



Industrialização, Digitalização,
Desempenho

5º Simpósio Brasileiro de Tecnologia da Informação e
Comunicação na Construção e 5º Workshop de
Tecnologia de Processos e Sistemas Construtivos
FLORIANÓPOLIS-SC | 20 a 22 de agosto

1 UMA ANÁLISE PESTEL SOBRE OS DESAFIOS PARA A ADOÇÃO DA INDÚSTRIA 4.0 NA CONSTRUÇÃO

A PESTEL Analysis of the Challenges to the Adoption of Industry 4.0 in Construction

Gabrielle Silva Soares

Universidade Federal de Santa Catarina | Florianópolis, SC |
gabriellesilvasoares@gmail.com

Prof. Ricardo Juan José Oviedo Haito, Dr.

Universidade Federal de Santa Catarina | Florianópolis, SC |
ricardo.oviedo.haito@ufsc.br

RESUMO

A adoção de soluções vinculadas à Indústria 4.0 na construção — na denominada Construção 4.0 — surge como uma alternativa para superar os entraves do setor e aprimorar seu desempenho. Embora os benefícios associados, como redução de custos, prazos e aumento da qualidade, sejam reconhecidos, a implementação dessas tecnologias pelas empresas ainda é limitada. Neste trabalho objetiva-se identificar os principais desafios para a adoção das dimensões digitais da Construção 4.0. A metodologia adotada baseou-se em uma revisão sistemática da literatura, que resultou na identificação e análise de dez categorias de desafios: Capacidade das tecnologias, Cultura organizacional, Padronização, Adaptação de novas tecnologias, Investimento financeiro, Obsolescência, Qualificação profissional, Cibersegurança e Privacidade, Legislação e regulamentação e Políticas Públicas e Setoriais. Complementarmente, realizou-se uma análise PESTEL (Político, Econômico, Social, Tecnológico, Ambiental e Legal) dessas categorias, com o objetivo de compreender os macrofatores que influenciam sua aplicação no contexto da construção civil. Na teoria, os resultados contribuem ao destacar fatores pouco abordados na literatura como Adaptação de novas tecnologias, Obsolescência e Políticas Públicas e Setoriais neste contexto. Na prática, este artigo contribui ao identificar fatores de tomada de decisão essenciais a estratégias vinculadas à adoção das tecnologias da Indústria 4.0 na construção.

Palavras-chave: construção 4.0, contribuição, implantação, desafios.

ABSTRACT

The adoption of solutions linked to Industry 4.0 in the construction sector — referred to as Construction 4.0 — emerges as an alternative to overcome the industry's challenges and enhance its performance. Although the associated benefits, such as cost and time reduction and improved quality, are widely recognized, the implementation of these technologies by companies remains limited. This study aims to identify the main challenges to adopting the digital dimensions of Construction 4.0. The methodology adopted was based on a systematic literature review, which led to the identification and analysis of ten categories of challenges: Technological capability, Organizational culture, Standardization, Technology integration, Financial investment, Obsolescence, Professional qualification, Cybersecurity and privacy, Legislation and regulation, and Public and sectoral policies. Additionally, a PESTEL analysis (Political, Economic, Social, Technological, Environmental, and Legal) was conducted on these categories to understand the macro factors influencing their application in the context of civil construction. Theoretically, the results contribute by highlighting factors that are rarely addressed in the literature, such as Technology integration, Obsolescence, and Public and sectoral policies. Practically, this article contributes by identifying decision-making factors that are essential to strategies related to the adoption of Industry 4.0 technologies in construction.

Keywords: building 4.0, contribution, implementation, challenges.

1 INTRODUÇÃO, LITERATURA E OBJETIVO

A construção civil é um setor estratégico para a economia global, representando cerca de 14% do PIB mundial e gerando milhões de empregos (Arora et al., 2020; Hossain; Nadeem, 2019). No entanto, também é um dos maiores responsáveis pelo consumo de recursos naturais e energia (Labaran et al., 2022). No Brasil, o setor respondeu por 6,2% do PIB em 2022 (Abramat, 2023) e empregou diretamente cerca de 7,5 milhões de trabalhadores em 2021 (Abramat, 2022). Apesar da sua importância, o setor apresenta grandes desafios como a sua dificuldade em cumprir prazos e custos, bem como a sua baixa produtividade (OTI-SARPONG et al., 2021). Para reverter tal situação, a industrialização da construção tem se consolidado como uma alternativa viável. Essa abordagem refere-se ao aumento do grau de organização da produção (SABBATINI, 1989), por

¹SOARES, G. S.; OVIEDO-HAITO, R. J. J. Uma Análise PESTEL sobre os Desafios para a Adoção da Indústria 4.0 na Construção. In: 5º SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DA INFORMAÇÃO E COMUNICAÇÃO NA CONSTRUÇÃO, 4., 2025, Florianópolis. Anais [...]. Porto Alegre: ANTAC, 2025.

meio da adoção de métodos de fabricação inovadores aplicados às suas atividades (BAÚ, 2021).

Essa concepção vem sendo repensada com o avanço da chamada quarta revolução industrial, ou Indústria 4.0.

A aplicação da Indústria 4.0 na construção civil dá origem ao conceito de Construção 4.0, que inclui a digitalização de processos, a servitização e a adoção da construção offsite (Hossain; Nadeem, 2019; Craveiro et al., 2019; Forcael et al., 2020; Zimmermann, 2022). Tecnologias 4.0 como IoT, inteligência artificial, drones, blockchain, impressão 3D e ferramentas do BIM vêm sendo integradas ao setor com o potencial de melhorar a eficiência, reduzir custos e aumentar a qualidade (Betiatto, 2021; Oesterreich; Teuteberg, 2016; Sawhney; Riley; Irizarry, 2020). Estima-se que a digitalização possa gerar economias entre US\$ 0,7 e US\$ 1,2 trilhões por ano até 2030, com ganhos de produtividade até dez vezes superiores aos métodos tradicionais (Gerbert et al., 2016; Álvarez; De Reyna, 2020). No entanto, a adesão ainda é baixa: em 2019, apenas 6% das empresas do setor haviam adotado soluções digitais (Nagy; Papp; Szabó, 2021), evidenciando a presença de barreiras significativas.

Diante desse contexto, este estudo tem como objetivo identificar e analisar os principais desafios para a adoção da Construção 4.0. Para isso, foi realizada uma revisão sistemática da literatura, complementada por uma análise PESTEL, a fim de compreender os macrofatores que influenciam essa adoção. O escopo do estudo concentra-se nas dimensões digitais da Construção 4.0, não abordando os aspectos específicos da construção offsite, os quais permanecem como oportunidade para pesquisas futuras.

2 METODOLOGIA

Este estudo utilizou uma revisão sistemática da literatura, com base nos procedimentos de Bryman (2012), Sampaio e Mancini (2007) e Castagnoli et al. (2022). Além disso, os dados obtidos foram organizados em um marco conceitual segundo uma análise PESTEL, que avalia fatores macroambientais — Político, Econômico, Social, Tecnológico, Ambiental e Legal — capazes de influenciar o desempenho do setor (Pan; Chen; Zhan, 2019; Turkyilmaz et al., 2019). Essa abordagem contribui para decisões estratégicas mais seguras e para a identificação de riscos e oportunidades (Vieitas, 2023). Dessa forma, unindo a Revisão Sistemática de Literatura com a Análise PESTEL, definiu-se a metodologia a ser seguida nesta pesquisa, apresentada na Figura 1.

A metodologia foi dividida em cinco fases: Planejamento, Triagem, Seleção, Análise e Redação. Na fase de planejamento, definiu-se a pergunta de pesquisa com base em estudos preliminares, que indicavam a lacuna entre os benefícios teóricos da Construção 4.0 e sua aplicação prática (por exemplo, vide Betiatto, 2021). A partir disso, formulou-se a pergunta: "*Quais são os desafios para a adoção da Construção 4.0?*".

As bases de dados selecionadas para a pesquisa foram Scopus, Engineering Village e Scielo, escolhidas com base na qualidade dos artigos disponíveis, na facilidade de exportação dos dados para análise e no acesso gratuito. A escolha por múltiplas bases segue a recomendação de Okoli e Schabram (2010), que destacam a importância dessa prática para garantir uma cobertura ampla e representativa na revisão sistemática.

Na fase de triagem, foram elaboradas e testadas três *strings* de busca em inglês (vide Figura 1); refinadas com o auxílio do software VOSViewer, que permitiu analisar a frequência e a relação entre os termos mais recorrentes nos documentos (Marques, 2023).

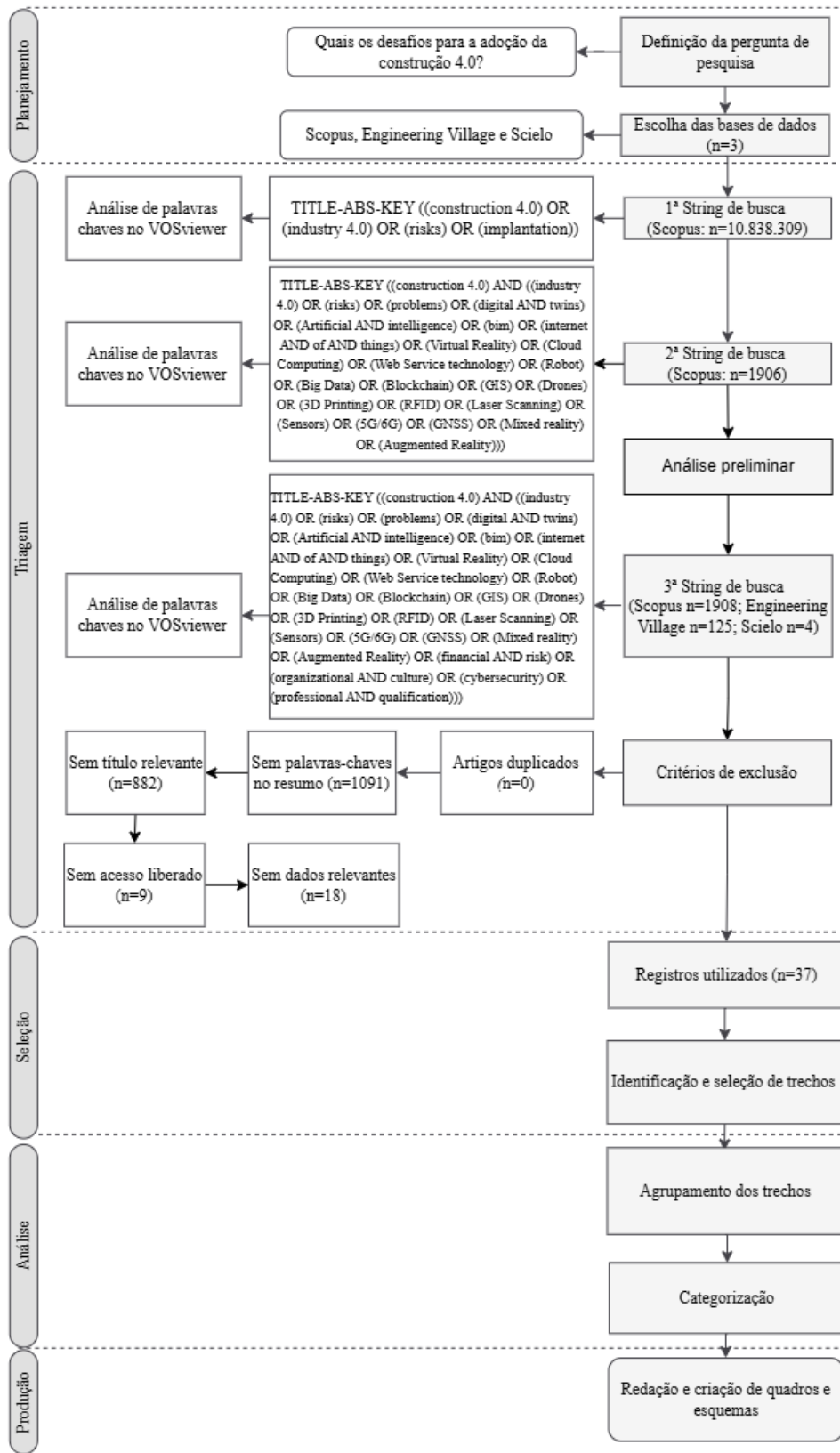
Ao final dessa etapa, os resultados foram submetidos a cinco critérios de exclusão: remoção de duplicatas; ausência de palavras-chave no resumo (identificadas via VOSViewer); título irrelevante; acesso restrito; e ausência de dados pertinentes ao tema. A aplicação desses critérios reduziu o número inicial de 2.037 documentos para 37 artigos.

Os 37 artigos selecionados foram lidos na íntegra, e trechos relacionados aos desafios da adoção da Construção 4.0 foram extraídos e organizados em planilha. Cada trecho foi classificado de acordo com suas palavras-chave, autores e conteúdo. Posteriormente, os trechos foram agrupados em dez categorias temáticas classificadas conforme o Quadro 1.

As categorias também foram analisadas conforme PESTEL, permitindo uma compreensão ampla dos fatores externos que influenciam a adoção da Indústria 4.0 na construção civil. Cada trecho foi classificado conforme

um ou mais aspectos do PESTEL

Figura 1: Etapas da metodologia



Fonte: A(o) autor(a)

3 RESULTADOS

3.1 Categorias

O Quadro 1 contém os critérios de agrupamento dos trechos extraídos na revisão sistemática da literatura. Seguido, apresenta-se a fundamentação de cada categoria. Posteriormente, analisam-se essas categorias conforme o marco PESTEL.

Quadro 1: Descrição das categorias e seus desafios

CATEGORIA	DESCRIÇÃO	EXEMPLOS DE DESAFIO
Capacidade das tecnologias	Importância do funcionamento eficaz das soluções tecnológicas digitais na indústria da construção, através de infraestrutura sólida.	Escassez e lentidão da conectividade à Internet; capacidade computacional reduzida; falhas de hardware e software; falta de infraestrutura.
Cultura organizacional	Mentalidade de inovação, adaptação e aprendizado contínuo, além da valorização da colaboração interdisciplinar e da liderança comprometida com a mudança.	Hesitação em passar por mudanças radicais; resistência ao aprendizado; falta de confiança; medo de perder o emprego.
Padronização	Salienta a importância de diretrizes comuns para facilitar o compartilhamento de informações.	Padrões que dificultam o compartilhamento de informações entre empresas; falta de padrões completos e internacionais; processos não padronizados dentro da empresa.
Adaptação de novas tecnologias	Importância de garantir que diferentes sistemas e tecnologias possam trabalhar de forma conjunta.	Integração de novas tecnologias com tecnologias existentes; comunicação entre sistemas; integração de diferentes fontes de informação.
Investimento financeiro	Apona os desafios e considerações relacionados aos recursos financeiros necessários para a implementação e manutenção de tecnologias inovadoras.	Incerteza em relação ao retorno do investimento; altos custos de adoção de novas tecnologias; os custos de manutenção; falta de incentivos financeiros.
Obsolescência	Rápida evolução do cenário tecnológico e de mão de obra.	Constante evolução do cenário tecnológico; obsolescência dos trabalhadores humanos.
Qualificação profissional	Formação e desenvolvimento contínuo dos profissionais para enfrentar os desafios e aproveitar as oportunidades trazidas pela digitalização e automação.	Falta de profissionais qualificados com conhecimento analítico, de programação e técnico.
Cibersegurança e Privacidade	Importância de proteger dados pessoais, das empresas, obras e dos sistemas contra ameaças cibernéticas.	Proteção contra ataques cibernéticos e malware; proteção de dados pessoais; prevenção de vazamento de dados.
Legislação e regulamentação	Ausência de regulamentos e certificações específicas para assegurar a conformidade com os padrões de segurança e qualidade.	Ausência de padrões, questões legais e contratuais; falta de regulamentos e certificações; diferentes legislações locais.
Políticas Públicas e Setoriais	Destaca os desafios e considerações relacionados às políticas governamentais e ao desenvolvimento da indústria da construção em nível nacional e internacional, que pode retardar a adoção de tecnologias inovadoras.	Natureza da indústria da construção em diferentes países; falta de adesão dos executivos ou políticas alternativas; falta de entusiasmo e apoio do governo.

Fonte: A(o) autor(a)

3.1.1 Capacidade das tecnologias

A adoção da Construção 4.0 exige infraestrutura robusta e dispositivos tecnologicamente preparados. No entanto, limitações como baixa conectividade à Internet (Oesterreich; Teuteberg, 2016; Singh et al., 2023), capacidade computacional insuficiente (Meneghello et al., 2019), falhas de hardware e software (Almarri; Boussabaine; Al Nauimi, 2021) e falta de infraestrutura adequada (Tamvada et al., 2022; Franco et al., 2022) comprometem o desempenho dessas tecnologias.

A conectividade é essencial para a coleta, transmissão e análise de dados, demandando redes físicas eficientes (Calvetti et al., 2020). Além disso, os dispositivos precisam resistir a condições adversas no canteiro de obras, como vibrações, umidade e quedas (Oesterreich; Teuteberg, 2016). Outro desafio está na escalabilidade dos sistemas, que devem manter desempenho desde projetos de pequeno até grande porte, integrando fontes diversas como BIM, sensores e dados operacionais (Omrany et al., 2023). Também são fundamentais mecanismos de diagnóstico e manutenção preventiva (Attaran; Celik, 2023), além da eficiência operacional dos dispositivos (Prabhakar; Belarmin Xavier; Abubeker, 2023).

3.1.2 Cultura organizacional

O setor da construção é historicamente resistente à adoção de inovações tecnológicas. A literatura aponta diversos fatores que explicam essa resistência, como a hesitação em mudar (Jan et al., 2023), a resistência ao aprendizado (Wang et al., 2021), a falta de compreensão sobre os benefícios da Construção 4.0 (Demirkesen; Tezel, 2021), a desconfiança (Wang et al., 2021) e o medo da substituição de empregos por máquinas (Prabhakar; Belarmin Xavier; Abubeker, 2023; Regona et al., 2022).

Dessa forma, dois cenários distintos foram identificados no contexto da cultura organizacional:

a) Gestores: a falta de familiaridade com as tecnologias e a ausência de confiança nas soluções digitais reduzem o interesse das empresas pela adoção da Construção 4.0 (Dinmohammadi, 2023; Wang et al., 2021).

b) Funcionários: há resistência à aprendizagem de novas competências e temor pela perda de empregos, o que dificulta a aceitação das mudanças (Singh et al., 2023; Wang et al., 2021).

Para enfrentar esses obstáculos, é necessário tornar as tecnologias mais atrativas (Nagy; Papp; Szabó, 2021) e promover ações que incentivem sua adoção. A nível de mercado, políticas públicas e programas de financiamento podem estimular as empresas (Oesterreich; Teuteberg, 2016). A nível interno, medidas como treinamentos, workshops e atividades de sensibilização são fundamentais para preparar os trabalhadores e promover um ambiente de integração com as tecnologias (Singh et al., 2023).

3.1.3 Padronização

A padronização é essencial para desbloquear o potencial das tecnologias da Construção 4.0. Entre os principais obstáculos estão: a ausência de processos padronizados dentro das empresas (Attaran; Celik, 2023; Oesterreich; Teuteberg, 2016; Regona et al., 2022; Singh et al., 2023), padrões incompatíveis para o compartilhamento de informações entre empresas (Regona et al., 2022) e a inexistência de normas completas e internacionais (Oesterreich; Teuteberg, 2016).

Na indústria da construção, a falta de padrões consistentes compromete a interoperabilidade entre sistemas e dificulta a colaboração entre os agentes envolvidos (Regona et al., 2022). Internamente, as organizações também enfrentam desafios para estabelecer padrões próprios, já que cada projeto possui características específicas (Bazan; Estevez, 2021), o que torna difícil criar estruturas que favoreçam a inovação tecnológica (Demirkesen; Tezel, 2021).

Para superar essas barreiras, Singh et al. (2023) ressaltam a necessidade de padronizar a troca de informações entre os departamentos de uma empresa, pois qualquer falha nessa comunicação pode inviabilizar a integração de tecnologias 4.0. A superação desses entraves requer a criação de formatos de dados padronizados e protocolos que permitam a colaboração contínua entre diferentes sistemas e atores.

Por exemplo, a adoção de padrões completos e internacionalmente reconhecidos — como a PAS 1192-2, elaborada pelo British Standards Institution para orientar o uso de BIM (Rêgo et al., 2022) — é fundamental

para garantir a consistência na gestão da informação ao longo do ciclo de vida dos projetos (Omrany et al., 2023).

3.1.4 Adaptação de novas tecnologias

O encontro entre a inovação e a tradição do passado promove uma revolução na eficiência e produtividade da indústria da construção. Nesse contexto, a adaptação de novas tecnologias com sistemas legados (Almarri; Boussabaine; Al Nauimi, 2021; Attaran; Celik, 2023; Wang et al., 2021), a incorporação de competências digitais (Jan et al., 2023; Prabhakar; Belarmin Xavier; Abubeker, 2023; Tamvada et al., 2022), e a comunicação entre diferentes tipos de dados (Čustović; Cao; Hall, 2023; Guo; Zhang; Zhang, 2023; Maqbool; Saiba; Ashfaq, 2023; Omrany et al., 2023), são desafios centrais que precisam ser superados.

Segundo Tamvada et al. (2022), as tecnologias 4.0 integram os mundos digital e físico, diluindo as fronteiras entre esses domínios ao combinar soluções digitais avançadas com métodos tradicionais. Nesse cenário, permitir a interoperabilidade entre diferentes tecnologias se torna um desafio fundamental (Turner et al., 2021).

Segundo Omrany et al. (2023), é necessário superar barreiras à integração e à interoperabilidade de dados, assegurando que os fluxos de informação estejam sincronizados entre as tecnologias empregadas. Um exemplo prático dessa integração é o uso de drones para inspeções em obras. De acordo com Ciampa, Vito e Pecce (2019), drones podem ser programados para realizar voos regulares sobre os canteiros, capturando imagens e vídeos em alta resolução. Assim, as informações obtidas por drones podem ser incorporadas ao processo tradicional de inspeção, otimizando a identificação de problemas e a tomada de decisões.

3.1.5 Investimento financeiro

O investimento financeiro é um fator determinante tanto para a aquisição de tecnologias quanto para a capacitação da força de trabalho na Construção 4.0 (Almarri; Boussabaine; Al Nauimi, 2021). Contudo, diversos obstáculos dificultam essa transição tecnológica, como a incerteza quanto ao retorno do investimento (Jan et al., 2023; Singh et al., 2023), os altos custos de adoção (Attaran; Celik, 2023; Bazan; Estevez, 2021; Nagy; Papp; Szabó, 2021; Prabhakar; Belarmin Xavier; Abubeker, 2023; Regona et al., 2022; Zhdaneev; Korenev; Lyadov, 2020), os elevados custos de manutenção (Jan et al., 2023), e a ausência de incentivos financeiros (Čustović; Cao; Hall, 2023). Tais fatores frequentemente desencorajam os diretores das empresas a adotarem as inovações associadas à Indústria 4.0.

A implementação das tecnologias da Construção 4.0 exige aportes financeiros significativos em plataformas tecnológicas, desenvolvimento de infraestrutura, manutenção, controle da qualidade dos dados e soluções de segurança (Attaran; Celik, 2023; Jan et al., 2023; Tamvada et al., 2022). Essa realidade torna-se especialmente desafiadora para subempreiteiros e pequenas empresas, que representam a maior parte do setor da construção (Regona et al., 2022).

Para mitigar esses entraves, é essencial o desenvolvimento de métodos e ferramentas que possibilitem a estimativa e a otimização dos investimentos, além da promoção de parcerias industriais colaborativas, capazes de reduzir os custos e riscos financeiros envolvidos (Čustović; Cao; Hall, 2023).

Complementarmente, políticas públicas que ofereçam incentivos fiscais podem desempenhar um papel estratégico na aceleração da transformação digital no setor. Um exemplo é a Lei do Bem (Lei nº 11.196/2005), regulamentada pelo Decreto nº 5.798/2006, que oferece incentivos fiscais para empresas que realizam atividades de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (PD&I). Dessa forma, contribui para reduzir a incerteza e os custos nas fases mais arriscadas da criação e teste de novas tecnologias (Brasil, 2005).

3.1.6 Obsolescência

Na corrida contra o ritmo frenético das mudanças e o constante surgimento de novas tecnologias digitais, exige-se das empresas uma capacidade de adaptação ágil e inovação contínua. Dentro desse contexto, destacam-se dois fatores principais: a constante evolução do cenário tecnológico (Almarri; Boussabaine; Al Nauimi, 2021; Maskuriy et al., 2019; Regona et al., 2022; Singh et al., 2023; Tamvada et al., 2022) e a obsolescência da qualificação dos trabalhadores (Singh et al., 2023), que contribuem significativamente para a complexidade dessa realidade.

Quanto à obsolescência tecnológica, é importante considerar que a rápida evolução das tecnologias torna difícil para organizações, tanto públicas quanto privadas, acompanharem essas mudanças. Dessa forma, componentes de rede, sistemas e estruturas de infraestrutura digital podem se tornar obsoletos em curto espaço de tempo (Almarri; Boussabaine; Al Nauimi, 2021), exigindo investimentos constantes em atualização e modernização.

No que se refere à obsolescência da força de trabalho, dois cenários se destacam:

- a) A substituição de atividades humanas por tecnologias automatizadas;
- b) A substituição das qualificações profissionais tradicionais por competências digitais emergentes.

No cenário “a”, a automação promovida pela Construção 4.0 tende a transformar profundamente a maneira como o trabalho é realizado, deslocando tarefas anteriormente executadas por humanos para sistemas autônomos (Singh et al., 2023). Já no cenário “b”, o avanço veloz da transformação digital torna as habilidades tradicionais rapidamente ultrapassadas, exigindo das organizações um esforço contínuo de capacitação e atualização de seus colaboradores (Tamvada et al., 2022).

3.1.7 Qualificação Profissional

Na inovação tecnológica relacionada à Indústria 4.0, o conhecimento é uma das chaves para alcançar uma construção mais eficiente. No entanto, a escassez de profissionais qualificados, com competências técnicas, analíticas e de programação (Demirkesen; Tezel, 2021; Jan et al., 2023; Nagy; Papp; Szabó, 2021; Singh et al., 2023; Tamvada et al., 2022; Wang et al., 2021), aliada à presença de trabalhadores da produção que não possuem certificações digitais (Demirkesen; Tezel, 2021; Elghaish et al., 2022), representa um obstáculo significativo à adoção das tecnologias da Construção 4.0. Para ilustrar essa situação, utiliza-se a classificação proposta por Oviedo Haito (2010), que divide os trabalhadores da construção civil, de forma geral, em dois grandes grupos:

- a) Apoio à produção;
- b) Produção.

O grupo “a” se subdivide em:

- a1) Apoio à produção no canteiro (ex.: engenheiros de obra, responsáveis pela segurança, apontadores);
- a2) Apoio à produção no escritório (ex.: projetistas, contadores, auxiliares técnicos).

Já o grupo “b” engloba os trabalhadores diretamente envolvidos na execução, como pedreiros, instaladores e montadores. Assim, é necessário que todos esses profissionais desenvolvam competências específicas para possibilitar a adoção das tecnologias da Construção 4.0. No cenário “a”, muitas empresas encontram dificuldades em adotar novas tecnologias devido à falta de profissionais especializados (Tamvada et al., 2022). Por isso, é fundamental que as competências desses trabalhadores sejam adaptadas à realidade da Indústria 4.0 (Schnasse; Menzefricke; Dumitrescu, 2021).

Segundo Souza e Debs (2023), a era da Construção 4.0 exige competências como alfabetização digital, programação, análise e gerenciamento de dados, planejamento e gestão de obras, pessoas e recursos naturais, além de familiaridade com processos de automação. No cenário “b”, a maioria dos trabalhadores da construção ainda possui baixa ou nenhuma formação educacional formal (Singh et al., 2023), o que torna a introdução de conceitos da Construção 4.0 particularmente desafiadora (Hayat; Réda, 2022).

Conforme Calvetti et al. (2020), é essencial que esses profissionais se familiarizem com o uso de tecnologias como drones, óculos de realidade mista e equipamentos automatizados. Portanto, a introdução de novas tecnologias pode tornar as competências tradicionais obsoletas, exigindo a criação e o desenvolvimento de novas habilidades (Tamvada et al., 2022).

3.1.8 Cibersegurança e Privacidade

O uso de dados digitais na Construção 4.0 exige uma série de precauções, que envolvem desde a proteção contra ataques cibernéticos e malwares (García de Soto et al., 2022; Guo; Zhang; Zhang, 2023; Meneghello et al., 2019; Regona et al., 2022; Sharma; Jindal; Borah, 2023; Tamvada et al., 2022), até a salvaguarda de dados pessoais (Alarefi, 2023; Demirkesen; Tezel, 2021; Meneghello et al., 2019; Oesterreich; Teuteberg, 2016; Wang et al., 2021), prevenção de vazamento de informações (Trung et al., 2021) e implementação de mecanismos de segurança completos, adequados e bem projetados (Meneghello et al., 2019).

Esses elementos estão diretamente relacionados à segurança e privacidade de empresas e usuários envolvidos no uso de tecnologias digitais. Com o aumento constante de ataques cibernéticos, a segurança digital tornou-se um risco significativo para empresas que adotam tecnologias da Construção 4.0 (Tamvada et al., 2022). Segundo Sharma, Jindal e Borah (2023), as preocupações com a privacidade aumentam quando as organizações não têm clareza sobre os riscos digitais aos quais estão expostas.

A cibersegurança e a privacidade são, portanto, questões críticas, com impactos que vão além do ambiente digital, podendo comprometer financeiramente as empresas e colocar em risco a segurança das obras (Regona et al., 2022). Infraestruturas frágeis e de baixo custo frequentemente não oferecem suporte a sistemas de segurança robustos, tornando-se alvos fáceis para invasores (Meneghello et al., 2019). Além disso, redes instáveis e mal estruturadas aumentam a vulnerabilidade a ataques externos (Almarri; Boussabaine; Al Nauimi, 2021).

A segurança dos usuários finais também deve ser considerada. Muitos deles desconhecem os riscos associados aos dispositivos digitais presentes em seu cotidiano. Por exemplo, redes sem fio desprotegidas podem permitir a espionagem e o vazamento de informações pessoais confidenciais (Meneghello et al., 2019). Para enfrentar esses desafios, é essencial implementar protocolos abrangentes de proteção de dados, que incluam práticas e tecnologias voltadas à segurança cibernética (Omrany et al., 2023). Entre essas práticas estão os controles de acesso, autenticação de usuários e definição de permissões, que restringem o acesso não autorizado a dados sensíveis, como no caso do uso de camadas adicionais de segurança, *wrappers* de segurança, conforme destacado por Nigam e Talcott (2022).

3.1.9 Legislação e Regulamentação

A conformidade com a legislação e regulamentação é essencial para garantir a adoção segura e eficaz da Construção 4.0. No entanto, ainda são significativos os desafios relacionados à ausência de marcos legais específicos, contratos adaptados às novas tecnologias e regulamentações que acompanhem a velocidade da inovação no setor (Maqbool; Saiba; Ashfaq, 2023; Omrany et al., 2023; Prabhakar; Belarmin Xavier; Abubeker, 2023; Regona et al., 2022; Singh et al., 2023).

A falta de regulamentações claras sobre certificações, diretrizes técnicas e exigências legais relacionadas ao uso de tecnologias digitais, como IoT, BIM e inteligência artificial, dificulta a adoção da Construção 4.0 (Demirkesen; Tezel, 2021; Dinmohammadi, 2023; Singh et al., 2023). As diferentes legislações locais, nacionais e internacionais também representam um obstáculo para empresas que atuam em múltiplas regiões ou em parcerias globais (Čustović; Cao; Hall, 2023).

A definição de diretrizes legais claras pode mitigar os riscos jurídicos e aumentar a confiança dos agentes do setor. Um exemplo disto são as normas ISO 19650, desenvolvidas pela Organização Internacional de Normalização (ISO). Estas representam uma regulamentação significativa para novas tecnologias na indústria da construção. De acordo com Ribeiro et al. (2023), essa série compreende um conjunto de diretrizes internacionais que estabelecem os padrões para a gestão da informação em projetos de construção que adotam o Building Information Modeling (BIM).

3.1.10 Políticas Públicas e Setoriais

O desenvolvimento eficaz da Construção 4.0 depende diretamente da formulação e implementação de políticas públicas e setoriais robustas que incentivem a inovação e a modernização do setor. No entanto, diversos fatores dificultam esse avanço, como as particularidades da indústria da construção em diferentes países (Omrany et al., 2023), a falta de apoio governamental (Al-Omari et al., 2023; Singh et al., 2023), a ausência de adesão dos executivos às políticas propostas ou a existência de políticas alternativas (Dinmohammadi, 2023), além de questões éticas, morais e legais ainda não devidamente abordadas por governos e órgãos institucionais (Kozlovskaja; Klosova; Strukova, 2021; Regona et al., 2022; Teisserenc; Sepasgozar, 2021).

Cada país possui um contexto único que influencia a implementação da Construção 4.0, incluindo seu grau de maturidade digital, os marcos regulatórios vigentes e as práticas do setor. Essa diversidade de realidades dificulta a aplicação homogênea das tecnologias digitais na construção civil (Omrany et al., 2023). Adaptar essas inovações às diferentes políticas locais representa um desafio adicional (Čustović; Cao; Hall, 2023).

Nesse cenário, torna-se essencial a criação de quadros de governança que orientem práticas responsáveis (Omrany et al., 2023). Um exemplo desse movimento foi registrado em Hong Kong, onde o governo implementou políticas que incluíram requisitos obrigatórios e esquemas de incentivo, com o objetivo de aumentar a adoção tecnológica e melhorar a eficiência, qualidade e sustentabilidade dos projetos (Jin et al., 2024).

3.2 Análise PESTEL

A partir da discussão anterior analisaram-se as categorias conforme o marco PESTEL. Destarte, o Quadro 2 mostra os seis aspectos de PESTEL, seus conceitos e exemplos.

Quadro 2: Aspectos considerados na análise PESTEL

PESTEL	CONCEITO
Político	Refere-se ao impacto das políticas governamentais, estabilidade política, regulamentações e intervenções governamentais na indústria.
Econômico	Envolve fatores econômicos que influenciam os padrões de demanda dos consumidores, custos de produção, rentabilidade e viabilidade de investimentos.
Social	Considera aspectos sociais, culturais, demográficos e comportamentais que impactam a indústria.
Tecnológico	Refere-se ao impacto da inovação tecnológica, avanços, pesquisa e desenvolvimento na indústria.
Ambiental	Envolve fatores ambientais, ecológicos e climáticos que afetam as operações das empresas.
Legal	Considera o impacto das leis, regulamentações, legislações trabalhistas, tributárias e comerciais na indústria.

Fonte: A(o) autor(a)

Através das categorias apresentadas realizou-se uma análise PESTEL, conforme o Quadro 3. Nele nota-se que os desafios nos aspectos social e tecnológico são os mais recorrentes. No aspecto social, destaca-se a necessidade imperativa de aceitação por parte da sociedade e a complexidade da cadeia de suprimentos, que envolve diversas partes interessadas no setor da construção (Singh et al., 2023). Entre essas partes, incluem-se clientes, consultores, empreiteiros e líderes comunitários (Osunsanmi et al., 2020), o que reforça a importância de considerar os fatores sociais para garantir o êxito na implementação das inovações tecnológicas associadas à Indústria 4.0.

Quadro 3: Análise PESTEL dos desafios para a adoção da Indústria 4.0 na Construção

DESAFIOS	P	E	S	T	E	L
Capacidade das tecnologias instaladas		X		X		
Cultura organizacional			X			
Padronização			X	X		
Adaptação de novas tecnologias			X	X		
Investimento financeiro		X	X	X		
Obsolescência		X	X	X	X	
Qualificação profissional	X		X	X		
Cibersegurança e Privacidade		X	X	X		
Legislação e regulamentação	X					X
Políticas Públicas e Setoriais	X					X

P - Political, E - Economic, S - Social, T -Technological, E - Environmental, L – Legal

Fonte: A(o) autor(a)

Já no aspecto tecnológico, a constante inovação exige que as empresas acompanhem e adotem continuamente novas soluções para manterem-se competitivas no mercado (Tamvada et al., 2022). No entanto, essa rápida evolução traz desafios significativos, como altos custos de implementação (Attaran; Celik, 2023), complexidade técnica (Almarri; Boussabaine; Al Nauimi, 2021), problemas de interoperabilidade (Prabhakar; Belarmin Xavier; Abubeker, 2023) e preocupações relacionadas à segurança cibernética (Guo et al., 2023). Esses elementos tornam o fator tecnológico uma das principais barreiras para a adoção da Construção 4.0.

Também é importante mencionar que os aspectos legal e ambiental da análise PESTEL não desempenharam um papel proeminente ao abordar os desafios para a adoção da Construção 4.0. Em relação ao aspecto legal, isso pode ser atribuído à ausência de preocupações jurídicas significativas nesta fase inicial de adoção tecnológica. Por exemplo, o Building Information Modeling (BIM) foi implementado na primeira década de 2000, mas suas regulamentações só foram estabelecidas e continuam sendo desenvolvidas ao longo da segunda década (Pinti; Codinhoto; Bonelli, 2022).

À medida que a indústria da construção evolui e novas tecnologias são incorporadas, é provável que questões legais específicas passem a ganhar maior destaque. No que diz respeito ao aspecto ambiental, historicamente a indústria da construção não priorizou de forma significativa as questões ecológicas (Kuyven; Oliveira, 2023). Destarte, apesar do crescente movimento em prol da sustentabilidade, muitas empresas ainda não consideram o impacto ambiental como prioridade ao adotar novas tecnologias. No entanto, com o aumento da pressão social e regulatória por práticas sustentáveis, espera-se que o setor passe a incorporar com mais frequência preocupações ambientais em suas decisões estratégicas (Gálvez-Martos et al., 2018; Kuyven; Oliveira, 2023).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este artigo teve como objetivo identificar os desafios para a adoção das tecnologias e práticas da Construção 4.0, com foco nos aspectos relacionados à transformação digital da Indústria 4.0. Para alcançar esse objetivo, foi realizada uma revisão sistemática da literatura, na qual foram identificadas dez categorias: Capacidade das tecnologias, Cultura organizacional, Padronização, Adaptação de novas tecnologias, Investimento financeiro, Obsolescência, Qualificação profissional, Cibersegurança e Privacidade, Legislação e regulamentação e Políticas Públicas e Setoriais. Na sequência, foi realizada uma análise PESTEL. Essa combinação metodológica permitiu uma visão ampla e estruturada sobre os desafios enfrentados pelas empresas da construção civil, abrangendo fatores políticos, econômicos, sociais, tecnológicos, ambientais e legais que influenciam a adoção de tecnologias emergentes no setor.

A literatura especializada já consolidava alguns desafios para a adoção das tecnologias da Indústria 4.0 na construção civil, entre eles: hesitação em adotar, alto custo de implementação, necessidade de competências aprimoradas, falta de padrões, requisitos mais altos para equipamentos de computação, segurança e proteção de dados, aprimoramento das redes de comunicação existentes, incerteza legal e contratual (Dinmohammadi, 2023; Jan et al., 2023; Oesterreich; Teuteberg, 2016), bem como a falta de colaboração e de compartilhamento de informações, atrasos nos pagamentos no contexto do uso de tecnologias digitais como o blockchain (Li; Greenwood; Kassem, 2019). Contudo, ao confrontar esses achados com os resultados desta pesquisa, observa-se que três categorias não estavam suficientemente exploradas na literatura: Adaptação de novas tecnologias, Obsolescência e Políticas Públicas e Setoriais. Dessa forma, essas dimensões emergem como contribuições relevantes deste estudo, ampliando o entendimento sobre os desafios enfrentados pelas empresas da construção civil na adoção da Construção 4.0.

Adicionalmente, uma análise PESTEL foi aplicada com base nas dez categorias de desafios identificadas na revisão sistemática. Esse cruzamento permitiu identificar uma predominância dos aspectos tecnológicos e sociais entre os obstáculos enfrentados pelas empresas na adoção da Construção 4.0. Em contrapartida, os fatores legais e ambientais apresentaram menor representatividade. No entanto, estudos anteriores destacam questões pertinentes a esses dois domínios, como o elevado consumo de energia por determinadas tecnologias (Dakhli, Lafhaj & Mossman, 2019; Perera et al., 2020), que não foram identificadas nesta revisão. Isso evidencia a necessidade de aprofundamento futuro nessas áreas. Adicionalmente, destaca-se o impacto potencial das políticas públicas e das regulamentações ambientais, que estão em constante evolução e podem afetar diretamente a dinâmica do setor. Exemplos disso são os incentivos à construção sustentável e ao uso de materiais ecoeficientes, que podem gerar novos desafios e oportunidades para as empresas (Sambucci, Sibai & Valente, 2021; Silva et al., 2020).

Complementarmente, um dos principais aspectos identificados é um dilema estratégico às empresas do setor: investir imediatamente em tecnologias que podem se tornar rapidamente obsoletas, ou postergar a adoção e correr o risco de perder competitividade? A constante evolução tecnológica e o risco de obsolescência da força de trabalho tornam essencial a formulação de estratégias dinâmicas e adaptativas para lidar com os impactos destas tecnologias no setor da construção civil.

Finalmente, é importante destacar que este estudo se restringiu à realização de uma revisão sistemática da literatura, sem coleta de dados empíricos. Assim, recomenda-se que pesquisas futuras incluam investigações junto a empresas do setor da construção. Além disso, considerando que a Construção 4.0 abrange também os conceitos da construção *offsite*, e que este trabalho focou apenas nos aspectos relacionados à transformação digital (ligados à digitalização e servitização), sugere-se que estudos futuros explorem também os desafios referentes à industrialização da construção.

REFERÊNCIAS

- ABDUL NABI, Mohamad; EL-ADAWAY, Islam H. Modular Construction: Determining Decision-Making Factors and Future Research Needs. *Journal of Management in Engineering*, [s. l.], v. 36, n. 6, p. 04020085, 2020.
- ABRAMAT. Perfil da cadeia da construção e da indústria de materiais e equipamentos Ed. 2022. [S. l.], 2022. Disponível em: https://abramat.org.br/wp-content/uploads/2023/03/Perfil-da-Cadeia-resumo-2022_c-serie-5-anos-v2.pdf. Acesso em: 25 fev. 2023.
- ABRAMAT. Perfil da Cadeia Produtiva da Construção Civil. Ed. 2023. [S. l.], 2023. Disponível em: <https://abramat.org.br/wp-content/uploads/2023/10/Perfil-da-Cadeia-Produtiva-da-Ind-da-Construcao-2023-Membros-1.pdf>. Acesso em: 5 maio 2024.

- AHMADISHEYKHSARMAST, Salar; SONMEZ, Rifat. A smart contract system for security of payment of construction contracts. **Automation in Construction**, [s. l.], v. 120, p. 103401, 2020.
- ALAREFI, M. Adoption of IoT by telecommunication companies in GCC: The role of blockchain. **Decision Science Letters**, [s. l.], v. 12, n. 1, p. 55–68, 2023.
- ALMARRI, Khalid; BOUSSABAIN, Halim; AL NAUIMI, Hamad. The influence of risks on the outturn cost of ICT infrastructure network projects. **Construction Innovation**, [s. l.], v. 23, n. 1, p. 85–104, 2021.
- AL-OMARI, Rawan et al. Barriers to the Adoption of Digitalization in the Construction Industry: Perspectives of Owners, Consultants, and Contractors. **Construction Economics and Building**, [s. l.], v. 23, n. 3/4, 2023. Disponível em: <https://epress.lib.uts.edu.au/journals/index.php/AJCEB/article/view/8636>. Acesso em: 24 maio 2024.
- ÁLVAREZ, Laureano; DE REYNA, Galo. Construction Predictions 2020 | Deloitte Central Europe. [S. l.]: **Deloitte Touche Tohmatsu Limited**, 2020. Disponível em: <https://www2.deloitte.com/ce/en/pages/real-estate/articles/construction-predictions-2020.html>. Acesso em: 7 dez. 2022.
- ARORA, Nidhi et al. Construction and building technology: Poised for a breakthrough? **McKinsey & Company**. [S. l.], 2020. Disponível em: <https://www.mckinsey.com/industries/advanced-electronics/our-insights/construction-and-building-technology-poised-for-a-breakthrough>. Acesso em: 10 set. 2021.
- ATTARAN, Mohsen; CELIK, Bilge Gokhan. Digital Twin: Benefits, use cases, challenges, and opportunities. **Decision Analytics Journal**, [s. l.], v. 6, p. 100165, 2023.
- BARBOSA, Filipe et al. Reinventing construction: A route to higher productivity. [S. l.]: **McKinsey Global Institute**, 2017. Disponível em: <https://www.mckinsey.com/business-functions/operations/our-insights/reinventing-construction-through-a-productivity-revolution>. Acesso em: 8 jul. 2020.
- 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: 6 jun. 2021.
- BAZAN, Patricia; ESTEVEZ, Elsa. Industry 4.0 and business process management: state of the art and new challenges. **Business Process Management Journal**, [s. l.], v. 28, n. 1, p. 62–80, 2021.
- BERTRAM, N. et al. Modular construction: From projects to products. [S. l.]: **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 jul. 2020.
- BETIATTO, Pâmela. Perfil de inovação dos serviços ofertados por Construtechs brasileiras. 2021. **TCC (graduação)** - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Engenharia Civil, Florianópolis, Brasil, 2021. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/223397>. Acesso em: 6 jun. 2021.
- BRASIL. Lei do Bem. Institui o Regime Especial de Tributação para a Plataforma de Exportação de Serviços de Tecnologia da Informação - **REPES, o Regime Especial de Aquisição de Bens de Capital para Empresas Exportadoras - RECAP**. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2005/lei/11196.htm. Acesso em: 24 maio 2024.
- BRYMAN, Alan. Social research methods. 4th eded. Oxford ; New York: **Oxford University Press**, 2012.
- BUDAYAN, Cenk; OKUDAN, Ozan. Assessment of Barriers to the Implementation of Smart Contracts in Construction Projects—**Evidence from Turkey. Buildings**, [s. l.], v. 13, n. 8, p. 2084, 2023.
- CALVETTI, Diego et al. Worker 4.0: The Future of Sensored Construction Sites. **Buildings**, [s. l.], v. 10, n. 10, p. 169, 2020.
- CARSON, Kathleen. Digitalization & Automation in the Construction Trades. In: **SEATTLE JOBS INITIATIVE**. 3 out. 2020. Disponível em: <https://www.seattlejobsinitiative.com/digitalization-automation-in-the-construction-trades/>. Acesso em: 2 mar. 2021.
- CASTAGNOLI, Rebecca et al. Evolution of industry 4.0 and international business: A systematic literature review and a research agenda. **European Management Journal**, [s. l.], v. 40, n. 4, p. 572–589, 2022.
- CHEN, Qian et al. Identifying enablers for coordination across construction supply chain processes: a systematic literature review. **Engineering, Construction and Architectural Management**, [s. l.], v. ahead-of-print, n. ahead-of-print, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1108/ECAM-05-2020-0299>. Acesso em: 28 fev. 2021.
- CIAMPA, Elena; VITO, Luca De; PECCE, Maria Rosaria. Practical issues on the use of drones for construction inspections. **Journal of Physics: Conference Series**, [s. l.], v. 1249, n. 1, p. 012016, 2019.
- CRAVEIRO, Flávio et al. Additive manufacturing as an enabling technology for digital construction: A perspective on Construction 4.0. **Automation in Construction**, [s. l.], v. 103, p. 251–267, 2019.

- ČUSTOVIĆ, Irfan; CAO, Jianpeng; HALL, Daniel M. Cloud manufacturing for industrialized construction: Opportunities and challenges for a new manufacturing model. **Journal of Infrastructure Intelligence and Resilience**, [s. l.], v. 2, n. 1, p. 100027, 2023.
- DAKHLI, Zakaria; LAFHAJ, Zoubeir; MOSSMAN, Alan. The Potential of Blockchain in Building Construction. *Buildings*, [s. l.], v. 9, n. 4, p. 77, 2019.
- DALLASEGA, Patrick; RAUCH, Erwin; LINDER, Christian. Industry 4.0 as an enabler of proximity for construction supply chains: A systematic literature review. **Computers in Industry**, [s. l.], v. 99, p. 205–225, 2018.
- DE ALMEIDA BARBOSA FRANCO, Jacqueline et al. Sustainability in the Civil Construction Sector Supported by Industry 4.0 Technologies: Challenges and Opportunities. *Infrastructures*, [s. l.], v. 7, n. 3, p. 43, 2022.
- DE ALMEIDA, Pedro Rodrigues; SOLAS, Manuel Zafra. Shaping the future of construction: A Breakthrough in Mindset and Technology. [S. l.]: **World Economic Forum**, 2016. Disponível em: <https://www.weforum.org/projects/future-of-construction/>. Acesso em: 2 maio 2019.
- DE-LA-TORRE-UGARTE-GUANILO, Mônica Cecília; TAKAHASHI, Renata Ferreira; BERTOLOZZI, Maria Rita. Revisão sistemática: noções gerais. **Revista da Escola de Enfermagem da USP**, [s. l.], v. 45, n. 5, p. 1260–1266, 2011.
- DEMIRKESEN, Sevilyay; TEZEL, Algan. Investigating major challenges for industry 4.0 adoption among construction companies. **Engineering, Construction and Architectural Management**, [s. l.], v. ahead-of-print, n. ahead-of-print, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1108/ECAM-12-2020-1059>. Acesso em: 16 dez. 2021.
- DINMOHAMMADI, Fateme. Adopting Artificial Intelligence in Industry 4.0: Understanding the Drivers, Barriers and Technology Trends. In: **2023 28TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON AUTOMATION AND COMPUTING (ICAC)**, 2023. 2023 28th International Conference on Automation and Computing (ICAC). [S. l.: s. n.], 2023. p. 01–06. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/10275230>. Acesso em: 28 fev. 2024.
- DOLLA, Tharun; JAIN, Karuna; DELHI, Venkata Santosh Kumar. Strategies for digital transformation in construction projects: stakeholders' perceptions and actor dynamics for Industry 4.0. **Journal of Information Technology in Construction (ITcon)**, [s. l.], v. 28, n. 8, p. 151–175, 2023.
- ELGHAISH, Faris et al. Applications of Industry 4.0 digital technologies towards a construction circular economy: gap analysis and conceptual framework. **Construction Innovation**, [s. l.], v. 22, n. 3, p. 647–670, 2022.
- FORCAEL, Eric et al. Construction 4.0: A Literature Review. **Sustainability**, [s. l.], v. 12, n. 22, p. 9755, 2020.
- FRANK, Alejandro G. et al. Servitization and Industry 4.0 convergence in the digital transformation of product firms: A business model innovation perspective. **Technological Forecasting and Social Change**, [s. l.], v. 141, p. 341–351, 2019.
- GÁLVEZ-MARTOS, José-Luis et al. Construction and demolition waste best management practice in Europe. **Resources, Conservation and Recycling**, [s. l.], v. 136, p. 166–178, 2018.
- GAO, Shang; LOW, Sui Pheng. The Last Planner System in China's construction industry — A SWOT analysis on implementation. **International Journal of Project Management**, [s. l.], v. 32, n. 7, p. 1260–1272, 2014.
- GARCÍA DE SOTO, Borja et al. Understanding the Significance of Cybersecurity in the Construction Industry: Survey Findings. **Journal of Construction Engineering and Management**, [s. l.], v. 148, n. 9, p. 04022095, 2022.
- GERBERT, Philipp et al. Digital in Engineering and Construction: The transformative Power of Building Information Modeling. Boston, USA: **The Boston Consulting Group Inc.**, 2016.
- GERHARD, Girmscheid. Industrialization in Building Construction: Production Technology or Management Concept?. In: INDUSTRIALIZATION IN BUILDING CONSTRUCTION, 2005, Helsinki (Finland). Proceedings of the 11th Joint CIB International Symposium: Combining Forces - Advancing Facilities Management and Construction through Innovation. Helsinki (Finland): **CIB - International Council for Research and Innovation in Building and Construction**, 2005. Disponível em: <http://hdl.handle.net/20.500.11850/69693>. Acesso em: 4 ago. 2022.
- GUO, Xin; ZHANG, Geng; ZHANG, Yingfeng. A Comprehensive Review of Blockchain Technology-Enabled Smart Manufacturing: A Framework, Challenges and Future Research Directions. **Sensors**, [s. l.], v. 23, n. 1, p. 155, 2023.
- HAMLEDARI, Hesam; FISCHER, Martin. Construction payment automation using blockchain-enabled smart contracts and robotic reality capture technologies. **Automation in Construction**, [s. l.], v. 132, p. 103926, 2021a.
- HAMLEDARI, Hesam; FISCHER, Martin. Role of Blockchain-Enabled Smart Contracts in Automating Construction Progress Payments. **Journal of Legal Affairs and Dispute Resolution in Engineering and Construction**, [s. l.], v. 13, n. 1, p. 04520038, 2021b.
- HAWERROTH, Amanda. Tendências vinculadas com a Construção 4.0 sob a perspectiva de relatórios de mercado. 2022. **TCC (graduação)** - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Engenharia Civil, Florianópolis, Brasil, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/243176>. Acesso em: 21 dez. 2022.

- HAYAT, Haroun; RÉDA, Ghomari Abdessamed. An IoT and spatial Big data based architecture for monitoring Occupational Health Risks exposure. In: **2022 FIRST INTERNATIONAL CONFERENCE ON BIG DATA, IOT, WEB INTELLIGENCE AND APPLICATIONS (BIWA)**, 2022. 2022 First International Conference on Big Data, IoT, Web Intelligence and Applications (BIWA). [S. l.: s. n.], 2022. p. 13–18.
- HOSSAIN, Aslam; NADEEM, Abid. Towards digitizing the construction industry: state of the art of construction 4.0. In: , 2019. **Proc. of the International Structural Engineering and Construction**. [S. l.]: ISEC Press, 2019. Disponível em: https://www.isec-society.org/ISEC_PRESS/ISEC_10/html/CON-13.xml. Acesso em: 23 dez. 2022.
- HU, Xin et al. Understanding Stakeholders in Off-Site Manufacturing: A Literature Review. *Journal of Construction Engineering and Management*, [s. l.], v. 145, n. 8, p. 03119003, 2019.
- IBEM, Eziyi O.; LARYEA, Samuel. Survey of digital technologies in procurement of construction projects. **Automation in Construction**, [s. l.], v. 46, p. 11–21, 2014.
- JAN, Zohaib et al. Artificial intelligence for industry 4.0: Systematic review of applications, challenges, and opportunities. **Expert Systems with Applications**, [s. l.], v. 216, p. 119456, 2023.
- JANSEN VAN VUUREN, Tercia; MIDDLETON, Campbell. Methodology for quantifying the benefits of offsite construction. [S. l.]: **CIRIA**, 2020. Disponível em: <https://www.repository.cam.ac.uk/handle/1810/317071>. Acesso em: 10 jun. 2024.
- JIANG, Rui et al. A SWOT analysis for promoting off-site construction under the backdrop of China's new urbanisation. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 173, p. 225–234, 2018.
- JIN, Xin et al. Influence of policies on stakeholders to drive the success of modular integrated construction in Hong Kong. **Engineering, Construction and Architectural Management**, [s. l.], v. ahead-of-print, n. ahead-of-print, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1108/ECAM-07-2023-0740>. Acesso em: 7 maio 2024.
- KAMALI, Mohammad; HEWAGE, Kasun. Life cycle performance of modular buildings: A critical review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 62, p. 1171–1183, 2016.
- KLINC, Robert; TURK, Žiga. Construction 4.0 – Digital Transformation of One of the Oldest Industries. **Economic and Business Review**, [s. l.], v. 21, n. 3, 2019. Disponível em: <https://www.ebrjournal.net/home/vol21/iss3/4>.
- KOOLWIJK, Jelle Simon Jowan et al. Collaboration and Integration in Project-Based Supply Chains in the Construction Industry. **Journal of Management in Engineering**, [s. l.], v. 34, n. 3, p. 04018001, 2018.
- KORDESTANI GHALEHNOEI, Nazanin et al. Challenges of offsite construction and BIM implementation: providing a framework for integration in New Zealand. **Smart and Sustainable Built Environment**, [s. l.], 2022.
- KOZLOVSKA, Maria; KLOSOVA, Daria; STRUKOVA, Zuzana. Impact of Industry 4.0 Platform on the Formation of Construction 4.0 Concept: A Literature Review. **Sustainability**, [s. l.], v. 13, n. 5, p. 2683, 2021.
- KUYVEN, Tainara; OLIVEIRA, Tarcisio Dorn de. SUSTENTABILIDADE AMBIENTAL E OS RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL (RCC): MAPEAMENTO DO DESCARTE ILEGAL DE RCC NO MUNICÍPIO DE IJUÍ - RS/**Environmental sustainability and civil construction waste (RCC)**: mapping of illegal RCC disposal in the municipality of Ijuí/RS. Informe GEPEC, [s. l.], v. 27, n. 2, p. 158–183, 2023.
- LABARAN, Yahaya Hassan et al. Carbon footprint management: A review of construction industry. **Cleaner Engineering and Technology**, [s. l.], v. 9, p. 100531, 2022.
- LAU, S. E. N. et al. Review: Identification of roadmap of fourth construction industrial revolution. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, [s. l.], v. 615, p. 012029, 2019.
- LEOTO, Ricardo; LIZARRALDE, Gonzalo. Challenges for integrated design (ID) in sustainable buildings. **Construction Management and Economics**, [s. l.], v. 37, n. 11, p. 625–642, 2019.
- LI, Jennifer; GREENWOOD, David; KASSEM, Mohamad. Blockchain in the built environment and construction industry: A systematic review, conceptual models and practical use cases. **Automation in Construction**, [s. l.], v. 102, p. 288–307, 2019.
- LIU, Hexu et al. Towards sustainable construction: BIM-enabled design and planning of roof sheathing installation for prefabricated buildings. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 235, p. 1189–1201, 2019.
- LU, Weisheng. Improved SWOT Approach for Conducting Strategic Planning in the Construction Industry. **Journal of Construction Engineering and Management**, [s. l.], v. 136, n. 12, p. 1317–1328, 2010.
- LUND, Susan et al. The future of work after COVID-19. [S. l.]: **McKinsey Global Institute**, 2021. Disponível em: <https://www.mckinsey.com/featured-insights/future-of-work/the-future-of-work-after-covid-19>. Acesso em: 20 fev. 2021.
- MADIGAN, David. A SWOT Analysis of the UK Civil Engineering Industry. ACI/DLV/ 96/014. [S. l.]: **School of Management. University of Bath.**, 1997. Disponível em: http://www.bath.ac.uk/management/larg_agile/publications/pdf/public/96.014.300.pdf. Acesso em: 17 jun. 2016.

- MAQBOOL, Rashid; SAIBA, Mohammed Rayan; ASHFAQ, Saleha. Emerging industry 4.0 and Internet of Things (IoT) technologies in the Ghanaian construction industry: sustainability, implementation challenges, and benefits. **Environmental Science and Pollution Research**, [s. l.], v. 30, n. 13, p. 37076–37091, 2023.
- MARQUES, Andreza. Perspectivas de utilização do Metaverso na construção civil. 2023. 74 f. **TCC (graduação)** - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Engenharia Civil, Florianópolis, Brasil, 2023. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/253306>. Acesso em: 15 dez. 2023.
- MASKURIY, Raihan et al. Industry 4.0 for the Construction Industry: Review of Management Perspective. **Economies**, [s. l.], v. 7, n. 3, p. 1–14, 2019.
- MEISELS, Michelle et al. The future of the construction industry: Preparing for fundamental shifts in connected construction. [S. l.]: **Deloitte Touche Tohmatsu Limited**, 2021. Disponível em: <https://www2.deloitte.com/us/en/pages/energy-and-resources/articles/future-of-construction-industry.html>. Acesso em: 5 dez. 2022.
- MENEGHELLO, Francesca et al. IoT: Internet of Threats? A Survey of Practical Security Vulnerabilities in Real IoT Devices. **IEEE Internet of Things Journal**, [s. l.], v. 6, n. 5, p. 8182–8201, 2019.
- NAGY, Orsolya; PAPP, Ilona; SZABÓ, Roland Zsolt. Construction 4.0 Organisational Level Challenges and Solutions. **Sustainability**, [s. l.], v. 13, n. 21, p. 12321, 2021.
- NIGAM, Vivek; TALCOTT, Carolyn. Automated Construction of Security Integrity Wrappers for Industry 4.0 Applications. **Journal of Logical and Algebraic Methods in Programming**, [s. l.], v. 126, p. 100745, 2022.
- NOWOTARSKI, Piotr; PASLAWSKI, Jerzy. Industry 4.0 Concept Introduction into Construction SMEs. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, [s. l.], 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**, [s. l.], v. 83, p. 121–139, 2016.
- OKOLI, Chitu; SCHABRAM, Kira. A Guide to Conducting a Systematic Literature Review of Information Systems Research. Rochester, NY: Social Science Research Network, 2010. **SSRN Scholarly Paper**. Disponível em: <http://papers.ssrn.com/abstract=1954824>. Acesso em: 1 jul. 2016.
- OLANIPEKUN, Ayokunle O.; SUTRISNA, Monty. Facilitating Digital Transformation in Construction—A Systematic Review of the Current State of the Art. **Frontiers in Built Environment**, [s. l.], v. 7, p. 96, 2021.
- OMRANY, Hossein et al. Digital Twins in the Construction Industry: A Comprehensive Review of Current Implementations, Enabling Technologies, and Future Directions. **Sustainability**, [s. l.], v. 15, n. 14, p. 10908, 2023.
- OSUNSANMI, Temidayo Oluwasola et al. Appraisal of stakeholders' willingness to adopt construction 4.0 technologies for construction projects. **Built Environment Project and Asset Management**, [s. l.], v. 10, n. 4, p. 547–565, 2020.
- OTI-SARPONG, Kwadwo et al. Transforming the construction sector: an institutional complexity perspective. **Construction Innovation**, [s. l.], v. 22, n. 2, p. 361–387, 2021.
- OVIEDO HAITO, Ricardo Juan Jose. Caracterização das empresas executoras de serviços de obras baseada nos seus ativos estratégicos. 2010. text - **Universidade de São Paulo**, [s. l.], 2010. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3146/tde-11082010-135918/>. Acesso em: 19 maio 2016.
- OVIEDO-HAITO, Ricardo Juan José; MORATTI, Tathyana; CARDOSO, Francisco Ferreira. Desafios da gestão da produção na construção 4.0. In: **XI SIBRAGEC & VIII ELAGEC 2019, 2019. XI SIBRAGEC & VIII ELAGEC 2019**. [S. l.: s. n.], 2019. Disponível em: <https://www.antaceventos.net.br/index.php/sibragec/sibragec2019/paper/view/466>. Acesso em: 26 out. 2019.
- PAN, Wei; CHEN, Le; ZHAN, Wenting. PESTEL Analysis of Construction Productivity Enhancement Strategies: A Case Study of Three Economies. **Journal of Management in Engineering**, [s. l.], v. 35, n. 1, p. 05018013, 2019.
- PANTELI, Christiana; KYLILI, Angeliki; FOKAIDES, Paris A. Building information modelling applications in smart buildings: From design to commissioning and beyond A critical review. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 265, p. 121766, 2020.
- PERERA, Srinath et al. Blockchain technology: Is it hype or real in the construction industry?. **Journal of Industrial Information Integration**, [s. l.], v. 17, p. 100125, 2020.
- PINTI, Lidia; CODINHOTO, Ricardo; BONELLI, Serena. A Review of Building Information Modelling (BIM) for Facility Management (FM): Implementation in Public Organisations. **Buildings**, [s. l.], v. 12, n. 3, 2022. Disponível em: <http://www.scopus.com/inward/record.url?scp=85123761630&partnerID=8YFLogxK>. Acesso em: 24 maio 2024.
- PIROOZFAR, Poorang et al. Configuration platform for customisation of design, manufacturing and assembly processes of building façade systems: A building information modelling perspective. **Automation in Construction**, [s. l.], v. 106, p. 102914, 2019.

- PRABHAKAR, Vishnuprasad V; BELARMIN XAVIER, C. S.; ABUBEKER, K. M. A Review on Challenges and Solutions in the Implementation of Ai, IoT and Blockchain in Construction Industry. **Materials Today: Proceedings**, [s. l.], 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785323016024>. Acesso em: 28 fev. 2024.
- RÊGO, Bruno Siano et al. Digital Transformation and Strategic Management: a Systematic Review of the Literature. **Journal of the Knowledge Economy**, [s. l.], v. 13, n. 4, p. 3195–3222, 2022.
- REGONA, Massimo et al. Opportunities and Adoption Challenges of AI in the Construction Industry: A PRISMA Review. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, [s. l.], v. 8, n. 1, p. 45, 2022.
- RIBEIRINHO, Maria João et al. The next normal in construction: How disruption is reshaping the world's largest ecosystem. [S. l.]: **McKinsey & Company**, 2020. Disponível em: <https://www.mckinsey.com/business-functions/operations/our-insights/the-next-normal-in-construction-how-disruption-is-reshaping-the-worlds-largest-ecosystem>. Acesso em: 28 jul. 2022.
- RIBEIRO, Yanh et al. Information systems for construction 4.0: classification of contents for integration and interoperability – case study. In: 2023 EUROPEAN CONFERENCE ON COMPUTING IN CONSTRUCTION AND THE 40TH INTERNATIONAL CIB W78 CONFERENCE, 2023. **Anais [...]**. [S. l.: s. n.], 2023. Disponível em: https://ec-3.org/publications/conference/paper/?id=EC32023_289. Acesso em: 24 maio 2024.
- ROBINSON, Graham; LEONARD, Jeremy; WHITTINGTON, Toby. The Future of Construction. London, UK: **Oxford Economics, Marsh and Guy Carpenter**, 2021. Disponível em: <https://www.marsh.com/us/industries/construction/insights/the-future-of-construction.html>. Acesso em: 16 dez. 2021.
- ROWLINSON, Steve. The temporal nature of forces acting on innovative IT in major construction projects. **Construction Management and Economics**, [s. l.], v. 25, n. 3, p. 227–238, 2007.
- SABBATINI, Fernando Henrique. Desenvolvimento de métodos, processos e sistemas construtivos: formulação e aplicação de uma metodologia. 1989. 321 f. **Tese (doutorado)** - Universidade de São Paulo, São Paulo, 1989. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3146/tde-30082017-091328/>. Acesso em: 6 out. 2017.
- SAMBUCCI, Matteo; SIBAI, Abbas; VALENTE, Marco. Recent Advances in Geopolymer Technology. A Potential Eco-Friendly Solution in the Construction Materials Industry: **A Review. Journal of Composites Science**, [s. l.], v. 5, n. 4, p. 109, 2021.
- SAMPAIO, Rf; MANCINI, Mc. Estudos de revisão sistemática: um guia para síntese criteriosa da evidência científica. **Revista Brasileira de Fisioterapia**, [s. l.], v. 11, n. 1, p. 83–89, 2007.
- SANTOS, Rúbia; PALADINI, Edson; JUNGLES, Antonio. A servitização como instrumento estratégico em um grupo empresarial da construção civil. In: , 2014. **Anais [...]**. [S. l.: s. n.], 2014. p. 1177–1185.
- SAWANT, Rohan; JOSHI, Deepa A.; MENON, Radhika. Blockchain Technology in Construction Supply Chain Management During Pandemic: A Bibliometric Analysis and Systematic Literature Review. In: **2022 INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTING, COMMUNICATION, AND INTELLIGENT SYSTEMS (ICCCIS), 2022. 2022 International Conference on Computing, Communication, and Intelligent Systems (ICCCIS)**. [S. l.: s. n.], 2022. p. 421–428. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/10037673>. Acesso em: 10 jun. 2024.
- SAWHNEY, Anil; RILEY, Michael; IRIZARRY, Javier. Construction 4.0: An Innovation Platform for the Built Environment. [S. l.]: **Routledge**, 2020. Disponível em: <https://www.taylorfrancis.com/books/e/9780429398100>. Acesso em: 8 jul. 2020.
- SCHNASSE, Felix; MENZEFRICKE, Jörn Steffen; DUMITRESCU, Roman. Identification of Socio-Technical Risks and Their Correlations in the Context of Digital Transformation for the Manufacturing Sector. In: **2021 IEEE 8TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRIAL ENGINEERING AND APPLICATIONS (ICIEA), 2021. 2021 IEEE 8th International Conference on Industrial Engineering and Applications (ICIEA)**. [S. l.: s. n.], 2021. p. 159–166.
- SCHUH, Günther et al. Industrie 4.0 Maturity Index – Managing the Digital Transformation of Companies. [S. l.]: **Acatech - National Academy of Science and Engineering**, 2020. Disponível em: <https://en.acatech.de/publication/industrie-4-0-maturity-index-managing-the-digital-transformation-of-companies/>. Acesso em: 11 jun. 2022.
- SCHWAB, Klaus; ZAHIDI, Saadia. The Future of Jobs Report 2020. [S. l.]: **World Economic Forum**, 2020. Disponível em: <https://www.weforum.org/reports/the-future-of-jobs-report-2020/>. Acesso em: 7 dez. 2022.
- SEARS, S. Keoki; CLOUGH, Richard H.; SEARS, Glenn A. Construction project management: a practical guide to field construction management. **5th eded. Hoboken**, N.J: John Wiley & Sons, 2008.
- SHA, Kaixun; YANG, Jie; SONG, Ruiqian. Competitiveness assessment system for China's construction industry. **Building Research & Information**, [s. l.], v. 36, n. 1, p. 97–109, 2008.
- SHARMA, Pratima; JINDAL, Rajni; BORAH, Malaya Dutta. A review of smart contract-based platforms, applications, and challenges. **Cluster Computing**, [s. l.], v. 26, n. 1, p. 395–421, 2023.
- SILVA, Guido et al. Natural fibers as reinforcement additives for geopolymers – A review of potential eco-friendly applications to the construction industry. **Sustainable Materials and Technologies**, [s. l.], v. 23, p. e00132, 2020.

- SINGH, Arpit et al. Identification and severity assessment of challenges in the adoption of industry 4.0 in Indian construction industry. **Asia Pacific Management Review**, [s. l.], v. 28, n. 3, p. 299–315, 2023.
- SOUZA, Alex Sander Clemente de; DEBS, Luciana. Identifying Emerging Technologies and Skills Required for Construction 4.0. **Buildings**, [s. l.], v. 13, n. 10, p. 2535, 2023.
- TAMVADA, Jagannadha Pawan et al. Adopting new technology is a distant dream? The risks of implementing Industry 4.0 in emerging economy SMEs. **Technological Forecasting and Social Change**, [s. l.], v. 185, p. 122088, 2022.
- TANG, Llewellyn C. M.; ATKINSON, Ben; ZOU, Raymond Rui. An entropy-based SWOT evaluation process of critical success factors for international market entry: a case study of a medium-sized consulting company. **Construction Management and Economics**, [s. l.], v. 30, n. 10, p. 821–834, 2012.
- TEISSERENC B, SEPASGOZAR S. Adoption of Blockchain Technology through Digital Twins in the Construction Industry 4.0: A PESTELS Approach. **Buildings**. 2021; 11(12):670.
- THOMAS, H. Randolph et al. Modeling Construction Labor Productivity. **Journal of Construction Engineering and Management**, [s. l.], v. 116, n. 4, p. 705–726, 1990.
- TRUNG, Nguyen et al. Digital Transformation, AI Applications and IoTs in Blockchain Managing Commerce Secrets: And Cybersecurity Risk Solutions in the Era of Industry 4.0 and Further. **Webology**, [s. l.], v. 18, p. 453–465, 2021.
- TURKYILMAZ, Ali et al. A Comprehensive Construction and Demolition Waste Management Model using PESTEL and 3R for Construction Companies Operating in Central Asia. **Sustainability**, [s. l.], v. 11, n. 6, p. 1593, 2019.
- TURNER, C. J. et al. Utilizing Industry 4.0 on the Construction Site: Challenges and Opportunities. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, [s. l.], v. 17, n. 2, p. 746–756, 2021.
- VIEITAS, Cássia Bruna Pinheiro. Planejamento estratégico na piscicultura: Um olhar sobre os fatores externos que influenciam a atividade no estado do Pará. [s. l.], 2023. Disponível em: <http://bdta.ufra.edu.br/jspui/handle/123456789/2865>. Acesso em: 17 maio 2024.
- WANG, Ke et al. Analyzing the Adoption Challenges of the Internet of Things (IoT) and Artificial Intelligence (AI) for Smart Cities in China. **Sustainability**, [s. l.], v. 13, n. 19, p. 10983, 2021.
- XUE, Xiaolong et al. Coordination mechanisms for construction supply chain management in the Internet environment. *International Journal of Project Management*, [s. l.], v. 25, n. 2, **ICCREM 2005**, the International Conference on Construction and Real Estate Management 2005, p. 150–157, 2007.
- ZABIDIN, Nadia Safura; BELAYUTHAM, Sheila; IBRAHIM, Che Khairil Izam Che. A bibliometric and scientometric mapping of Industry 4.0 in construction. **Journal of Information Technology in Construction (ITcon)**, [s. l.], v. 25, n. 17, p. 287–307, 2020.
- ZAVADSKAS, E. K.; TURSKIS, Z.; TAMOSAITIENE, J. Selection of construction enterprises management strategy based on the SWOT and multi-criteria analysis. **Archives of Civil and Mechanical Engineering**, [s. l.], v. 11, n. 4, p. 1063–1082, 2011.
- ZENG, S. X.; CHEN, H. M.; TAM, C. M. Market Structure of the Construction Industry of China. **Architectural Science Review**, [s. l.], v. 48, n. 4, p. 367–375, 2005.
- ZHANG, Jingxiao et al. A critical review of the current research mainstreams and the influencing factors of green total factor productivity. **Environmental Science and Pollution Research**, [s. l.], v. 28, n. 27, p. 35392–35405, 2021.
- ZHDANEEV, O. V.; KORENEV, V. V.; LYADOV, A. S. Opportunities and Challenges to Deploy Industry 4.0 Technologies in the Russian Oil Refining and Petrochemical Industries. **Russian Journal of Applied Chemistry**, [s. l.], v. 93, n. 12, p. 1926–1930, 2020.
- ZIMMERMANN, Joana. Caracterização das fontes de vantagem competitiva vinculadas com a Construção 4.0. 2022. **TCC (graduação)** - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Engenharia Civil, Florianópolis, Brasil, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/243179>. Acesso em: 20 dez. 2022.