INTEGRAÇÃO DO PASSAPORTE DIGITAL DE MATERIAIS COM INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL E OUTRAS TECNOLOGIAS DIGITAIS: ANÁLISE DE BENEFÍCIOS E DESAFIOS

INTEGRATION OF MATERIAL PASSPORT WITH ARTIFICIAL INTELLIGENCE AND OTHER DIGITAL TECHNOLOGIES: ANALYSIS OF BENEFITS AND CHALLENGES

Mayara Gibosky [1]; Lucas Rosse Caldas [2]

[1]Engenheira Ambiental e Sanitarista | mayara.gibosky@fau.ufrj.br | UFRJ | Rio de Janeiro, Brasil; [2] Doutor em Engenharia Civil | lucas.caldas@fau.ufrj.br |UFRJ | Rio de Janeiro, Brasil.

Resumo:
Passaportes digitais de materiais (PDMs) são instrumentos digitais que reúnem dados essenciais sobre a composição, desempenho e origem de materiais, viabilizando sua rastreabilidade, reutilização e reciclagem no setor da construção. Este artigo investiga de que forma a Inteligência Artificial (IA) pode otimizar a criação, análise e aplicação dos PDMs, promovendo práticas mais sustentáveis e circulares. A metodologia adotada é uma análise qualitativa com uma revisão sistemática e exploratória, fundamentada em revisão integrativa da literatura, com foco em tecnologias digitais como o BIM e aplicações de IA no contexto da construção civil. Os resultados apontam que técnicas de aprendizado de máquina e processamento de linguagem natural podem automatizar a geração de passaportes, identificar padrões de desempenho e assegurar a conformidade normativa em tempo real. A integração entre IA e PDMs contribui para reduzir perdas, ampliar a rastreabilidade de materiais e apoiar decisões em projetos sustentáveis. Portanto, esta pesquisa contribui para a compreensão do papel transformador da IA na melhoria da eficiência e sustentabilidade ao longo do ciclo de vida dos materiais, possibilitando a integração de práticas circulares na construção civil e em outros setores.

Palavras-chave:
Inteligência Artificial; BIM; Economia Circular; Análise de Dados.

Abstract:
Digital Material Passports (DMPs) are digital tools that gather essential data about the composition, performance, and origin of materials, enabling their traceability, reuse, and recycling in the construction sector. This article investigates how Artificial Intelligence (AI) can optimize the creation, analysis, and application of DMPs, promoting more sustainable and circular practices. The adopted methodology is a qualitative analysis with a systematic and exploratory review, based on an integrative literature review focused on digital technologies such as BIM and AI applications in the context of civil construction. The results indicate that machine learning and natural language processing techniques can automate passport generation, identify performance patterns, and ensure real-time regulatory compliance. The integration between AI and DMPs helps reduce waste, enhance material traceability, and support decision-making in sustainable projects. Therefore, this research contributes to the understanding of AI's transformative role in improving efficiency and sustainability throughout the materials' life cycle, enabling the integration of circular practices in construction and other sectors.

Keywords:
Artificial Intelligence; BIM; Circular Economy; Data Analysis.

1. INTRODUÇÃO

Os passaportes de materiais são documentos importantes para o gerenciamento de materiais em diversos setores, como arquitetura, engenharia e construção. Eles fornecem informações detalhadas sobre os materiais, que podem ser divididas, catalogadas e certificadas para garantir a qualidade e conformidade. Estes documentos servem como um repositório meticuloso de informações sobre os materiais, documentando suas propriedades, origem, tratamentos e certificações já existentes. A importância dos passaportes de materiais reside na sua capacidade de garantir a qualidade, segurança e conformidade dos materiais com os padrões e regulamentos aplicáveis e estimular uma economia circular (Munaro e Tavares, 2018). Eles são essenciais para garantir que os materiais cumpram os requisitos técnicos e de desempenho ao longo de todo o ciclo de vida do produto, desde a fabricação e instalação até a manutenção. O conceito de passaporte de materiais foi inicialmente introduzido sob a forma de "certificado de nutrientes" (Hansen, Braungart e Mulhall, 2012, *apud* Munaro e Tavares, 2018) e abrange não apenas os materiais, mas também produtos e sistemas construtivos.

Historicamente, a criação e gestão de passaportes de materiais envolviam processos manuais e documentação física, que, embora eficazes, eram suscetíveis a erros e ineficiências. Com o avanço da tecnologia, a digitalização desses documentos tornou-se uma prática comum, facilitando o acesso e a atualização das informações. No entanto, a digitalização desses documentos trouxe novos desafios significativos: a gestão de grandes volumes de dados gerados e armazenados digitalmente pode se tornar complexa, exigindo sistemas robustos para armazenamento, processamento e recuperação eficiente das informações. A necessidade de integrar dados provenientes de diferentes fontes e formatos adiciona uma camada extra de complexidade.

Nesse contexto, emerge a necessidade de explorar soluções tecnológicas que possam lidar com essas demandas de forma eficiente e segura. A Inteligência Artificial (IA), com suas diversas aplicações, apresenta um potencial promissor para otimizar a criação, análise e gerenciamento dos passaportes de materiais. Técnicas como aprendizado de máquina e processamento de linguagem natural podem automatizar processos, identificar padrões, reduzir perdas e ampliar a rastreabilidade de materiais ao longo do ciclo de vida das construções. Diante disso, este estudo se justifica pela relevância de investigar como a integração entre Passaportes Digitais de Materiais (PDM) e tecnologias de IA pode contribuir para práticas mais sustentáveis e circulares no setor da construção civil. O objetivo principal é analisar, a partir de uma revisão integrativa da literatura, o papel da Inteligência Artificial na transformação digital dos passaportes de materiais, destacando seus benefícios, desafios e potenciais aplicações para aumentar a eficiência, transparência e sustentabilidade no ciclo de vida dos materiais.

2. MÉTODOS

A metodologia deste estudo foi estruturada em quatro etapas principais, combinando revisão sistemática da literatura, análise qualitativa, avaliação de tecnologias e aplicação de métodos diversos. Inicialmente, foi realizada uma revisão sistemática da literatura com o objetivo de identificar bons artigos sobre a utilização de passaportes de materiais, além de compreender o estado atual da aplicação da IA na gestão desses documentos. Para isso, foram utilizadas ferramentas acadêmicas, como *Scopus* e *Google Scholar*, normas técnicas, regulamentações e revisão de artigos acadêmicos e científicos. Na etapa seguinte, desenvolveu-se uma análise qualitativa de exemplos representativos de passaportes de materiais oriundos de diversos setores da engenharia e suas tecnologias, com ênfase na construção civil. A análise envolveu a coleta e comparação de práticas documentais, destacando as informações incluídas nos passaportes e suas variações entre setores como construção, engenharia e manufatura. O uso da Inteligência Artificial, principalmente no setor da construção civil, favorece a conformidade em tempo real com normas e regulamentos, ampliando sua aplicabilidade em setores de alta exigência.

O presente estudo visa compreender essa interseção entre IA e passaportes digitais por meio de uma metodologia mista, que combina análises quantitativas e qualitativas. A revisão sistemática da

literatura foi conduzida com base no protocolo PRISMA (Page *et al.*, 2022), utilizando operadores booleanos (AND/OR) e análise bibliométrica, garantindo rigor e transparência na seleção e avaliação das fontes (Morais *et al*., 2024). Essa abordagem integrada permite uma visão abrangente e aprofundada das oportunidades e desafios relacionados à aplicação da IA na gestão de passaportes de materiais. Os resultados deste estudo reforçam o potencial transformador da IA na construção civil, ao promover maior sustentabilidade, rastreabilidade e eficiência na gestão de recursos, alinhando-se aos princípios da economia circular.

O protocolo PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*) estabelece diretrizes essenciais para a condução e relato de revisões sistemáticas e meta-análises. A declaração PRISMA 2020, que atualiza a versão de 2009, inclui uma lista de checagem com 27 itens organizados em sete seções, além de um modelo de fluxograma adaptável para revisões sistemáticas originais e atualizadas. Este protocolo fornece orientações detalhadas para a elaboração de protocolos de revisões, garantindo que todas as etapas do processo, desde a formulação da pergunta de pesquisa até a disseminação dos resultados, sejam adequadamente documentadas e relatadas (Page *et al*., 2022). A terceira etapa concentrou-se na avaliação da aplicação da IA na gestão dos passaportes de materiais. Assim, foram identificadas tecnologias relevantes, como aprendizado de máquina (*machine learning*), processamento de linguagem natural e análise preditiva. A análise incluiu estudos de caso e exemplos práticos em que essas tecnologias foram empregadas para melhorar a eficiência e precisão na gestão documental, destacando benefícios e resultados obtidos.

A análise qualitativa foi baseada na interpretação dos dados coletados por meio da revisão sistemática e da análise de conteúdo dos passaportes. Já a análise quantitativa foi aplicada quando pertinente, para avaliar a eficácia das tecnologias de IA em termos de desempenho e impacto na gestão dos documentos. A coleta e triagem de dados envolveu buscas em bases como *Scopus e Google Acadêmico,* realizadas em três etapas. A primeira consistiu em buscas iniciais com filtros predefinidos como: ano, palavras-chave, idioma, citações; já na segunda, em ajustes nas estratégias com apoio de ferramentas de IA para refinar as palavras-chave; além de limitar os filtros e a terceira etapa, consistiu na seleção criteriosa dos artigos com base na relevância temática e qualidade metodológica. Termos como “passaportes de materiais”, “Inteligência Artificial”, “sustentabilidade” e “economia circular” foram utilizados, aliados a operadores booleanos (AND; OR), com o protocolo PRISMA, que visa critérios de elegibilidade (inclusão e exclusão de estudos), as fontes de dados, a estratégia de busca, o método de extração de dados e a avaliação de risco (Page *et al*., 2022), para garantir uma busca mais eficiente de artigos relevantes.

2.1. DEFINIÇÃO DAS QUESTÕES RELEVANTES PARA A PESQUISA

Para conduzir esta pesquisa sobre a integração de IA e tecnologias na análise e gestão de passaportes de materiais, foi necessário definir questões relevantes que guiaram a investigação. Primeiramente, foi essencial compreender os componentes e funções dos passaportes de materiais na construção civil, para estabelecer uma base sólida sobre o que esses documentos representam e como são utilizados. Em seguida, a pesquisa do artigo explorou como a Inteligência Artificial (IA) e tecnologias podem ser aplicadas para melhorar a análise desses passaportes, investigando as técnicas específicas, como aprendizado de máquina e processamento de linguagem natural, que podem otimizar a coleta e interpretação de dados. Adicionalmente, a pesquisa deve examinar como a integração da IA pode impactar a tomada de decisões e o planejamento em projetos de construção, e quais são as melhores práticas para a sua implementação bem-sucedida.

2.2. ANÁLISE DE ARTIGOS MAIS RELEVANTES

Após a análise sistemática da literatura, foram identificados 7 artigos de maior relevância para o estudo, presentes na Tabela 1. A escolha desses estudos reflete a eficácia da abordagem metodológica adotada e proporciona uma base sólida para a discussão e análise aprofundada no contexto da pesquisa.

Nome do artigo	autores	Local	Palavras- chave	Descrição
1-Causal AI-powered Digital Product Passports for enabling a circular and sustainable manufacturing ecosystem	Ompusunggu, Agusmian P.Tjahjowidodo, Tegoeh Witjaksono, H	Google Acadêmico	Sustainability, Circularity, Manufacturing, Digital Product Passport, Causal AI, Digital Twin (DT), Ontologies	O artigo propõe um framework para o DPP, utilizando IA causal para otimizar a sustentabilidade e transparência.
2-Data requirements and availabilities for material passports: A digitally enabled framework for improving the circularity of existing buildings ",	Sultan Çetin", , Deepika Raghu", ", Meliha Honic", Ad Straub", Vincent Gruis	Scopus	Circular economy; Digitalisation; Material passports ; Building industry; Stakeholder identification; Data requirements	Framework para passaportes de materiais em edifícios existentes.
3-Bim Methodology for Cost Analysis, Sustainability, and Management Of Steel Structures with reconfigurable joints for Industrial Structures	Xabier Pereiro, Manuel Cabaleiro, Borja Conde, Belén Riveiro	Scopus	Steel structures; Circular economy;Design for deconstruction; Industrial structures ;Reconfigurable joints;Sustainable structures	BIM analisa custo e sustentabilidade de estruturas
4-Barriers for data management as an enabler of circular economy: an exploratory study of the Norwegian AEC-industry	A. Bellini; S. Bang	Google Acadêmico	Material passports ; Building industry;	Estudo sobre barreiras na gestão de dados para economia circular.
5-Digitizing material passport for sustainable construction projects using BIM	Islam Atta, Emad S. Bakhoum, Mohamed M. Marzouk	Scopus	Circular economy; Digitalisation; Material passports; Building industry; Stakeholder identification; Data requirements	Ferramenta de Passaporte de Materiais melhora a sustentabilidade na construção.
6-Urban transformation processes and material stock techniques to facilitate circular economy and urban resilience	George Suciu; Ioana Petre; Cosmina Stalidi	google acadêmico	Surveys, Roads, Buildings, Urban planning, Laboratories, Recycling, Wastewater	Projeto CREATE apoia estratégias de economia circular na construção sustentável.
7- Industry 5.0 and the Circular Economy: Utilizing LCA with Intelligent Products	Chris Turner; John Oyekan; Wolfgang Garn; Cian Duggan;Khaled Abdou	Google Acadêmico	intelligent products; smart products; Industry 4.0; Industry 5.0; Society 5.0; circular economy; human centric manufacturing; human in the loop; Life Cycle Assessment (LCA)	Industry 5.0 usa LCA e produtos inteligentes para sustentabilidade e circularidade.

Tabela 1: Aplicações e Benefícios da Inteligência Artificial na Gestão de Passaportes de Materiais.
Fonte: os autores (2024).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. ANÁLISE DE ARTIGOS SOBRE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL E PASSAPORTE DE MATERIAIS

A integração da Inteligência Artificial (IA) nos passaportes de materiais na construção civil representa um avanço significativo na busca por práticas sustentáveis e eficientes (Ompusunggua *et al*., 2024). À medida que a indústria enfrenta desafios crescentes relacionados ao consumo de recursos e à geração de resíduos, o uso de tecnologias digitais se torna essencial para otimizar a

gestão de materiais ao longo do ciclo de vida dos edifícios. Os avanços significativos da IA podem transformar a maneira como as informações são coletadas e analisadas, facilitando a identificação de materiais que podem ser reutilizados ou reciclados ao final da vida útil dos edifícios (Atta *et al*., 2021). Ao aplicar algoritmos de aprendizado de máquina, ou *machine learning* (ML), é possível prever o desempenho dos materiais em diferentes condições e sugerir alternativas mais sustentáveis. Esse tipo de análise não apenas melhora a eficiência operacional, mas também contribui para a redução das emissões de carbono, alinhando-se com os objetivos da economia circular (Pereiro *et al*., 2023). Além disso, a utilização de gêmeos digitais em conjunto com passaportes de materiais permite uma visualização em tempo real das condições e do desempenho dos componentes de um edifício (Ompusunggua *et al*., 2024). A IA pode processar dados de sensores e outras fontes em tempo real, possibilitando a manutenção preditiva e a otimização de processos. Essa capacidade de antecipar problemas e identificar oportunidades de melhoria pode resultar em significativas economias de tempo e recursos, promovendo uma construção mais sustentável (Bellini e Bang, 2022).

No entanto, a adoção de tecnologias digitais, como o BIM, incluindo a IA, enfrenta barreiras que devem ser superadas (Bellini e Bang, 2022). A falta de interoperabilidade entre sistemas, a resistência cultural à mudança e a escassez de competências são desafios que precisam ser abordados para que a integração seja bem-sucedida. A colaboração entre diferentes atores da cadeia de valor é fundamental para garantir que as informações sejam compartilhadas e utilizadas de maneira eficaz, maximizando o potencial dos passaportes de materiais (Çetin *et al*., 2023). Em suma, a IA tem um papel relevante no fortalecimento dos PDMs na construção civil, promovendo uma gestão de dados mais eficiente e sustentável (Ompusunggua *et al*., 2024). À medida que a indústria se adapta às demandas de um mundo em mudança, a combinação de IA e práticas circulares não apenas aprimora a eficiência operacional, mas também contribui para um futuro mais sustentável. A implementação dessas tecnologias pode ser um catalisador para a inovação, permitindo que a construção civil avance rumo a um modelo mais circular e responsável (Atta *et al*., 2021).

A integração da IA na gestão de passaportes de materiais representa uma inovação significativa na indústria da construção, proporcionando não apenas eficiência, mas também melhorias em sustentabilidade e rastreabilidade (Ompusunggua *et al*., 2024; Atta *et al*., 2021). A análise crítica dos artigos selecionados resultou em alguns dados e informações sobre como a IA pode otimizar processos, desde a coleta de dados até a tomada de decisões informadas, alinhando-se com as necessidades da economia circular (Çetin *et al*., 2023). Esses estudos não apenas evidenciam o potencial transformador da tecnologia, mas também destacam as práticas mais eficazes para sua implementação (Pereiro *et al*., 2023). Além disso, os resultados apontam para uma crescente adoção de outras tecnologias digitais, como o *Building Information Modeling* (BIM), *Digital Twins*, que se inter-relacionam com os PDMs. Essa interseção permite uma gestão mais integrada e eficiente, contribuindo para a sustentabilidade ao longo do ciclo de vida dos produtos. A análise também revela os desafios enfrentados, como a necessidade de garantir a interoperabilidade dos dados e superar a resistência à mudança por parte dos usuários (Bellini, Bang, 2022; Atta *et al*., 2021). A seguir, são apresentados os principais resultados obtidos a partir da metodologia aplicada.

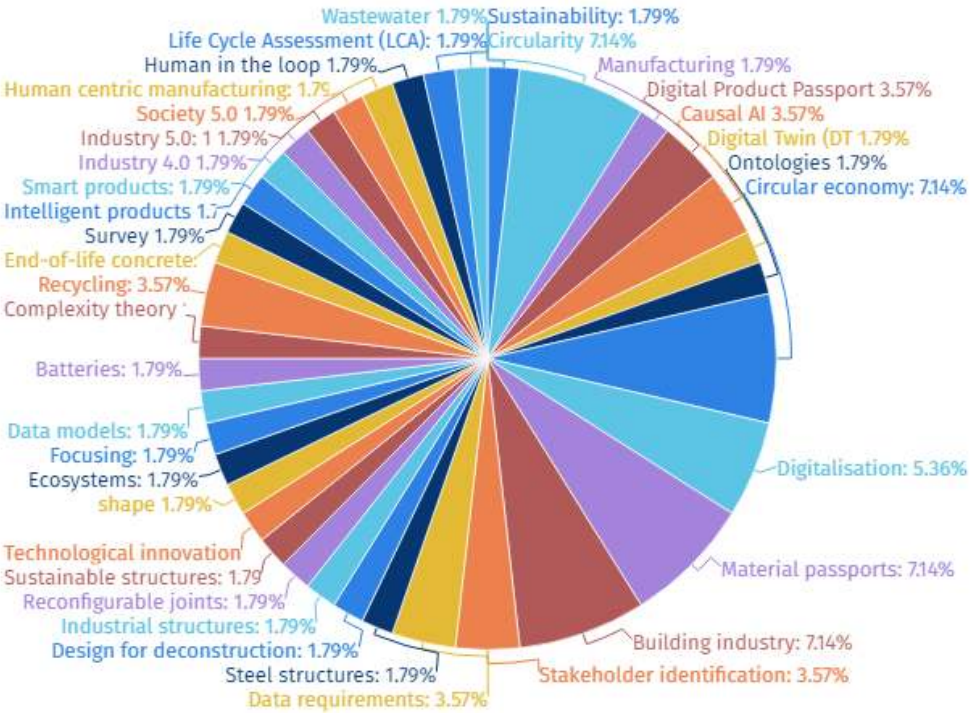


Figura 4: Gráfico das palavras-chaves
Fonte: os autores (2024).

3.2. ESTADO DA ARTE ATUAL DAS APLICAÇÕES DE IA NA GESTÃO DOS DADOS

A IA tem se destacado como uma ferramenta transformadora na gestão de dados e processos na indústria da construção e manufatura, particularmente no contexto de economia circular e sustentabilidade. Vários artigos exploram como tecnologias emergentes, como o PDM e a IA causal, estão sendo integradas para otimizar a gestão de materiais e promover práticas sustentáveis. O uso de IA pode ser útil para aprimorar a rastreabilidade e a transparência, oferecendo uma visão detalhada do ciclo de vida dos produtos e contribuir com o Passaporte de Materiais, desde a fabricação até o fim de sua vida útil. Esses avanços são imprescindíveis para enfrentar desafios como a falta de informações precisas sobre materiais e a necessidade de sistemas mais eficientes para a recuperação e reciclagem de produtos.

Além disso, o conceito de *Digital Twin (DT)* e ontologias, mostrado no artigo de Ompusunggua *et al*. (2024), desempenham um papel significativo na transformação digital dos processos industriais. O processo BIM, com a utilização de *DTs* em combinação com PDM permite a simulação e a monitorização em tempo real dos produtos e estruturas, facilitando a gestão e a otimização das operações. Os estudos sugerem que a implementação de modelos ontológicos pode melhorar a interoperabilidade entre diferentes sistemas e domínios de informação, o que é essencial para a integração de dados complexos e a implementação eficaz de estratégias de economia circular. Por outro lado, a aplicação de IA na gestão de materiais e estruturas de aço e na construção sustentável também é abordada em pesquisas que destacam a importância de estruturas reconfiguráveis e a avaliação de sustentabilidade ao longo de múltiplas reconfigurações. A IA ajuda a avaliar a viabilidade econômica e ambiental de diferentes soluções construtivas, fornecendo informações primordiais para a tomada de decisões informadas. Assim, a IA está se consolidando como uma ferramenta essencial para enfrentar desafios complexos na gestão e sustentabilidade de recursos na indústria da construção e manufatura, principalmente na gestão desses dados.

3.3. PRINCIPAIS BENEFÍCIOS E DESAFIOS AO COMBINAR PASSAPORTES DE MATERIAIS COM IA

Com os dados sobre as aplicações de IA, conforme descrito na Tabela 2, na gestão de materiais e processos nas indústrias da construção e manufatura será possível:

1. Desenvolver Modelos de Avaliação de Sustentabilidade: Ao usar a ferramenta de IA, que analise e preveja o impacto ambiental e econômico de novos materiais e técnicas de construção, pode ajudar na tomada de decisões mais precisas sobre o uso de materiais recicláveis e sustentáveis (Atta *et al*., 2021); **2. Criar Simulações no processo BIM e com *DTs*:** As simulações detalhadas (Ompusunggua *et al*., 2024) para modelar e monitorar o desempenho de estruturas e produtos ao longo de seu ciclo de vida podem incluir a simulação de diferentes cenários de uso e a avaliação do impacto das mudanças de projeto ou de processos na sustentabilidade e na eficiência operacional; **3. Implementar Sistemas de Gestão de Dados Avançados:** Construir e implementar sistemas de gestão de dados que integrem IA para melhorar a interoperabilidade entre diferentes plataformas e sistemas de informação pode envolver o desenvolvimento de ontologias que ajudam a padronizar e integrar dados de diferentes fontes, facilitando a análise e o compartilhamento de informações (Pereiro *et al.*, 2023); **4. Desenvolver Ferramentas de Avaliação e Monitoramento:** A criação de ferramentas e aplicativos que utilizem IA para avaliar e monitorar a conformidade com os princípios da economia circular, inclusive em tempo real (Çetin *et al*., 2023). Por exemplo, uma ferramenta pode ser desenvolvida para calcular indicadores de sustentabilidade, como a pontuação de desmontagem e recuperação, ajudando as partes interessadas a fazerem escolhas mais sustentáveis na fase de design e construção; **5. Apoiar Iniciativas de Pesquisa e Desenvolvimento:** Aplicar os dados para apoiar pesquisas adicionais e inovações tecnológicas no campo da IA e sustentabilidade (Atta *et al*., 2021; Pereiro *et al*., 2023), identificando lacunas na pesquisa atual e propondo novos projetos que abordem essas áreas, contribuindo para o avanço da tecnologia e melhores práticas na indústria.

Aspecto	**Ferramenta: Digital Twin (DT) Digital Product Passaport (DPP); Ontologias**
Benefício 1	Aprimoramento da rastreabilidade e transparência: IA melhora a visibilidade do ciclo de vida dos produtos, desde a fabricação até o fim de sua vida útil.
Benefício 2	Otimização da gestão de dados: A IA casual ajuda a analisar dados complexos e prever impactos ambientais, facilitando a tomada de decisões sustentáveis
Desafio 1	Qualidade, interoperabilidade e segurança dos dados: Garantir a integridade e a compatibilidade dos dados entre diferentes sistemas e plataformas.
Desafio 2	Implementação e integração tecnológica: Integrar novas tecnologias como DPP e IA com sistemas existentes pode ser complexo e exigir adaptações significativas, especialmente em contextos onde existe preconceito ou falta de recursos para investir em inovação tecnológica

Tabela 2: Aplicações e Benefícios da Inteligência Artificial na Gestão de Passaportes de Materiais.
Fonte: os autores (2024).

Os estudos mostraram que a integração da IA nos passaportes de materiais elevou significativamente a rastreabilidade e eficiência operacional, contribuindo para a redução de emissões e otimização dos recursos na construção civil, com contribuições relevantes para políticas de economia circular e inovação tecnológica, principalmente no setor de construção civil.

4. CONCLUSÕES

A integração da Inteligência Artificial (IA) no funcionamento e gestão de passaportes digitais de materiais (PDM) representa um avanço significativo para a indústria da construção, podendo promover eficiência, sustentabilidade e rastreabilidade. A análise dos artigos revisados revelou que a IA não apenas otimiza a coleta e interpretação de dados, mas também facilita a tomada de decisões informadas, alinhando práticas construtivas às exigências da economia circular. Outras tecnologias digitais, como o BIM e *Digital Twins,* emergem como ferramentas complementares para a visualização e monitoramento em tempo real, permitindo uma gestão mais eficaz dos recursos ao longo do ciclo de vida dos materiais. No entanto, a implementação bem-sucedida dessas tecnologias enfrenta desafios, incluindo a necessidade de garantir a interoperabilidade dos dados e lidar com a resistência à mudança por parte dos usuários.

Apesar dos resultados serem promissores com novas tecnologias que podem ser aplicadas nas áreas da construção e afins, este estudo foi limitado pela predominância de análises teóricas, amostras restritas e pouca diversidade geográfica entre os artigos revisados, o que pode comprometer a generalização das conclusões. Além disso, é fundamental promover a colaboração entre os diferentes autores e investir em capacitação. Com a superação desses obstáculos, a combinação de IA e passaportes de materiais pode catalisar uma transformação significativa no setor, contribuindo para um futuro mais circular, sustentável e responsável na construção civil. Recomenda-se que futuras pesquisas implementem modelos de IA e passaportes digitais de materiais em contextos empíricos variados, com foco na integração tecnológica e nos obstáculos práticos de adoção para fortalecer e ampliar os achados iniciais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ATTA, I.; BAKHOUM, E. S.; MARZOUK, M. M. Digitizing material passport for sustainable construction projects using BIM. **Journal of Building Engineering**, Egito, v. 43, n. 3, p. 1–1, 3 set. 2021.

BELLINI, A. *et al*. Barriers for data management as an enabler of circular economy: an exploratory study of the Norwegian AEC-industry. Emerging Concepts for Sustainable Built Environment (SBEfin2022), Noruega, 2022, v. 77, 15 out. 2022. **IOP Conference Series**: Earth and Environmental Science, p. 1–11.

ÇETIN, S.; STRAUB, A.; GRUIS, V.; RAGHU, D.; HONIC, M. Digitalization for a circular economy in the building industry: Multiple-case study of Dutch social housing organizations. **Journal of Cleaner Production**, Países Baixos/Suíça, 2023, v. 40, n. 230, 11 set. 2023. Resources, Conservation & Recycling Advances, p. 422–437.

FERREIRA ALVES, G. **Passaporte de Materiais a partir de modelagem da informação da construção**: aplicação utilizando Revit e Dynamo. 2023. 132 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2023.

HANSEN, K.; BRAUNGART, M.; MULHALL, D. Materials Passports: Optimizing value recovery from materials. ICE Publishing, v. 170, n. 1, p. 1–4, 2016b. Resource Re-Pletion. Role of Buildings. In: **The Springer Encyclopedia of Sustainability Science and Technology.** Sustainable Built Environments. New York: Springer, 2012. p. 502–525.

MORAIS, G. A. T. de; ALMEIDA FILHO, A. T. de; PALHA, R. P. BIM para gerenciamento, operação e manutenção de instalações: revisão cientométrica e sistemática. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 24, e.131575, jan./dez. 2024.

MUNARO, M. R.; TAVARES, S. F. O passaporte de materiais de construção: solução circular em edificações como banco de materiais. In: Encontro Nacional De Tecnologia Do Ambiente Construído, 17., 2018, Foz do Iguaçu. **Anais...** Porto Alegre: ANTAC, 2018.

OMPUSUNGGUA, A. P.; TJAHJOWIDODO, T.; WICAKSANO, H. Causal AI-powered digital product passports for enabling a circular and sustainable manufacturing ecosystem. In: **12th International Conference on Through-life Engineering Services** – TESConf2024, 6–7 jun. 2024, Cranfield, UK.

PAGE, M. J.; MCKENZIE, J. E.; BOSSUYT, P. M.; BOUTRON, I.; HOFFMANN, T. C.; MULROW, C. D. *et al*. A declaração PRISMA 2020: diretriz atualizada para relatar revisões sistemáticas. **Rev Panam Salud Publica**, v. 46, e112, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.26633/RPSP.2022.112. Acesso em: 11 maio 2025.

PEREIRO, X. *et al*. BIM methodology for cost analysis, sustainability, and management of steel structures with reconfigurable joints for industrial structures. **Journal of Building Engineering**, Espanha, 2023, v. 77, n. 456, 15 out. 2023. Resources, Conservation & Recycling Advances, p. 480–498.

PETHERSON, E. *et al*. **Inteligência Artificial na Gestão de estoque**. Logística, São Paulo, v. 1, p. 1–17, 17 set. 2021.

SUCIU, G.; PETRE, I.; STALIDI, C. Urban transformation processes and material stock techniques to facilitate circular economy and urban resilience. In: **2023 15th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI)**, Bucharest, Romania, 2023, p. 1–5. doi: 10.1109/ECAI58194.2023.10194029.

TURNER, C. *et al*. Industry 5.0 and the Circular Economy: Utilizing LCA with Intelligent Products. In: **2023 12th International Conference on Through-life Engineering**, London, UK, 2022, v. 15, n. 1, p. 1–11, 10 nov. 2022.