C13	M	M	B	1
C14	M	M	M	1
C15	M	M	A	2
C16	M	A	B	0
C17	M	A	M	0
C18	M	A	A	1
C19	A	B	B	3
C20	A	B	M	3
C21	A	B	A	3
C22	A	M	B	2
C23	A	M	M	2
C24	A	M	A	2
C25	A	A	B	1
C26	A	A	M	1
C27	A	A	A	2
Legenda: A - alto; M - médio; B - baixo				

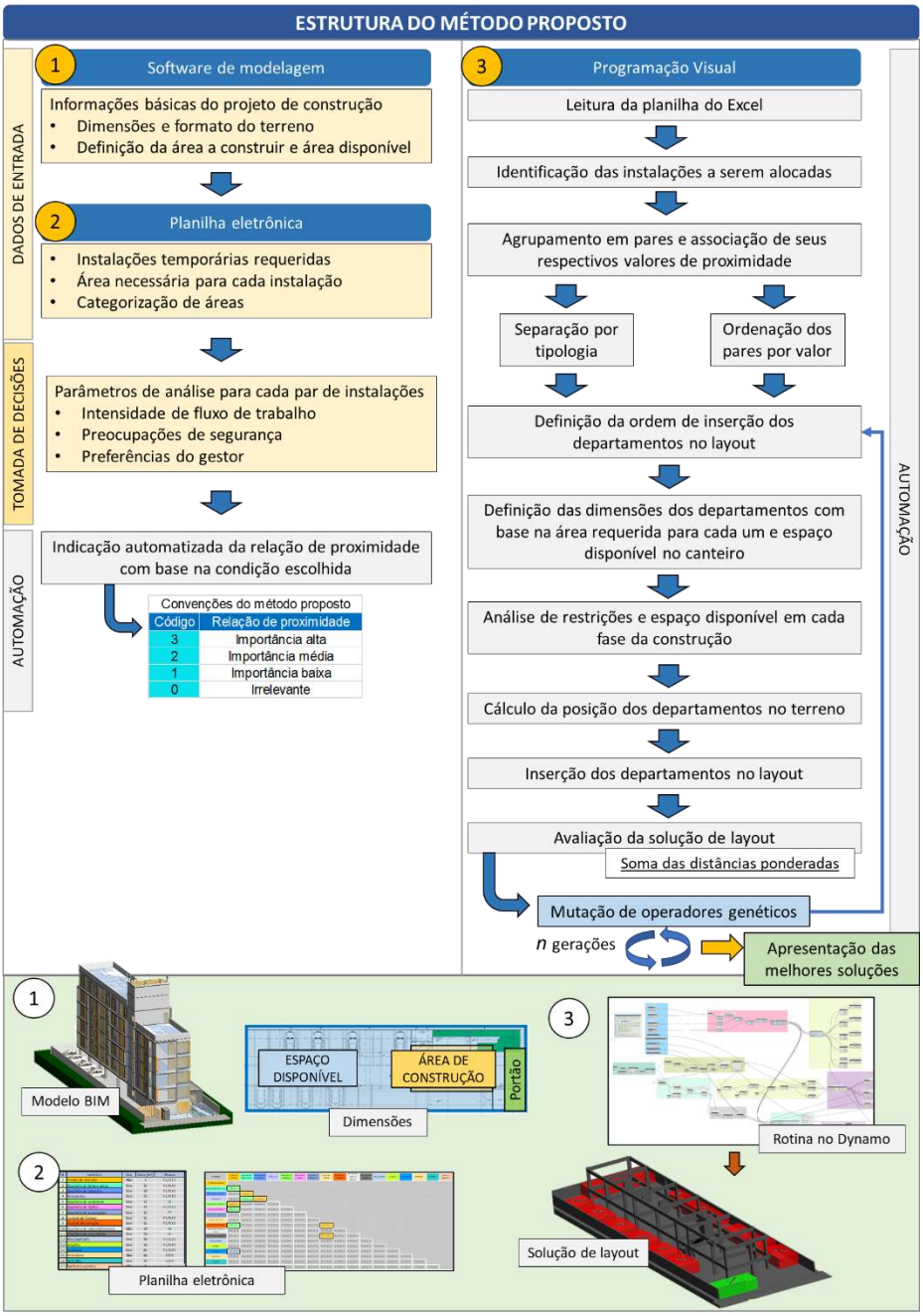
Fonte: adaptado pelos autores [9].

Então, o usuário preenche a matriz de relacionamentos e o layout é gerado.

MÉTODO PARA OTIMIZAR A TOMADA DE DECISÃO

A Figura 7 representa a estrutura do MOTD, que teve como foco a automação dos procedimentos do PSL.

Figura 7: Estrutura do MOTD



Fonte: os autores.

Os objetos do canteiro são posicionados utilizando a abordagem de espaço contínuo, dando assim mais possibilidade de busca ao algoritmo. Visando reduzir o tempo de processamento computacional e necessidade de equipamentos e infraestrutura sofisticados, já que estas adversidades são tidas como obstáculos para o uso de

abordagens avançadas, os objetos são representados como elementos estacionários e geometria aproximada. A distinção de suas respectivas dimensões é feita com base na área mínima indicada pelo usuário e espaço disponível.

A partir de fórmulas matemáticas programadas e diferentes funções incrementadas, o GA aponta soluções ótimas para o problema. São geradas visualizações 3D e em planta baixa, além de um relatório com dados de localização, tamanho das instalações e a nota das distâncias ponderadas para as concepções de canteiro mais eficientes.

Também foi implementada uma função de avaliação da solução, que é mensurada pela soma das distâncias ponderadas. Isto é, a soma da distância entre cada par de instalações multiplicada pelo seu grau de proximidade. Quanto menor der o resultado, maior é o atendimento das necessidades de proximidade, assumindo-se que mais distâncias foram minimizadas, sendo este o indicador de eficiência da solução.

ESTUDO EXPLORATÓRIO

O método de otimização proposto foi usado em um projeto habitacional de pequeno porte no Brasil, cuja área de terreno planejada é de 300m² e a área de construção é de 157,92m². Os portões de acesso de pessoas e materiais foram considerados elementos fixos por já terem seus locais predeterminados e dependentes de fatores como a rua. O guincho também foi considerado um elemento fixo pois a análise de sua localização possui capacidade maior que a que o algoritmo pode atender.

Além destes elementos, 14 instalações foram adicionadas à matriz para serem posicionadas no canteiro de obras como um espaço contínuo e suas dimensões variam de acordo com a área mínima indicada pelo gestor que executou a obra. A Figura 8 apresenta a matriz de relacionamentos preenchida pelo gestor.

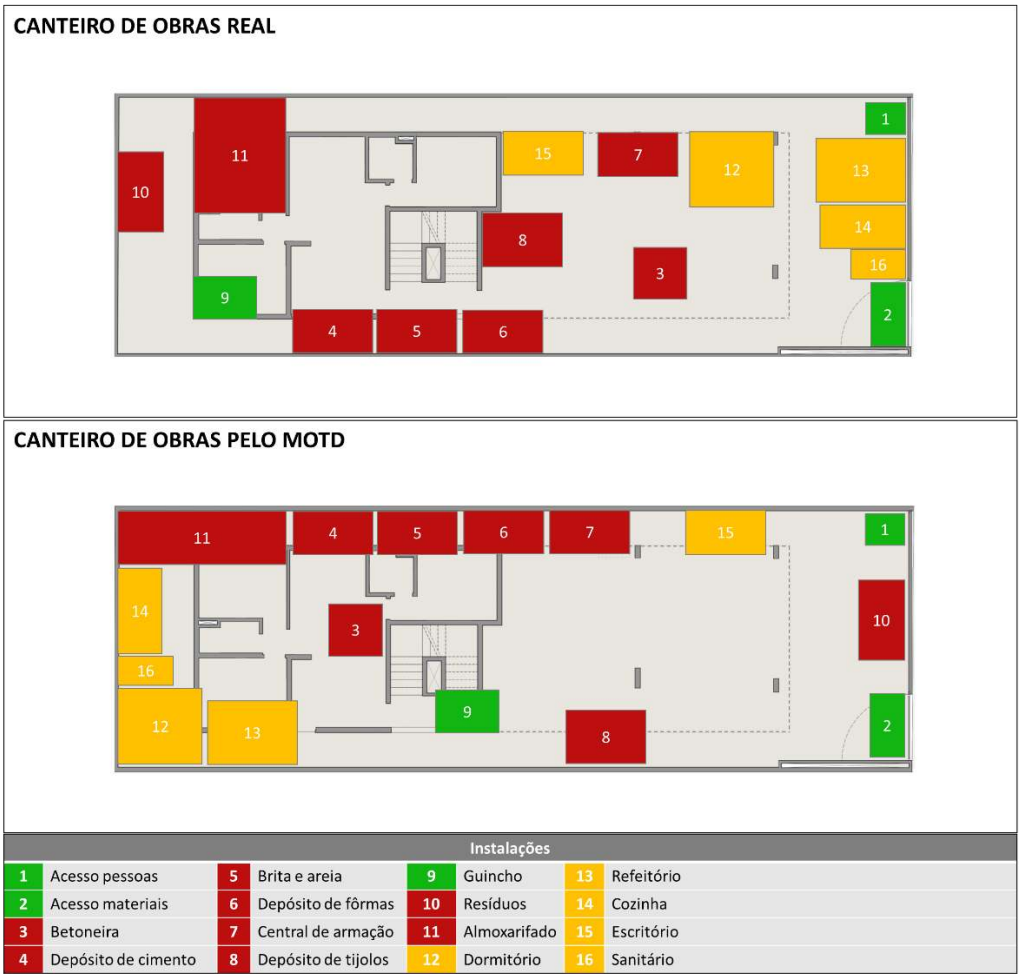
Figura 8: Matriz de relacionamentos

Relações	Acesso de pessoas	Acesso de materiais	Betoneira	Depósito de cimento	Brita e areia	Fôrmas	Central de armação	Tijolos	Guincho	Resíduos	Almoxarifado	Dormitório	Refeitório	Cozinha	Escritório	Sanitário
Acesso de pessoas																
Acesso de materiais	B|B|B|0															
Betoneira	B|B|B|0	B|B|B|0														
Depósito de cimento	B|B|B|0	M|B|M|2	A|B|A|3													
Brita e areia	B|B|B|0	M|B|B|1	A|B|A|3	M|B|M|2												
Fôrmas	B|B|B|0	M|M|B|1	B|B|B|0	B|B|B|0	B|B|B|0											
Central de armação	B|B|B|0	B|B|B|0	B|B|B|0	B|B|B|0	B|B|B|0	B|B|M|1										
Tijolos	B|B|B|0	M|M|A|2	B|B|B|0	B|B|B|0	B|B|B|0	B|B|M|1	B|M|M|1									
Guincho	B|B|B|0	B|B|B|0	A|B|A|3	B|B|B|0	B|B|B|0	M|B|M|2	M|B|M|2	A|B|M|3								
Resíduos	B|B|B|0	M|B|A|3	B|B|B|0	B|B|B|0	B|B|B|0	B|B|B|0	B|B|B|0	B|B|B|0	B|B|B|0							
Almoxarifado	B|B|B|0	B|B|B|0	B|B|B|0	B|B|B|0	B|B|B|0	B|B|B|0	B|B|B|0	B|B|B|0	B|B|B|0	B|B|B|0						
Dormitório	B|B|B|0	B|B|B|0	B|B|B|0	B|B|B|0	B|B|B|0	B|B|B|0	B|B|B|0	B|B|B|0	B|B|B|0	B|B|B|0	B|B|B|0					
Refeitório	B|B|B|0	B|B|B|0	B|B|B|0	B|B|B|0	B|B|B|0	B|B|B|0	B|B|B|0	B|B|B|0	B|B|B|0	B|B|B|0	B|B|B|0	M|B|B|1				
Cozinha	B|B|B|0	B|B|B|0	B|B|B|0	B|B|B|0	B|B|B|0	B|B|B|0	B|B|B|0	B|B|B|0	B|B|B|0	B|B|B|0	B|B|B|0	M|B|B|1	M|B|M|2			
Escritório	B|B|A|2	B|B|B|0	B|B|B|0	B|B|B|0	B|B|B|0	B|B|B|0	B|B|B|0	B|B|B|0	B|B|B|0	B|B|B|0	B|B|B|0	B|B|B|0	B|B|B|0	B|B|B|0		
Sanitário	B|B|B|0	B|B|B|0	B|B|B|0	B|B|B|0	B|B|B|0	B|B|B|0	B|B|B|0	B|B|B|0	B|B|B|0	B|B|B|0	B|B|B|0	M|B|M|2	B|B|B|0	B|B|B|0	B|B|B|0	

Fonte: os autores.

O canteiro executado foi reproduzido no modelo BIM para que suas distâncias ponderadas fossem calculadas e pudesse ser feita a comparação com o canteiro desenvolvido pelo MOTD, a partir das preferências de proximidade escolhidas pelo gestor. A Figura 9 ilustra a planta baixa do canteiro real e do que foi planejado pelo MOTD.

Figura 9: Soluções de canteiro de obras



Fonte: os autores.

Instalações apontadas como fixas foram identificadas com a cor verde, enquanto que áreas de produção e estoque como vermelho e áreas de vivência como amarelo. Embora no desenho hajam paredes, o gestor afirmou que estas apenas seriam levantadas em fases posteriores da construção, por isso o único local que colocou como restrição foi a entrada da escada para o pavimento superior.

Diferentemente de estudos anteriores que integraram SLP e BIM que utilizaram a abordagem de locais predeterminados para todos os elementos [9], a abordagem espaço contínuo possibilitou posicionar os elementos em qualquer lugar disponível do canteiro, respeitando as restrições impostas.

A partir do cálculo embutido no Dynamo, as distâncias entre os elementos foram calculadas e multiplicadas pelo valor da relação em ambos os canteiros.

A Figura 10 compara o resultado do somatório das distâncias ponderadas em ambos os casos. Percebe-se que no canteiro gerado pelo DMOM houve uma redução de 159,21 metros, equivalente uma redução de 40,98% da distância total.

Figura 10: Comparação dos resultados

Somatório de distâncias ponderadas (m)		Redução total
Canteiro de obras real	388,49	159,21m
Canteiro de obras pelo MOTD	229,28	40,98%

Fonte: os autores.

É importante ressaltar que o processo de desenvolvimento do DMOM, sobretudo com relação à criação da ferramenta computacional, foi marcado por muitos desafios e exigiu múltiplas iterações de testes e ajustes antes de se chegar à versão final. Um dos principais obstáculos foi garantir que a formulação matemática no Dynamo e o algoritmo genético conseguissem respeitar as preferências de proximidade entre os elementos do canteiro de obras informadas pelo gestor.

Os gestores participantes da pesquisa, após utilizarem a ferramenta e discutirem acerca dos resultados obtidos, perceberam que o DMOM demonstrou ser uma solução robusta, capaz de suportar a tomada de decisão no planejamento do layout de canteiros de obras de forma significativa, proporcionando ganhos concretos em termos de eficiência operacional e minimização de distâncias.

CONCLUSÃO

Um plano de layout eficiente do canteiro garante o uso ideal do espaço disponível, custos de projeto mais baixos, menor necessidade de realocação de materiais durante a construção, melhor acessibilidade e segurança do ambiente de trabalho

A principal contribuição deste trabalho é o desenvolvimento de uma ferramenta para planejamento do layout do canteiro de obras que oferece a possibilidade de utilização em vários contextos, adaptando-se a diversidade da indústria da construção civil.

O planejamento do layout por um método híbrido, onde utiliza-se os benefícios da automatização para geração de diferentes soluções, sem deixar de lado a experiência do profissional oferece mais flexibilidade que outras ferramentas propostas em estudos anteriores. Através da inserção de um mínimo de dados de entrada para uma rápida geração de soluções, sem necessidade de longos tempos de processamento, o método proposto também garante agilidade para testar diferentes cenários.

Para pesquisas futuras, sugere-se a aplicação do método em outros estudos de caso, considerando diferentes contextos de construção, como obras verticais, canteiros com restrição de espaço, construção modular, entre outros.

REFERÊNCIAS

[1] ANDAYESH, M.; SADEGHPOUR, F. Dynamic site layout planning through minimization of total potential energy. **Automation in Construction**, v. 31, p. 92–102, 2013a.

[2] CHAU, K. W.; ANSON, M. A Knowledge-Based System for Construction Site Level Facilities Layout The Construction Site Layout Problem. **Journal of Construction Management and Economics**, v. 2358, p. 393–402, 2002.

[3] SJØBAKK, B.; SKJELSTAD, L. Proposing a standard template for construction site layout: A case study of a Norwegian contractor. **IFIP Advances in Information and Communication Technology**, v. 459, p. 376–382, 2015.

[4] SAID, H.; EL-RAYES, K. Optimizing Material Procurement and Storage on Construction Sites. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 137, n. 6, p. 421–431, 2011.

[5] SCHWABE, K.; TEIZER, J.; KÖNIG, M. Applying rule-based model-checking to construction site layout planning tasks. **Automation in Construction**, v. 97, n. November 2017, p. 205–219, 2019.

[6] SAID, H.; EL-RAYES, K. Automated multi-objective construction logistics optimization system. **Automation in Construction**, v. 43, p. 110–122, 2014.

[7] AKANMU, A. et al. Auto-generated site layout: An integrated approach to real-time sensing of temporary facilities in infrastructure projects. **Structure and Infrastructure Engineering**, v. 12, n. 10, p. 1243–1255, 2016.

[8] FLESSAS, M. et al. Layout performance indicators and systematic planning: A case study in a Southern Brazilian restaurant. **British Food Journal**, v. 117, n. 8, p. 2098–2111, 2015.

[9] LE, P. L.; DAO, T. M.; CHAABANE, A. BIM-based framework for temporary facility layout planning in construction site: A hybrid approach. **Construction Innovation**, v. 19, n. 3, p. 424–464, 2019.

[10] AMIRI, R.; SARDROUD, J. M.; SOTO, B. G. DE. BIM-based Applications of Metaheuristic Algorithms to Support the Decision-making Process: Uses in the Planning of Construction Site Layout. **Procedia Engineering**, v. 196, n. June, p. 558–564, 2017.

[11] VARGAS, F. B. DE; FORMOSO, C. T. Método para planejamento e controle da produção baseado em zonas de trabalho com o apoio de BIM. **Ambiente Construído**, v. 20, n. 1, p. 129–151, 2020.

[12] MOON, H. et al. Development of a schedule-workspace interference management system simultaneously considering the overlap level of parallel schedules and workspaces. **Automation in Construction**, v. 39, p. 93–105, 2014.

[13] KASSEM, M.; DAWOOD, N.; CHAVADA, R. Construction workspace management within an Industry Foundation Class-Compliant 4D tool. **Automation in Construction**, v. 52, n. September, p. 42–58, 2015.

[14] SU, X.; CAI, H. Life Cycle Approach to Construction Workspace Modeling and Planning. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 140, n. 7, p. 1–12, 2014.

[15] GUO, S.-J. Identification and Resolution of Work Space Conflicts in Building Construction. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 128, n. 4, p. 287–295, 2002.

[16] ZHANG, J. P.; HU, Z. Z. Automation in Construction BIM- and 4D-based integrated solution of analysis and management for con fl icts and structural safety problems during construction : 1 . Principles and methodologies. **Aut**, v. 20, n. 2, p. 155–166, 2011.

[17] SONG, X. et al. Conflict resolution-motivated strategy towards integrated construction site layout and material logistics planning: A bi-stakeholder perspective. **Automation in Construction**, v. 87, n. July 2017, p. 138–157, 2018.

[18] NING, X. .; LIU, W. A Safety Model for Construction Site Layout Planning Using an ACO Algorithm. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONSTRUCTION AND REAL ESTATE MANAGEMENT, n., 2015, Lulea, Suécia. **Anais [...]** Lulea: 2015, p. 28-32.

[19] PIKAS, E. et al. Overview of Building Information Modelling in Healthcare Projects. **HaCIRIC 11 Conference Proceedings, HaCIRIC, Imperial College, Tanaka Business School, Manchester, UK, 26-28 September 2011**, p. 286–298, 2011.

[20] ZOUEIN, P. P.; HARMANANI, H.; HAJAR, A. Genetic Algorithm for Solving Site Layout Problem with Unequal-Size and Constrained Facilities. **Journal of Computing in Civil Engineering**, v. 16, n. 2, p. 143–151, 2002.

[21] YAHYA, M.; SAKA, M. P. Construction site layout planning using multi-objective artificial bee colony algorithm with Levy flights. **Automation in Construction**, v. 38, p. 14–29, 2014.

[22] HAMMAD, A. A multi-objective construction site layout planning problem solved through integration of location and traffic assignment models. **Construction Management and Economics**, v. 38, n. 8, p. 756–772, 2020.

[23] ZOUEIN, P. P.; TOMMELEIN, I. D. Dynamic Layout Planning Using a Hybrid Incremental Solution Method. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 125, n. 6, p. 400–408, 1999.

[24] XU, J.; LI, Z. Multi-objective dynamic construction site layout planning in fuzzy random environment. **Automation in Construction**, v. 27, p. 155–169, 2012.

[25] ELBELTAGI, E. et al. Schedule-dependent evolution of site layout planning. **Construction Management and Economics**, v. 19, n. 7, p. 689–697, 2001.

[26] LIANG, C. J.; KAMAT, V. R.; MENASSA, C. M. Real-time construction site layout and equipment monitoring. **Construction Research Congress 2018: Construction Information Technology - Selected Papers from the Construction Research Congress 2018**, v. 2018-April, p. 64–74, 2018.

[27] HAMMAD, A.; AKBARNEZHAD, A.; REY, D. A multi-objective mixed integer nonlinear programming model for construction site layout planning to minimise noise pollution and transport costs. **Automation in Construction**, v. 61, p. 73–85, 2016.

[28] AL HAWARNEH, A.; BENDAK, S.; GHANIM, F. Dynamic facilities planning model for large scale construction projects. **Automation in Construction**, v. 98, n. September 2017, p. 72–89, 2019.

[29] KUMAR, S. S.; CHENG, J. C. P. A BIM-based automated site layout planning framework for congested construction sites. **Automation in Construction**, v. 59, p. 24–37, 2015.

[30] LIU, K. H. et al. Planejamento Sistemático do Layout in human-system interface: An evaluation of alarm displays with spatial proximity for accidents diagnosis of advanced boiling water reactor. **International Journal of Industrial Ergonomics**, v. 51, p. 30–42, 2016.

[31] SINGH, A. P.; YILMA, M. Production floor layout using Planejamento Sistemático do Layout in Can manufacturing company. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONTROL, DECISION AND INFORMATION TECHNOLOGIES, 13., 2013, Hammamet, Tunisia. **Anais [...]** Hammamet: University of Monastir...2013, p. 822-828.

[32] MARCH, S. T.; SMITH, G. F. Design and natural science research on information technology. **Decision Support Systems**, v. 15, n. 4, p. 251–266, dez. 1995.

[33] LACERDA, D. P.; DRESCH, A.; PROENÇA, A.; ANTUNES JÚNIOR, J. A. V.. Design Science Research: método de pesquisa para a engenharia de produção. **Gestão & Produção**, [S.L.], v. 20, n. 4, p. 741-761, 26 nov. 2013.