Indústria 5.0: Oportunidades e Desafios para Arquitetura e Construção

13º Simpósio Brasileiro de Gestão e Economia da Construção e 4º Simpósio Brasileiro de Tecnologia da Informação e Comunicação na Construção

ARACAJU-SE | 08 a 10 de Novembro

[1]POTENCIAIS APLICAÇÕES DAS TECNOLOGIAS DA INDÚSTRIA 4.0 NA CONSTRUÇÃO MODULAR

Potential applications of Industry 4.0 technologies in modular construction

Beatriz Martins Folador
Universidade Federal de Santa Catarina | Florianópolis, Santa Catarina | beatriz.martins.folador@gmail.com

Prof. Ricardo Juan José Oviedo Haito, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina | Florianópolis, Santa Catarina | ricardo.oviedo.haito@ufsc.br

RESUMO

A indústria da construção, embora globalmente significativa, tem uma performance menor em comparação a outros setores da economia. Em contrapartida, a construção modular, envolvendo a produção de componentes (módulos) em uma fábrica, apresenta maior agilidade, economia, sustentabilidade e qualidade. Ademais, a adaptação da Indústria 4.0 para a construção, ou Construção 4.0, promete vantagens em termos de eficiência e redução de desperdícios, aspectos essenciais para o aumento da competitividade no setor da construção. No entanto, pouco se sabe sobre a aplicação das tecnologias da Construção 4.0 na construção modular, levando à pergunta de quais tecnologias da Indústria 4.0 podem aplicar-se em etapas da construção modular? Consequentemente, neste artigo investigaram-se aplicações de tecnologias da Indústria 4.0 com potencial de uso nas etapas da construção modular, com base na revisão de literatura. Especificamente, identificaram-se aplicações relativas a dezenove tecnologias com potencial de uso em cinco fases da construção modular (planejamento e projeto; montagem *off site*; logística; montagem *on site*; e uso e ocupação). Esta identificação contribui com o conhecimento de usos potenciais de tecnologias da Indústria 4.0 na construção modular, bem como na forma de mapeá-las.

Palavras-chave: Construção modular; Construção *offsite*; Construção 4.0; Indústria 4.0.

ABSTRACT

The construction industry, although globally significant, has lower performance compared to other sectors of the economy. In contrast, modular construction, involving the production of components (modules) in a factory, offers greater agility, cost savings, sustainability, and quality. Furthermore, the adaptation of Industry 4.0 for construction, or Construction 4.0, promises advantages in terms of efficiency and waste reduction, essential aspects for increasing competitiveness in the construction sector. However, little is known about the application of Construction 4.0 technologies in modular construction, leading to the question of which Industry 4.0 technologies can be applied in stages of modular construction? Consequently, this article investigates the applications of Industry 4.0 technologies with potential use in stages of modular construction, based on literature review. Specifically, applications related to nineteen technologies with potential use in five phases of modular construction (planning and design; off-site assembly; logistics; on-site assembly; and use and occupation) were identified. This identification contributes to the knowledge of potential uses of Industry 4.0 technologies in modular construction, as well as how to map them.

Keywords: *Modular Building; Offsite construction; Construction 4.0; Industry 4.0*.

1 INTRODUÇÃO

O desempenho do setor da construção apresenta-se inferior quando comparado a outros setores industriais (BARBOSA et al., 2017), manifestado pela sua baixa produtividade, atrasos e imprecisão de custos (OTI-SARPONG et al., 2021). Em contrapartida à ineficiência da construção tradicional, a construção fora do canteiro (*offsite construction* - OSC), especialmente a construção modular, mostra-se uma alternativa mais rápida e econômica (BERTRAM et al., 2019). Este modo de construir diferencia-se pela produção de componentes, denominados módulos, em ambiente fabril (FERDOUS et al., 2019), para seu posterior transporte e montagem no canteiro. O conceito de módulo associa-se a uma unidade funcional e independente, que permite compor uma construção através de combinações entre eles (BAÚ, 2021); sendo este modo mais sustentável, produtivo e seguro, com maior qualidade do produto (KAMALI et al., 2018).

Complementarmente, outra alternativa para melhorar o desempenho do setor relaciona-se com a Construção 4.0, que é a adaptação da Indústria 4.0 no setor da construção civil, mediante a integração dos mundos físicos e digitais, a partir da comunicação e interação automática entre objetos inteligentes (SAWHNEY, RILEY e

[1]FOLADOR, B. M.; OVIEDO-HAITO, R.J.J. Potenciais aplicações das tecnologias da Indústria 4.0 na construção modular. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GESTÃO E ECONOMIA DA CONSTRUÇÃO, 13., 2023, Aracaju. **Anais [...].** Porto Alegre: ANTAC, 2023.

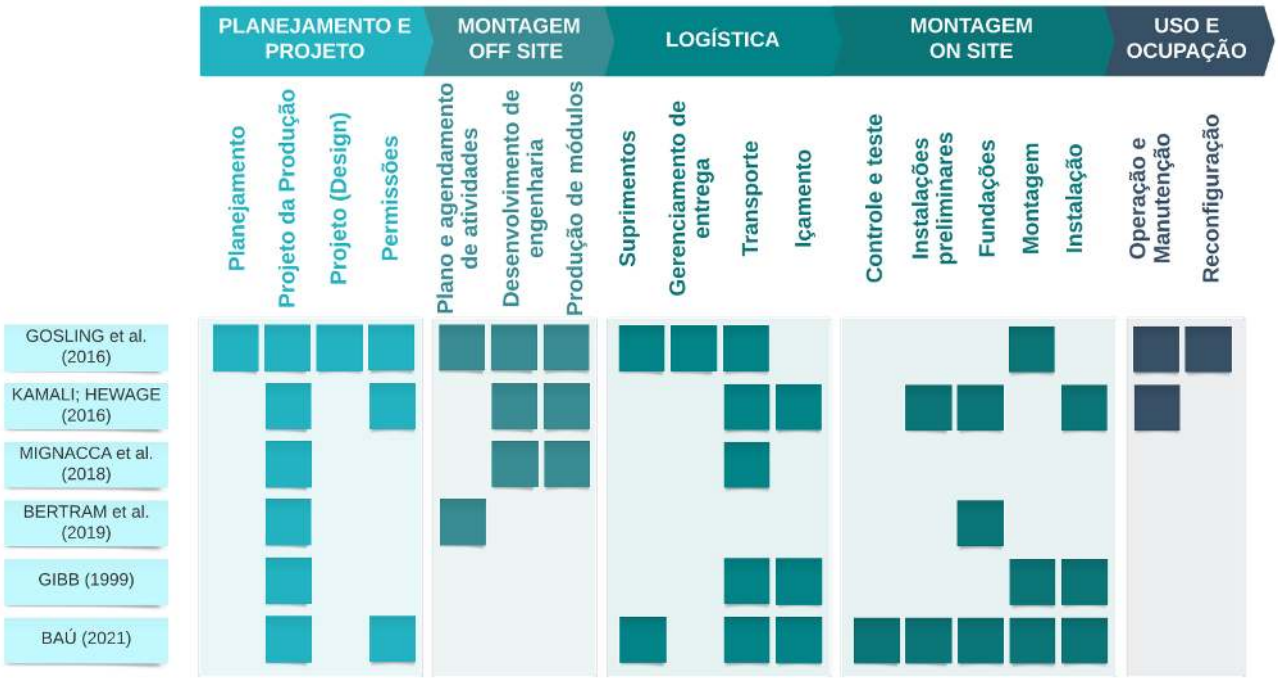
IRIZARRY, 2020). Essas tecnologias podem ser divididas em dois meios: o meio digital em que as tecnologias operam de forma exclusiva ou majoritária no mundo digital e o meio físico em que as tecnologias realizam ações no mundo físico, como a coleta de dados (FOLADOR, 2022). Dentre as vantagens da Construção 4.0 encontram-se: redução de ineficiência e desperdício; melhor gerenciar os resultados da produção ao longo do ciclo de vida, integração entre os agentes; melhoria do custo e tempo gasto, aumento da agilidade, da qualidade do produto e da segurança (DALLASEGA, RAUCH e LINDER, 2018; NOWOTARSKI E PASLAWSKI, 2017; OESTERREICH; TEUTEBERG, 2016; SAWHNEY, RILEY e IRIZARRY, 2020). Isto permite aprimorar o *design*, o gerenciamento, as operações e a tomada de decisões em empreendimentos de construção (OSUNSANMI et al., 2020).

Nessa conjuntura, tanto a Construção 4.0 quanto a construção modular mostram-se como alternativas capazes de potencializar a performance da construção. Sobre ambos os assuntos existe uma extensa literatura. Porém, pouco se sabe sobre a vinculação de tecnologias relativas à Construção 4.0 no contexto da construção modular, e suas possíveis aplicações. Como decorrência, uma pergunta a responder seria: quais tecnologias da Indústria 4.0 podem aplicar-se em etapas da construção modular?

1.1 Revisão Bibliográfica

As atividades e etapas pertencentes à construção modular divergem na literatura. Porém, conforme mostrado na Figura 1, convergem em cinco etapas (planejamento e projeto; montagem *off site*; logística; montagem *on site*; e uso e ocupação).

Figura 1 - Atividades identificadas nos processos de construção modular x autores



Fonte: Adaptado de Folador (2022).

A primeira etapa é o planejamento e projeto, que se refere à concepção inicial do projeto, tanto *design* como projetos de produção. Inclui atividades de coordenação, orçamentação e gestão das atividades de planejamento e permissões para as etapas seguintes de fabricação do módulo e preparação do canteiro. Quando finalizada, iniciam-se às montagens *on site* e *off site*, podendo acontecer de forma simultânea. No caso da construção no canteiro, ou montagem *on site*, primeiramente realizam-se atividades de terraplanagem, fundação e instalações preliminares. Enquanto isso, na fábrica (montagem *off site)* se produz o módulo que, quando finalizado, que é transportado até o canteiro. Esta etapa de transporte, logística, refere-se ao deslocamento do módulo da fábrica até o local do empreendimento. Já no canteiro, o módulo será içado e devidamente encaixado. Finalizada a montagem, realizam-se os acabamentos das conexões entre os módulos e, também, com outras instalações no canteiro de obras. Ainda na etapa de montagem *on site* realizam-se controles e testes de requisitos técnicos e de qualidade. Por fim, após a entrega da obra ao proprietário, inicia-se a fase de uso e ocupação, etapa relativa as atividades realizadas após a entrega da obra, nela inclui-se à ocupação, manutenção e eventuais alteração de leiaute.

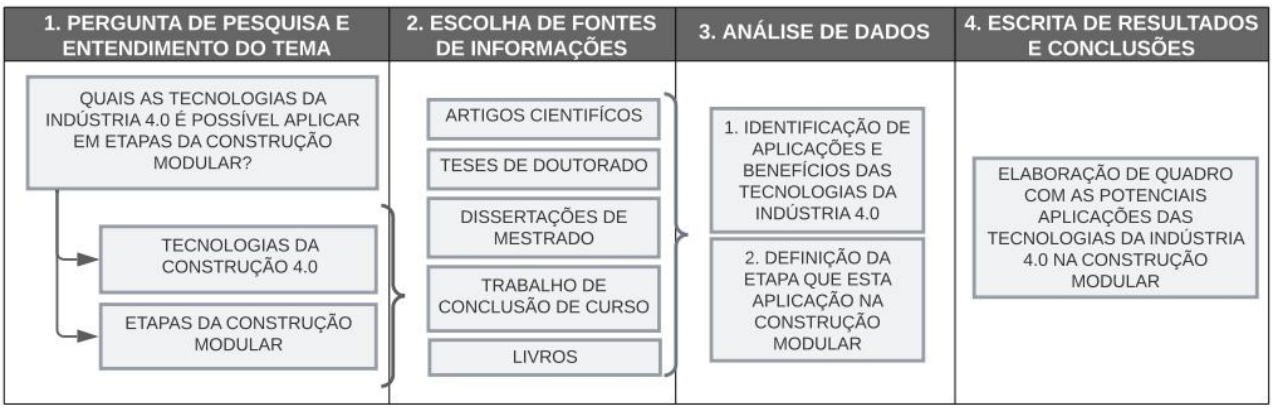
Complementarmente, entre as tecnologias associadas com a Construção 4.0 alguns autores (ALBERTIN et al., 2017; BEHZADAN e KAMAT, 2011; BETIATTO, 2021; DALLASEGA, RAUCH e LINDER, 2018; DOMDOUZIS, KUMAR e ANUMBA, 2007; FOLADOR, 2022; GARCIA, 2022; GOMES, 2010; SANTOS, 2020; SAWHNEY, RILEY e IRIZARRY, 2020) consideram: *Additive Manufacturing-AM* (manufatura aditiva), *Artificial Intelligence-AI* (inteligência artificial), *Augmented Reality-AR* (Realidade Aumentada-RA), *Big Data-BD, Blockchain-BC, Building Information Modeling-BIM, Cloud Computing-CC* (computação em nuvem), *Digital Twin-DT* (gêmeo digital), *Geographic Information System-GIS* (sistema de informação geográfica), *Global Positioning System-GPS* (sistema de posicionamento global), *Internet of the Things-IoT* (internet das coisas), *laser scanning, Radio Frequency Identification-RFID* (identificação por radiofrequência), *Mixed Reality-MR* (Realidade Mista-RM), *robotics* (robótica), *sensors* (sensor), *Unmanned Aerial Vehicle-UAV/drone* (Veículo Aéreo Não Tripulado-VANT), *Unmanned Land Vehicle-ULV* (Veículo Terrestre Não Tripulado-VTNT) e *Virtual Reality-VR* (Realidade Virtual-RV).

Como decorrência, a incorporação de tecnologias relativas à Indústria 4.0 na construção modular oferece potencializar os benefícios a elas atrelados, somando o potencial de uma produção mais organizada e menos dependente do canteiro de obras (construção modular) à eficiência decorrente da comunicação e interação automática entre objetos inteligentes (Indústria 4.0).

2 METODOLOGIA

Focando nas vantagens associadas às tecnologias vinculadas à Indústria 4.0, este artigo busca uma resposta para a pergunta: quais tecnologias da Indústria 4.0 podem aplicar-se em etapas da construção modular? Para respondê-la seguiram-se os passos ilustrados na Figura 2.

Figura 2: Metodologia de pesquisa



Fonte: Elaboração própria (2022).

Primeiramente, identificaram-se dezenove tecnologias associadas à Construção 4.0 nas dez referências comentadas no item de revisão bibliográfica. Posteriormente, na literatura buscou-se entender quais as suas aplicações e benefícios, e quais as etapas da construção modular em que estas poderiam ser aplicadas. Desta forma, usou-se amostragem baseada em teoria (PATTON, 1990), buscando artigos cujo conteúdo detalhasse aplicações de tecnologias vinculadas com a Indústria 4.0. Para tanto, em Google Scholar buscaram-se combinações entre as palavras chaves: Construção modular, Construção *offsite*, Construção 4.0, Indústria 4.0 e tecnologia (especificamente, cada uma das dezenove identificadas), tanto em inglês como em português. Na sequência, identificaram-se documentos como artigos e monografias contendo as aplicações.

As etapas relativas à construção modular foram levantadas, comparadas e divididas em cinco etapas (planejamento e projeto; montagem *off site*; logística; montagem *on site* e; uso e ocupação) conforme mostrado na Figura 1. Em paralelo, levantaram-se aplicações vinculadas com tecnologias associadas à Construção 4.0. Estas foram registradas em uma planilha eletrônica, segundo tecnologia, atividade/aplicação e autor (vide https://docs.google.com/spreadsheets/d/1bYErc-jhQRtjZOWqzVpHlYUfROgnNesRl3fAFPqSXHA/edit#gid=0). Esta atividade/aplicação conteve um trecho descrevendo alguma aplicação da tecnologia. Na sequência, atribuíram-se estas aplicações de acordo com seu potencial de contribuir com as atividades das etapas da construção modular. A seção seguinte mostra os resultados alcançados.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 3 foi elaborada com a finalidade de mostrar possíveis aplicações das tecnologias da Construção 4.0 nas etapas da construção modular. Nela, estas etapas dividem-se em cinco colunas, uma para cada uma das etapas identificadas: planejamento e projeto; montagem *off site*; logística; montagem *on site* e; uso e ocupação. Por sua vez, cada coluna contém duas subdivisões (uma verde e uma azul), separando as tecnologias do meio físico daquelas do meio digital. Cada subdivisão contém ícones que representam a tecnologia, acompanhados da descrição de potenciais usos desta tecnologia na etapa indicada (conforme a coluna). Para exemplificar a utilidade da Figura 3, a sua leitura pode iniciar-se pela etapa de planejamento e projeto. Nela, o *laser scanning*, é uma tecnologia que atua no meio físico, realizando a coleta de dados e viabilizando sua digitalização para o meio digital, mediante modelos 3D. Adicionalmente, nesta etapa alocaram-se tecnologias como a RV, que permitem a visualização dos componentes do projeto de forma tridimensional no meio digital.

A fim de resumir as aplicações das tecnologias nas etapas, complementando a Figura 3, os tópicos a seguir dividiram-se de acordo com as cinco etapas da construção modular identificadas. Tais tópicos contêm exemplos da utilização de tecnologias associadas à Construção 4.0, bem como os benefícios relacionados.

3.1 Planejamento e Projeto

Durante a etapa de planejamento e projeto, diversas atividades são desenvolvidas, incluindo gestão de projetos, orçamentação, planejamento de etapas futuras, preparação do canteiro, *design* e produção de projetos (FOLADOR, 2022). Para aprimorar a eficiência e comunicação nesta fase, há várias tecnologias disponíveis, como BIM, RA e RV.

O BIM é uma das tecnologias centrais da Indústria 4.0 aplicada à construção (OESTERREICH; TEUTEBERG, 2016) e permite a colaboração eficiente de todos os membros da equipe durante todo o ciclo de vida do empreendimento (NEELAMKAVIL, 2009). Dentre outros, as suas ferramentas de modelagem relacionam o escopo do projeto com o cronograma, simulando a sua execução (NEELAMKAVIL, 2009). Seu uso em conjunto com RV permite a atualização automática e simultânea do *design* dos projetos (DU et al., 2018), o que poderia otimizar a gestão de projetos de construção modular, destacando a importância da inovação tecnológica para uma modelagem e simulação mais precisa dos projetos.

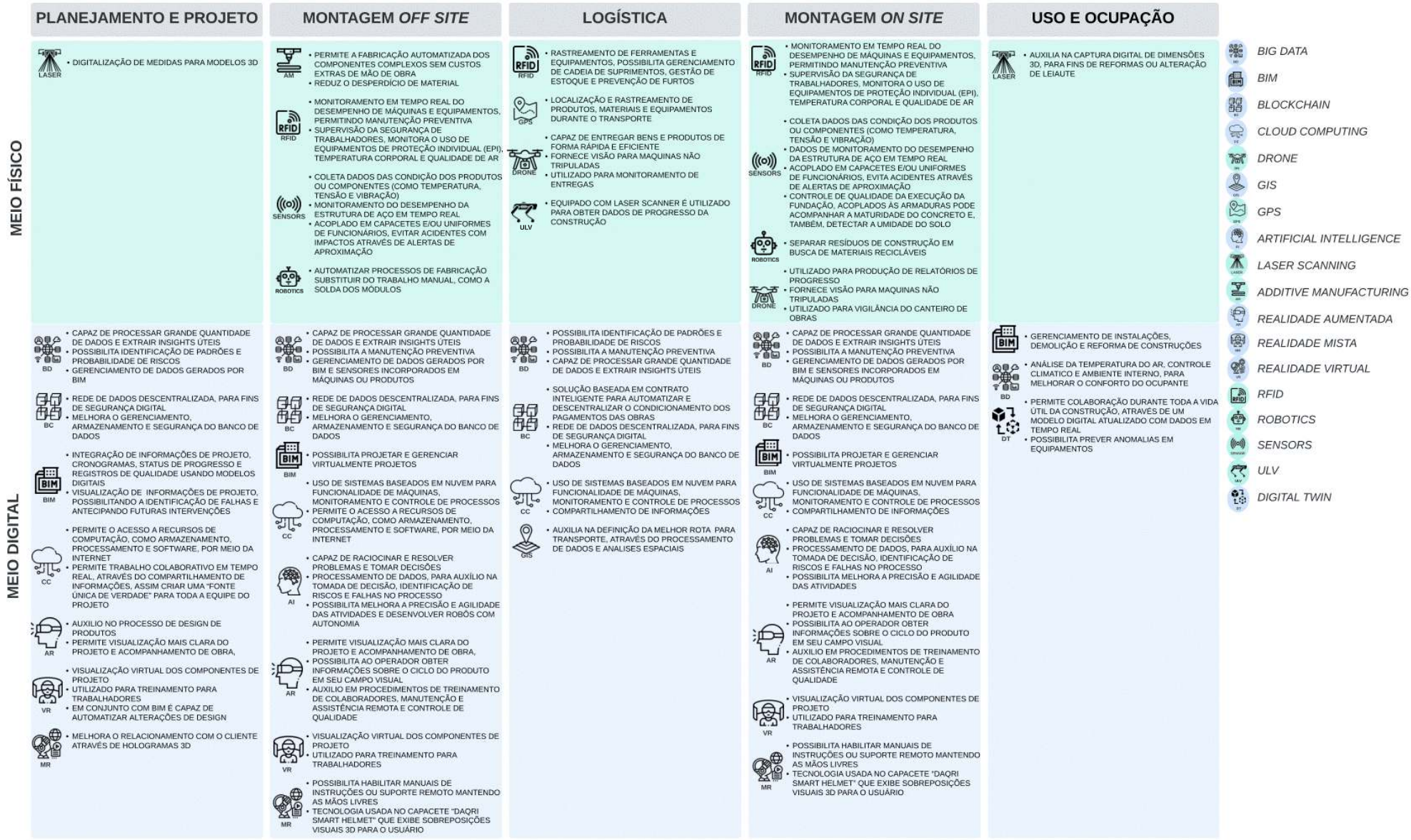
Adicionalmente, modelos BIM geram uma grande quantidade de dados. Nesse contexto, soluções de *Big Data* são capazes de identificar padrões e probabilidades futuras, aprimorando a tomada de decisões (OESTERREICH; TEUTEBERG, 2016). Segundo tais autores, esses dados e arquivos podem ser compartilhados em tempo real por meio da computação em nuvem, melhorando a comunicação entre fornecedores e membros da equipe na fase de projeto modular, favorecendo a colaboração na elaboração do projeto, previsibilidade de prazos e aprimoramento da tomada de decisões.

3.2 Logística

A logística na construção modular engloba planejamento logístico, o transporte e içamento do módulo e gestão de suprimentos, sendo uma etapa intermediária entre a fábrica [montagem *on site*] e o canteiro [montagem *off site*]. Nela, algumas tecnologias como GPS, SIG, RFID e *Blockchain* podem trazer benefícios.

O uso de geotecnologias possibilita a coleta, processamento, análise e disponibilidade de informação com referência geográfica (ROSA, 2005). Dentre elas, o GPS possibilita habilitar um sistema automático de localização e rastreamento ao longo de todo o trajeto, da fábrica até o canteiro (SARDROUD; LIMBACHIY, 2011). Já o SIG, através do processamento de dados, é capaz de definir a rota mais adequada (NETO; LIMA, 2006). A coleta de dados utilizando RFID, mediante a transmissão de informações para monitoramento, permite o rastreamento e fiscalização dos componentes, auxiliando na gestão de estoque e prevenção de furtos. Dessa forma, este conjunto de tecnologias aplicado à construção modular tem o potencial de fornecer trajetórias de transporte e gestão de suprimentos mais eficientes, através da adaptação de rotas e monitoramento de insumos em tempo real.

Figura 3: Potenciais aplicações de tecnologias da Construção 4.0 nas etapas da construção modular



Fonte: Elaboração própria (2022).

Adicionalmente, a gestão eficiente do fluxo de caixa é fundamental para o equilíbrio financeiro e entregas dentro do prazo. Nesse sentido, Hamledari e Fischer (2021) propõem um método para automatizar pagamentos em projetos de construção usando contratos inteligentes baseados em *Blockchain*. Para isso, utilizaram sensores instalados em *drones* ou em VTNTs para monitoramento do progresso da construção. Em seguida, em posse dos dados compartilhados referente aos serviços executados, o contrato inteligente automatiza os pagamentos, mediante transações registradas diretamente na *Blockchain*. A automatização do processo de pagamento por meio de *Blockchain* permite a automatização e descentralização desta atividade, favorecendo o aumento na transparência e na qualidade dos dados de custo e prazo (HAMLEDARI, FISCHER, 2021). Ademais, a eficiência no planejamento e gerenciamento da logística dos materiais, pode acarretar grande economia já que os insumos representam cerca de 50 a 60% do custo total de um empreendimento (KINI, 1999).

3.3 Montagem *Off Site*

A montagem *off site* reúne processos realizados em ambiente fabril (BAÚ, 2021). A *Smart Factory* (fábrica inteligente) é composta por um conjunto de tecnologias que visam automatizar o processo construtivo, como a modularização, a manufatura aditiva e a robótica (OESTERREICH e TEUTEBERG, 2016). A aplicação dessas tecnologias na construção modular, especificamente a manufatura aditiva (impressão 3D) e a robótica, traz potenciais benefícios para a execução de tarefas repetitivas e perigosas que podem afetar a saúde e segurança dos trabalhadores humanos.

Quanto à robótica, quando aplicada à soldagem, possibilita o aumento da eficiência, qualidade e capacidade de flexibilidade do processo, além de reduzir os custos trabalhistas (ROUT; DEEPAK; BISWAL, 2019). Shen et al. (2010), aborda o uso da soldagem robótica inteligente, capaz de rastrear a costura em tempo real, inspecionar a solda e controlar automaticamente os parâmetros de soldagem. Essa otimização aumenta a eficiência e qualidade da produção e soluciona a escassez de mão de obra qualificada (FERDOUS et al., 2019), além de garantir a segurança e saúde dos trabalhadores humanos ao substituí-los em tarefas perigosas e/ou repetitivas (CARDOSO, 2016). Complementarmente, as máquinas equipadas com dispositivos RFID permitem o monitoramento em tempo real de seus estados e desempenho, reduzindo os custos e os desperdícios no processo de fabricação (ZHONG et al., 2013).

Outra possibilidade de automatização é a impressão 3D, também conhecida como manufatura aditiva, é um processo de fabricação de peças em 3D por meio da adição de camadas sucessivas de material (CARDOSO, 2016). Segundo o autor, essa técnica permite criar peças com *designs* complexos e tamanhos variados. Esta tecnologia poderia ser utilizada em componentes arquitetônicos (OESTERREICH; TEUTEBERG, 2016), contribuindo para a minimização do desperdício de material, ao utilizar apenas a quantidade necessária, ao contrário dos métodos de usinagem convencionais (CARDOSO, 2016).

3.4 Montagem *In Loco*

Esta etapa aborda as atividades executadas no canteiro, do recebimento do módulo à finalização da construção modular. Nela inclui-se à fundação, instalações preliminares, montagem, instalações elétricas, hidráulicas e demais serviços para finalizar a obra. Como possíveis aplicações nessa fase, cita-se sensores, etiquetas RFID e veículos não tripulados, para rastreamento, monitoramento e desempenho de máquinas e/ou pessoas.

Sensores instalados em máquinas e equipamentos permitem enviar dados de desempenho para engenheiros analisarem e viabilizarem manutenções preditivas, reduzindo custos (ANDERL, 2014). Já etiquetas RFID integradas a outros dispositivos permitem rastrear e controlar em tempo real do uso de Equipamentos de Proteção Individual (EPI) pelos trabalhadores (OESTERREICH; TEUTEBERG, 2016). Também fornecem informações precisas para o processo de colaboração remota, controle e monitoramento (TRAPPEY; LU; FU, 2009). Dessa forma, o uso dessas tecnologias no canteiro auxilia na gestão de estoque, prevenção de furtos, segurança dos trabalhadores, mitiga a manutenção corretiva, reduzindo custos e diminuindo o risco de acidentes e atrasos na obra.

Outra fonte de benefícios é o uso de veículos não tripulados, como *drones* equipados com câmeras ou veículo terrestre equipados com *laser scanner*. Estes contribuem na captura da realidade física do local da construção e utilização dessas informações para criação de modelos digitais 3D (HAMLEDARI; FISCHER, 2021). Esses dados permitem obter relatórios de progresso (OESTERREICH; TEUTEBERG, 2016) e acompanhar o

cronograma físico da obra. Esse acompanhamento é fundamental, especialmente na construção modular, na qual é importante a entrega dos módulos na ordem programada, uma vez que ocupam grande espaço no canteiro de obras (BAÚ, 2021), impactando também nas etapas de montagem *off site* e logística.

3.5 Uso e Ocupação

Esta etapa envolve atividades relacionadas à ocupação, manutenção e eventuais mudanças no layout. Nela, a utilização de gêmeos digitais tem o potencial de revolucionar a gestão da informação para um modelo integrado focado em dados (GARCIA, 2022), trazendo melhorias no conforto para os ocupantes e acompanhamento em tempo real (STATSENKO, et al., 2022). Embora os gêmeos digitais possam ser aplicados em todas as fases, eles têm maior aplicabilidade na fase de uso e ocupação (GARCIA, 2022). Destarte, permitem a geração de modelos digitais precisos da construção para monitorar seu uso e favorecer a manutenção preventiva, mediante a coleta de dados em tempo real por meio de sensores (KHAJAVI et al., 2019).

Adicionalmente, com o auxílio de sensores monitorando a temperatura do ambiente e a qualidade do ar, o uso de *Big Data* permite o aumento do conforto durante a ocupação (STATSENKO, et al., 2022). Para este autor, esse conjunto de tecnologias possibilita criar um sistema de aquecimento e resfriamento inteligente, aumentando a satisfação dos usuários e fornecendo maior conforto e bem-estar.

3.6 Síntese

Dentre as tecnologias da Indústria 4.0 aplicadas à construção, o BIM em particular, pode desempenhar um papel central na colaboração eficiente ao longo de todo o ciclo de vida do empreendimento. Quando utilizado durante o planejamento e projeto, a sua combinação com tecnologias como a RA e RV melhoram a eficiência e comunicação. Ainda no intuito de favorecer a comunicação entre equipes, o compartilhamento de dados e arquivos em tempo real é possibilitado por meio da computação em nuvem que, quando usada em conjunto com *Big Data*, otimiza a gestão de projetos.

Isto facilitaria a gestão da construção modular, na qual há simultaneidade das etapas de montagem *off site* e montagem *on site*. Especificamente, na montagem *off site*, a robótica e a impressão 3D melhorariam a eficiência, qualidade e segurança. Na logística, tecnologias como GPS, SIG, RFID e *Blockchain* trariam benefícios, como rotas mais eficientes e monitoramento de suprimentos, assim como a agilidade/rapidez gerada pela automatização de processos (inteligência artificial e robótica). No canteiro de obras (*on site*), sensores e RFID permitiriam monitorar o desempenho e controle de estoques, bem como veículos não tripulados podem capturar dados para modelos 3D. O acompanhamento de processos e automação, por sua vez, permitirão tomadas de decisões mais apropriadas ao longo das etapas da construção modular.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A construção modular e a Construção 4.0 surgem como alternativas capazes de trazer benefícios à construção. O presente artigo buscou responder à pergunta “quais tecnologias da Indústria 4.0 podem aplicar-se em etapas da construção modular?”. Para alcançar esse objetivo, realizou-se uma pesquisa bibliográfica, na qual identificaram-se aplicações relativas às tecnologias da Construção 4.0 e às etapas da construção modular em que poderiam ser implementadas.

Em seguida, atribuíram-se as aplicações de acordo com seu potencial de contribuir com as atividades das etapas da construção modular. Como decorrência, os resultados obtidos permitiram atribuir possíveis aplicações relativas a dezenove tecnologias da Indústria 4.0, tanto tecnologias do meio físico quanto do meio digital, nas cinco etapas da construção modular identificas: planejamento e projeto, montagem *off site*, logística, montagem *on site* e uso e ocupação.

Desta forma, exemplificou-se que o uso do BIM, da RA e da RV na etapa de planejamento e projeto permite aprimorar a eficiência, comunicação e colaboração entre os participantes dos empreendimentos. Já em fábrica, é possível melhorar a velocidade, qualidade e precisão na produção, com o uso da robótica. Ademais, na logística, tecnologias como GPS, GIS e *Blockchain* favorecem um cenário automatizado de monitoramento, rastreamento e supervisão de materiais e pagamentos. No canteiro sensores, etiquetas RFID e veículos não tripulados viabilizam o rastreamento, monitoramento e desempenho de equipamentos, objetos e/ou pessoas. Por fim, na etapa de uso e ocupação, os gêmeos digitais e *Big Data* permitem o monitoramento em tempo

real, possibilitando conforto ao usuário e manutenções. A identificação destas aplicações potenciais é uma das contribuições deste artigo para o conhecimento do tema.

Estes possíveis usos foram identificados mediante a elaboração e utilização da Figura 3. Tal Figura permite visualizar de forma clara as possíveis aplicações dessas tecnologias nas diferentes etapas do ciclo construtivo modular, constituindo-se em outra das contribuições desta pesquisa.

Finalmente, como decorrência das limitações do método utilizado, recomenda-se como trabalhos futuros o levantamento sistematizado de aplicações de tecnologias da Indústria 4.0 aplicáveis à construção modular, bem como a utilização desta proposta em estudos de caso em empresas de construção modular como base para a aferição da maturidade no uso de tecnologias da Indústria 4.0 nesse tipo de empresas.

REFERÊNCIAS

ALBERTIN, Marcos Ronaldo et al. Principais inovações tecnológicas da indústria 4.0 e suas aplicações e implicações na manufatura. Em: SIMPÓSIO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, XXVI., 2017, Bauru, São Paulo, Brasil. **Anais[...]**, 2023. Tema: "Contribuições Da Engenharia De Produção Para Uma Economia De Baixo Carbono". Disponível em: <https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/60805>. Acesso em: 14 fev. 2023.

ANDERL, Reiner. Industrie 4.0-advanced engineering of smart products and smart production. Em: 19TH INTERNATIONAL SEMINAR ON HIGH TECHNOLOGY, 2014, Piracicaba, São Paulo, Brasil. **Anais[...]**, Technological Innovations in the Product Development, 2014

BARBOSA, Filipe et al. Reinventing construction: A route to higher productivity. **McKinsey Global Institute**, 2017. Disponível em: <https://www.mckinsey.com/businessfunctions/operations/our-insights/reinventing-construction-through-a-productivity-revolution>. Acesso em: 18 out. 2022.

BAÚ, Gabriela. **Construções modulares: Mapeamento do processo executivo de edificações em chassi de aço**. 2021. TCC (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Engenharia Civil, Florianópolis, Brasil, 2021. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/223394>. Acesso em: 26 set. 2022.

BEHZADAN, Amir H.; KAMAT, Vineet R. Integrated information modeling and visual simulation of engineering operations using dynamic augmented reality scene graphs. **Journal of Information Technology in Construction (ITcon)**, v. 16, n. 17, p. 259-278, 2011. ISSN 1874-4753.

BERTRAM, N. et al. Modular construction: From projects to products. **McKinsey & Company: Capital Projects & Infrastructure**, 2019. Disponível em: <https://www.mckinsey.com/industries/capital-projects-and-infrastructure/our-insights/modular-construction-from-projects-to-products>. Acesso em: 8 jun. 2022.

BETIATTO, Pâmela. **Perfil de inovação dos serviços ofertados por Construtechs brasileiras**. 2021. TCC (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Engenharia Civil, Florianopolis, Brasil, 2021. Disponível em: https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/223397. Acesso em: 16 nov. 2022.

BRANDÍN, Roberto; ABRISHAMI, Sepehr. Information traceability platforms for asset data lifecycle: blockchain-based technologies. **Smart and Sustainable Built Environment**, v. 10, n. 3, p. 364-386, 2021.

CARDOSO, Marcelo de Oliveira. **Indústria 4.0: a quarta revolução industrial. 2016**. 43 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Automação Industrial) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

CAVALCANTI, Vladyr Yuri Soares de Lima et al. Indústria 4.0: desafios e perspectivas na construção civil. **Revista Campo do Saber**, v. 4, n. 4, 2018.

CRAVEIROA, Flávio et al. Additive manufacturing as an enabling technology for digital construction: A perspective on Construction 4.0. **Automation in Construction**. Dev, v. 4, n. 6, 2019.

DA SILVA, Alice Duarte; SIMÃO, A. dos S.; MENEZES, CAG. Impactos da Indústria 4.0 na Construção Civil brasileira. Em: SIMPÓSIO DE EXCELÊNCIA EM GESTÃO E TECNOLOGIA, v. 15, 2018. **Anais [...]**. Disponível em: <https://www.aedb.br/seget/arquivos/artigos18/18726200.pdf>. Acesso em: 30 jan. 2023.

DOMDOUZIS, Konstantinos; KUMAR, Bimal; ANUMBA, Chimay. Radio-Frequency Identification (RFID) applications: A brief introduction. **Advanced Engineering Informatics**, v. 21, n. 4, p. 350-355, 2007.Disponivel em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1474034606000498>. Acesso em 4 jan. 2023.

DING, Kai et al. Smart steel bridge construction enabled by BIM and Internet of Things in industry 4.0: A framework. Em: 15TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON NETWORKING, SENSING AND CONTROL (ICNSC), 2018. **Anais [...]**. p. 1-5. IEEE, 2018.

DU, Jing et al. Zero latency: Real-time synchronization of BIM data in virtual reality for collaborative decision-making. **Automation in Construction**, v. 85, p. 51–64, 2018.

FAROOQ, M. Umar et al. A review on internet of things (IoT). **International journal of computer applications**, v. 113, n. 1, p. 1-7, 2015.

FERDOUS, Wahid et al. New advancements, challenges and opportunities of multi-storey modular buildings–A state-of-the-art review. **Engineering Structures**, v. 183, p. 883-893, 2019.

FOLADOR, Beatriz Martins. **Potenciais aplicações de tecnologias da Construção 4.0 em sistemas construtivos modulares em estrutura de aço**. 2022. TCC (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Engenharia Civil, Florianópolis, Brasil, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/240252/TCC_BeatrizMFolador.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 6 jan. 2023.

GARCIA, Anderson et al. Aplicação de gêmeos digitais na indústria da construção: estado da arte. Em: CONGRESSO PORTUGUÊS DE BUILDING INFORMATION MODELLING - PTBIM 2022, **Anais [...]**. Guimarães: Universidade do Minho, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.21814/uminho.ed.32.44>. Acesso em: 23 mar. 2023.

GIBB, Alistair G. F. **Off-site Fabrication: Prefabrication, Pre-assembly and Modularisation**. John Wiley & Sons, 1999.

GOMES, D. dos S. Inteligência Artificial: conceitos e aplicações. **Olhar Científico Revista de Publicações da FAAr**. v1, n. 2, p. 234-246, 2010.

GOSLING, Jonathan et al. Defining and Categorizing Modules in Building Projects: An International Perspective. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 142, n. 11, p. 04016062, 2016.

HAMLEDARI, Hesam; FISCHER, Martin. Construction payment automation using blockchain-enabled smart contracts and robotic reality capture technologies**. Automation in Construction**, v. 132, p. 103926, 2021.

HAYAT, Samira; YANMAZ, Evşen; MUZAFFAR, Raheeb. Survey on unmanned aerial vehicle networks for civil applications: A communications viewpoint. **IEEE Communications Surveys & Tutorials**, v. 18, n. 4, p. 2624-2661, 2016.

IET, The Institution of Engineering and Technology, Digital Engineering and Project Controls in the Construction Industry, 2012 [Online]. Available: < https://www.theiet.org/media/1217/laing-case.pdf >. Acesso em: 20 Nov 2022.

JASELSKIS, Edward J.; EL-MISALAMI, Tarek. Implementing radio frequency identification in the construction process. **Journal of construction engineering and management**, v. 129, n. 6, p. 680-688, 2003.

JIA, Xiaolin et al. RFID technology and its applications in Internet of Things (IoT). EM: 2ND INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONSUMER ELECTRONICS, COMMUNICATIONS AND NETWORKS (CECNet), 2012. **Anais [...]**. IEEE, 2012. p. 1282-1285.

KAMALI, Mohammad; HEWAGE, Kasun. Life cycle performance of modular buildings: A critical review. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 62, p. 1171-1183, 2016.

KAMALI, Mohammad; HEWAGE, Kasun; MILANI, Abbas S. Life cycle sustainability performance assessment framework for residential modular buildings: Aggregated sustainability indices. **Building and Environment**, v. 138, p. 21-41, 2018.

KHAJAVI, Siavash H. et al. Digital twin: vision, benefits, boundaries, and creation for buildings. **IEEE access**, v. 7, p. 147406-147419, 9 out. 2019. ISSN: 2169-3536.

KINI, Damodara U. Materials management: The key to successful project management. **Journal of management in engineering**, v. 15, n. 1, p. 30-34, 1999.

KOCHOVSKI, Petar; STANKOVSKI, Vlado. Supporting smart construction with dependable edge computing infrastructures and applications. **Automation in Construction**, v. 85, p. 182-192, 2018.

KOLBERG, Dennis; ZÜHLKE, Detlef. Lean automation enabled by industry 4.0 technologies. **IFAC-PapersOnLine**, v. 48, n. 3, p. 1870-1875, 2015.

LOPES, Isabelle Bomtempo. **Análise Da Transformação Digital Na Indústria Da Construção Civil**. Projeto de Conclusão de Curso II. Universidade Federal Fluminense Escola de Engenharia Departamento de Engenharia Civil, Niterói, Brasil, 2022. Disponível em: <https://tec.uff.br/wp-content/uploads/sites/719/2022/08/PCC2-Isabelle-Bomtempo-Vers%C3%A3o-Final.pdf>. Acesso em: 8 dez. 2022.

LU, Yujie et al. Building Information Modeling (BIM) for green buildings: A critical review and future directions. **Automation in Construction**, v. 83, p. 134-148, 2017.

MIGNACCA, Benito et al. We Never Built Small Modular Reactors (SMRs), but What Do We Know About Modularization in Construction?. Em: 26TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON NUCLEAR ENGINEERING, 2018. London, UK **Anais [...]**. ASME - The American Society of Mechanical Engineers, 2018. p. V001T13A012. Disponível em: http://dx.doi.org/10.1115/ICONE26-81604. Acesso em: 18 dez. 2022

NEELAMKAVIL, Joseph. Automation in the prefab and modular construction industry. Em: 26TH SYMPOSIUM ON CONSTRUCTION ROBOTICS ISARC. 2009, Austin, Texas, EUA. **Anais [...]**. p. 229–306, 2009.

NETO, ALBERTO; LIMA, RENATO. Roteirização de veículos de uma rede atacadista com o auxílio de Sistemas de Informações Geográficas (SIG). **Revista Pesquisa e Desenvolvimento Engenharia de Produção**, n. 5, p. 18-39, 2006.

NOWOTARSKI, Piotr; PASLAWSKI, Jerzy. Industry 4.0 Concept Introduction into Construction SMEs. Em**:** IOP CONFERENCE SERIES: MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING, 2017. **Anais [...]**. v. 245, p. 052043, 2017.

OESTERREICH, Thuy Duong; TEUTEBERG, Frank. Understanding the implications of digitisation and automation in the context of Industry 4.0: A triangulation approach and elements of a research agenda for the construction industry. **Computers in Industry**, v. 83, p. 121–139, 2016.

OSUNSANMI, Temidayo Oluwasola et al. Appraisal of stakeholders' willingness to adopt construction 4.0 technologies for construction projects. **Built Environment Project and Asset Management**, v. 10, n. 4, p. 547–565, 2020.

OTI-SARPONG, Kwadwo et al. Transforming the construction sector: an institutional complexity perspective. **Construction Innovation**, v. 22, n. 2, p. 361–387, 2021.

PASCHOU, Theoni et al. Towards Service 4.0: a new framework and research priorities. **Procedia Cirp**, v. 73, p. 148-154, 2018.

PATTON, M. Q. **Qualitative evaluation and research methods.** 2nd ed. Newbury Park, CA: Sage. 1990.

QI, Han; GANI, Abdullah. Research on mobile cloud computing: Review, trend and perspectives. Em: 2012 SECOND INTERNATIONAL CONFERENCE ON DIGITAL INFORMATION AND COMMUNICATION TECHNOLOGY AND IT'S APPLICATIONS (DICTAP), 2012, Bangkok, Tailândia, p. 195–202. **Anais [...]**. IEEE, 2012.

ROSA, Roberto. Geotecnologias na geografia aplicada. **Revista do Departamento de Geografia**, v. 16, p. 81-90, 2005.

ROUT, Amruta; DEEPAK, B. B. V. L.; BISWAL, B. B. Advances in weld seam tracking techniques for robotic welding: A review. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, v. 56, p. 12–37, 2019.

RÜßMANN, Michael et al. Industry 4.0: The future of productivity and growth in manufacturing industries. **Boston consulting group**, v. 9, n. 1, p. 54-89, 2015.

SACKS, Rafael; PERLMAN, Amotz; BARAK, Ronen. Construction safety training using immersive virtual reality. **Construction Management and Economics**, v. 31, n. 9, p. 1005-1017, 2013.

SAN, Kiu Mee; CHOY, Chia Fah; FUNG, Wong Phui. The potentials and impacts of blockchain technology in construction industry: A literature review. **IOP Science**. 2019.

SANTOS, Rafael Souza. Revisão de Literatura em Inovações Tecnológicas da Indústria da Construção. **Boletim do Gerenciamento**, v. 19, n. 19, p. 1–11, 2020.

SARDROUD, Javad Majrouhi. Influence of RFID technology on automated management of construction materials and components. **Scientia Iranica**, v. 19, n. 3, p. 381-392, 2012.

SARDROUD, Javad Majrouhi; LIMBACHIY, Mukesh. Towards Linking Islands of Information Within Construction Projects Utilizing RF Technologies. Em: ELECTRICAL ENGINEERING AND APPLIED COMPUTING. Springer, Dordrecht, 2011. **Anais [...]**. p. 197-207. E-book. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-94-007-1192-1_17. Acesso em: 7 fev. 2023.

SAWHNEY, Anil et al. A proposed framework for Construction 4.0 based on a review of literature. Em: ASSOCIATED SCHOOLS OF CONSTRUCTION PROCEEDINGS OF THE 56TH ANNUAL INTERNATIONAL CONFERENCE, 2020. EPiC Series in Built Environment. **Anais [...]**. EasyChair, 2020. p. 301–309. Disponível em: https://easychair.org/publications/paper/VXLK. Acesso em: 28 jan. 2023.

SHEN, Hongyuan et al. Real-Time Seam Tracking Technology of Welding Robot with Visual Sensing. **Journal of Intelligent & Robotic Systems**, v. 59, n. 3, p. 283–298, 2010.

STATSENKO, Larissa et al. Construction 4.0 technologies and applications: A systematic literature review of trends and potential areas for development**. Construction Innovation**, n. ahead-of-print, 2022.

TRAPPEY, Amy JC; LU, Tung-Hung; FU, Li-Dien. Development of an intelligent agent system for collaborative mold production with RFID technology. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, v. 25, n. 1, p. 42-56, 2009.

WANG, Mudan et al. A systematic review of digital technology adoption in off-site construction: Current status and future direction towards industry 4.0. **Buildings**, v. 10, n. 11, p. 204, 2020.

ZHANG, Chengyi; ARDITI, David. Automated progress control using laser scanning technology. **Automation in construction**, v. 36, p. 108-116, 2013.

ZHONG, Ray Y. et al. RFID-enabled real-time manufacturing execution system for mass-customization production. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, v. 29, n. 2, p. 283-292, 2013.