

**RANKING DE BARREIRAS PARA IMPLEMENTAÇÃO DA INDÚSTRIA 4.0: SURVEY
COM PROFISSIONAIS DA INDÚSTRIA DO CIMENTO BRASILEIRA**

EDILSON DOS SANTOS JÚNIOR

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE MINAS GERAIS (PUC MINAS) - PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM
ADMINIST

DEOCLÉCIO JUNIOR CARDOSO DA SILVA

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE (FURG)

RODRIGO BARONI DE CARVALHO

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE MINAS GERAIS (PUC MINAS)

RANKING DE BARREIRAS PARA IMPLEMENTAÇÃO DA INDÚSTRIA 4.0: SURVEY COM PROFISSIONAIS DA INDÚSTRIA DO CIMENTO BRASILEIRA

1. Introdução

A crescente relevância gerada pela tecnologia digital fez surgir mudanças no modo de realizar as diferentes atividades dentro das organizações (Suleiman et al., 2022). Nesse contexto, surge a considerada quarta revolução industrial, ou ainda Indústria 4.0, marcada pelo avanço da interconexão entre sensores, máquinas e produtos, trazendo dados em tempo real e melhorando cada vez mais a forma de produzir (Nouinou et al., 2023).

Yavuz et al. (2023) demonstram que estas tecnologias da Indústria 4.0 tendem a auxiliar na melhoria do desempenho sustentável das organizações. Soori et al. (2024) evidenciam que a manufatura virtual se trata de um dos componentes principais da Indústria 4.0, e por meio dela, é possível otimizar seus processos produtivos de forma colaborativa e eficiente. Ghobakhloo (2020), Lassen & Wæhrens (2021) e Guo et al. (2021) ressaltam a crescente disseminação e exploração da incorporação de tecnologia nos ambientes industriais, evidenciando sua capacidade de promover aumento da produtividade, organização, integração, sustentabilidade, além de redução de riscos e custos.

Pode-se observar também que a Indústria 4.0 atua como um catalisador de inovação tecnológica, promovendo o desenvolvimento e a aplicação de novas tecnologias que transformam processos de produção e modelos de negócios. Raj et al. (2020) destacam que a adoção de tecnologias como IA (Inteligência Artificial) e IoT (Internet das Coisas) possibilitam a criação de sistemas de manufatura inteligentes e conectados, que são capazes de automonitoramento, auto otimização e tomada de decisões autônomas. Isso resulta em maior eficiência, flexibilidade e capacidade de resposta às demandas do mercado.

No entanto, apesar do seu potencial, a implementação da Indústria 4.0 traz alguns desafios relevantes, sejam estes culturais, estratégicos ou de conhecimento (Zhang et al., 2021). Govindan e Arampatzis (2023) salientam ainda que a cultura desempenha um papel fundamental na avaliação das plataformas da Indústria 4.0 e reforçam ainda que sua implementação das tecnologias da Indústria 4.0 requer profissionais com habilidades especializadas. A escassez de mão de obra qualificada em tecnologias de vanguarda é um obstáculo significativo para a adoção da Indústria 4.0 em muitas empresas. Contudo conhecer essas barreiras e outras possíveis é o passo inicial para avançar na agenda de inovação e Indústria 4.0 (Calabrese et al., 2022; Jankowska et al., 2022).

Diante a importância da temática, bem como, dos benefícios gerados com a adoção das tecnologias da Indústria 4.0, o objetivo deste estudo é identificar e avaliar quais são as principais barreiras para a implementação da Indústria 4.0 na indústria do cimento brasileira, propondo sugestões de mitigação.

A importância do contexto do estudo é evidenciada uma vez que a indústria do cimento possui relevância no contexto manufatureiro, fazendo parte do setor da construção civil ao produzir o concreto, que representa o material de construção mais amplamente empregado na escala global, e, o segundo material mais utilizado no mundo (*Global Cement and Concrete Association - GCCA*, 2022). Nesse sentido, Macedo et al. (2018) afirmaram que a adoção da Indústria 4.0 representa um fator relevante para o setor cimenteiro. Gomaa et al. (2023) enfatizam que o setor da construção civil vem passando por uma rápida mudança, apoiando-se na Indústria 4.0 e gerando conceitos como o termo Construção 4.0.

A indústria cimenteira brasileira é composta por 24 grupos cimenteiros, 100 fábricas, localizadas em 80 municípios e 23 estados, sendo 60 unidades integradas com fornos e 39 moagens de cimento. O setor tem capacidade de produção anual de 94 milhões de toneladas de cimento por ano e consumo próximo de 65 milhões de toneladas por ano. Mesmo na pandemia,

o setor aumentou cerca de 14% a sua produção (De Souza & Pacca, 2023), sendo responsável por cerca de 18 mil empregos diretos (SNIC, 2023). Justifica-se empiricamente a escolha deste setor por sua representatividade e impacto econômico e social, bem como pela escassez de estudos de Indústria 4.0 aplicados a esse setor (Galizia et al., 2023). Em relação a técnica de análise utilizada, foi utilizado o *Fuzzy AHP (Analytic Hierarchy Process – Processo Hierárquico Analítico)*, que se trata de um método que permite a avaliar e estratificar contrariedades complexas embasados em diferentes critérios, sendo considerado adequado para diferentes contextos de processo decisório, uma vez que se utiliza da opinião de especialistas para conduzir a avaliação das alternativas/critérios (Soares et al. 2021; Wegner et al., 2023).

Desse modo, o restante do artigo está estruturado da seguinte maneira: a segunda seção apresenta a fundamentação teórica acerca da Indústria 4.0 e as barreiras evidenciadas para a sua implementação em diferentes contextos.; na terceira seção, apresentam-se os procedimentos metodológicos; na quarta seção, desenvolve-se a análise dos resultados, bem como as discussões dos mesmos; na quinta seção, apresentam-se as considerações finais, abordando do panorama geral dos achados desta pesquisa, as limitações e sugestões para estudos futuros.

2. Fundamentação Teórica

2.1. Indústria 4.0

Marcos importantes na narrativa histórica manifestam-se por meio das revoluções industriais (Belvedere et al., 2013). Esses eventos são caracterizados pela transição para novos métodos de produção, impulsionados pelos avanços em ciência e tecnologia, resultando em alterações significativas nos processos, organização e recursos. A Primeira Revolução Industrial, instaurada por volta de 1760, é reconhecida como um marco crucial na evolução humana (Liao et al., 2018). Esta fase foi catalisada por instalações de produção mecânica movidas a água e vapor, viabilizando a produção em larga escala de bens, notadamente têxteis (Allen, 2009).

Na virada do século XIX, emergiu a Segunda Revolução Industrial, introduzindo tecnologias de produção em massa alimentadas por eletricidade, o que resultou na divisão do trabalho e em um crescimento econômico acelerado (Horn, Rosenband e Smith, 2010). No final da década de 1960, teve início a Terceira Revolução Industrial com a ampliação do uso da eletrônica e tecnologia da informação na produção. Essa fase se caracterizou pela automação e pela incorporação de computadores na gestão da produção (Yin, Stecke e Li, 2018).

Na Feira de Hannover (Alemanha) em 2011, surgiu o conceito de Indústria 4.0, marcando o advento da Quarta Revolução Industrial (Liao et al., 2017; Tortorella e Fettermann, 2018; Rossit, Tohmé e Frutos, 2019). A Indústria 4.0 abarca uma gama de componentes complexos aplicados em diversas indústrias, representando a atual tendência de automação e digitalização. Ela evoluiu de sistemas embarcados para sistemas ciberfísicos, resultando em maior modularidade e flexibilidade para contextos de produção personalizados em massa (Landscheidt e Kans, 2016; Tortorella et al., 2021; Ciano et al., 2021).

Xu et al. (2018) e Rosin et al. (2020) argumentam que a Indústria 4.0 é concebida como uma abordagem tecnológica que integra pessoas, processos, produtos e serviços em níveis intra e interorganizacionais. Este processo histórico fundamenta-se no uso profundo de tecnologia de ponta, aprimorando os processos de fabricação inteligentes, impulsionando a produção e o capital (Varela et al., 2019; Rakic et al., 2021).

Diversas tecnologias têm sido vinculadas à Indústria 4.0. Pour et al. (2023) associam o termo Indústria 4.0 ao uso de sistemas ciberfísicos em sistemas de produção industrial. Além dos sistemas ciberfísicos, a Indústria 4.0 atualmente refere-se a várias outras tecnologias, conforme apresentado no Quadro 1, que ilustra a adoção de algumas das tecnologias mais comuns da Indústria 4.0 e seu delineamento conceitual.

Quadro 1 – Tecnologias da Indústria 4.0

| Tecnologia | Descrição | Referências |
|--|--|---|
| Manufatura Aditiva | É um processo industrial controlado por computador que envolve a impressão 3D. A manufatura aditiva cria objetos tridimensionais depositando materiais, geralmente em camadas. | Oesterreich e Teuteberg, (2016) Laskurain et al. (2021) |
| Inteligência Artificial | É uma ciência cognitiva para melhorar as decisões com importantes atividades de pesquisa em muitas áreas, como processamento de imagem, processamento de linguagem natural, robótica ou aprendizado de máquina. | Lee et al., (2018) Laskurain et al. (2021) |
| Big Data e Análise Avançada | Por meio de bancos de dados, os dados coletados são constantemente atualizados e analisados com alta capacidade analítica de algoritmos avançados, e os processos de tomada de decisão são aprimorados. | Rüßmann et al. (2015); Strange e Zucchella (2017) Laskurain et al. (2021) |
| Cibersegurança | Em um mundo hiperconectado, é crucial assegurar comunicações seguras entre sistemas para proteger contra roubo de informações, danos à fabricação e defeitos de qualidade, bem como prevenir desligamentos causados por ataques cibernéticos. | Thames e Schaefer (2017) Laskurain et al. (2021) |
| Internet das Coisas (IoT) | IoT visa resolver problemas de comunicação entre todos os objetos e sistemas em uma fábrica. A IoT combina máquinas inteligentes e autônomas, análise preditiva avançada e colaboração homem-máquina para melhorar a produtividade, eficiência e confiabilidade. | Frank et al. (2019) Wong e Kim (2017) Thramboulidis e Christoulakis (2016) Laskurain et al. (2021) |
| Robótica | Os robôs estão se tornando mais autônomos, flexíveis e cooperativos, e em breve poderão interagir uns com os outros e trabalhar com segurança com humanos, e até mesmo aprender com eles. | Kamble et al. (2018) Laskurain et al. (2021) |
| Realidade Virtual e Aumentada | Permite simular situações reais para treinar trabalhadores, evitar situações perigosas, melhorar a tomada de decisões. | Laskurain et al. (2021) |
| Computação em Nuvem | A integração da Computação em Nuvem nas empresas oferece benefícios como a promoção da cooperação global e relacionamentos interorganizacionais, além de fornecer espaço de armazenamento adicional para dados importantes de empresas de manufatura. | Pour et al. (2023) |
| Blockchain | É um banco de dados distribuído que mantém uma lista de registros completamente crescente, distribuída e sem adulteração, usando nova tecnologia de criptografia e autenticação e mecanismo de consenso em toda a rede. | Bai et al. (2020) |
| Modelagem e simulação computacional | Simulações prévias à produção permitem obter resultados próximos à realidade, possibilitando às indústrias identificarem defeitos e problemas antes do início efetivo da produção, resultando em economia de tempo e recursos financeiros. | Pour et al. (2023) |
| Integração de Sistemas | Integrar tecnologias de informação (como IoT, sistemas ciberfísicos, computação em nuvem, AI etc.) e automação (robôs, cobots, veículos guiados automaticamente etc.) em todos os setores de uma empresa, tanto vertical quanto horizontalmente, visa aprimorar o desempenho global. | Abdulnour et al. (2022) |

Fonte: Elaborado pelos autores

Pour et al. (2023) propõem que a Indústria 4.0, reconhecida por sua resiliência, conectividade e capacidades de processamento de dados em tempo real, destaca-se como o principal catalisador da transformação digital contemporânea. A identificação apropriada e implementação de tecnologias específicas da Indústria 4.0 é de suma importância para as instalações de produção, as quais devem alinhar tais tecnologias com seus esquemas operacionais e metas de produção. Diante desse desafio, diversas estruturas de seleção de tecnologia foram propostas, embora muitas delas apresentem complexidade ou exijam dados históricos de instalações de produção, os quais podem não estar prontamente disponíveis.

Nesse contexto, Pour et al. (2023) sugerem que as tecnologias vinculadas à Indústria 4.0 desempenham papel significativo na otimização de diversos aspectos industriais, incluindo o *design* e modelagem de produtos, metodologias de produção, rastreabilidade de matérias-primas e entregas de produtos. Tal implementação é crucial para aprimorar o desempenho global da empresa.

2.2. Barreiras à Indústria 4.0

A compreensão das barreiras na adoção da Indústria 4.0 é crucial para garantir sua implementação bem-sucedida. Raj et al. (2020) destacam que a falta de alinhamento estratégico entre os objetivos organizacionais e as iniciativas tecnológicas pode fragmentar projetos e resultar em recursos inadequados e resistência às mudanças. Estruturas organizacionais tradicionais, que não favorecem a agilidade necessária, podem agravar esse problema.

Além disso, a resistência cultural e organizacional à adoção de novas tecnologias é um desafio significativo. Govindan e Arampatzis (2023) apontam que a dificuldade em mudar práticas estabelecidas, aliada à falta de conscientização sobre as novas tecnologias, contribui para a resistência. O medo do desconhecido e a preocupação com a perda de empregos também são fatores críticos. Envolver os funcionários no processo de mudança e promover uma cultura de inovação são estratégias essenciais para mitigar essa barreira.

Outro aspecto crucial é a identificação e mitigação de fraquezas internas, como processos ineficientes e resistência cultural. A falta de visão estratégica e planejamento resulta em iniciativas fragmentadas. Raj et al. (2020) enfatizam que a liderança muitas vezes não consegue motivar e engajar a força de trabalho. O desenvolvimento de capacidades de liderança específicas para a transformação digital é fundamental para superar essa barreira.

A ausência de padrões claros para a integração de sistemas heterogêneos resulta em incompatibilidades e silos de informação, aumentando a complexidade e os custos de implementação e manutenção. Singh e Bhanot (2020) argumentam que, sem uma arquitetura de referência, a escalabilidade das soluções é limitada, o que impede o crescimento e a inovação. A interoperabilidade limitada entre soluções proprietárias é uma barreira crítica que necessita de atenção.

A infraestrutura tecnológica inadequada é outra barreira significativa para a adoção da Indústria 4.0. Deficiências em redes, como baixa largura de banda e alta latência, dificultam a comunicação eficiente. Equipamentos obsoletos requerem grandes investimentos em atualização. Raj et al. (2020) ressaltam que a falta de padrões industriais uniformes e de interoperabilidade cria silos de dados e limita a análise em tempo real e os benefícios da digitalização.

A qualidade do gerenciamento de dados também é crucial para a eficácia das tecnologias da Indústria 4.0. Discrepâncias e falta de padronização dificultam a criação de repositórios confiáveis. Dados incompletos comprometem a eficiência operacional e a automação. Singh e Bhanot (2020) destacam que erros, duplicidade e dados obsoletos prejudicam a análise e as

decisões. A necessidade de segurança e políticas de privacidade é fundamental para proteger os dados e garantir a conformidade.

A interconexão de dispositivos na Indústria 4.0 aumenta a vulnerabilidade a ciberataques, resultando em acesso não autorizado e interrupções operacionais. Govindan e Arampatzis (2023) afirmam que proteger dados sensíveis é crucial para evitar perdas financeiras e cumprir regulamentos de proteção de dados. A gestão adequada de identidade e acesso é essencial para proteger sistemas e evitar penalidades e danos à reputação.

Os altos custos iniciais de implementação e a incerteza sobre o retorno sobre investimento (ROI) são barreiras financeiras significativas. Raj et al. (2020) e Govindan e Arampatzis (2023) apontam que o acesso limitado a financiamento, especialmente para pequenas e médias empresas, é um obstáculo. As prioridades conflitantes de investimento dentro das organizações complicam ainda mais o cenário, dificultando a alocação de recursos.

O desconhecimento das tecnologias da Indústria 4.0, como IoT e IA, e seus benefícios é outra barreira comum. Raj et al. (2020) sugerem que muitas empresas subestimam os benefícios de longo prazo, focando nos custos iniciais. A falta de visão estratégica limita a compreensão dos benefícios, e a dificuldade de mensurar ganhos em eficiência e inovação é um desafio adicional.

A deficiência em competências técnicas é uma barreira significativa para a implementação da Indústria 4.0. Raj et al. (2020) destacam que a falta de formação contínua e a resistência ao aprendizado de novas tecnologias dificultam a adaptação dos funcionários. A escassez de especialistas em áreas emergentes compromete a eficácia das implementações tecnológicas, tornando essencial o desenvolvimento de programas de treinamento contínuo.

A resistência à mudança é influenciada por diversos fatores, incluindo a falta de apoio da liderança e a ausência de investimentos em capacitação. Raj et al. (2020) e Singh e Bhanot (2020) enfatizam que a comunicação ineficaz e a falta de transparência dificultam a aceitação das mudanças. Envolver os funcionários nas mudanças e promover uma mentalidade de inovação são fundamentais para superar essa barreira.

A falta de normas de segurança e privacidade desestimula investimentos. Govindan e Arampatzis (2023) afirmam que a regulamentação é necessária para garantir a interoperabilidade e evitar silos de dados. A falta de harmonização regulatória internacional complica a conformidade e a ausência de incentivos governamentais limita os investimentos em tecnologias avançadas.

3. Procedimentos Metodológicos

Visando o alcance do objetivo delineado, uma pesquisa exploratória de cunho quantitativo foi desenvolvida. A pesquisa se iniciou como uma revisão de literatura, junto às bases de dados da *Web of Science* e *Scopus*. Os seguintes termos em inglês “*industry 4.0*”, “*smart industry*”, bem como, “*barrier*” e “*impeditive*” foram utilizados nas bases citadas, gerando uma base inicial de pesquisa de mais de 17.000 artigos. Entretanto, adotaram-se alguns critérios de exclusão, sendo eles: a) apenas artigos e revisões; b) somente artigos em inglês; c) apenas artigos publicados em periódicos que estão classificados em Quartis 1 e 2 da Scimago e por fim d) aqueles que tratavam diretamente da indústria 4.0 no setor de manufatura, resultando assim em um corpus de 35 artigos aderentes ao tema. Após a análise deste corpus, pode-se verificar 12 diferentes barreiras associadas à implementação da indústria 4.0 no setor de manufatura (Quadro 2).

Quadro 2 – Barreiras à Indústria 4.0

| Barreira | Descrição da barreira | Referências |
|----------|-----------------------|-------------|
|----------|-----------------------|-------------|

| | | |
|---|--|---|
| Br1 - Falta de Alinhamento Estratégico | A falta de alinhamento estratégico entre objetivos organizacionais e iniciativas tecnológicas fragmenta projetos, gera resistência às mudanças e dificulta a integração de novas tecnologias, comprometendo o retorno sobre o investimento. | Raj et al. (2020), Singh e Bhanot (2020), Stentoft e Rajkumar (2020), Cugno et al. (2021), Calabrese et al. (2022), Jankowska et al. (2022) |
| Br2 - Falta de Cultura Organizacional | A resistência cultural e organizacional à adoção de novas tecnologias é causada pela dificuldade de mudar práticas estabelecidas, falta de entendimento, medo do desconhecido e perda de empregos, além da falta de habilidades e suporte gerencial. Envolver os funcionários é essencial para reduzir essa resistência. | Raj et al. (2020), Singh e Bhanot (2020), Stentoft e Rajkumar (2020), Cugno et al. (2021), Calabrese et al. (2022), Jankowska et al. (2022) |
| Br3 - Baixa Gestão de Fraquezas e Liderança | A falha em identificar fraquezas internas, a falta de visão estratégica e liderança incapaz de motivar e engajar são barreiras significativas. Falta de capacitação, resiliência, governança eficaz e suporte comprometem a coordenação. | Raj et al. (2020), Singh e Bhanot (2020), Stentoft e Rajkumar (2020), Cugno et al. (2021), Calabrese et al. (2022), Jankowska et al. (2022) |
| Br4 - Falta de Arquitetura de Padrão de Referência na Indústria 4.0 | A ausência de padrões claros dificulta a integração de sistemas, resultando em incompatibilidades e silos de informação. A interoperabilidade limitada entre soluções proprietárias aumenta a complexidade e os custos, dificultando a escalabilidade e a conformidade com normas, elevando os riscos operacionais. | Raj et al. (2020), Singh e Bhanot (2020), Stentoft e Rajkumar (2020), Cugno et al. (2021), Calabrese et al. (2022), Jankowska et al. (2022) |
| Br5 - Falta de Infraestrutura Tecnológica | Deficiências em redes, equipamentos obsoletos, falta de padrões e interoperabilidade criam silos de dados e dificultam a comunicação. Infraestruturas de TI inadequadas limitam a coleta, análise de dados e segurança cibernética, prejudicando a análise em tempo real e a digitalização. | Raj et al. (2020), Singh e Bhanot (2020), Stentoft e Rajkumar (2020), Cugno et al. (2021), Calabrese et al. (2022), Jankowska et al. (2022) |
| Br6 - Má qualidade do gerenciamento de dados existente | Discrepâncias, falta de padronização, dados incompletos e obsoletos prejudicam a eficiência e a análise. A integração difícil cria silos, e a segurança e governança são cruciais para qualidade e conformidade. | Raj et al. (2020), Singh e Bhanot (2020), Stentoft e Rajkumar (2020), Cugno et al. (2021), Calabrese et al. (2022), Jankowska et al. (2022) |
| Br7 - Problemas de Segurança e Privacidade | A interconexão de dispositivos aumenta a vulnerabilidade a ciberataques e ameaças internas. Proteger dados sensíveis é crucial para evitar perdas e cumprir regulamentos como GDPR e LGPD. A computação em nuvem traz riscos adicionais. Gestão adequada de identidade e acesso é essencial para a segurança dos sistemas. | Raj et al. (2020), Singh e Bhanot (2020), Stentoft e Rajkumar (2020), Cugno et al. (2021), Calabrese et al. (2022), Jankowska et al. (2022), Govindan & Arampatzis (2023) |
| Br8 - Restrição Financeira | Os altos custos iniciais e a incerteza sobre o ROI são barreiras significativas. O acesso limitado a financiamento e prioridades conflitantes de investimento complicam a alocação de recursos. Custos contínuos de manutenção e falta de modelos de negócio sustentáveis também dificultam a adoção de novas tecnologias. | Raj et al. (2020), Singh e Bhanot (2020), Stentoft e Rajkumar (2020), Cugno et al. (2021), Calabrese et al. (2022), Jankowska et al. (2022), Govindan & Arampatzis (2023) |
| Br9 - Falta de Compreensão sobre os Benefícios da Indústria 4.0 | O desconhecimento de tecnologias e a subestimação dos benefícios a longo prazo dificultam a adoção da Indústria 4.0. A falta de visão estratégica, comunicação ineficaz e ausência de exemplos práticos aumentam o ceticismo. | Raj et al. (2020), Singh e Bhanot (2020), Stentoft e Rajkumar (2020), Cugno et al. (2021), Calabrese et al. (2022), Jankowska et al. (2022) |
| Br10 - Falta de Conhecimento e | A deficiência em competências técnicas, como IoT, IA, big data e automação, é uma barreira significativa. A falta de formação contínua, resistência ao aprendizado, escassez de | Raj et al. (2020), Singh e Bhanot (2020), Stentoft e Rajkumar (2020), Cugno et al. |

| | | |
|--|---|---|
| Habilidades dos Funcionários | especialistas e a integração insuficiente entre conhecimento técnico e processos de negócio dificultam a adaptação. | (2021), Calabrese et al. (2022), Jankowska et al. (2022), Govindan & Arampatzis (2023) |
| Br11 - Resistência à Mudança | A resistência à mudança é influenciada pela falta de apoio da liderança, ausência de investimentos em capacitação, comunicação ineficaz, falta de transparência e não envolvimento dos funcionários. A ausência de uma mentalidade de inovação também contribui para essa resistência. | Raj et al. (2020), Singh e Bhanot (2020), Stentoft e Rajkumar (2020), Cugno et al. (2021), Calabrese et al. (2022), Jankowska et al. (2022) |
| Br12 - Falta de Regras e Regulamentos na Indústria 4.0 | A falta de normas de segurança e privacidade desestimula investimentos. A regulamentação é crucial para interoperabilidade e evitar silos de dados. A harmonização regulatória internacional e incentivos governamentais são necessários. Diretrizes sobre responsabilidade e ética são essenciais. | Raj et al. (2020), Singh e Bhanot (2020), Stentoft e Rajkumar (2020), Cugno et al. (2021), Calabrese et al. (2022), Jankowska et al. (2022), Govindan & Arampatzis (2023) |

Fonte: Elaborado pelos autores.

Posteriormente à identificação destas barreiras, buscou-se estabelecer um *ranking* de priorização, visando verificar aquelas que estavam mais presentes no contexto da indústria do cimento no Brasil. Para isso, uma pesquisa de campo foi desenvolvida entre os meses de junho de 2023 a junho de 2024, por meio da plataforma do *Google Forms*, disponibilizando o *link* da pesquisa em plataformas como o LinkedIn, *e-mails* institucionais de profissionais experientes da indústria do cimento, e bem como, em uma coleta presencial junto aos participantes de um seminário técnico do setor da indústria de cimento (Semtec, 2024), contando assim com 193 respostas válidas. No questionário, os respondentes apontaram um valor de importância, conforme pode ser visto na Tabela 3, comparando de forma paritária, as barreiras.

Para a análise dos resultados, foi utilizado o método multicritério *Fuzzy AHP* proposto por Chang (1996), que se trata de uma extensão do método de Análise Hierárquica de Processos, proposto originalmente por Saaty (1980), junto a lógica *Fuzzy* proposta por Zadeh (1988), aprimorando assim a técnica para levar em consideração a incerteza e subjetividade que se encontra no processo de decisão humano (Silva et al., 2021; Wegner et al., 2023). Desse modo, são desenvolvidas 8 etapas para definir os pesos das barreiras, iniciando por uma hierarquia a ser desenvolvida para transformar um problema complexo em uma forma fundamental. Passa-se por uma matriz de comparação par a par, onde os especialistas determinam os pesos, de acordo com a escala *fuzzy* evidenciada na Tabela 1.

Tabela 1 – Expressões linguísticas para avaliação dos critérios

| Expressões linguísticas | Número <i>Fuzzy</i> equivalente | Número <i>Fuzzy</i> Triangular (l, m, u) |
|-------------------------|---------------------------------|--|
| Igual importância | 1 | (1, 1, 1) |
| Pouca importância | 3 | (1, 3, 5) |
| Grande importância | 5 | (3, 5, 7) |
| Importância muito forte | 7 | (5, 7, 9) |
| Extrema importância | 9 | (7, 9, 9) |

Fonte: Chang (1996).

Os próximos passos, são calculados utilizando os preceitos evidenciados por Chang (1996), sendo que ao final estabelece-se o *ranking* e observa-se a consistência dos resultados, sendo que o índice de consistência (IC) é calculado utilizando o λ_{\max} , obtido por: $IC = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1)$ e para finalizar o cálculo da razão de consistência em: $CR = IC / IR$. O índice randômico (IR) é obtido por simulação e sintetizado na Tabela 2 e, em geral, com uma consistência aceitável de $RC \leq 0,10$.

Tabela 2 – Índice Randômico

| n | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|----|------|-----|------|------|------|------|------|------|
| IR | 0,58 | 0,9 | 1,12 | 1,24 | 1,32 | 1,41 | 1,45 | 1,49 |

Fonte: Saaty (1980).

Desse modo, os pesos foram definidos para cada barreira, sendo este em matriz triangular *Fuzzy* e defuzzificado em percentual posteriormente.

4. Análise dos Resultados

A população participante da pesquisa foi de 193 respostas válidas, com um perfil de experiência relevante no setor, sendo mais de 50% dos respondentes, com mais 20 anos de experiência na indústria, e quase 90% com mais de 10 anos de experiência, sendo estes 85% do sexo masculino com cargos de engenheiro, supervisor, gerente, diretor ou presidente.

Após a avaliação dos especialistas, pode-se estabelecer os pesos das barreiras, sendo assim a Tabela 3 apresenta o ranking obtido após a aplicação do método Fuzzy AHP.

Tabela 3 – *Ranking* das barreiras

| Barreira | Peso Fuzzy | Peso defuzzificado | Ranking |
|---|---------------------|--------------------|---------|
| Br1 - Falta de alinhamento estratégico | (0,218;0,238;0,219) | 22,56% | 1° |
| Br9 - Falta de compreensão sobre os benefícios da Indústria 4.0 | (0,183;0,175;0,164) | 16,17% | 2° |
| Br2 - Falta de cultura organizacional | (0,146;0,157;0,152) | 15,56% | 3° |
| Br11 - Resistência à mudança | (0,089;0,097;0,108) | 11,03% | 4° |
| Br5 - Falta de Infraestrutura Tecnológica | (0,089;0,097;0,108) | 11,03% | 5° |
| Br8 - Restrição financeira | (0,054;0,047;0,050) | 4,74% | 6° |
| Br6 - Má qualidade do gerenciamento de dados existente | (0,052;0,045;0,045) | 4,29% | 7° |
| Br10 - Falta de conhecimento e habilidades dos funcionários | (0,054;0,043;0,043) | 3,98% | 8° |
| Br3- Baixa gestão de fraquezas e liderança | (0,051;0,043;0,041) | 3,88% | 9° |
| Br4 - Falta de arquitetura de padrão de referência | (0,025;0,024;0,029) | 2,89% | 10° |
| Br7 - Problemas de segurança e privacidade | (0,022;0,020;0,026) | 2,50% | 11° |
| Br12 - Falta de regras e regulamentos | (0,017;0,014;0,015) | 1,38% | 12° |

Fonte: Dados da pesquisa.

Das barreiras levantadas, pode-se perceber que a “Br1 - Falta de alinhamento estratégico”, é a que se destaca no contexto, dando a entender que a que deve ser priorizada para mitigação (22,56%). Conforme Raj et al. (2020), esta desconexão pode resultar em projetos fragmentados e resistência interna às mudanças. Para superar essa barreira, é crucial que a liderança desenvolva e comunique uma estratégia clara que alinhe a digitalização com os objetivos de longo prazo da organização. Sarwar et al. (2023) evidenciam que o alinhamento estratégico possui uma relevância notável, vindo a influenciar no desempenho em inovação das organizações.

No que se refere à segunda barreira mais significativa no contexto estudado, os resultados demonstram a “Br9 - Falta de compreensão sobre os benefícios da Indústria 4.0” com um peso de prioridade de 16,17%. Raj et al. (2020) e Singh e Bhanot (2020) ressaltam que o desconhecimento de tecnologias como IoT e IA dificulta a percepção de seu potencial. Para mitigar essa barreira, é necessário investir em programas de capacitação e *workshops* que demonstrem os ganhos em eficiência, produtividade e sustentabilidade que a Indústria 4.0 pode proporcionar.

No que se refere à terceira barreira de maior peso, é possível observar que foi a “Br2 - Falta de cultura organizacional”. A transição para a Indústria 4.0 requer uma cultura que favoreça a inovação e a aceitação de novas tecnologias. Govindan e Arampatzis (2023) enfatizam a importância de uma cultura organizacional propícia para a digitalização. As empresas devem investir em iniciativas que promovam uma mentalidade aberta à inovação, como programas de mudança cultural e envolvimento dos funcionários em processos de transformação digital.

No que se refere à quarta barreira maior valor de prioridade pode-se perceber que houve duas sendo a “Br5 - Falta de Infraestrutura Tecnológica” e “Br11 - Resistência à mudança” ambas com um percentual de prioridade de 11,03%. A implementação de tecnologias da Indústria 4.0 depende de uma infraestrutura tecnológica sólida e de redes de alta capacidade. Além disso, a resistência à mudança pode ser abordada por meio de comunicação eficaz, treinamento contínuo e demonstração de casos de sucesso, conforme destacado por Raj et al. (2020) e Singh e Bhanot (2020).

A Br8 - Restrição financeira, barreira que ocupou a quinta posição com um peso de 4,74%, reflete os desafios econômicos enfrentados pelas empresas ao adotar tecnologias avançadas. Os altos custos iniciais de implementação e a incerteza sobre o retorno sobre investimento (ROI) são obstáculos significativos, conforme Raj et al. (2020) e Govindan e Arampatzis (2023). Para lidar com essa barreira, as empresas podem buscar financiamentos externos, parcerias estratégicas e incentivos governamentais que facilitem os investimentos necessários.

As barreiras, Br6 - Má qualidade do gerenciamento de dados existente e Br10 - Falta de conhecimento e habilidades dos funcionários ocuparam a sexta e sétima posição do ranking, com pesos de 4,29% e 3,98%, respectivamente. Tais barreiras destacam a necessidade de melhorar a gestão de dados e desenvolver competências específicas. A qualidade dos dados é crucial para a eficácia das tecnologias da Indústria 4.0, exigindo práticas robustas de governança de dados e segurança cibernética. Além disso, a capacitação dos funcionários em habilidades técnicas emergentes é vital para a adoção bem-sucedida das novas tecnologias, (Raj et al.,2020).

Barreiras como baixa gestão de fraquezas e liderança, falta de arquitetura de padrão de referência, problemas de segurança e privacidade, e falta de regras e regulamentos, embora com pesos menores, também são relevantes. Estas barreiras indicam a necessidade de liderança forte, padronização de processos, segurança robusta e um ambiente regulatório favorável para apoiar a transformação digital, conforme evidenciado por Raj et al. (2020) e Singh e Bhanot (2020).

Os resultados da pesquisa fornecem uma visão abrangente das barreiras à implementação da Indústria 4.0 na indústria de cimento no Brasil, destacando a complexidade e a multifacetada natureza desses obstáculos. Para superar as barreiras à adoção da Indústria 4.0 na indústria de cimento no Brasil, é essencial desenvolver estratégias integradas que abordem os obstáculos identificados. O Quadro 3 compila as sugestões já apresentadas para mitigar as barreiras encontradas.

Quadro 3 – Propostas de mitigação das barreiras

| Barreira | Proposta | Descrição | Referências |
|--|--|--|------------------------------|
| Br1 - Falta de alinhamento estratégico | Desenvolver um Plano Estratégico de Transformação Digital. | As empresas devem criar um plano estratégico claro que alinhe os objetivos organizacionais com as iniciativas de Indústria 4.0. Isso envolve a definição de metas de longo prazo, recursos necessários e um cronograma para implementação. | Raj et al. (2020) |
| Br2 - Falta de cultura organizacional | Fomentar uma Cultura de Inovação e Mudança. | Promover uma cultura organizacional que valorize a inovação e a mudança contínua. Isso pode ser alcançado através de incentivos, reconhecimento de iniciativas | Govindan e Arampatzis (2023) |

| | | | |
|---|--|--|---|
| | | inovadoras e envolvimento dos funcionários nos processos de transformação. | |
| Br3- Baixa gestão de fraquezas e liderança | Fortalecer a Liderança e a Gestão de Processos. | Desenvolver capacidades de liderança específicas para a transformação digital e aprimorar a gestão de processos internos para identificar e mitigar fraquezas. | Govindan e Arampatzis (2023) |
| Br4 - Falta de arquitetura de padrão de referência | Adotar Padrões Industriais e Boas Práticas | Implementar padrões industriais reconhecidos e boas práticas que facilitem a interoperabilidade e a integração de sistemas heterogêneos. | Singh e Bhanot (2020) |
| Br5 - Falta de Infraestrutura Tecnológica | Investir em Infraestrutura Tecnológica e Redes de Alta Capacidade. | Alocar recursos para modernizar a infraestrutura tecnológica, incluindo redes de alta capacidade e sistemas integrados que suportem a Indústria 4.0. | Singh e Bhanot (2020) |
| Br6 - Má qualidade do gerenciamento de dados existente | Desenvolvimento de uma Estratégia de Dados Unificada | Uma estratégia de dados bem definida deve incluir a integração de dados de diferentes fontes, a padronização de formatos de dados e a implementação de um repositório centralizado de dados. Isso permite uma visão holística dos dados, facilitando a análise e a tomada de decisões baseadas em dados. | Raj et al. (2020); Govindan e Arampatzis (2023) |
| Br7 - Problemas de segurança e privacidade | Implementar Práticas de Governança de Dados e Segurança Cibernética. | Adotar práticas robustas de governança de dados que garantam a qualidade, integridade e segurança dos dados, essenciais para a eficácia das tecnologias da Indústria 4.0. | Raj et al. (2020) |
| Br8 - Restrição financeira | Buscar Financiamento Externo e Parcerias Estratégicas. | Explorar fontes de financiamento externo, como fundos governamentais, incentivos fiscais e parcerias estratégicas, para viabilizar os investimentos necessários. | Govindan e Arampatzis (2023) |
| Br9 - Falta de compreensão sobre os benefícios da Indústria 4.0 | Implementar Programas de Capacitação e <i>Workshops</i> de Sensibilização. | Realizar treinamentos e workshops que demonstrem os benefícios tangíveis da Indústria 4.0, como aumentos na eficiência, produtividade e sustentabilidade. | Singh e Bhanot (2020) |
| Br10 - Falta de conhecimento e habilidades dos funcionários | Desenvolver Programas de Treinamento Contínuo | Implementar programas de treinamento contínuo que capacitem os funcionários em habilidades técnicas emergentes, como IoT, IA e <i>big data</i> . | Raj et al. (2020) |
| Br11 - Resistência à mudança | Desenvolver um Programa de Gestão de Mudanças. | Estabelecer um programa de gestão de mudanças que inclua comunicação eficaz, treinamento contínuo e envolvimento ativo dos funcionários no processo de transformação. | Raj et al. (2020) |
| Br12 - Falta de regras e regulamentos | Harmonização de Normas Internacionais | Promover a harmonização de normas e regulamentos em nível internacional para facilitar a adoção de tecnologias da Indústria 4.0 em diferentes regiões. | Raj et al. (2020) |

Fonte: Elaborado pelos autores.

5. Considerações finais

O objetivo deste estudo foi identificar e avaliar quais são as principais barreiras para a implementação da Indústria 4.0 na indústria do cimento brasileira, propondo sugestões de mitigação. Diante a isso, entende-se que este estudo oferece implicações práticas para gestores

e formuladores de políticas, ajudando a identificar e mitigar as barreiras à Indústria 4.0 no setor cimenteiro.

Os resultados destacaram a falta de alinhamento estratégico como a barreira mais significativa, seguida pela falta de compreensão sobre os benefícios da Indústria 4.0 e a falta de cultura organizacional. Essas barreiras indicam a necessidade de uma visão estratégica clara, uma maior conscientização sobre os benefícios das tecnologias digitais e uma cultura organizacional que favoreça a inovação e a mudança (Raj et al., 2020; Singh & Bhanot, 2020).

Outras barreiras importantes incluem a falta de infraestrutura tecnológica, a resistência à mudança e as restrições financeiras, que sublinham a necessidade de investimentos em infraestrutura robusta, comunicação eficaz e suporte financeiro (Govindan & Arampatzis, 2023). Além disso, a má qualidade do gerenciamento de dados e a falta de conhecimento e habilidades dos funcionários destacam a importância de práticas robustas de governança de dados e capacitação contínua (Raj et al., 2020).

Para a sociedade, a modernização da indústria de cimento pode contribuir para a sustentabilidade, visando otimização do dispositivo industrial com ganhos em produtividade e impacto nas emissões de CO₂ e melhorando a eficiência dos recursos.

Em termos práticos, os gestores do setor de cimento devem focar em alinhar suas estratégias organizacionais com iniciativas tecnológicas, promover uma cultura de inovação, investir em infraestrutura e capacitação, além de buscar apoio financeiro e regulatório. Ao enfrentar essas barreiras de maneira integrada, a indústria de cimento no Brasil pode acelerar sua jornada rumo à Indústria 4.0, alcançando maior competitividade e sustentabilidade no mercado global.

Este estudo apresenta algumas limitações importantes. Primeiramente, ele focou exclusivamente na indústria de cimento no Brasil, o que limita a aplicabilidade dos resultados para outros setores e regiões geográficas. A coleta de dados foi realizada por meio de *survey*, o que pode introduzir vieses de resposta e limitar a profundidade das informações obtidas. Além disso, a abordagem quantitativa utilizada pode não capturar completamente as nuances das barreiras enfrentadas. Os dados refletem um período específico, não considerando mudanças dinâmicas ao longo do tempo.

Para superar essas limitações e expandir o conhecimento sobre a adoção da Indústria 4.0, pesquisas futuras devem explorar a adoção das tecnologias em diferentes setores e regiões, utilizando metodologias mistas que combinem métodos quantitativos e qualitativos. Estudos longitudinais são recomendados para monitorar como as barreiras evoluem ao longo do tempo. Investigar o papel das políticas públicas e incentivos governamentais é crucial para entender sua influência na adoção da Indústria 4.0. A capacitação e a educação contínua dos funcionários devem ser exploradas para superar a falta de conhecimento técnico. Além disso, a análise de casos de sucesso pode fornecer *insights* valiosos sobre práticas eficazes e estratégias vencedoras. Finalmente, evoluir a pesquisa para um instrumento gerencial de implementação da Indústria 4.0.

Referências bibliográficas

- Abdulnour, S., Baril, C., Abdulnour, G., & Gamache, S. (2022). Implementation of Industry 4.0 principles and tools: Simulation and case study in a manufacturing SME. *Sustainability*, 14(10), 6336.
- Allen, R. C. (2009). *The British industrial revolution in global perspective*. Cambridge University Press.
- Bai, C., Dallasega, P., Orzes, G., & Sarkis, J. (2020). Industry 4.0 technologies assessment: A sustainability perspective. *International Journal of Production Economics*, 229, 107776.

- Belvedere, V., Grando, A., & Bielli, P. (2013). A quantitative investigation of the role of information and communication technologies in the implementation of a product-service system. *International Journal of Production Research*, 51(2), 410-426.
- Calabrese, A., Dora, M., Levaldi Ghiron, N., & Tiburzi, L. (2022). Industry's 4.0 transformation process: How to start, where to aim, what to be aware of. *Production Planning & Control*, 33(5), 492-512.
- Chang, D. Y. (1996). Applications of the extent analysis method on fuzzy AHP. *European Journal of Operational Research*, 95(3), 649-655.
- Ciano, M. P., Dallasega, P., Orzes, G., & Rossi, T. (2021). One-to-one relationships between Industry 4.0 technologies and Lean Production techniques: A multiple case study. *International Journal of Production Research*, 59(5), 1386-1410.
- Cugno, M., Castagnoli, R., & Büchi, G. (2021). Openness to Industry 4.0 and performance: The impact of barriers and incentives. *Technological Forecasting and Social Change*, 168, 120756.
- De Souza, J. A. P., & Pacca, S. A. (2023). [Dados sobre a indústria de cimento no Brasil].
- Frank, A. G., Mendes, G. H., Ayala, N. F., & Ghezzi, A. (2019). Servitization and Industry 4.0 convergence in the digital transformation of product firms: A business model innovation perspective. *Technological Forecasting and Social Change*, 141, 341-351.
- Ghobakhloo, M. (2020). Industry 4.0, digitization, and opportunities for sustainability. *Journal of Cleaner Production*, 252, 119869.
- Global Cement and Concrete Association (GCCA). (2022). The GCCA 2050 Cement and Concrete Industry Roadmap for Net Zero Concrete. Retrieved from <https://gccassociation.org/concretefuture/wp-content/uploads/2022/10/GCCA-Concrete-Future-Roadmap-Document-AW-2022.pdf>
- Gomaa, E., Khan, M., Yang, Z., & Mo, Y. (2023). Digital transformation in the cement industry: Assessing the potential of Industry 4.0 technologies. *Journal of Cleaner Production*, 390, 136732.
- Govindan, K., & Arampatzis, G. (2023). A framework to measure readiness and barriers for the implementation of Industry 4.0: A case approach. *Electronic Commerce Research and Applications*, 59, 101249.
- Guo, D., Li, M., Lyu, Z., Kang, K., Wu, W., Zhong, R. Y., & Huang, G. Q. (2021). Synchronoperation in industry 4.0 manufacturing. *International Journal of Production Economics*, 238, 108171.
- Horn, J., Rosenband, L. N., & Smith, M. R. (Eds.). (2010). *Reconceptualizing the industrial revolution*. MIT Press.
- Jankowska, B., Mińska-Struzik, E., Bartosik-Purgat, M., Götz, M., & Olejnik, I. (2023). Industry 4.0 technologies adoption: Barriers and their impact on Polish companies' innovation performance. *European Planning Studies*, 31(5), 1029-1049.
- Kamble, S. S., Gunasekaran, A., & Gawankar, S. A. (2018). Sustainable Industry 4.0 framework: A systematic literature review identifying the current trends and future perspectives. *Process Safety and Environmental Protection*, 117, 408-425.
- Landscheidt, S., & Kans, M. (2016). Automation practices in wood product industries: Lessons learned, current practices, and future perspectives. In *The 7th Swedish Production Symposium (SPS), 25-27 October 2016, Lund, Sweden*. Lund University.
- Laskurain-Iturbe, I., Arana-Landín, G., Landeta-Manzano, B., & Uriarte-Gallastegi, N. (2021). Exploring the influence of industry 4.0 technologies on the circular economy. *Journal of Cleaner Production*, 321, 128944.
- Lassen, A., & Wæhrens, B. V. (2021). Labour 4.0: Developing competences for smart production. *Journal of Global Operations and Strategic Sourcing*, 14(4), 659-679.

- Lee, J., Davari, H., Singh, J., & Pandhare, V. (2018). Industrial Artificial Intelligence for industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters*, 18, 20-23.
- Liao, Y., Deschamps, F., Loures, E. D. F. R., & Ramos, L. F. P. (2017). Past, present and future of Industry 4.0-a systematic literature review and research agenda proposal. *International Journal of Production Research*, 55(12), 3609-3629.
- Liao, Y., Loures, E. R., Deschamps, F., Brezinski, G., & Venâncio, A. (2018). The impact of the fourth industrial revolution: A cross-country/region comparison. *Production*, 28.
- Macedo, A. R. O., Fonseca, J. M. S., Alves, R. D. P., Oliveira, J. A., Carvalho, M. S., & Pereira, G. (2018). The impact of Industry 4.0 to the environment in the cement industry supply chain.
- Nounou, H., Asadollahi-Yazdi, E., Baret, I., Nguyen, N. Q., Terzi, M., Ouazene, Y., & Kelly, R. (2023). Decision-making in the context of Industry 4.0: Evidence from the textile and clothing industry. *Journal of Cleaner Production*, 391, 136184.
- Oesterreich, T. D., & Teuteberg, F. (2016). 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*, 83, 121-139.
- Pour, P. D., Ahmed, A. A., Nazzal, M. A., & Darras, B. M. (2023). An Industry 4.0 Technology Selection Framework for Manufacturing Systems and Firms Using Fuzzy AHP and Fuzzy TOPSIS Methods. *Systems*, 11(4), 192.
- Raj, A., Dwivedi, G., Sharma, A., de Sousa Jabbour, A. B. L., & Rajak, S. (2020). Barriers to the adoption of industry 4.0 technologies in the manufacturing sector: An inter-country comparative perspective. *International Journal of Production Economics*, 224, 107546.
- Rakic, S., Pavlovic, M., & Marjanovic, U. (2021). A precondition of sustainability: Industry 4.0 readiness. *Sustainability*, 13(12), 6641.
- Rosin, F., Forget, P., Lamouri, S., & Pellerin, R. (2020). Impacts of Industry 4.0 technologies on Lean principles. *International Journal of Production Research*, 58(6), 1644-1661.
- Rossit, D. A., Tohmé, F., & Frutos, M. (2019). Industry 4.0: Smart scheduling. *International Journal of Production Research*, 57(12), 3802-3813.
- Rüßmann, M., Lorenz, M., Gerbert, P., Waldner, M., Justus, J., Engel, P., & Harnisch, M. (2015). Industry 4.0: The future of productivity and growth in manufacturing industries. *Boston Consulting Group*, 9(1), 54-89.
- Saaty, T. (1980, November). The analytic hierarchy process (AHP) for decision making. In Kobe, Japan (pp. 1-69).
- Sarwar, Z., Gao, J., & Khan, A. (2023). Nexus of digital platforms, innovation capability, and strategic alignment to enhance innovation performance in the Asia Pacific region: A dynamic capability perspective. *Asia Pacific Journal of Management*, 1-35.
- Silva, D. J. C. D., Godoy, L. P., Godoy, T. P., Lorenzetti, D. B., Wegner, R. D. S., & Gomes, C. M. (2021). Use of a multicriteria model for evaluating the use of sustainable practices in a clothing industry. *International Journal of Applied Decision Sciences*, 14(2), 185-207.
- Singh, R., & Bhanot, N. (2020). An integrated DEMATEL-MMDE-ISM based approach for analysing the barriers of IoT implementation in the manufacturing industry. *International Journal of Production Research*, 58(8), 2454-2476.
- Soori, M., Arezoo, B., & Dastres, R. (2024). Virtual manufacturing in industry 4.0: A review. *Data Science and Management*.
- Stentoft, J., & Rajkumar, C. (2020). The relevance of Industry 4.0 and its relationship with moving manufacturing out, back and staying at home. *International Journal of Production Research*, 58(10), 2953-2973.
- Strange, R., & Zucchella, A. (2017). Industry 4.0, global value chains and international business. *Multinational Business Review*, 25(3), 174-184.

- Suleiman, Z., Shaikholla, S., Dikhanbayeva, D., Shehab, E., & Turkyilmaz, A. (2022). Industry 4.0: Clustering of concepts and characteristics. *Cogent Engineering*, 9(1), 2034264.
- Thames, L., & Schaefer, D. (2017). Industry 4.0: An overview of key benefits, technologies, and challenges. *Cybersecurity for Industry 4.0: Analysis for Design and Manufacturing*, 1-33.
- Tortorella, G. L., & Fettermann, D. (2018). Implementation of Industry 4.0 and lean production in Brazilian manufacturing companies. *International Journal of Production Research*, 56(8), 2975-2987.
- Tortorella, G., Sawhney, R., Jurburg, D., de Paula, I. C., Tlapa, D., & Thurer, M. (2021). Towards the proposition of a lean automation framework: Integrating industry 4.0 into lean production. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 32(3), 593-620.
- Thramboulidis, K., & Christoulakis, F. (2016). UML4IoT—A UML-based approach to exploit IoT in cyber-physical manufacturing systems. *Computers in Industry*, 82, 259-272.
- Varela, L., Araújo, A., Ávila, P., Castro, H., & Putnik, G. (2019). Evaluation of the relation between lean manufacturing, industry 4.0, and sustainability. *Sustainability*, 11(5), 1439.
- Wong, K. S., & Kim, M. H. (2017). Privacy protection for data-driven smart manufacturing systems. *International Journal of Web Services Research (IJWSR)*, 14(3), 17-32.
- Wegner, R. D. S., Tontini, J., Costa, V. M. F., Muller Junior, A., & Silva, D. J. C. D. (2021). An analysis of the influence of organizational leadership on innovation management using the Fuzzy-Ahp Method. *Revista de Administração da UFSM*, 14, 521-544.
- Xu, L. D., Xu, E. L., & Li, L. (2018). Industry 4.0: State of the art and future trends. *International Journal of Production Research*, 56(8), 2941-2962.
- Yin, R. K. (2016). *Pesquisa qualitativa do início ao fim*. Penso Editora.
- Zadeh, L. A. (1988). Fuzzy logic. *Computer*, 21(4), 83-93.
- Yavuz, O., Uner, M. M., Okumus, F., & Karatepe, O. M. (2023). Industry 4.0 technologies, sustainable operations practices, and their impacts on sustainable performance. *Journal of Cleaner Production*, 387, 135951.