Industrialização, Digitalização, Desempenho

5º Simpósio Brasileiro de Tecnologia da Informação e Comunicação na Construção e 5º Workshop de Tecnologia de Processos e Sistemas Construtivos

FLORIANÓPOLIS-SC | 20 a 22 de agosto

[1]APLICAÇÃO DE BIM E MACHINE LEARNING NA CONSTRUÇÃO CIVIL: UMA REVISÃO DE LITERATURA

Application of BIM and Machine Learning in Civil Construction: a literature review

Joseph Hakkinen Alves Santos
UFRGS | Porto Alegre, Rio Grande do Sul | jhas001@hotmail.com

Eduardo Luis Isatto
UFRGS | Porto Alegre, Rio Grande do Sul | isatto@ufrgs.br

Juliana Giazzon Cavalli
UFRGS | Porto Alegre, Rio Grande do Sul | julianagiazzon@gmail.com

RESUMO

Nos últimos anos, a indústria da AEC (Arquitetura, Engenharia e Construção) tem adotado diversas tecnologias para aprimorar o desenvolvimento e a gestão de projetos, com destaque para o Building Information Modeling (BIM). O BIM possibilita a padronização e a colaboração em um Common Data Environment (CDE), permitindo o compartilhamento de informações da construção de forma integrada entre as disciplinas. Além de facilitar a coordenação entre as equipes também contribui com a excelência no ciclo de vida do projeto. Porém, análise complexa de dados ou interação com outros mecanismos exigem o uso combinado do BIM com Machine Learning (ML). O ML trata-se de um conjunto de ferramentas probabilísticas de análise de dados históricos com análises preditivas. A integração entre BIM e ML amplia a análise de dados, permitindo novas aplicações inovadoras para o projeto. Este estudo visou compilar os principais avanços tecnológicos que integram BIM e ML, com base em publicações acadêmicas de 2014 a 2024. Como resultado, obteve-se 168 publicações espalhadas nas áreas de Planejamento, Qualidade, Segurança, Sustentabilidade, Arquitetura, Engenharia e BIM. Foi observado um avanço expressivo nas últimas décadas no uso dessas tecnologias na construção civil, evidenciando o avanço do setor na informatização dos processos.

Palavras-chave: BIM, IA, Aprendizado de Máquina, gestão.

ABSTRACT

The AEC (Architecture, Engineering, and Construction) industry has recently adopted several technologies to improve project development and management, emphasizing Building Information Modeling (BIM). BIM enables standardization and collaboration in a Common Data Environment, allowing construction information to be integrated across disciplines. This facilitates team coordination and contributes to excellence in the project life cycle. However, complex data analysis or interaction with other mechanisms have influenced the combined use of BIM with Machine Learning (ML). ML is a set of probabilistic tools for analyzing historical data with predictive analysis. Integrating BIM and ML expands data analysis, enabling new innovative applications for the project. This study aimed to compile the main technological advances integrating BIM and ML based on academic publications from 2014 to 2024. As a result, 168 publications were obtained spread across the areas of Planning, Quality, Safety, Sustainability, Architecture, Engineering and BIM. In recent decades, a significant advance was observed in using these technologies in civil construction, evidencing the sector's advancement in computerizing processes.

Keywords: *BIM, AI, Machine Learning, Management.*

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, o setor da construção civil tem avançado no uso de tecnologias focadas na execução e gestão eficientes de projetos, o que resulta em melhorias na produtividade e na qualidade final dos projetos. Nesse ambiente, metodologias de integração digital e automatização de processos ganharam visibilidade e estão sendo, cada vez mais, implementadas no setor. Entre as diversas tecnologias, tem se evidenciado o uso do *Building Information Modeling* (BIM), uma metodologia em constante evolução, alternativa aos métodos tradicionais de trabalho, onde a padronização das informações da construção é feita em um ambiente *Common Data Environment* (CDE), promovendo a colaboração entre os projetistas (JORGE, 2022).

O BIM é uma metodologia que possibilita a criação e gestão virtual de informações detalhadas e padronizadas de todas as disciplinas e fases de uma construção. Este modelo permite o compartilhamento de dados entre diferentes equipes, flexibilizando a coordenação e a compatibilização dos projetos (LINO, AZENHA e

[1]SANTOS, J. H. S; ISATTO, E. L.; CAVALLI, J. G. A. Aplicação de BIM e Machine Learning na construção civil: uma revisão de literatura. In: 5º SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DA INFORMAÇÃO E COMUNICAÇÃO NA CONSTRUÇÃO, 4., 2025, Florianópolis. Anais [...]. Porto Alegre: ANTAC, 2025.

LOURENÇO, 2012; VAN NEDERVEEN e TOLMAN, 1992). Entre as suas diversas versatilidades, o BIM permite a visualização detalhada dos projetos, possibilitando a extração de quantidade com precisão e reduzindo retrabalhos durante o processo construtivo (MONZANI, 2024; PEREIRA, 2024; DOURADO, 2016).

Nesse mar de possibilidades, algumas limitações do BIM podem ser identificadas como as análises preditivas, a compatibilidade de dados entre plataformas, e algumas outras limitações de integrações tecnológicas. Nesse ponto, diversas aplicações têm sido feitas utilizando o *Machine Learning* (ML) na gestão de projetos e na tomada de decisão. ML é um campo da Inteligência Artificial (AI) que utiliza algoritmos para analisar dados históricos e aprender padrões, este oferece técnicas capazes de lidar com sistemas complexos e grande volume de dados, possibilitando a previsão de comportamentos futuros (GONDIA, EL-DAKHAKHNI e NASSAR, 2020).

A integração entre o BIM e o ML permite análises avançadas de dados oriundos do modelo BIM, fornecendo uma visão preditiva e prescritiva do projeto. Esse escopo possibilitou o desenvolvimento de diversas ferramentas no setor da construção civil, delineadas em sua maioria em periódicos acadêmicos. No entanto, a ausência de um estudo que sintetize esses avanços em um único documento motivou a realização desse trabalho. O principal objetivo é compilar as principais tecnologias desenvolvidas até o momento que aplicam ambas as tecnologias digitais na construção civil, com base em uma análise de publicações acadêmicas entre os anos 2014 e 2024, nas bases de periódicos Scopus.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Metodologia

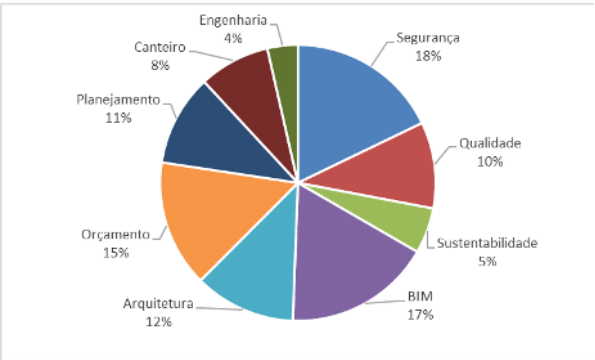
Uma pesquisa bibliométrica foi feita de modo a identificar publicações referentes a casos de estudo onde foram empregados o BIM em conjunto com o *Machine Learning* na construção civil. Para isso, foi utilizada a plataforma Scopus, aplicando o filtro de “Journal” e “Conference proceeding” na língua inglesa datados de 2014 a 2024. Foi utilizada a seguinte expressão de pesquisa: "machine learning" AND "BIM" AND "construction". As datas escolhidas são decorrentes dos registros expressivos de uso do ML na construção civil por volta do ano 2014.

Como resultado, foram identificados 211 trabalhos, desses foram filtrados 168 da área da engenharia e escolhidos 33 a partir da leitura dos títulos (Tabela 1). Em seguida foram analisados e categorizados em sete classes: Avaliação e Controle de Qualidade, Estimativa e Previsão de Custos, Planeamento e Controle, Eficiência Energética e Sustentabilidade, Gestão de Alterações de Projeto, Deteção de Anomalias e Falhas e Classificação de Elementos BIM.

2.2 Resultados parciais

Após a pesquisa, 168 trabalhos foram encontrados e suas proporções de acordo com a área de pesquisa estão representadas na Figura 1.

Figura 1: Proporção de áreas de pesquisa dos artigos encontrados.



Fonte: Autores, 2025.

A leitura dos títulos desses trabalhos resultou na seleção de 29 publicações mais relevantes para o trabalho, elencados e classificados na Tabela 1. Muitos utilizavam temáticas similares e, para a escolha desses, foi

aplicado o critério do maior número de citações e o ano mais recente da publicação.

Tabela 1: Resumo dos artigos escolhidos na pré-análise.

AUTORES	TÍTULO	ANO	CLASSE	CITAÇÕES
Valero E.; Forster A.; Bosché F.; Renier C.; Hyslop E.; Wilson L.	High level-of-detail BIM and machine learning for automated masonry wall defect surveying	2018	Avaliação e Controle de Qualidade	20
Kayhani N.; McCabe B.; Sankaran B.	Semantic-aware quality assessment of building elements using graph neural networks	2023		
Kayhani N.; McCabe B.; Sankaran B.	BIM-based construction quality assessment using Graph Neural Networks	2023		2
Braun A.; Borrmann A.	Combining inverse photogrammetry and BIM for automated labeling of construction site images for machine learning	2019	Classificação de Elementos BIM	113
Soman R.K.; Whyte J.K.	Codification Challenges for Data Science in Construction	2020		28
Cheng J.C.P.; Chen W.; Chen K.; Wang Q.	Data-driven predictive maintenance planning framework for MEP components based on BIM and IoT using machine learning algorithms	2020		315
Huang M.Q.; Ninić J.; Zhang Q.B.	BIM, machine learning and computer vision techniques in underground construction: Current status and future perspectives	2021		225
Yang J.; Shi Z.-K.; Wu Z.-Y.	Towards automatic generation of as-built BIM: 3D building facade modeling and material recognition from images	2016	Deteção de Anomalias e Falhas	31
Xiao M.; Chao Z.; Coelho R.F.; Tian S.	Investigation of Classification and Anomalies Based on Machine Learning Methods Applied to Large Scale Building Information Modeling	2022		1
El Mokhtari K.; Panushev I.; McArthur J.J.	Development of a Cognitive Digital Twin for Building Management and Operations	2022		17
Sankaran B.	Machine Learning for Construction Process Control: Challenges and Opportunities	2022		0
Ali Ghaffarianhoseini; Tongrui Zhang; Okey Nwadigo; Amirhosein Ghaffarianhoseini; Nicola Naismith; John Tookey; Kaamran Raahemifar	Application of nD BIM Integrated Knowledge-based Building Management System (BIM-IKBMS) for inspecting post-construction energy efficiency	2017	Eficiência Energética e Sustentabilidade	134
Kim H.; Stumpf A.; Schneider R.	Developing energy efficient building design in machine learning	2019		0
Abdul Mateen Khan; Muhammad Abubakar Tariq; Sardar Kashif Ur Rehman; Talha Saeed; Fahad K. Alqahtani; Mohamed Sherif	BIM Integration with XAI Using LIME and MOO for Automated Green Building Energy Performance Analysis	2024		
Huang C.-H.; Hsieh S.-H.	Predicting BIM labor cost with random forest and simple linear regression	2020	Estimativa e Previsão de Custos	34
Gao X.; Pishdad-Bozorgi P.; Shelden D.; Tang S.	Machine Learning-Based Building Life-Cycle Cost Prediction: A Framework and Ontology	2020		1
Park D.; Yun S.	Construction Cost Prediction Using Deep Learning with BIM Properties in the Schematic Design Phase	2023		3
Zhang Y.	Prefabricated Building Cost Prediction Model Combined with BIM and Deep Learning	2023		0

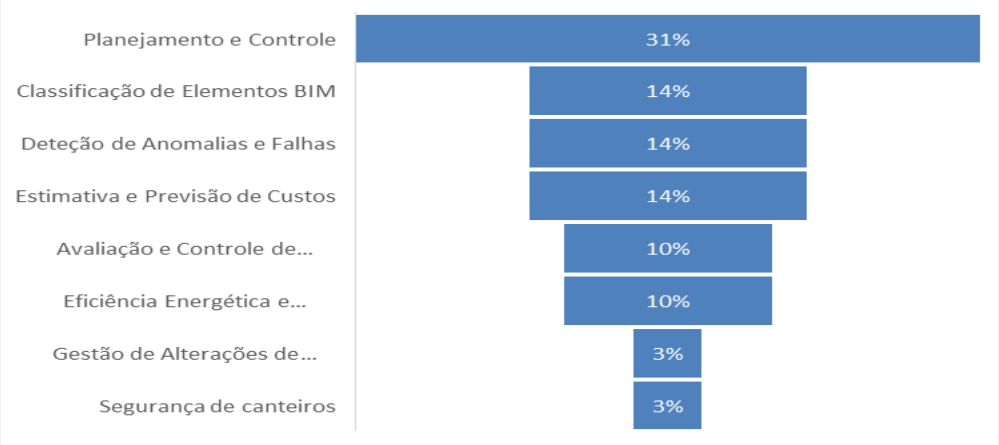
Tabela 1 continua ...

Abdulfattah B.S.; Abdelsalam H.A.; Abdelsalam M.; Bolpagni M.; Thurairajah N.; Perez L.F.; Butt T.E.	Predicting implications of design changes in BIM-based construction projects through machine learning	2023	Gestão de Alterações de Projeto	12
Golparvar-Fard M.; Peña-Mora F.; Savarese S.	Automated progress monitoring using unordered daily construction photographs and IFC-based building information models	2015	Planejamento e Controle	304
Mazen A. Al-Sinan, Abdulaziz A. Bubshait, Zainab Aljaroudi	Generation of Construction Scheduling through Machine Learning and BIM: A Blueprint	2024		
Torres-Calderon W.; Chi Y.; Amer F.; Golparvar-Fard M.	Automated Mining of Construction Schedules for Easy and Quick Assembly of 4D BIM Simulations	2019		15
Golparvar-Fard M.; Peña-Mora F.; Savarese S.	Model-based detection of progress using D4AR models generated by daily site photologs and building information models	2019		4
Ruperto F.; Strappini S.	Complex Works Project Management Enhanced by Digital Technologies	2021		4
Singh J.; Anumba C.J.; Cheng J.C.P.	Artificial Intelligence-Based Framework for Automating Practical Pipe System Installation Schedule Optimization and Generation	2021		0
Singh J.; Anumba C.J.	Real-Time Pipe System Installation Schedule Generation and Optimization Using Artificial Intelligence and Heuristic Techniques	2022		6
Lihui Huang; Roshan Pradhan; Souravik Dutta; Yiyu Cai	BIM4D-based scheduling for assembling and lifting in precast-enabled construction	2022		31
Ashwath K.; Patel V.; Patel V.; Dave B.	Using AI for Planning Predictions – Development of a Data Enhancement Engine	2023		0
Jeewoong Park; Kyungki Kim; Yong K. Cho	Framework of automated construction-safety monitoring using cloud-enabled BIM and BLE mobile tracking sensors	2016	Segurança de canteiros	284

Fonte: Autores, 2025.

Após a análise dos respectivos trabalhos, estes foram classificados em diferentes categorias, conforme demonstrado na Figura 2.

Figura 2: Proporção de artigos em cada classe.



Fonte: Autores, 2025.

2.3 Principais trabalhos discutidos em detalhes

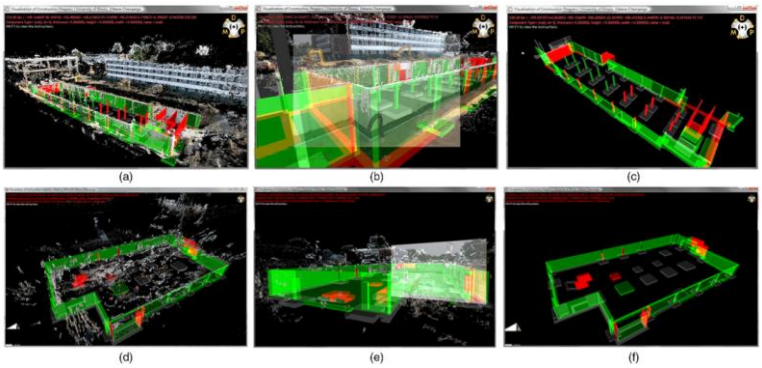
2.3.1 Automated progress monitoring using unordered daily construction photographs and IFC-based building information models

O monitoramento e o controle do progresso da obra são fundamentais para o sucesso do gerenciamento de um projeto. Essa coleta de dados é feita normalmente de forma manual, com longos períodos de medição em obra, comparando com projeto e cronograma para produzir relatórios diários de construção. Essas informações dão suporte à tomada de decisão e, quando automatizadas, minimizam o tempo de coleta e maximizam a acurácia das medições.

Visando isso, Golparvar-Fard, Peña-Mora e Savarese (2015) abordaram esses desafios e apresentaram uma nova forma para monitoramento do progresso físico com base em duas fontes de informação: fotos não ordenadas da construção e informações do modelo BIM 4D. Inicialmente foi utilizada a técnica de structure-from-motion (SfM), onde um modelo de nuvem de pontos é gerado. Em seguida, esse modelo é registrado sobre o modelo planejado. Nessa etapa, um algoritmo é utilizado para gerar reconstrução volumétrica do local, rotulando diferentes áreas de acordo com as observações. Esse processo de rotulagem também é aplicado no modelo planejado para identificar as áreas ocupadas e visíveis para o monitoramento. Por fim, um modelo probabilístico bayesiano foi aplicado para reconhecer automaticamente desvios de progresso, comparando medições de progresso com limites dinâmicos aprendidos por meio de um classificador support vector machine (SVM). Este modelo quantifica o progresso automaticamente e leva em conta oclusões e reconhece se os elementos do edifício construído estão faltando devido a oclusões ou devido a alterações (Figura 3).

Neste artigo, o modelo foi validado por meio do acompanhamento do progresso em dois projetos de construção. O estudo mostrou que o algoritmo de coloração e rotulagem de voxel obteve alta precisão na rotulagem das etapas da construção. Além disso, a SVM mostrou resultados promissores na detecção de progresso e a aplicação do D4AR reduziu o tempo necessário para coleta de dados e detecção do progresso, levando a uma melhor tomada de decisão e controle do projeto. No geral, os resultados apresentados marcam essa abordagem como a primeira do gênero a utilizar fotografias diárias local e os modelos BIM 4D em IFC para rastreamento e análise automatizados do progresso.

Figura 3: Progresso visualizado do projeto RH no ambiente D4AR; (b) visão semitransparente do progresso da UR do ponto de vista da câmera; (c) resultados da detecção do progresso da UR em BIM baseado em IFC; (d) progresso visualizado do projeto SD no ambiente.



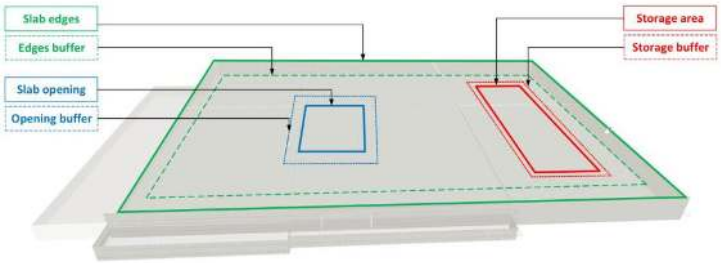
Fonte: Golparvar-Fard, Peña-Mora e Savarese, 2015.

2.3.2 A Framework of automated construction-safety monitoring using cloud-enabled BIM and BLE mobile tracking sensors.

O ambiente da construção civil é inóspito e repleto de possibilidade de acidentes, o que aumenta a necessidade de monitoramento contínuo da segurança e proteção dos trabalhadores. Devido à complexidade desse ambiente, é extremamente difícil que técnicos e engenheiros de segurança monitorem todos os riscos que podem existir. Nesse contexto, um estudo feito por Park, Kim e Cho (2016) demonstrou o uso de dispositivos vestíveis combinados ao BIM para monitoramento e mapeamento de zonas de riscos. O objetivo deste trabalho foi criar e avaliar um sistema automatizado de monitoramento de segurança de baixo custo para auxiliar no processo de monitoramento de segurança na construção. O artigo apresenta uma estrutura de sistema de monitoramento de segurança em tempo real utilizando aplicativos locais baseados em nuvem.

Inicialmente, os riscos de segurança são identificados por meio de uma análise das informações do modelo BIM. Isso pode ser feito manualmente, pelos engenheiros de segurança do trabalho, ou de forma automatizada. Os autores desenvolveram um software utilizando Machine Learning, que identifica automaticamente potenciais zonas de perigo no modelo BIM, com base em regras pré-estabelecidas (Figura 4). Após o reconhecimento das zonas de risco, as informações de tipo, local e horários são registrados no sistema automatizado de monitoramento de segurança. A atualização do modelo BIM no decorrer da obra possibilita que o sistema seja atualizado constantemente, modificando e atualizando as zonas de risco.

Figura 4: Reconhecimento automático de zonas de risco no modelo BIM.



Fonte: Park, Kim e Cho, 2016.

Após esse zoneamento, alguns riscos importantes que não são identificados pelo software serão identificados manualmente pelo engenheiro de segurança do trabalho no local. Qualquer problema de segurança como áreas com falta de limpeza, falta de proteções de segurança, andaimes e outros, precisa ser identificado e registrado no sistema automatizado de monitoramento de segurança. Para isso, são instalados sensores equipados com Bluetooth de baixa energia. Com base na comunicação de sinal entre os sensores e os dispositivos móveis de cada operário, o sistema de rastreamento transmite as informações para a nuvem. Então, a plataforma cruza os dados de localização com os dados extraídos do modelo BIM identificando e mapeando locais de áreas perigosas e os locais dos trabalhadores.

Em seguida, os resultados do monitoramento de segurança são comunicados instantaneamente para o

engenheiro de segurança, como também, por meio do dispositivo móvel, o trabalhador recebe alertas preventivos em tempo real quando se encontra em zonas de risco.

2.3.3 Application of nD BIM Integrated Knowledge-based Building Management System (BIM-IKBMS) for inspecting post-construction energy efficiency.

Movidos pela necessidade de inspecionar o desempenho energético sustentável durante o ciclo de vida pós-construção dos edifícios, os pesquisadores Ghaffarian Hosseini et al. (2017) sugeriram neste trabalho o uso de um Building Management System (BMS) utilizando aplicativos nD BIM (BIM-IKBMS) para manutenção de um edifício que equilibre a maximização da eficiência energética do mesmo com o nível de conforto desejado dos utilizadores.

Os autores propuseram o termo nD BIM-IKBMS combinando três importantes tópicos. Iniciando com o Building Information Modelling (BIM), que armazena e manipula informações da edificação com todas as alterações de projeto, seguido pelo uso da Knowledge-based Management (KM) que utiliza Machine Learning (ML) para aprender a partir da experiência histórica, e, por fim, o uso do Building Management Systems (BMS) que traz informações históricas do controle e uso dos equipamentos MEP (mecânico, elétrico e hidráulico) da edificação. A terminologia 'nD' significa múltiplas dimensões, capacidade do BIM que permite incorporar informações de todas as hierarquias no modelo.

Neste estudo, foi realizada uma revisão do estado da arte das tecnologias relevantes para nDBIM-IKBMS. Durante essa análise, foi evidenciado que a adoção do nD BIM permite que sistemas de gerenciamento predial baseado em conhecimento histórico possam ser aplicados em inspeções energéticas prediais, colaborando para a redução do consumo energético predial. Essa pesquisa situou uma base técnica para o desenvolvimento do nD BIM-IKBMS, e a viabilidade técnica de cada sub tecnologia foi validada por meio da análise das aplicações mais recentes.

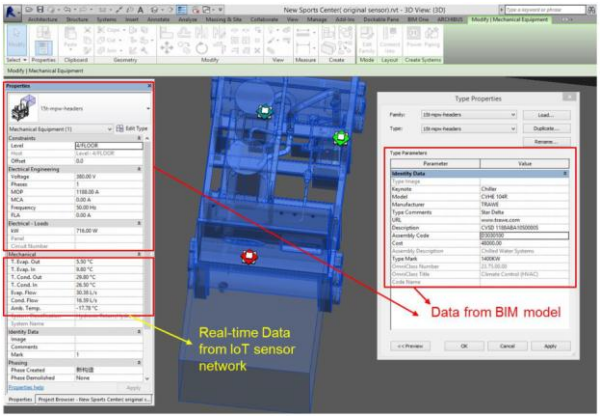
2.3.4 Data-driven predictive maintenance planning framework for MEP components based on BIM and IoT using machine learning algorithms.

Visando a gestão eficiente das manutenções das instalações (FMM), com foco na eliminação de falhas e na prevenção de reparos que prolonguem a vida útil dos componentes, uma estratégia preditiva foi desenvolvida por CHENG et al. (2020) utilizando BIM, Internet das Coisas (IoT) e ML. Para isso, uma estrutura de planejamento e manutenção preditiva foi desenvolvida em duas camadas, sendo a primeira formada pela coleta e integração dos dados e a segundo a aplicação separada em quatro módulos: monitoramento de condições e alarme de falhas; avaliação de condições; previsão de condições e planejamento de manutenção. Para previsão futura do comportamento dos componentes, foi utilizado algoritmos de ML Artificial Neural Network (ANN) e Support Vector Machine (SVM).

Inicialmente, os atributos e parâmetros, como localização, dimensão, material, tipo, etc. são obtidos do modelo BIM. Em seguida, os dados em tempo real dos sensores são coletados e visualizados no modelo BIM para monitoramento em tempo real em um ambiente 3D. Quando sinais de anomalia são detectados, a estrutura analisa a falha potencial com base nos registros históricos de manutenção e nos dados do sensor, por meio do algoritmo de ML. Se existir uma falha potencial, a equipe de manutenção avaliará a condição dos componentes de acordo com registros de inspeção, padrões de manutenção e condição monitorada no segundo estágio. Após a geração da condição prevista, o plano de manutenção é reprogramado de acordo com as condições analisadas anteriormente.

A estrutura proposta foi validada em quatro aparelhos de refrigeração de três edifícios acadêmicos no campus da Universidade de Ciência e Tecnologia de Hong Kong (HKUST). Para isso, os autores utilizaram sensores de temperatura, de pressão e de taxa de fluxo. Os sinais dos sensores foram coletados e enviados através de uma rede de sensores para os modelos BIM (Figura 5).

Figura 5: Sensores e modelo BIM.



Fonte: CHENG *et al.*, 2020.

Os resultados mostram que os dados constantemente atualizados obtidos da camada de informações, juntamente com os algoritmos de aprendizado de máquina na camada de aplicação, podem prever com eficiência a condição futura dos componentes MEP para planejamento de manutenção.

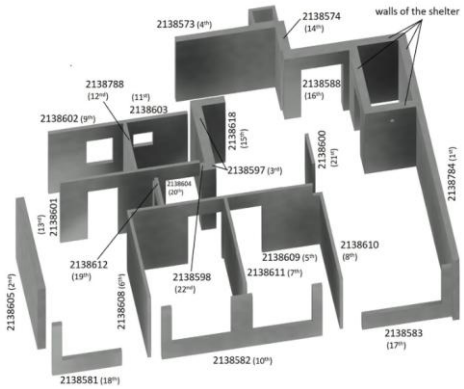
2.3.5 BIM4D-based scheduling for assembling and lifting in precast-enabled construction.

Ultimamente tem crescido o uso de estruturas pré-moldadas na construção civil, esses elementos podem ser fabricados off-site e, posteriormente, levados e montados no canteiro de obras. Após a chegada ao canteiro de obras, um árduo planejamento estratégico de montagem assistida por guindaste é elaborado, demasiado tempo e recursos. Com isso, diversos esforços têm sido empregados no desenvolvimento de planejamento de montagem utilizando guindastes, visando a produtividade e a segurança. Sabendo disso, um estudo elaborado por Huang et al. (2022) desenvolveu um modelo utilizando Machine Learning e BIM 4D para planejar o caminho e procedimento de instalações de peças pré-moldadas de concreto levando-se em consideração colisões com elementos já montados e restrições de espaço.

Para isso, um BIM4D-based Intelligent Assembly Scheduler (BIAS) foi projetado em conjunto com um Computer-Aided Lifting Planner (CALP), software desenvolvido pela Universidade Tecnológica de Nanyang, em Singapura. O agendador coleta as informações de cronograma do modelo BIM4D e gera um micro programa com a sequência de montagem dos elementos. Esse micro programa é determinado com base em três pontos: (1) a importância relativa das propriedades físicas dos elementos; (2) a interferência entre as posições dos elementos; e, (3) os caminhos de elevação sem colisão dos elementos (Figura 5). Após isso, um algoritmo genético Elitista Multinível (MEGA) foi proposto para determinar a sequência ideal levando em conta tanto a montagem quanto a elevação dos elementos.

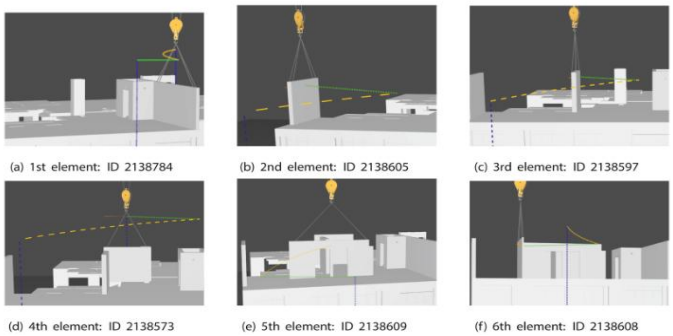
Um estudo de caso é realizado com os dados BIM4D de um edifício residencial. Os resultados do estudo de caso demonstram a eficiência e eficácia do BIAS para o agendamento de construção baseado em BIM4D (Figura 6 e Figura 7).

Figura 6: Sequência ideal de montagem de elementos de parede com IDs.



Fonte: Huang *et al.*, 2020.

Figura 7: Simulação de montagem de alguns elementos.



Fonte: Huang *et al.*, 2020.

2.4 Discussão

Essa integração de BIM e ML tem avançado em diversas áreas da construção, como demonstrado nas fontes fornecidas. Na avaliação e controle de qualidade, o uso de Redes Neurais de Grafos (GNNs) analisa as relações semânticas em modelos BIM para aprimorar a identificação automatizada da qualidade, mesmo com dados incompletos (KAYHANI, MCCABE e SANKARAN, 2023). Técnicas de visão computacional também comparam o construído com o BIM para controle de qualidade, e o ML pode detectar defeitos em elementos como paredes de alvenaria (VALERO *et al.,* 2028).

Para a manutenção preditiva, BIM integrado com IoT (Internet das Coisas) e algoritmos de ML como Redes Neurais Artificiais (ANNs) e Máquinas de Vetores de Suporte (SVM) permite monitorar, prever falhas e planejar a manutenção de componentes MEP (mecânicos, elétricos e hidráulicos) (CHENG *et al.*, 2020). Na previsão de custos, o ML, incluindo Random Forest (RF) e redes neurais, tem sido utilizado para estimar custos de mão de obra em projetos BIM e custos de construção em geral (HUANG e HSIEH, 2020).

No planejamento e programação (4D BIM), mineração de texto e ML analisam descrições de atividades para vincular cronogramas a elementos BIM 3D, facilitando a geração automática de cronogramas (TORRES-CALDERON *et al.,* 2019). A classificação automática de elementos BIM (paredes, vigas etc.) tem sido realizada com alta precisão usando diversos algoritmos de ML como SVM, ANN, árvores de decisão e RF, explorando propriedades geométricas e metadados (XIAO *et al.*, 2022).

Em relação à construção sustentável e eficiência energética, a inteligência artificial explicável combinada com BIM é usada para prever o consumo de energia e otimizar o design sustentável (AS e BILIR, 2024). No setor de construção subterrânea, BIM, ML e visão computacional auxiliam na previsão do desempenho de tuneladoras e no monitoramento de infraestruturas (HUANG, NINIĆ e ZHANG, 2021). Na fase inicial, o ML também está sendo investigado para prever as consequências de alterações de projeto com base em dados BIM (ABDULFATTAH *et al.,* 2023). A combinação de BIM com visão computacional e ML permite o monitoramento automatizado do progresso da construção (BRAUN e BORRMANN, 2019).

A integração de dados de modelos BIM, sensores IoT e sistemas de gerenciamento de instalações (FM) é explorada para otimizar a manutenção, com o uso de ontologias para padronizar essa integração (EL MOKHTARI, PANUSHEV e MCARTHUR, 2022). O IFC (Industry Foundation Classes) é um formato chave para essa interoperabilidade (HUANG, NINIĆ e ZHANG, 2021). A extração de dados relevantes de arquivos IFC para aplicações de ML é um passo crítico, envolvendo desde a análise da estrutura do arquivo (XIAO *et al.*, 2022) até o pré-processamento de texto usando NLP (ASHWATH *et al.*, 2023). A representação de BIM como grafos, onde elementos são nós e relações são arestas, permite o uso de GNNs para tarefas como avaliação de qualidade (KAYHANI, MCCABE e SANKARAN, 2023).

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Como visto, nas últimas duas décadas a indústria da AEC (Arquitetura, Engenharia e Construção) tem evoluído significativamente no uso de tecnologias de informação e informática. O *Building Information Modelling* (BIM) trouxe robustez, confiabilidade e eficiência tanto no processo de design quanto no processo de projeto (construção). Por outro lado, o avanço computacional também possibilitou a disseminação do *Machine Learning* (ML) na construção civil, trazendo uma ampla gama de ferramentas que possibilitam a existência de inúmeras novas ferramentas de controle.

Diversas áreas da AEC têm se beneficiado da união do BIM e do ML. Aplicações de alta eficiência foram alcançadas na gestão de obras, no controle da qualidade e da segurança. Avanços significativos também foram observados no desenvolvimento de ferramentas de projeto e de gestão eficiente do ciclo de vida dos projetos. Algumas lacunas de conhecimento foram observadas, com a falta de análise cruzada do modelo BIM com o planejamento, o orçamento, a qualidade e a segurança simultaneamente. Bem como também não foram encontrados estudos utilizando *Internet of Things* (IoT) em conjunto com modelos BIM para acompanhamento do *Last Planner System* (LPS).

Estamos na era das *Artificial Intelligence* (IA) e é esperado que diversas outras aplicações sejam desenvolvidas nos próximos anos capazes de suprir essas lacunas e desenvolver novas aplicações e soluções para maximizar a automação de processos nesse setor. Essa ideia fortalece a tendência atual de industrialização da construção civil.

Esse trabalho teve intuito exploratório, sendo um mapa ilustrativo do atual cenário de pesquisas envolvendo BIM e ML. Algumas deficiências podem ser citadas com o uso de apenas uma base de periódicos, a não inclusão de teses e dissertações, e a leitura resumida de poucos artigos entre aqueles encontrados. Isso abre espaço para que futuros trabalhos venham a expandir essa pesquisa e avançar na construção do conhecimento.

REFERÊNCIAS

ABDULFATTAH, B. S.; ABDELSALAM, H. A.; ABDELSALAM, M.; BOLPAGNI, M.; THURAIRAJAH, N.; PEREZ, L. F.; BUTT, t. E.. Predicting implications of design changes in BIM-based construction projects through machine learning. **Automation in Construction**, v. 155, p. 105057, 2023.

AS, M.; BILIR, T.. Machine learning algorithms for energy efficiency: Mitigating carbon dioxide emissions and optimizing costs in a hospital infrastructure. **Energy and Buildings**, v. 318, p. 114494, 2024.

ASHWATH, K.; PATEL, V.; PATEL, V.; DAVE, B. Using AI for Planning Predictions–Development of a Data Enhancement Engine. In: **ISARC. Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction**. IAARC Publications, 2023. p. 569-576.

BRAUN, A.; BORRMANN, A.. Combining inverse photogrammetry and BIM for automated labeling of construction site images for machine learning. **Automation in Construction**, v. 106, p. 102879, 2019.

CHENG, J. C. P.; CHEN, W.; CHEN, K.; WANG, Q. Data-driven predictive maintenance planning framework for MEP components based on BIM and IoT using machine learning algorithms. **Automation in Construction**, v. 112, p. 103087, 2020. ISSN 0926-5805. DOI: https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103087.

DOURADO, T. T. Tecnologia BIM aplicada na compatibilização de projetos: estudo de caso. Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pernambuco. 2016.

EL MOKHTARI, K.; PANUSHEV, I.; MCARTHUR, J. J. Development of a cognitive digital twin for building management and operations. **Frontiers in Built Environment**, v. 8, p. 856873, 2022.

GHAFFARIANHOSEINI, A.; ZHANGA, T.; NWADIGO, O.; GHAFFARIANHOSEINI, A.; NAISMITH, N.; TOOKEY; J.; RAAHEMIFAR; K. Application of nD BIM Integrated Knowledge-based Building Management System (BIM-IKBMS) for inspecting post-construction energy efficiency. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 72, p. 935-949, 2017. DOI: 10.1016/j.autcon.2018.10.003.

GOLPARVAR-FARD, M.; PEÑA-MORA, F.; SAVARESE, S. Automated progress monitoring using unordered daily construction photographs and IFC-based building information models. **Journal of Computing in Civil Engineering**, v. 29, n. 1, p. 04014025, 2015. DOI: https://doi.org/10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000205.

GONDIA, A.; SIAM, A.; EL-DAKHAKHNI, W.; NASSAR, A. H. Machine learning algorithms for construction projects delay risk prediction. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 146, n. 1, p. 04019085, 2020. DOI: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001736. DOI: 10.1016/j.autcon.2021.103999.

HUANG, Chien-Hsun; HSIEH, Shang-Hsien. Predicting BIM labor cost with random forest and simple linear regression. **Automation in Construction**, v. 118, p. 103280, 2020.

HUANG, L.; PRADHAN, R.; DUTTA, S.; CAI, Yiyu. BIM4D-based scheduling for assembling and lifting in precast-enabled construction. **Automation in Construction**, v. 133, p. 103999, 2022. DOI: 10.1016/j.autcon.2021.103999.

HUANG, M. Q.; NINIĆ, J.; ZHANG, QianBing. BIM, machine learning and computer vision techniques in underground construction: Current status and future perspectives. **Tunnelling and Underground Space Technology**, v. 108, p. 103677, 2021.

JORGE, G. de O. A. Desafios e limitações da implementação do BIM em projetos de edificações. Lisboa: Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2022. Dissertação de Mestrado.

KAYHANI, N.; MCCABE, B.; SANKARAN, B.. BIM-based construction quality assessment using Graph Neural Networks. In: **ISARC. Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction**. IAARC Publications, 2023. p. 9-16.

LAGOS, C. I.; HERRERA, R. F.; MAC CAWLEY, A. F.; ALARCÓN, L. F. Predicting construction schedule performance with last planner system and machine learning. **Automation in Construction**, v. 167, p. 105716, 2024. DOI: 10.1016/j.autcon.2024.105716.

LINO, J. C.; AZENHA, M.; LOURENÇO, P. Integração da metodologia BIM na engenharia de estruturas. BE2012-Encontro Nacional Betão Estrutural, p. 2-3, 2012.

MONZANI, J. M. Estudo sobre a utilização de softwares para desenvolvimento de projetos BIM. 2024. 20 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2024.

NDE, J. Lançamento do Construction IQ para Analisar a Segurança da Construção. Autodesk Blogs. 2019. Disponível em: https://blogs.autodesk.com/mundoaec/lancamento-construction-iq-para-analisar-seguranca-da-construcao/.

PARK, J. W.; KIM, K.; CHO, Y. K. Framework of automated construction-safety monitoring using cloud-enabled BIM and BLE mobile tracking sensors. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 143, n. 2, p. 05016019. 2017. DOI: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001223.

PEREIRA, D. M. O Impacto da Metodologia BIM na Elaboração de Orçamentos em Projetos de Obras Civis. **Boletim do Gerenciamento,** [S.l.], v. 17, n. 17, p. 30-41, ago. 2020. ISSN 2595-6531.

SANAZ, T. H.; EBADATI, O. M.; KAUR, Harleen. Cost estimation and prediction in construction projects: A systematic review on machine learning techniques. SN **Applied Sciences**, v. 2, n. 10, p. 1703, 2020.

SHOAR, S.; CHILESHE, N.; EDWARDS, J. D. Machine learning-aided engineering services' cost overruns prediction in high-rise residential building projects: Application of random forest regression. **Journal of Building Engineering**, v. 50, p. 104102, 2022. DOI: 10.1016/j.jobe.2022.104102.

TORRES-CALDERON, W.; CHI, Y.; AMER, F.; GOLPARVAR-FARD, M. Automated mining of construction schedules for easy and quick assembly of 4D BIM simulations. In: **ASCE International Conference on Computing in Civil Engineering 2019**. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2019. p. 432-438.

VALERO, E.; FORSTER, A.; BOSCHÉ, F.; RENIER, C.; HYSLOP, E.; WILSON, L. High level-of-detail BIM and machine learning for automated masonry wall defect surveying. In: **35th International Symposium on Automation and Robotics in Construction 2018**. 2018.

VAN NEDERVEEN, G. A.; TOLMAN, F. P. Modelling multiple views on buildings. **Automation in Construction**, v. 1, n. 3, p. 215-224, 1992. DOI: doi.org/10.1016/0926-5805(92)90014-B.

WANG, Yu-Ren; YU, Chung-Ying; CHAN, Hsun-Hsi. Predicting construction cost and schedule success using artificial neural networks ensemble and support vector machines classification models. **International Journal of Project Management**, v. 30, n. 4, p. 470-478, 2012. DOI: doi.org/10.1016/j.ijproman.2011.09.002.

XIAO, M.; CHAO, Z.; COELHO, R. F.; TIAN, S.. Investigation of Classification and Anomalies Based on Machine Learning Methods Applied to Large Scale Building Information Modeling. **Applied Sciences**, v. 12, n. 13, p. 6382, 2022.