ARTIGO

INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL NO AUXÍLIO DA DESCONSTRUÇÃO DE EDIFÍCIOS: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN ASSISTING BUILDING DECONSTRUCTION: A SYSTEMATIC LITERATURE REVIEW

INTELIGENCIA ARTIFICIAL EN EL APOYO A LA DECONSTRUCCIÓN DE EDIFICIOS: UNA REVISIÓN SISTEMÁTICA DE LA LITERATURA

Carolina Mendonça de Freitas Mendes de Souza[1], Bárbara dos Santos Rezende[1], Alexandre Santana Cruz[2], Lucas Rosse Caldas[1,2]

RESUMO:

A desconstrução de edifícios pode incentivar a reutilização dos materiais para serem implantados em novas construções, minimizando custos e reduzindo a degradação ambiental, objetivando uma economia circular. Porém, a implementação dessa ideia ainda esbarra em desafios, como por exemplo, a necessidade de otimização da triagem dos materiais, para assim reduzir tempo e custos desse processo. Nesse sentido, a Inteligência Artificial (IA) pode auxiliar o processo de desconstrução, por ser uma ferramenta eficiente para melhorar os níveis de produtividade e gestão de recursos. Dessa forma, o presente estudo propõe uma revisão sistemática da literatura buscando entender como a associação da IA com metodologias e ferramentas tecnológicas digitais pode superar barreiras encontradas no processo de desconstrução de edifícios, mostrando de uma forma mais prática o funcionamento desta associação. Foram selecionadas treze publicações, dentro do período de 2022 até 2024 e usando a metodologia PRISMA, que identificaram o destaque do aprendizado de máquina associado ao Building Information Modeling (BIM) para a resolução de questões na área da desconstrução, principalmente relacionadas à filtragem de materiais. Identificaram-se lacunas específicas que foram analisadas para propor abordagens baseadas em IA, visando solucionar questões críticas no processo de desconstrução como, por exemplo, a avaliação da massa dos materiais.

PALAVRAS-CHAVE: IA; economia circular; fim de vida; TIC; BIM.

1 Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Programa de Engenharia Civil (PEC - COPPE)

2 Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Programa de Pós-graduação em Arquitetura (PROARQ)

Fonte de Financiamento:
CAPES; CNPq; FAPERJ

Conflito de Interesse:
Não há.

Submetido em:
22/11/2024
Aceito em:
13/03/2025

How to cite this article:

SOUZA, C. M. de F. M. *et al*. Inteligência artificial no auxílio da desconstrução de edifícios: uma revisão sistemática da literatura. **Gestão & Tecnologia de Projetos**. São Carlos, v20, n1, 2025. https://doi.org/10.11606/gtp.v20i1.231590

ABSTRACT:

Building deconstruction can encourage the reuse of materials in new constructions, minimizing costs and reducing environmental degradation while aiming for a circular economy. However, implementing this concept still faces challenges, such as the need to optimize material sorting to reduce the time and cost of the process. In this regard, Artificial Intelligence (AI) can assist the deconstruction process as an efficient tool for improving productivity levels and resource management. Thus, this study proposes a systematic literature review to understand how the combination of AI with digital methodologies and technological tools can overcome barriers encountered in the building deconstruction process, presenting a more practical view of this integration. Thirteen publications were selected, covering the period from 2022 to 2024 and employing the PRISMA methodology. These studies highlighted the prominence of machine learning combined with Building Information Modeling (BIM) in addressing issues in the deconstruction field, particularly regarding material sorting. Specific gaps were identified and analyzed to propose an AI-based approaches aimed at solving critical issues in the deconstruction process, such as the evaluation of material mass.

KEYWORDS: AI; circular economy; end of life; ICT; BIM.

RESUMEN:

La deconstrucción de edificios puede fomentar la reutilización de materiales en nuevas construcciones, minimizando costos y reduciendo la degradación ambiental, mientras se apunta a una economía circular. Sin embargo, la implementación de este concepto aún enfrenta desafíos, como la necesidad de optimizar la clasificación de materiales para reducir el tiempo y los costos del proceso. En este sentido, la Inteligencia Artificial (IA) puede ayudar en el proceso de deconstrucción como una herramienta eficiente para mejorar los niveles de productividad y la gestión de recursos. Así, este estudio propone una revisión sistemática de la literatura para comprender cómo la combinación de la IA con metodologías digitales y herramientas tecnológicas puede superar las barreras encontradas en el proceso de deconstrucción de edificios, presentando una visión más práctica de esta integración. Se seleccionaron trece publicaciones que abarcan el período de 2022 a 2024 y emplean la metodología PRISMA. Estos estudios destacaron la relevancia del aprendizaje automático combinado con el Building Information Modeling (BIM) para abordar problemas en el campo de la deconstrucción, particularmente en la clasificación de materiales. Se identificaron y analizaron brechas específicas para proponer enfoques basados en IA que permita resolver cuestiones críticas en el proceso de deconstrucción, como la evaluación de la masa de los materiales.

PALABRAS CLAVE: IA; economía circular; fin de vida; TIC; BIM.

INTRODUÇÃO

O setor da construção possui grande participação nas mudanças climáticas globais atuais e futuras (Cruz *et al*., 2024b), sendo responsável por aproximadamente 21% das emissões globais de gases de efeito estufa (UNEP, 2024). Um dos contribuintes para essa porcentagem está atrelado à geração de resíduos de construção e demolição (RCD). A indústria da construção civil gera um volume substancial de mais de dez bilhões de toneladas de RCD por ano, muitas vezes destinados a aterros sanitários, causando significativa poluição ambiental (Liu et al., 2021; Sirimewan et al., 2024).

O modelo convencional utilizado em grande escala atualmente, que impacta significativamente o meio ambiente, é o modelo linear de consumo de recursos, o qual segue um padrão de "extrair, fabricar, descartar" (Ellen MacArthur Foundation, 2015). Ele é refletido no uso de materiais virgens para a construção de um edifício, por exemplo, e que no final de sua vida útil são descartados, pois os mesmos são projetados para uso único e não retêm o potencial de reuso (Akanbi *et al*., 2018).

A Economia Circular (EC) é considerada uma das alternativas mais relevantes que pode ajudar a reverter este cenário, pois possui como premissa manter os materiais em uma espécie de circuito contínuo buscando os três princípios de (1) preservar e melhorar o capital natural controlando estoques finitos e equilibrando os fluxos de recursos renováveis, (2) otimizar a produção de recursos através da circulação de produtos, componentes e materiais com a maior utilidade em todos os momentos e (3) promover a eficácia do sistema revelando e eliminando externalidades negativas, podendo então apresentar um maior potencial de redução da produção de resíduos e da extração de recursos para a indústria da construção (Ellen MacArthur Foundation, 2015; Benachio *et al*., 2020).

Pelo olhar da EC, os edifícios em fim de vida útil podem ser desconstruídos servindo como bancos de materiais e assim poderem ser reutilizados em novas construções minimizando custos e reduzindo a degradação ambiental (Hopkinson *et al*., 2019). A desconstrução na construção civil pode ser definida como: atividades para desmontar sistematicamente componentes e materiais de um edifício ou estrutura (Tatiya *et al*., 2018).

Dentre as possibilidades da EC, a reutilização de materiais derivados de edifícios obsoletos em fim de vida útil é cada vez mais considerada, permitindo que eles sejam reutilizados em construções atuais e futuras, porém alguns desafios dificultam a adoção em larga escala do reuso circular (Bellini *et al*. 2024).

Neste sentido, as tecnologias digitais são de extrema importância para ajudar nos desafios encontrados, pois podem oferecer benefícios significativos, como reduções de custos, aumentos na eficiência da produção, melhoria da qualidade e velocidade, geração de bancos de dados e auxílio na tomada de decisões (Cruz *et al*., 2024a; Setaki e Timmeren, 2022). O uso de tecnologias como a inteligência artificial (IA) e a internet das coisas (IoT) possibilita a "transição digital sustentável para uma economia circular inteligente" (Fraga-Lamas *et al.*, 2021).

Diferentes publicações foram vistas abordando o uso de IA na EC, a maioria com o foco no gerenciamento de resíduos, porém poucas se concentravam na relação da IA com o processo de desconstrução de edifícios. Balogun *et al*. (2024), através de uma revisão sistemática trazem publicações até 2022 e abordam campos da IA que podem ser aplicados no processo de desconstrução dentro da EC, porém focando no campo teórico e não aprofundando nos exemplos práticos. Também é citado no estudo referido, de forma superficial, como a IA pode complementar diferentes ferramentas e métodos usados na desconstrução, o que ajudaria na resolução das barreiras da circularidade de materiais (Amarasinghe *et al*., 2024). O Building

Information Modeling (BIM), que suporta diferentes visualizações dos dados em um conjunto de desenhos, tanto 2D quanto 3D (Sacks *et al*., 2018, p. 13), é um exemplo de ferramentas que subcampos da IA podem ser aplicados em suas plataformas, como Revit e ArchiCAD no caso do BIM, tendo diferentes propósitos, incluindo verificação de códigos, revisões de qualidade, ferramentas inteligentes para comparar versões e guias de design (Sacks *et al*., 2018, p. 391), que são relevantes para o processo de desconstrução, para o entendimento e avaliação do projeto.

Algumas barreiras se destacam dentre as lacunas científicas como, a falta de políticas e regulamentos sobre o tema, pouca oferta e procura de materiais secundários, baixo custo para eliminação de material em aterros e alto custo de implementação de práticas de circularidade de materiais, a falta de conhecimento e conscientização sobre a EC e seus benefícios, além da falta de informação sobre materiais de construção circulares, produtos e estratégias e a infraestrutura inadequada para apoiar a gestão de resíduos de construção e a recuperação de materiais (Amarasinghe *et al.*, 2024; Sanchez e Haas, 2018).

No intuito de tratar as lacunas mencionadas, o presente estudo propõe uma revisão sistemática da literatura (RSL) que responda à questão de (1) como a associação da IA com metodologias e outras ferramentas tecnológicas digitais, do campo das Tecnologias da Informação e Comunicação (TICs), pode auxiliar na desconstrução de edifícios? Considerando: (2) a demonstração de uma forma mais prática através de estudos de caso e (3) a consideração de publicações que atendem às duas demandas anteriores, dentro do período a partir de 2022. A partir disso (4) identificar questões específicas não abordadas e mostrar como a IA poderia ser aplicada para resolvê-las.

INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL NA DESCONSTRUÇÃO

Dentre os benefícios da desconstrução, pode-se considerar a retirada de componentes de um edifício fora de uso para então serem reparados, reutilizados, refabricados ou reciclados (Sanchez e Haas, 2018), consequentemente evitando o esgotamento de energia e materiais virgens e promovendo a conservação dos recursos naturais, possibilitando que esses produtos sejam vendidos, armazenados, consignados ou até mesmo doados (Tatiya *et al*., 2018). Adicionalmente, há a preservação do valor histórico-cultural e imaterial do bem que é recuperado e utilizado novamente. Se aptos para a reutilização, o processo inclui as etapas de coleta das informações, avaliações dos componentes baseadas nestas informações e o planejamento em si, para que possa acontecer a reutilização (Bellini *et al.*, 2024).

Quando analisado o planejamento para a desconstrução, destaca-se o levantamento mais detalhado da estrutura e classificação de materiais, componentes e conexões, se é um material perigoso, qual a sua localização e se é de fácil acesso ou não (Tatiya *et al*., 2018). O processo de triagem, muitas vezes manual, acaba por demandar muito tempo e pode ser prejudicial à saúde humana em diversas vertentes (Chen *et al*., 2023). A pouca ou nenhuma informação sobre as transformações físicas e técnicas dos materiais ao longo de sua vida útil e sobre as opções de "otimizar a recuperação do seu valor na fase de fim de vida" são outros desafios encontrados (Lacovidou *et al.*, 2018).

Ao observar os subcampos da IA mais conhecidos, encontram-se o aprendizado de máquina (*machine learning*), visão computacional, processamento de linguagem natural (*natural language processing*), sistemas baseados em conhecimento (*knowledge-based systems*), otimização (*optimisation)*, robótica (*robotics*) e planejamento e programação automatizados. Na área da construção civil a otimização tem se destacado, juntamente com o aprendizado de máquina e robótica e isto pode refletir a busca por melhoria dos baixos níveis de produtividade

e a necessidade de suprir a mão-de-obra (Abioye *et al*., 2021). Destaca-se também sistemas baseados em conhecimento, mostrando que a aplicação da IA pode melhorar o processo de desconstrução.

Benefícios dos subcampos da IA aplicados na desconstrução foram pontuados por Balogun *et al*. (2024) no gerenciamento aprimorado de recursos, precisão nas técnicas de desmontagem, adaptabilidade a diversas tarefas, manuseio de cargas pesadas, redução de custos e o benefício que entrou como foco deste estudo e foi associado à diferentes subcampos da IA: a fácil integração com outras tecnologias digitais. Percebe-se que é de suma importância a garantia de que as soluções de IA se integrem perfeitamente com as ferramentas e sistemas existentes utilizados no processo de desconstrução (Balogun *et al*., 2024).

A busca por soluções tecnológicas dentro da desconstrução combinadas com IA se intensificou nos últimos anos, já que ela possui o potencial de amplificá-las (Balogun *et al*., 2024). Pode-se dizer que com o lançamento do ChatGPT em novembro de 2022, o qual combina IA com processamento de linguagem natural (NLP), o conhecimento sobre a IA começou a ser mais percebido pelo público em geral (Alessandri-Bonetti *et al*., 2024), o que trouxe maior destaque para esse campo, principalmente na área de pesquisas.

METODOLOGIA DE PESQUISA

As diretrizes da metodologia "*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyse*" (PRISMA) foram aplicadas na presente RSL, assim como fizeram Nascimento *et al*. (2023) e Vasconcelos *et al* (2020) em seus estudos, com o intuito de avaliar as publicações detectadas e investigar como as lacunas identificadas estão sendo abordadas no contexto da IA aplicada à desconstrução de edifícios, incluindo também os subcampos potências da IA na construção civil, para otimizar as tomadas de decisão, prever custos e melhorar a segurança e eficiência dos processos da desconstrução. Dessa forma, ao fim desta pesquisa, busca-se esclarecer os campos em potencial explorados e as barreiras superadas nesta área, auxiliadas pelas novas tecnologias.

Foram identificadas palavras-chave que se destacam como campos potências da IA e termos frequentes na discussão sobre desconstrução. Estas palavras foram combinadas utilizando o operador booleano "AND" entre cada categoria, resultando em um total de vinte e uma palavras-chave, conforme a Tabela 1. O processo de busca foi conduzido nas bases de dados Scopus e Science Direct e ao final treze publicações foram escolhidas para compor a revisão sistemática.

O Chat GPT e o Chat PDF foram utilizados como recurso adicional para auxiliar na identificação do tema central dos estudos, das ferramentas utilizadas na metodologia e a relação do artigo com a tecnologia de inteligência artificial e seus subcampos aplicados à desconstrução de edifícios. Ao fim da leitura de cada publicação pelas autoras desta revisão, os PDFs dos artigos foram inseridos nas plataformas Chat GPT e Chat PDF, onde se fez as perguntas: "Este artigo utiliza IA ou algum subcampo de IA na metodologia e desenvolvimento da pesquisa para auxiliar na desconstrução de edifícios?" e "Este artigo associa IA com metodologias e ferramentas tecnológicas para auxiliar na desconstrução de edifícios?". Assim, a IA é empregada também como uma ferramenta de filtragem, com o objetivo de avaliar a consistência entre as informações verificadas pelas autoras e pela plataforma, no contexto de uma revisão da literatura, por exemplo. Assim, a IA é empregada também como uma ferramenta de filtragem, com o objetivo de avaliar a consistência entre as informações verificadas pelas autoras e pela plataforma, no contexto de uma revisão da literatura, por exemplo.

Palavras-Chave
Reuse **AND** Construction
Reuse **AND** AI
Reuse **AND** AI **AND** BIM
Deconstruction **AND** Artificial Intelligence
Deconstruction **AND** AI
Deconstruction **AND** AI **AND** BIM
Deconstruction **AND** Machine Learning
Deconstruction **AND** Robotics
Deconstruction **AND** Knowledge-based systems
Deconstruction **AND** Optimisation
Circular Economy **AND** AI
Design for Disassembly
Design for Disassembly **AND** AI
Design for Disassembly **AND** AI **AND** BIM
Design for Disassembly **AND** Machine Learning
Design for Disassembly **AND** Robotics
Design for Disassembly **AND** Knowledge-based systems
Design for Disassembly **AND** Optimisation
Design for Deconstruction
Design for Deconstruction **AND** AI
Design for Deconstruction **AND** AI **AND** BIM

Tabela 1. Palavras-chave adotadas.

Fonte: Os autores.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

ANÁLISE EXPLORATÓRIA

A análise exploratória realizada nesta revisão buscou visualizar os campos em potencial explorados e as barreiras a serem superadas pelo uso da IA e seus subcampos na área de desconstrução de edifícios. Para isso, foram estabelecidas determinações que visam esclarecer lacunas do cenário atual da pesquisa de IA para desconstrução, conforme apontado por Balogun *et al.* (2024). O período analisado abrangeu de 2022 a 2024, considerando um intervalo de dois anos entre esta revisão e a de Balogun *et al*. (2024).

Com base neste período, os artigos foram selecionados para identificar se os desafios enfrentados no contexto da IA para desconstrução avançaram, especialmente em relação à facilidade de uso da IA associada a ferramentas ou metodologias conhecidas. Como destacado a seguir os profissionais da desconstrução são convencionais nos seus métodos, pelo que é essencial garantir que as soluções de IA se integrem perfeitamente com as ferramentas e sistemas existentes utilizados no processo de desconstrução (Balogun *et al*., 2024).

Nesse sentido, a IA deve complementar e melhorar a eficiência dos processos. Portanto, buscamos selecionar trabalhos que explorem essa associação e que, por meio de estudos de caso, demonstram a aplicabilidade real das ferramentas e métodos, avançando além da fase conceitual e laboratorial, visando garantir uma maior eficiência na resolução dos problemas associados à desconstrução.

Tabela 2. Publicações totais selecionadas.

Fonte: Os autores.

Publicações	Autores	País	Resultados/Conclusões
1 - A many-objective optimization model for the end-of-life of buildings	Quéheille *et al*. (2024)	França	Propõe um modelo de otimização com múltiplos objetivos para gerenciar o fim de vida de edifícios, baseado na desconstrução, considerando seis objetivos específicos, com base na Avaliação do Ciclo de Vida
2 - Data requirements and availabilities for material passports: A digitally enabled framework for improving the circularity of existing buildings	Çetin *et al*. (2023)	Holanda e Suíça	Propõe melhorar a circularidade de materiais de edifícios existentes, abordando as lacunas de dados necessárias para criar passaportes de materiais e utilizando tecnologias digitais, como IA, para apoiar estratégias de EC.
3 - Renovation or Redevelopment: The Case of Smart Decision-Support in Aging Buildings	Wu e Maalek (2023)	Alemanha	Desenvolve um framework de suporte à decisão inteligente para avaliar a renovação, desconstrução ou reurbanização de prédios antigos, considerando aspectos de sustentabilidade como custo, consumo de energia e emissões de carbono.

4 - Automating building element detection for deconstruction planning and material reuse: A case study	Gordon *et al*. (2023)	Suíça, Espanha e Holanda	Desenvolve um processo semi-automatizado para planejar a desconstrução de materiais de construção para reutilização.
5 - Assessing the impact of policy tools on building material recovery	Mollaei *et al.* (2023)	Canadá	Propõe a aplicação de uma ferramenta de otimização no contexto da desconstrução de edifícios que seria usada para estimar a eficácia relativa de políticas focadas na recuperação de materiais de construção e na redução de resíduos e carbono.
6 - Augmenting materials passports to support disassembly planning based on building information modelling standards	Sanchez *et al*. (2024)	Singapura, Estados Unidos e Suíça	Propõe aumentar os passaportes de materiais, integrando as informações relacionadas à capacidade de recuperação de componentes, permitindo que haja a otimização para o planejamento de desmontagem de edifícios.
7 - Optimally leveraging depth features to enhance segmentation of recyclables from cluttered construction and demolition waste streams	Prasad e Arashpour (2024)	Austrália	Propõe melhorar a identificação inteligente de materiais desordenados oriundos da construção em instalações de recuperação de materiais (MRFs), aproveitando de forma otimizada os recursos visuais e espaciais.
8 - Deep learning-based models for environmental management: Recognizing construction, renovation, and demolition waste in-the-wild	Sirimewan *et al*. (2024)	Austrália, Malásia, Reino Unido e Arábia Saudita	Propõe a coleta de imagens de resíduos de construção em ambientes não controlados do mundo real para reconhecer automaticamente os materiais na natureza.
9 - Integration of BIM and design for deconstruction to	Lima *et al*. (2023)	Brasil e Holanda	Compartilhamento de dados dos elementos construtivos e seus

improve circular economy of buildings			parâmetros de desconstrução, definição prévia de possível destino para reutilização e desenvolvimento de banco de elementos de construção reutilizáveis.
10 - Smart building demolition and waste management frame with image-to-BIM	Hu *et al*. (2022)	Bélgica, China e Reino Unido	Propõe otimizar o processo de demolição e gestão de resíduos, a partir de um modelo 3D, melhorando o fluxo de informações durante a desconstrução do edifício de forma mais inteligente.
11 - Identification and Extracting Method of Exterior Building Information on 3D Map	Sohn *et al*. (2022)	Coréia	Desenvolve um método para extrair informações de fachadas de edifícios, melhorando a integração de dados arquitetônicos em representações tridimensionais, possibilitando planejamento urbano e visualização mais aprimorados.
12 - Robot for automatic waste sorting on construction sites	Chen *et al*. (2022)	China	Desenvolve um robô para realizar a triagem automática de resíduos nos canteiros de obras.
13 - Enabling Component Reuse From Existing Buildings Using Machine Learning - Using Google Street View to Enhance Building Databases	Deepika *et al*. (2022)	Suíça e Espanha	Propõe identificar e classificar componentes de edifícios existentes por análise de dados visuais para mapear materiais e componentes reutilizáveis em edifícios que estão sendo renovados ou demolidos.

A Tabela 2 apresenta um panorama dos resultados sobre as publicações selecionadas, focando nas informações do ano e local de produção e um breve resumo do assunto abordado. Há predominância de artigos do ano de 2023 e isso corrobora a observação anterior sobre a criação do Chat GPT no final de 2022 e a crescente disseminação do conhecimento em IA (Alessandri-Bonetti *et al*., 2024). Além disso, percebe-se a maior presença de países europeus

entre as publicações, com destaque para a Suíça, com quatro artigos, e a Holanda, com três (Tabela 2, Figura 1).

Esse fenômeno pode ser atribuído pelo engajamento da Europa na economia circular. Em 2015, a Comissão Europeia adotou o primeiro plano de ação para a EC, visando estimular a transição dos países para este modelo, aumentar a competitividade global, promover o crescimento econômico sustentável e gerar novos empregos (Mrad e Ribeiro, 2022). Estratégias e regras, como o Pacto Ecológico Europeu de 2019, foram elaboradas para enfrentar os desafios das mudanças climáticas e da degradação ambiental (Mrad e Ribeiro, 2022).

Figura 1. Mapa destacando os países das publicações selecionadas.

Fonte: Os autores.

Publicações	IA utilizada	Metodologias/ ferramentas associadas	Auxílio na desconstrução
1	Utiliza o algoritmo genético/ evolutivo I-DBEA (*Improved Decomposition-Based Evolutionary Algorithm*), que é uma técnica de otimização baseada em IA	Modelos de múltiplo objetivo e ACV	Otimiza a tomada de decisão, permitindo que os tomadores de decisão considerem múltiplos critérios simultaneamente
2	Utiliza sistemas de visão computacional baseado em IA	Sistemas de escaneamento	Ajuda a suprir a falta de informações precisas sobre os materiais usados nos edifícios, incluindo

Tabela 3. Publicações totais selecionadas, mostrando IAs utilizadas, ferramentas/metodologias associadas e auxílios na desconstrução.

Fonte: Os autores.

			sua composição e potencial de reutilização
3	Utiliza IA aplicada através de Design Generativo e Algoritmos Genéticos	BIM, FIM (Processamento de Nuvem de Pontos com Modelagem de Informação de Campo) e Otimização estrutural	Otimiza a tomada de decisão entre desconstrução e renovação de edifícios
4	Utiliza técnicas de visão computacional	Sensores de escaneamento como, LiDAR e fotogrametria, Análise de nuvens de pontos e Modelos em 3D BIM	Mais precisão e eficiência no planejamento de desconstrução e reuso de materiais
5	Utiliza técnica de otimização baseada em IA	BIM	Otimiza a tomada de decisão, permitindo que os tomadores de decisão considerem políticas focadas na recuperação de materiais de construção e na redução de resíduos e carbono
6	Utiliza otimização multiobjetivo por aprendizado de máquina	BIM	Ajuda a suprir a falta de informações e otimizar as etapas de desmontagem
7	Utiliza visão computacional e aprendizado profundo (aprendizado de máquina)	Sensores de profundidade e câmeras RGB	Auxilia na triagem de materiais em meio de diversos resíduos

8	Utiliza aprendizado profundo (aprendizado de máquina)	Backbone networks	Auxilia na triagem de materiais em meio de diversos resíduos
9	Utiliza a linguagem natural	BIM	Mais precisão e eficiência no planejamento de desconstrução e reuso de materiais
10	Utiliza visão computacional	BIM	Mais precisão e eficiência no planejamento de desconstrução e reuso de materiais
11	Utiliza aprendizado profundo (aprendizado de máquina)	S-map e AutoIt	Auxilia na triagem de materiais e na obtenção de dados para o processo de desconstrução
12	Utiliza robótica com aprendizado profundo (aprendizado de máquina)	Sensores LiDAR e câmeras RGB	Auxilia na triagem de materiais em meio de diversos resíduos
13	Utiliza aprendizado de máquina	Google Street View	Auxilia na triagem de materiais e na obtenção de dados para o processo de desconstrução

A Tabela 3 foca mais no tema discutido no presente estudo ao pontuar as IAs e ferramentas/metodologias abordadas em cada publicação e demonstrando como elas foram úteis para o auxílio na desconstrução, complementando assim a Tabela 2. Em relação às IAs utilizadas, destacam-se as publicações focadas no subcampo do aprendizado de máquina (Tabela 3; Figura 2), especialmente no aprendizado profundo, vinculados principalmente com a filtragem de materiais de construção presentes no edifício. Este tipo de técnica aprende automaticamente as representações de recursos diretamente dos dados, eliminando a engenharia manual de recursos. O que proporciona ao processo de desconstrução de edificações a capacidade de identificar os materiais, dada sua ampla aplicação em tarefas complexas (Balogun *et al.*, 2024).

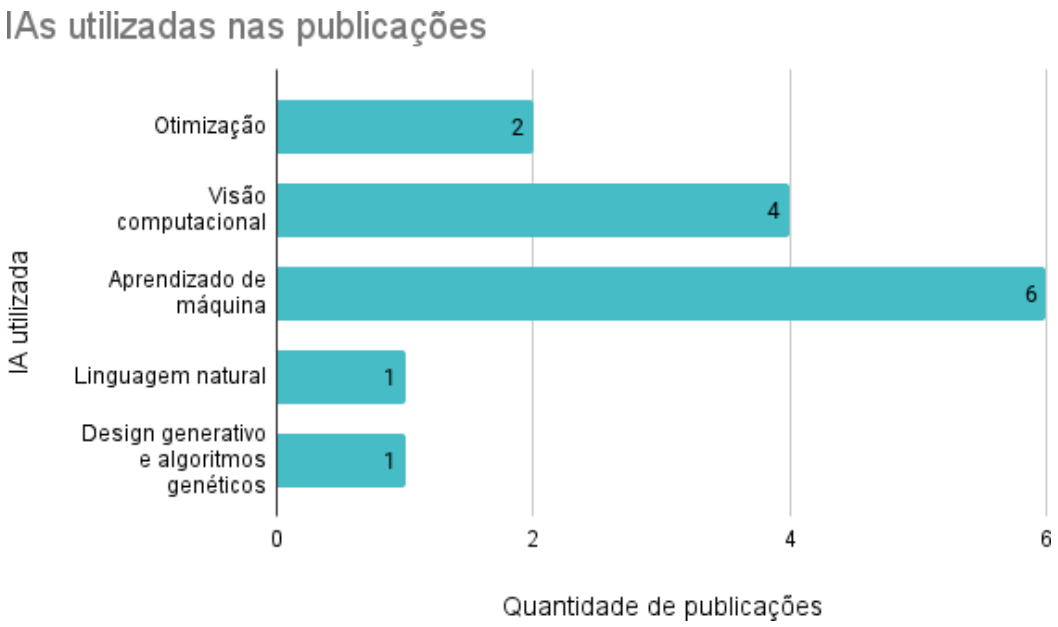


Figura 2. Quantidade de publicações para Revisão Sistemática e as IAs identificadas.

Fonte: Os autores.

Metodologia/Ferramenta	Definição
Avaliação de Ciclo de Vida (ACV)	Metodologia utilizada para avaliação sistemática e quantitativa dos impactos ambientais de materiais e produtos durante seu ciclo de vida (Schroeder e Lemke, 2015).
Building Information Modeling (BIM)	Abordagem para construir e processar o compartilhamento de dados entre as partes interessadas usando ferramentas digitais que podem gerenciar o projeto de forma completa (Biswas *et al*., 2024).
Sensor LiDAR	Método para determinar distâncias variáveis através da mira de um laser e medindo o tempo de retorno da luz refletida (Chen *et al.*, 2022).
Fotogrametria	Medições do mundo real a partir de imagens 2D (Gordon *et al*., 2023)
Câmera RGB	Produzem imagens medindo a intensidade das cores vermelho, verde e azul para cada pixel (Hassler e Baysal-Gurel, 2019)
Nuvem de Pontos	Conjunto de pontos que têm a capacidade de descrever com precisão a geometria da superfície de um objeto. Fornecem informações espaciais 3D que permitem a modelagem detalhada e precisa de estruturas complexas (Wang e Kim, 2019; Yue *et al*., 2024).

Tabela 4. Principais metodologias/ferramentas tecnológicas encontradas e suas definições.

Fonte: Os autores.

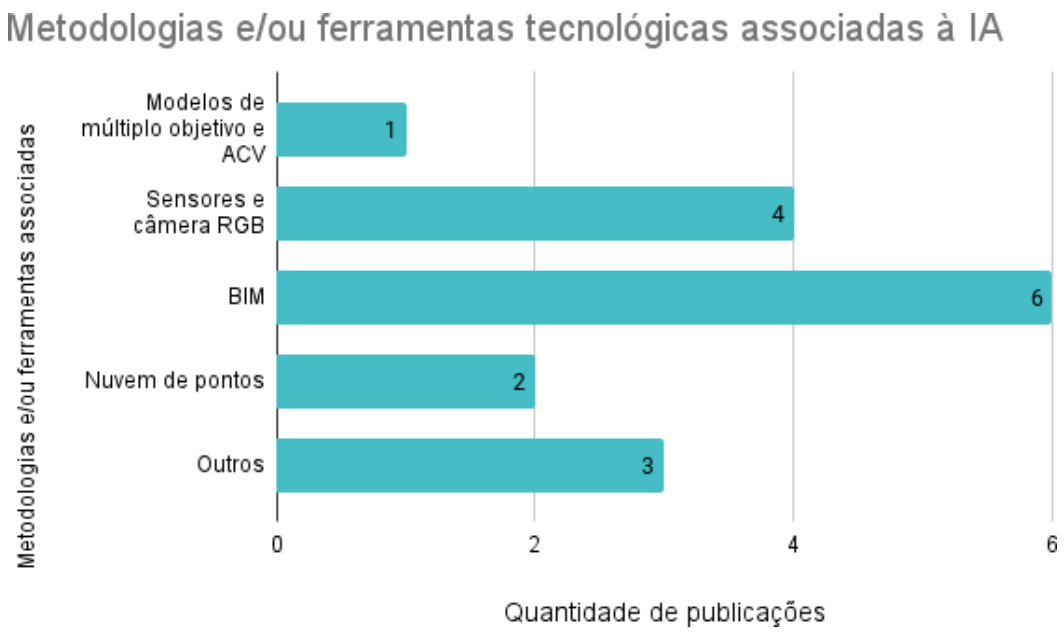


Figura 3. Quantidade de publicações para Revisão Sistemática e as metodologias e/ou ferramentas associadas às IAs identificadas.

Fonte: Os autores.

Figura 4. Quantidade de publicações para Revisão Sistemática e os auxílios na desconstrução identificados.

Fonte: Os autores.

Ao analisar a frequência das metodologias e/ou ferramentas tecnológicas associadas à IA (Tabela 3; Figura 3) e tendo como base suas definições (Tabela 4), observa-se que o BIM é o mais abordado por ser eficaz na representação de modelos de desmontagem e na gestão automatizada das informações deste processo e dos componentes construtivos (Sanchez *et al.*, 2024). É uma ferramenta que permite a migração do trabalho baseado em desenho para campo dos objetos e para que isso aconteça de forma colaborativa entre as áreas, exige o compartilhamento de banco de dados (Succar, 2009) o que se torna de extrema importância para o processo de desconstrução. O BIM foi aplicado em conjunto com diferentes IAs, como visão computacional, aprendizado de máquina e otimização, além de ter auxiliado em diferentes questões da desmontagem, contribuindo para suprir a falta de informações e aumentar a precisão e eficiência do planejamento, demonstrando sua versatilidade e

justificando sua ampla utilização. Alguns artigos utilizaram mais de uma metodologia e/ou ferramenta, o que justifica a quantidade elevada de publicações na Figura 3.

Na análise das barreiras do processo de desconstrução, esta revisão sistemática, identificou quatro tipos de auxílio proporcionadas pela IA associadas a diferentes ferramentas tecnológicas, comprovados em estudos de caso (Tabela 3; Figura 4).

Das treze publicações selecionadas, três delas exploraram aplicações voltadas para a otimização da tomada de decisão em favor da desconstrução em detrimento da demolição (Mollaei *et al*., 2023; Quéheille *et al*., 2024; Wu *et al*., 2023). Essas publicações consideram múltiplos aspectos, incluindo custos, impactos ambientais, viabilidade técnica, conformidade regulatória e políticas públicas, com o objetivo de facilitar a implementação de uma economia circular.

Dois dos artigos identificaram a falta de informações precisas sobre os materiais e componentes utilizados nos edifícios como um desafio (Çetin *et al*., 2023; Sanchez *et al*., 2024). Eles exploraram o uso da IA como facilitadora para melhorar a gestão, reutilização e reciclagem de materiais, além de otimizar os processos de desmontagem.

Outro aspecto destacado nas publicações, foi a necessidade de garantir maior precisão e eficiência no planejamento e reuso de materiais para incentivar a prática da desconstrução. Os artigos abordaram como essas melhorias podem reduzir tempo e custos no processo (Gordon *et al.*, 2023), como a IA pode auxiliar na organização e compartilhamento de informações, definindo previamente o possível destino para reutilização e desenvolvimento de banco de elementos de construção reutilizáveis (Lima *et al*., 2023) e ainda foi explorada a possibilidade de obtenção de dados e avaliação de segurança, melhorando assim o processo de desmontagem (Hu *et al*., 2022).

A triagem de materiais que pode superar barreiras na desconstrução, como a escassez de materiais secundários, baixo custo de eliminação em aterros e, principalmente, a falta de informações e a classificação dos materiais de construção, além da reduzir impactos ambientais e aumentar a possibilidade de reutilização, se destacou, com cinco publicações. Estes artigos destacaram o uso da IA principalmente na etapa de fim de vida do edifício, que permitiria maior possibilidade de reutilização dos materiais e diminuição dos impactos ambientais, uma vez que o número de resíduos em aterros cairia drasticamente, além de possibilitar a formação de banco de dados para futuras construções com materiais secundários (Chen *et al*., 2022; Deepika *et al*., 2022; Prasad e Arashpour, 2024; Shon *et al.*, 2022; Sirimewan *et al.*, 2024).

Estas quatro categorias serão analisadas nas seções subsequentes levando em consideração o tipo de IA utilizada associada com outra ferramenta/metodologia e sua aplicação prática em estudos de casos.

OTIMIZAÇÃO DA TOMADA DE DECISÃO EM FAVOR DA DESCONSTRUÇÃO

A otimização na desconstrução de edifícios, com o suporte de ferramentas de IA, aborda uma série de desafios cruciais para a gestão eficaz do fim de vida das construções. Entre esses desafios, destaca-se a complexidade da tomada de decisões em relação à recuperação de materiais e à redução de resíduos. Muitas vezes, as práticas tradicionais de demolição resultam em grandes volumes de resíduos que são difíceis de reciclar, aumentando a pressão sobre os aterros e contribuindo para impactos ambientais adversos.

Os estudos de Mollaei *et al*. (2023) e Quéheille *et al*. (2024) demonstram que a aplicação de modelos de otimização permite quantificar a eficácia de diferentes políticas de gerenciamento de resíduos, considerando múltiplos objetivos, como custo, tempo, taxa de aterro, qualidade do

ecossistema e saúde humana. Essa abordagem não só facilita a identificação de opções ideais, como a desconstrução, mas também promove a reutilização de materiais, resultando em economia financeira e na redução das emissões de carbono.

O modelo de otimização proposto por Quéheille *et al*. (2024) que utiliza o algoritmo genético DBEA e integra dados de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), fornece uma visão abrangente dos impactos ambientais. Assim como o uso da otimização com o BIM (Mollaei *et al*, 2023) ajuda a antecipar os resultados, evitando gastos na hora de realizar o projeto. Essas ferramentas são especialmente úteis para os tomadores de decisão, pois permitem avaliar diferentes cenários de fim de vida, equilibrando custos e benefícios ambientais.

A pesquisa de Wu *et al.* (2023) complementa essa discussão ao apresentar um framework inteligente que avalia o impacto ambiental de soluções de fim de vida, utilizando técnicas de design generativo e programação visual. A capacidade de gerar modelos automáticos de BIM a partir de nuvens de pontos, aliada a uma documentação digital precisa, garante a eficácia das avaliações e a precisão dos dados coletados, assim a renovação e a desconstrução podem ser planejadas de forma a maximizar a reutilização de materiais, minimizando o impacto ambiental.

Mollaei *et al*. (2023), Quéheille *et al*. (2024) e Wu *et al*. (2023) levaram a teoria discutida para prática, aplicando suas pesquisas em estudos de caso reais. Os primeiros demonstraram, ao aplicar seu modelo a diferentes cenários políticos, que a desconstrução pode levar a reduções significativas de resíduos e emissões de carbono, além de gerar retornos financeiros positivos por meio da escolha de opções ideais. Os segundos evidenciaram com seu modelo, que equilibrou custo, duração e taxa de aterro, que a reciclagem de resíduos é a opção mais vantajosa, tanto ambiental quanto economicamente. Os terceiros estudaram aplicar o framework a um edifício residencial de 1961, mostrando que uma desconstrução bem planejada melhora os resultados em relação ao carbono incorporado.

A otimização associada às ferramentas de BIM e ACV aprimora a identificação de estratégias de desconstrução, maximizando a reutilização de materiais e minimizando resíduos e impactos ambientais, especialmente o aquecimento global, causado pelas emissões de carbono. Isso possibilita uma análise detalhada dos impactos ambientais e econômicos no fim de vida dos edifícios, impulsionando a fase de planejamento da desconstrução e garantindo mais viabilidade financeira e escolhas estratégicas.

Melhoria da Precisão e na Eficiência no Planejamento da Desconstrução

A visão computacional e a linguagem natural são subcampos da IA que têm mostrado grande potencial para enfrentar os desafios da desconstrução na indústria da construção. A visão computacional, como abordado por Abioye *et al.* (2021), se concentra na simulação do sistema visual humano, permitindo uma compreensão avançada de imagens digitais e tridimensionais. Essa tecnologia é crucial para a desconstrução, pois facilita a identificação e análise de elementos de construção, otimizando o planejamento e a execução do processo.

Gordon *et al*. (2023) desenvolveram um processo semi-automatizado que combina técnicas de digitalização, como fotogrametria e Lidar, para capturar dados em tempo real de edifícios. Esses dados são então utilizados para criar modelos em BIM, que são analisados para determinar a viabilidade de recuperação de materiais. Em seu estudo, a visão computacional não apenas melhora a precisão na reconstrução dos componentes, mas também automatiza a segmentação e classificação dos elementos, tornando o planejamento de desconstrução mais eficiente e reduzindo o desperdício de materiais.

O estudo de Hu *et al*. (2022) também ilustrou como a visão computacional pode ser aplicada para identificar materiais em imagens de superfícies, integrando-se ao Revit para realizar uma reconstrução 3D. Essa abordagem foi testada em uma casa rural na China, onde demonstrou ser eficaz para o planejamento de demolição, avaliação de segurança e projeção de custos. Contudo, o estudo também destacou a necessidade de intervenção manual devido à baixa precisão de detecção, um desafio que pode ser resolvido com algoritmos mais robustos e conjuntos de treinamento mais abrangentes.

Por outro lado, a linguagem natural, embora menos intuitiva em sua aplicação na construção por ser voltada para criar modelos computacionais que imitam as capacidades linguísticas dos seres humanos (Abioye *et al*., 2021), desempenha um papel importante na definição de parâmetros de projeto. Como observado por Lima *et al*. (2023), essa tecnologia transforma descrições de projetos em operações e serviços, facilitando a modelagem no Revit. A aplicação de linguagem natural em um projeto real de escritório no fim de sua vida útil demonstrou como pode contribuir para uma base de documentação que suporta um planejamento de desmontagem mais eficiente.

Os desafios da desconstrução que esses subcampos da IA ajudam a mitigar incluem a complexidade da gestão de materiais, a necessidade de precisão na identificação de componentes e a otimização do tempo e dos custos envolvidos. A integração de visão computacional e linguagem natural com BIM não só melhora o compartilhamento de informações, mas também proporciona uma avaliação de segurança mais robusta, resultando em um processo de desconstrução mais preciso e eficiente. A visualização dos elementos a serem desmontados também facilita a gestão dos materiais e o treinamento da equipe do processo. Adicionalmente, pode ser aplicado para facilitar o ensino sobre o processo de desconstrução para os futuros profissionais que estão nas universidades e cursos técnicos.

Melhoria para a Falta de Informações Sobre Materiais e Componentes de Construção

Diferentes subcampos da IA oferecem soluções promissoras para abordar a falta de informações na desconstrução, especialmente sobre os materiais e componentes gerados no processo. Um dos principais subcampos identificados na RSL é o aprendizado de máquina, que permite que sistemas aprendam com dados históricos, realizando modelagens, controles e previsões sem a necessidade de programação explícita (Abioye *et al*., 2021). Outro subcampo relevante é a visão computacional, que pode processar e analisar grandes volumes de dados visuais, contribuindo significativamente para a gestão de informações sobre materiais.

A aplicação do aprendizado de máquina na otimização de passaportes de materiais (PM) é fundamental, especialmente quando esses passaportes não fornecem todas as informações necessárias para a desconstrução. Essa tecnologia permite que as informações sejam aprimoradas e adaptadas a diferentes contextos de construção, aprendendo com experiências anteriores. A pesquisa de Sanchez *et al*. (2024) ilustra essa eficácia por meio da ferramenta Mecanismo de Enriquecimento Semântico para Planejamento de Desmontagem (SEEDP), que utiliza o software Revit para automatizar modelos de desmontagem baseados em BIM. Essa automação resulta na criação de passaportes digitais padronizados, facilitando a geração de sequências de desmontagem e instruções específicas para a extração de componentes, otimizando, assim, o planejamento e a execução da desconstrução.

A visão computacional, por sua vez, é aplicada na criação de PMs, conforme identificado por Çetin *et al.* (2023), que apontou a necessidade crítica de dados sobre materiais e componentes em edifícios existentes. Essa tecnologia, combinada com fotogrametria e sistemas Lidar, permite a coleta e análise precisa de dados, melhorando a performance dos materiais e o

potencial de reuso e reciclagem. Após a análise de dados, um modelo BIM é gerado, facilitando a avaliação da viabilidade de reutilização. A incorporação de ACV e otimização do design permite que os dados dos PMs sejam integrados nas decisões de projeto, promovendo uma gestão de informações mais eficiente ao longo do ciclo de vida da edificação.

Esses estudos demonstram como a aplicação prática e integrada de PMs, aliada a ferramentas de IA, pode superar a falta de dados no setor da construção, promovendo uma abordagem mais eficiente para gerenciar o fim de vida das edificações. Os desafios da desconstrução, como a escassez de informações sobre materiais e a complexidade na avaliação de sua reutilização, são significativamente mitigados por essas tecnologias.

Triagem de Materiais em Prol da Reutilização

O aprendizado de máquina e a visão computacional emergem como áreas cruciais dentro da IA para a triagem de materiais na desconstrução, especialmente no que diz respeito à reutilização de recursos. Um dos principais desafios enfrentados na desconstrução é a complexidade da gestão de resíduos, que frequentemente resulta em baixas taxas de recuperação e reutilização de materiais. A densidade de lixeiras em canteiros de obras e a variedade de resíduos de diferentes tamanhos e formas dificultam a identificação e separação eficaz dos materiais valiosos.

A união do aprendizado de máquina com a visão computacional tem mostrado resultados promissores, como evidenciado por Prasad e Arashpour (2024), que demonstraram que sensores de profundidade, treinados por câmeras RGB, podem melhorar significativamente a eficiência e a precisão da triagem de resíduos. Essa combinação não apenas aumenta as taxas de reconhecimento de materiais, mas também possibilita a recuperação de recursos que, de outra forma, seriam descartados, contribuindo para a sustentabilidade e a economia circular.

Além disso, a revisão sistemática revelou que a aplicação do aprendizado de máquina, associada a uma infraestrutura de rede backbone, que permite a transmissão de dados entre si e redes locais (Motta, 2012), possibilita o reconhecimento da composição dos fluxos de resíduos, facilitando a análise e a otimização dos processos de desconstrução. Sirimewan *et al.* (2024) corroboram essa abordagem, aplicando-a em cenários reais de canteiros de obras e demonstrando como a combinação de aprendizado de máquina e redes backbone pode aprimorar o desempenho de modelos de aprendizado profundo, resultando em uma separação mais eficaz dos materiais.

A detecção de fachadas de arranha-céus em Seul, por meio de um mapa de construção 3D e técnicas automatizadas de captura de dados, exemplifica como a IA pode ser utilizada para coletar informações relevantes para a reutilização de componentes (Shon *et al*., 2022). Além disso, o estudo de Raghu *et al*. (2022) destaca a capacidade do aprendizado de máquina em classificar características de edifícios a partir do Google Street View, contribuindo para a criação de protocolos de planejamento urbano que favoreçam a reciclagem e reutilização de materiais.

Por fim, a aplicação de robótica em conjunto com aprendizado de máquina, como descrito por Chen *et al*. (2022), ilustra uma inovação significativa na triagem de materiais diretamente no local da obra. O uso de câmeras RGB-D e sensores LiDAR permite a construção de um modelo 3D dos resíduos detectados, otimizando o processo de coleta e separação em lixeiras de reciclagem. Essa abordagem não só melhora a eficiência operacional, mas também facilita a tomada de decisões sobre quais materiais devem ser reutilizados ou reciclados.

Essas inovações tecnológicas abordam como a IA pode permitir uma melhor análise de estruturas, reutilização dos materiais e componentes e criação de banco de dados dentro do processo de desconstrução, resultando na preservação de recursos naturais e redução dos impactos ambientais, além de ajudar na tomada de decisão em prol da sustentabilidade coletando informações externas de edifícios, economizando tempo, custo e esforço (Shon *et al.*, 2022).

ANÁLISE CRÍTICA DOS RESULTADOS

Analisando tudo que foi levantado pela RSL, a Figura 5 apresenta todo o processo para a desconstrução de um edifício e potencialidade de reuso dos materiais considerando as diferentes metodologias e ferramentas no campo das TICs avaliadas na RSL e o papel da IA. Percebe-se que o BIM é o que mais aparece em todo o processo, já que ter o modelo digital do edifício é a base para toda a gestão da informação (possibilitando desde a questão da visualização, identificação dos materiais, como extração de quantitativos e previsão de cenários a partir de simulações) entendendo-se que lentes e filtros BIM são ferramentas de análise que facilitam a identificação de conceitos e relações, podendo ser usadas isoladamente ou em conjunto para criar diversas visualizações do que acontece no processo de desconstrução (Succar, 2009). A ACV servirá para avaliar potenciais impactos ambientais, em diferentes fases do processo, enquanto o PM para tanto na fase de desconstrução como na de reúso e reciclagem dos materiais, pois trará informações desses materiais. A nuvem de pontos (NP) para levantar informações como profundidade, elevação, geometria e localização da edificação, a fotogrametria (FG) para realizar a reconstrução da edificação, o sensor de escaneamento (SE) para escanear e identificar de forma mais detalhada e confiável os componentes da edificação, e a integração dos sistemas (IS) para integrar as diferentes ferramentas tecnológicas.

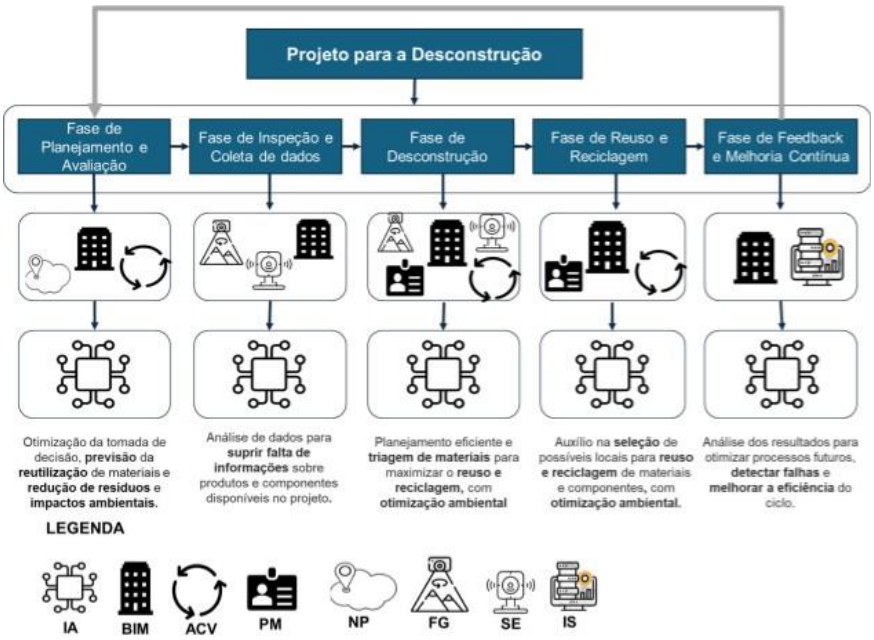


Figura 5. Proposição de processo com a integração das metodologias e ferramentas tecnológicas associadas à IA aplicadas às fases da desconstrução de uma edificação.

Fonte: Os autores.
IA – Inteligência artificial.
BIM – Buiding Infomation Modeling.
ACV – Avaliação do Ciclo de Vida.
PM – Passaporte de materiais.
NP – Nuvem de Pontos.
FG – Fotogrametria.
SE – Sensor de Escaneamento.
IS – Integração de Sistemas.

A IA poderá ser aplicada em diversos momentos, tanto para a gestão da informação para a desconstrução e reuso dos materiais como também para possibilitar a compatibilização entre as diferentes metodologias/ferramentas. Dados de saída de uma ou mais de uma

metodologia/ferramenta pode ser dado de entrada de outra metodologia/ferramenta. Por exemplo, os impactos ambientais calculados via ACV podem fazer parte do PM. Ao final do processo, será possível ter um feedback, com a identificação das falhas e problemas envolvidos, possibilitando a melhoria contínua.

LACUNAS ENCONTRADAS

A partir da RSL, percebeu-se que algumas questões da prática e problemáticas da desconstrução não foram levantadas e consequentemente não tiveram uma resposta de como a IA poderia auxiliar e facilitar o processo. Essa seção busca citar algumas dessas questões e indicar como a IA pode auxiliar a resolvê-las. Foi realizada uma nova busca à procura das problemáticas não consideradas e novamente utilizado o auxílio do Chat GPT para entender qual IA se aplicaria melhor em cada questão identificada.

A infraestrutura inadequada para apoiar a gestão de resíduos de construção e a recuperação de materiais foi abordada como uma barreira da desconstrução. Mais especificamente dentro deste tópico, que não foi abordado nas publicações selecionadas, tem-se a pouca ou nenhuma oferta de espaços apropriados para depósito de materiais oriundos da desconstrução. Locais para comprar e vender materiais de construção usados e servirem como uma espécie de estoque para eles, aumentando também a demanda por material secundário na região (EPA, 2008; Guy e Ciarimboli, 2007).

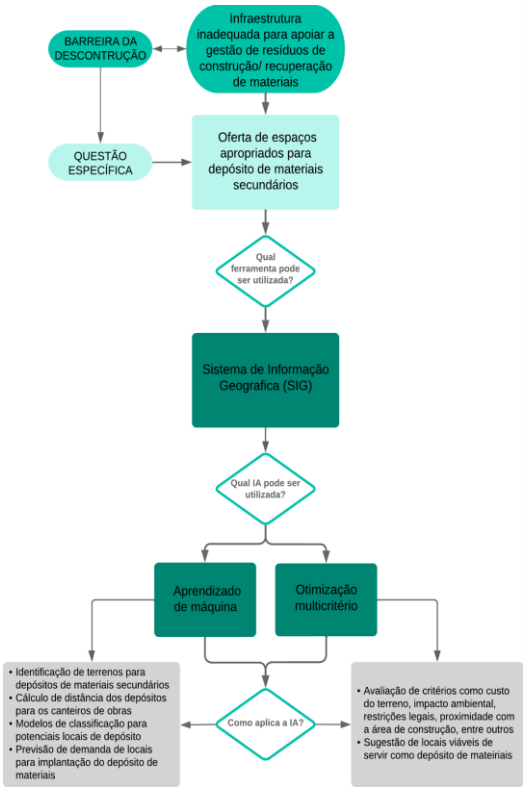
O fluxograma apresentado na Figura 6 (à esquerda) mostra como a IA pode ser aplicada na análise de mapas, que podem ser gerados por Sistemas de Informação Geográfica (SIG), para ajudar a identificar possíveis locais de depósito destes materiais. A IA pode aprender a partir de dados antigos de depósitos existentes e então identificar locais convenientes em relação à acessibilidade, custo, demanda e proximidade com grandes projetos de construção, podendo também otimizar as decisões com base em várias restrições e objetivos, avaliando e comparando diversos locais, podendo sugerir qual seria o mais viável.

Para estabelecer o índice de desmontabilidade e a desconstrutibilidade de edifícios, bem como a resiliência de materiais e componentes de construção é necessário informações sobre os materiais (O'Grady *et al.*, 2021). Entre as informações necessárias para as equações de determinação do índice, destaca-se neste estudo a massa do material, que foi uma lacuna encontrada entre as publicações relacionada a barreira da falta de informações a respeito dos materiais de construção e que também se relaciona com a dificuldade e riscos do processo de desmontagem dos elementos.

A Figura 6 (à direita) demonstra como a partir de um modelo BIM, subcampos da IA podem ser utilizados para calcular automaticamente a massa dos materiais com base em dados sobre densidade e volume extraídos do modelo ou analisando dados de demolições realizadas anteriormente, ajudando a prever o volume de resíduos e planejar a logística de reutilização do material e transporte, além de sugerir a sequência mais eficiente de remoção de materiais pesados em novos processos de desconstrução. A IA também pode ser aplicada na robótica, programando robôs para remover de forma eficiente materiais pesados, calculando sua massa e ajustando sua força de acordo com as exigências da tarefa, minimizando os riscos e facilitando o processo.

Dentro do levantamento mais detalhado da estrutura e ainda observando a esfera dos materiais e o seu processo de desmontagem, encontra-se a questão específica das conexões. Recomenda-se o uso de conexões que sejam de fácil acesso, legibilidade e simplicidade, destacando as conexões de fricção, como abraçadeiras, ou mecânicas, como peças aparafusadas, com materiais metálicos, ao invés de soldas ou cola (Guy e Ciarimboli, 2007;

Webster *et al.*, 2005). O uso da IA neste campo não foi levantado dentre as publicações analisadas e apareceu como uma lacuna na RSL.



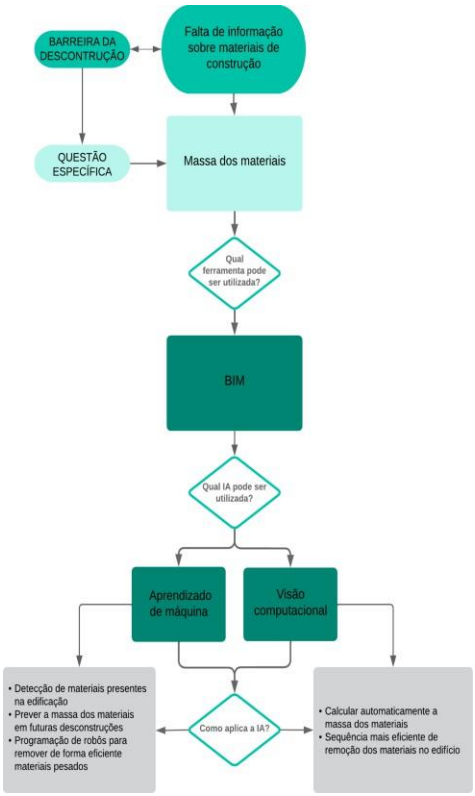


Figura 6 (à esquerda). Fluxograma para mostrar como a IA pode auxiliar na procura por possíveis locais de depósito de materiais secundários.

Fonte: Os autores.

Figura 6 (à direita). Fluxograma para mostrar como a IA pode auxiliar na falta de informação sobre os materiais.

Fonte: Os autores.

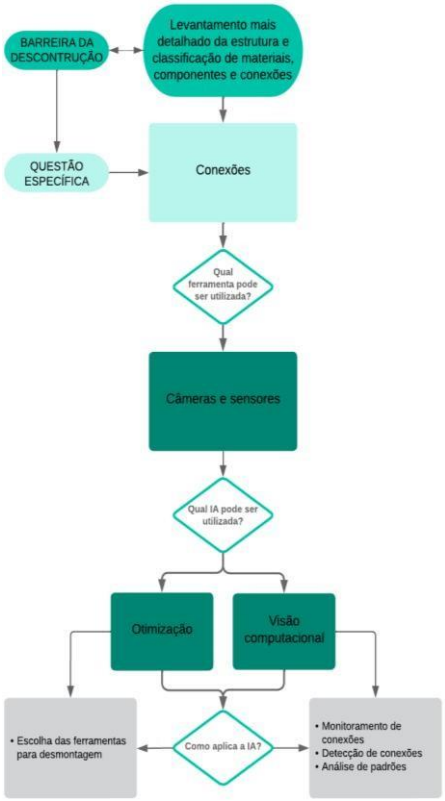


Figura 7. Fluxograma para mostrar como a IA pode auxiliar na questão das conexões para facilitar o processo de desmontagem.

Fonte: Os autores.

Foi apresentado na Figura 7 como essa questão pode ser abordada com o uso de sensores e câmeras associados com subcampos da IA. Se faz possível a detecção automática de onde se encontram os conectores, permitindo o monitoramento em tempo real da estabilidade dos mesmos e observando, por exemplo, se um parafuso está solto ou se a fricção em uma braçadeira está diminuindo e a partir disso, analisando seus padrões, possibilita-se prever o momento que a conexão ficará instável. Pode-se escanear o edifício realizando um mapa visual dos conectores destacando aqueles que podem ser acessados facilmente e sugerindo ferramentas ou métodos específicos para desconectar cada um.

Por fim, existirá lacunas de como cada metodologia/ferramenta trabalhará em conjunto, seja uma a uma (ex. ACV x BIM, BIM x PM, ACV x PM, etc.) ou diferentes agrupamentos (ACV x BIM x PM) com a IA e considerando todo o processo de desconstrução e reúso de materiais.

CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste estudo foi apresentada uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL) buscando pontuar como a associação da Inteligência Artificial (IA) com metodologias e ferramentas tecnológicas digitais pode superar barreiras encontradas no processo de desconstrução de edifícios. Foram selecionadas publicações que demonstram de forma prática o auxílio prestado por essas tecnologias, considerando dentro do período de 2022 até 2024. A partir disto, foram identificadas lacunas específicas e proposto como a IA poderia ser aplicada.

O aprendizado de máquina foi o subcampo da IA mais encontrado nas publicações, principalmente para auxiliar no problema da filtragem de materiais de construção disponíveis no edifício, que foi o campo de atuação das tecnologias mais abordado pelas publicações desta revisão. O BIM foi a metodologia mais frequentemente associada à IA neste recorte de período, principalmente por ter a versatilidade de percorrer diferentes áreas do processo de desconstrução, desde o planejamento até o fim de vida de uma edificação.

Das treze publicações selecionadas, três delas exploraram aplicações voltadas para a otimização da tomada de decisão, dois dos artigos identificaram a falta de informações precisas sobre os materiais e componentes utilizados nos edifícios, outros três trabalharam a necessidade de garantir maior precisão e eficiência no planejamento e reuso de materiais e destacou-se o auxílio na triagem dos materiais com cinco publicações encontradas. Estas publicações podem ser enquadradas conforme as etapas da desconstrução de planejamento, implementação e pós-implementação.

Abordagens inovadoras na otimização não apenas melhoram a eficiência operacional durante a fase de planejamento, mas também proporcionam insights valiosos durante a implementação e a pós-implementação. Na fase de planejamento, a otimização permite a formulação de estratégias que consideram todos os aspectos do ciclo de vida do edifício, desde a desconstrução até a gestão de resíduos. Durante a implementação, as técnicas de IA ajudam a monitorar e ajustar os processos em tempo real, enquanto na fase de pós-implementação, as análises de desempenho e as lições aprendidas podem ser utilizadas para melhorar futuras operações de desconstrução.

Publicações identificadas na área de superar a falta de dados no setor da construção se encaixam perfeitamente na fase de planejamento da desconstrução, onde a criação de passaporte de materiais e a avaliação da viabilidade de reutilização são cruciais. Durante essa fase, as tecnologias de IA ajudam a otimizar o planejamento, permitindo que informações essenciais sejam coletadas e analisadas, facilitando a tomada de decisões informadas para a desconstrução sustentável.

Os estudos voltados para o auxílio na triagem dos materiais permitem uma melhor análise de estruturas, reutilização dos materiais e componentes e criação de banco de dados dentro do processo de desconstrução se encaixando nas três fases. Na etapa de planejamento, no intuito de entender quais os materiais e componentes foram utilizados na construção, na implementação, onde as técnicas de IA são aplicadas ativamente para otimizar processos e resultados durante a desconstrução e na pós-implementação, que é de extrema importância, ao identificar quais materiais estão aptos a serem reutilizados ou reciclados e quais devem ser descartados. As práticas identificadas nesta RSL ajudam a resolver os problemas de custos elevados e logísticas complexas da desconstrução, auxiliando a contabilização dos grandes benefícios ambientais trazidos por esse processo.

É inegável que no período de dois anos, as pesquisas de IA voltadas para a desconstrução avançaram, porém ainda existem muitas oportunidades a serem exploradas. Ao analisar a RSL proposta e identificar o ponto de atuação da IA dentro das barreiras encontradas na desconstrução, foram identificadas algumas lacunas em relação às questões específicas dentro do processo. Três foram abordadas para demonstrar a aplicação de ferramentas tecnológicas em conjunto com IA: (1) pouca oferta de espaços apropriados para depósito de materiais secundários, onde a resolução desta questão permitiria que empresas ou governos buscassem locais de forma mais eficiente, estratégica e sustentável, promovendo um gerenciamento mais eficaz de materiais de construção usados; (2) questão da massa dos materiais, o qual a solução pode fornecer estimativas precisas de valores, otimizar a logística e reduzir custos e riscos, além de contribuir para uma desconstrução mais eficiente e sustentável; (3) questão das conexões, pontuando que conexões eficientes podem aumentar a segurança, prever instabilidades e automatizar processos, tornando a desconstrução mais eficiente e precisa.

Como sugestão para futuros trabalhos recomenda-se o desenvolvimento de estudos buscando focar sobre as lacunas específicas identificadas e como a IA e seus subcampos são aplicadas, demonstrando na prática o funcionamento do que foi proposto e a busca por novas lacunas mais específicas no processo de desconstrução. Adicionalmente, sugere-se pesquisar empresas que tenham como foco o processo de desconstrução e reúso de materiais para verificar se as dificuldades encontradas na RSL estão compatíveis e se a IA e as outras metodologias/ferramentas avaliadas já estão sendo aplicadas na prática do mercado.

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos à Universidade Federal do Rio de Janeiro, em especial ao Programa de Engenharia Civil da COPPE e ao Programa de Pós-Graduação em Arquitetura (PROARQ), a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ) e aos revisores pelas contribuições valiosas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIOYE, S. O., OYDELE, L. O., AKANBI, L., AJAYI, A., DELGADO, J. M. D., BILAL, M., AKINADE, O. O., AHMED, A.. Artificial intelligence in the construction industry: A review of present status, opportunities and future challenges. **Journal of Building Engineering**, v. 44, dez. 2021, 103299. ISSN 2352-7102. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103299.

AKANBI, L. A., OYDELE, L. O., AKINADE, O. O., AJAYI, A., DELGADO, J. M. D., BILAL, M., BELLO, S. A. Salvaging building materials in a circular economy: A BIM-based whole-life performance estimator. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 129, p. 175-186, fev. 2018, ISSN 0921-3449. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.10.026.

ALESSANDRI-BONETTI, M., LIU, H. Y., GIORGINO, R., NGUYEN, V. T., EGRO F. M. The first months of life of ChatGPT and its impact in healthcare: A bibliometric analysis of the current literature. **Annals Biomedical Engineering**, v. 52, p. 1107–1110, mar. 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s10439-023-03325-8

AMARASINGHE, I., HONG, Y., STEWART, RODNEY, A. Visualising a framework for enhancing material circularity in building construction projects: Drivers, barriers, and strategies. **Building and Environment**, v. 253., fev. 2024, 111359, ISSN 0360-1323. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111359.

BALOGUN, H., ALAKA, H., DEMIR, E., EGWIM, C.N., OLU-AJAYI, R., SULAIMON, I., OSEGHALE, R. Artificial intelligence for deconstruction: Current state, challenges, and opportunities. **Automation in Construction**, v. 166, out. 2024, 105641, ISSN 0926-5805. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105641.

BELLINI, A., ANDERSEN, B., KLUNGSETH, N. J., TADAYON, A. Achieving a circular economy through the effective reuse of construction products: A case study of a residential building. **Journal of Cleaner Production**, v. 450, abr. 2024, 141753, ISSN 0959-6526. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141753.

BENACHIO, G. L. F., FREITAS, M. D. C. D., TAVARES, S. F. Circular economy in the construction industry: a systematic literature review. **Journal of Cleaner Production**, v. 260, jul. 2020, 121046. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121046.

BISWAS, H. K., SIM, T. Y., LAU, S. L. Impact of Building Information Modelling and Advanced Technologies in the AEC Industry: A Contemporary Review and Future Directions. **Journal of Building Engineering**, v. 82, abr. 2024, 108165, ISSN 2352-7102. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.108165.

ÇETIN, S., RAGHU, D., HONIC, M., STRAUB, A., GRUIS, V. Data requirements and availabilities for material passports: A digitally enabled framework for improving the circularity of existing buildings. **Sustainable Production and Consumption**, v. 40, p. 422-437, set. 2023. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.spc.2023.07.011.

CHEN, J., FU, Y., LU, W., PAN, Y. Augmented reality-enabled human-robot collaboration to balance construction waste sorting efficiency and occupational safety and health. **Journal of Environmental Management**, v. 348, dez. 2023, 119341, ISSN 0301-4797. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119341.

CHEN, X., HUANG, H., LIU, Y., LI, J., LIU, M. Robot for automatic waste sorting on construction sites. **Automation in Construction**, v. 141, set. 2022, 104387, ISSN 0926-5805. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104387.

CRUZ, A. S., CALDAS, L. R., MENDES, V. M., MENDES, J. C., BASTOS, L. E. G. Multi-objective optimization based on surrogate models for sustainable building design: A systematic literature review. **Building and Environment**, v. 266, dez. 2024a, 112147, ISSN 0360-1323. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.112147.

CRUZ, A. S., MENDES, V. F., MENDES, J. C., CALDAS, L. R., BASTOS, E. G. B. What lies ahead? The future performance of Global South residential buildings amid climate change: a systematic literature review. **Journal of Building Engineering**, v. 98, dez. 2024b, 111486, ISSN 2352-7102. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.111486.

DEEPIKA, R., ARETI, M., MATHILDE, M., IACOPO, N., ANGELOS, C., CATHERINE, D. W. Enabling component reuse from existing buildings through machine learning, using Google Street View to enhance building databases. **POST-CARBON - 27th CAADRIA Conference**, Sydney, v. 2, abr. 2022, p. 577-586, Disponível em: https://doi.org/10.52842/conf.caadria.2022.2.577

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. **Towards a circular economy: Business rationale for an accelerated transition**. Disponível em: https://www.ellenmacarthurfoundation.org/towards-a-circular-economy-business-rationale-for-an-accelerated-transition. Acesso em: 20 de ago. 2024.

EPA (U.S. Environmental Protection Agency). **Lifecycle construction resource guide**. Atlanta, 2008. 72 p.

FRAGA-LAMAS, P., LOPES, S. I., FERNÁNDEZ-CARAMÉS, T. M. Green IoT and edge AI as key technological enablers for a sustainable digital transition towards a smart circular economy: An industry 5.0 use case. **Sensors**, v. 21, ago. 2021. Disponível em: https://doi.org/10.3390/s21175745.

GORDON, M., BATALLÉ, A., DE WOLF, C., SOLLAZZO, A., DUBOR, A., WANG, T. Automating building element detection for deconstruction planning and material reuse: A case study. **Automation in Construction**, v. 146, p. 104697, fev. 2023. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104697.

GUERRA, B. C., SHAHI, S., MOLLAEI, A., SKAF, N., WEBER, O., LEITE, F., HAAS, C. Circular economy applications in the construction industry: A global scan of trends and opportunities. **Journal of Cleaner Production**, v. 324, nov. 2021, 129125, ISSN 0959-6526, Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129125.

GUY, B., CIARIMBOLI, N. **Design for Disassembly in the Built Environment: a guide to closed-loop design and building**. Seattle: City of Seattle, King County, WA, and Resource Venture, Inc., 2007. Prepared by the Hamer Center for Community Design, The Pennsylvania State University. Disponível em: https://www.lifecyclebuilding.org/docs/DfDseattle.pdf

HASSLER, S. C. BAYSAL-GUREL, F. Unmanned Aircraft System (UAS) Technology and Applications in Agriculture. **Agronomy**, v. 9, out. 2019. Disponível em: https://doi.org/10.3390/agronomy9100618.

HOPKINSON, P., CHEN, H. M., ZHOU, K., WANG, Y., LAM, D. Recovery and reuse of structural products from end-of-life buildings. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers– Engineering Sustainability**, v. 172 p. 119–128, maio 2019. Disponível em: https://doi.org/10.1680/jensu.18.00007.

HU, X., ZHOU, Y., VANHULLEBUSCH, S., MESTDAGH, R., CUI, Z., LI, J. Smart building demolition and waste management frame with image-to-BIM. **Journal of Building Engineering**, v. 49, maio 2022, 104058, ISSN 2352-7102. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104058.

LACOVIDOU, E., PURNELL, P., LIM, M. K. The use of smart technologies in enabling construction components reuse: A viable method or a problem creating solution? **Journal of Environmental Management**, v. 216, p. 214-223, jun. 2018, ISSN 0301-4797. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.04.093.

LIMA, P. R. B., RODRIGUES, C. S., POST, J. M. Integration of BIM and design for deconstruction to improve circular economy of buildings. **Journal of Building Engineering**, v. 80, dez. 2023, 108015, ISSN 2352-7102. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.108015.

LIU, J., WU, P., JIANG, Y., WANG, X. Explore potential barriers of applying circular economy in construction and demolition waste recycling. **Journal of Cleaner Production**, v. 326, dez. 2021, 129400, ISSN 0959-6526 . Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129400.

MOLLAEI, A., BACHMANN, C., HAAS, C. Assessing the impact of policy tools on building material recovery. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 198, nov. 2023, 107188, ISSN 0921-3449. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.107188.

MRAD, C., RIBEIRO, L. F. A review of Europe's circular economy in the building sector. **Sustainability**, v. 14, Out. 2022, 14211. Disponível em: https://doi.org/10.3390/su142114211

NASCIMENTO ,C. R. S. de M. *et al*. O BIM como instrumento para gestão da manutenção e operação de edificações: um panorama atual. **Gestão & Tecnologia de Projetos.** São Carlos, v. 18, n. 1, ago. 2023. Disponível em: https://doi.org/10.11606/gtp.v18i1.185678

O'GRADY, T., MINUNNO,R., CHONG, H., MORRISON, G. M. Design for disassembly, deconstruction and resilience: A circular economy index for the built environment. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 175, dez. 2021, 105847, ISSN 0921-3449. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105847.

PRASAD, V., ARASHPOUR, M. Optimally leveraging depth features to enhance segmentation of recyclables from cluttered construction and demolition waste streams. **Journal of Environmental Management**, v. 354, mar. 2024, 120313, ISSN 0301-4797. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120313.

QUÉHEILLE, E., TAILLANDIER, F., SAIYOURI, N., FERNANDEZ, C. A many-objective optimization model for the end-of-life of buildings. **Environment Systems and Decisions**, jun. 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s10669-024-09984-9.

RICH, E., KNIGHT, K., NAIR, S. B. **Artificial intelligence**. 3. ed. New Delhi: Tata McGraw-Hill Education Pvt. Ltd., 2010. 585 p.

SACKS, Rafael, EASTMAN, Charles, LEE, Ghang, TEICHOLZ, Paul**. BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Designers, Engineers, Contractors, and Facility Managers**. 3. ed. Hoboken, NJ: Wiley, 2018, 682 p.

SANCHEZ, B., HAAS, C. A novel selective disassembly sequence planning method for adaptive reuse of buildings. **Journal of Cleaner Production**, v. 183, maio 2018, p. 998-1010, ISSN 0959-6526. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.201.

SANCHEZ, B., HONIC, M., LEITE, F., HERTHOGS, P., STOUFFS, R. Augmenting materials passports to support disassembly planning based on building information modelling standards. **Journal of Building Engineering**, v. 90, ago. 2024, 109083, ISSN 2352-7102. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.109083.

SUCCAR, B. Building information modelling framework: A research and delivery foundation for industry stakeholders. **Automation in Construction**, v. 18, n. 3, p. 357-375, maio 2009, ISSN 0926-5805. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.autcon.2008.10.003.

SCHROEDER, H.; LEMKE, M. Sustainability of Earth Building Materials—Environmental Product Declarations as an Instrument of Competition in Building Material Industry. **Vitruvio**, **International journal of Architecture Technology and Sustainability**, p. 45-55, dez. 2015. Disponível em: https://doi.org/10.4995/vitruvio-ijats.2015.4474

SETAKI, F., TIMMEREN, A. V. Disruptive technologies for a circular building industry. **Building and Environment**, v. 223, set. 2022, 109394, ISSN 0360-1323. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109394.

SHON, D.; NOH, B.; BYUN, N. Identification and extracting method of exterior building information on 3D map. **Buildings**, v. 12, abr. 2022, 452. Disponível em: https://doi.org/10.3390/buildings12040452

SIRIMEWAN, D., BAZLI, M., RAMAN, S., MOHANDES, S. R., KINEBER, A. F., ARASHPOUR, M. Deep learning-based models for environmental management: Recognizing construction, renovation, and demolition waste in-the-wild. **Journal of Environmental Management**, v. 351, fev. 2024, 119908, ISSN 0301-4797. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119908.

TATIYA, A., ZHAO, D., SYAL, M., BERGHORN, G. H., LAMORE, R. Cost prediction model for building deconstruction in urban areas. **Journal of Cleaner Production**, v. 195, p. 1572-1580, set. 2018, ISSN 0959-6526. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.084.

THOMSEN A., SCHULTMANN F., KOHLER, N. Deconstruction, demolition and destruction. **Building Research & Information**, v. 39, p. 327-332, jun. 2011. Disponível em: https://doi.org/10.1080/09613218.2011.585785.

UNEP (United Nations Environment Programme). Beyond foundations: Mainstreaming sustainable solutions to cut emissions from the buildings sector. **Global status report for buildings and construction**, 2024. Disponível em: https://www.unep.org/pt-br/resources/relatorios/relatorio-de-status-global-para-edificacoes-e-construcao. Acesso em 15 jul. 2024.

VASCONCELOS, B. M., OLIVEIRA, V. S. Diretrizes para projeto de ambiente construído inclusivo (pessoas com deficiência auditiva): revisão sistemática. **Gestão e Tecnologia de Projetos**, São Carlos, v.15, n. 2, p.98-112, jun. 2020. Disponível em: http://dx.doi.org/10.11606/gtp.v15i2.162777.

WANG, Q., KIM, M. Applications of 3D point cloud data in the construction industry: A fifteenyear review from 2004 to 2018. **Advanced Engineering Informatics**, v. 39, p. 306-319, jan. 2019, ISSN 1474-0346. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.aei.2019.02.007.

WEBSTER, M. D., GUMPERTZ, S., COSTELLO, D. T. Designing structural systems for deconstruction: How to extend a new building's useful life and prevent it from going to waste when the end finally comes. **Greenbuild Conference**, Atlanta, nov. 2005.

WU, B., MAALEK, R. Renovation or redevelopment: The case of smart decision-support in aging buildings. **Smart Cities**, v. 6, p. 1922-1936, ago. 2023. Disponível em: https://doi.org/10.3390/smartcities6040089.

YUE, H., WANG, Q., ZHAO, H., ZENG, N., TAN, Y. Deep learning applications for point clouds in the construction industry. **Automation in Construction**, v. 168, dez. 2024, 105769, ISSN 0926-5805. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105769.

Carolina Mendonça
carolina.souza@coc.ufrj.br

Bárbara Rezende
barbara.rezende@coc.ufrj.br

Alexandre Cruz
alexandre.cruz@fau.ufrj.br

Lucas Caldas
lucas.caldas@fau.ufrj.br