



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Faculdade De Ciências Econômicas
Centro de Pós-graduação e Pesquisas em Administração
Curso de Especialização em Gestão Estratégica

**A INFLUÊNCIA DA INDÚSTRIA 4.0 NO DESEMPENHO OPERACIONAL DA
INDÚSTRIA DE REFROTÁRIOS: IMPACTOS DA INOVAÇÃO TECNOLÓGICA**

Fabiano Gonçalves Monteiro

Belo Horizonte

2025

Fabiano Gonçalves Monteiro

**A INFLUÊNCIA DA INDÚSTRIA 4.0 NO DESEMPENHO OPERACIONAL DA
INDÚSTRIA DE REFRAATÓRIOS: IMPACTOS DA INOVAÇÃO TECNOLÓGICA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Ciências Econômicas da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Especialista em Gestão Estratégica com Ênfase em Gestão Sustentável de Negócios.

Orientador: Professor Dr. Marcos Paulo de Oliveira Corrêa.

Coordenador: Professor Dr. Valderi Alcântara

Belo Horizonte

2025

Ficha catalográfica

M775i
2025

Monteiro, Fabiano Gonçalves.

A influência da indústria 4.0 no desempenho operacional da indústria de refratários [manuscrito]: impactos da inovação tecnológica / Fabiano Gonçalves Monteiro. – 2025.
1 v.: il.

Orientador: Marcos Paulo de Oliveira Corrêa.

Monografia (especialização) – Universidade Federal de Minas Gerais, Centro de Pós-Graduação e Pesquisas em Administração. Inclui bibliografia.

1. Administração. 2. Internet das coisas. 3. Inteligência artificial. I. Corrêa, Marcos Paulo de Oliveira. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Centro de Pós-Graduação e Pesquisas em Administração. III. Título.

CDD: 658

Elaborado por Rosilene S. Santos – CRB-6/2527
Biblioteca da FACE/UFMG. – RSS/ 073/2025



Universidade Federal de Minas Gerais
Faculdade de Ciências Econômicas
Centro de Pós-Graduação e Pesquisas em Administração
Curso de Especialização em Gestão Estratégica

ATA DA DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO do Senhor **FABIANO GONÇALVES MONTEIRO**, matrícula nº 2023710710. No dia 23/06/2025 às 20:30 horas, reuniu-se em sala virtual, a Comissão Examinadora de Trabalho de Conclusão de Curso - TCC, indicada pela Coordenação do Curso de Especialização em Gestão Estratégica - CEGE, para julgar o Trabalho de Conclusão de Curso intitulado "A INFLUÊNCIA DA INDÚSTRIA 4.0 NO DESEMPENHO OPERACIONAL DA INDÚSTRIA DE REFRATÁRIOS: IMPACTOS DA INOVAÇÃO TECNOLÓGICA", requisito para a obtenção do Título de Especialista. Abrindo a sessão, o orientador e Presidente da Comissão, Prof. Marcos Paulo de Oliveira Corrêa, após dar conhecimento aos presentes do teor das Normas Regulamentares de apresentação do TCC, passou a palavra ao aluno para apresentação de seu trabalho. Seguiu-se a arguição pelos examinadores, seguida das respostas do aluno. Logo após, a Comissão se reuniu sem a presença do aluno e do público, para avaliação do TCC, que foi considerado:


APROVADO

NÃO APROVADO

90 (noventa) pontos.

O resultado final foi comunicado publicamente ao aluno pelo orientador e Presidente da Comissão. Nada mais havendo a tratar, o Senhor Presidente encerrou a reunião e lavrou a presente ATA, que será assinada por todos os membros participantes da Comissão Examinadora. Belo Horizonte, 23/06/2025.

Prof. Marcos Paulo de Oliveira Corrêa
(CEGE/UFMG)

 Documento assinado digitalmente
MARCOS PAULO DE OLIVEIRA CORREA
Data: 23/06/2025 20:45:28-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof^a Roberta de Cássia Macedo
(Universidade FUMEC)

 Documento assinado digitalmente
ROBERTA DE CÁSSIA MACEDO
Data: 23/06/2025 21:08:52-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

RESUMO

A Indústria 4.0 representa uma transformação tecnológica centrada na integração entre automação avançada, conectividade digital e inteligência computacional, por meio de tecnologias como Internet das Coisas (IoT), Big Data, Inteligência Artificial (IA) e sistemas ciberfísicos. Essas inovações têm gerado impactos relevantes em setores industriais que demandam alto desempenho operacional, como a indústria de refratários, onde há forte necessidade de confiabilidade, produtividade e sustentabilidade. O estudo investiga de que forma as tecnologias emergentes da Indústria 4.0 influenciam o desempenho operacional da indústria de refratários, com foco em processos como manutenção preditiva, controle de qualidade, rastreabilidade da produção e otimização energética. A pesquisa, de natureza teórica e exploratória, baseia-se em revisão de literatura e análise de dados secundários para compreender como as tecnologias da Indústria 4.0 impulsionam o desempenho operacional na indústria de refratários, promovendo maior eficiência, aprimoramento contínuo e adoção de práticas sustentáveis do setor. Como referência prática, são analisadas as iniciativas da empresa RHI Magnesita, destacando a adoção de ferramentas digitais e metodologias de gestão inteligente que viabilizam a redução de custos, a automação de decisões operacionais e a integração entre áreas produtivas. Com isso, o trabalho evidencia o papel da Indústria 4.0 como agente catalisador de transformações operacionais e estratégicas no setor refratário, apontando caminhos para sua adaptação a um mercado global competitivo e em constante evolução.

Palavras-chave: Indústria 4.0. Internet das Coisas (IoT). Big Data. Inteligência Artificial (IA). Indústria de Refratários.

ABSTRACT

Industry 4.0 represents a technological transformation centered on the integration of advanced automation, digital connectivity, and computational intelligence, through technologies such as the Internet of Things (IoT), Big Data, Artificial Intelligence (AI), and cyber-physical systems. These innovations have generated significant impacts in industrial sectors that demand high operational performance, such as the refractory industry, which requires reliability, productivity, and sustainability. This study investigates how emerging technologies from Industry 4.0 influence the operational performance of the refractory industry, with a focus on processes such as predictive maintenance, quality control, production traceability, and energy optimization. The research is theoretical and exploratory in nature, based on a literature review and analysis of secondary data, aiming to understand how Industry 4.0 technologies enhance operational efficiency, foster continuous improvement, and encourage the adoption of sustainable practices in the sector. As a practical reference, the study analyzes initiatives developed by the company RHI Magnesita, highlighting the adoption of digital tools and intelligent management methodologies that enable cost reduction, automation of operational decisions, and integration across production areas. Thus, the research demonstrates the role of Industry 4.0 as a catalyst for operational and strategic transformations in the refractory sector, pointing to pathways for adaptation in a competitive and constantly evolving global market.

Keywords: Industry 4.0. Internet of Things (IoT). Big Data. Artificial Intelligence (AI). Refractory Industry.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	6
1.1	Contextualização do problema.....	6
1.2	Objetivos.....	11
1.3	Justificativa	13
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	14
2.1	Introdução ao Conceito de Indústria 4.0	14
2.2	Impactos na Indústria de Refratários	16
2.3	Indústria 4.0 e Sustentabilidade: Oportunidades, Desafios e Caminhos para uma Transformação Verde e Digital	18
2.4	Integração Tecnológica e Desempenho Operacional.....	20
2.5	Perspectivas Futuras	21
3	METODOLOGIA	22
3.1	Descrição do Estudo de Caso.....	23
3.2	Procedimentos de Análise.....	25
3.3	Considerações sobre Limitações e Contribuições.....	26
4	DISCUSSÕES	26
4.1	Implementação da Indústria 4.0 na RHI Magnesita.....	26
4.2	Resultados Operacionais com base na Transformação Digital da Indústria 4.0	27
4.3	Benefícios em Sustentabilidade	29
4.4	Vantagem Competitiva e Inovações Tecnológicas	29
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	30
6	REFERÊNCIAS	33

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização do problema

Manter a competitividade no mercado global exige das organizações uma atuação estratégica baseada na eficiência operacional, na inovação tecnológica e na sustentabilidade. Em setores industriais de alta complexidade e exigência térmica, como siderurgia, cimento, petroquímica e metais não ferrosos, a adoção de soluções refratárias de alto desempenho é um fator crítico para garantir a confiabilidade e a continuidade dos processos. Os materiais refratários, por sua resistência a temperaturas extremas, choques térmicos e agentes químicos agressivos, são essenciais na proteção de equipamentos industriais, influenciando diretamente na eficiência energética, no consumo de matérias-primas e nos custos operacionais (Duarte, 2024).

Segundo Duarte (2024) a indústria de refratários no Brasil se destaca como uma das mais desenvolvidas do mundo, com capacidade tecnológica para fornecer produtos de alto valor agregado e atender às exigências de segmentos que demandam robustez, precisão e durabilidade. A redução do consumo específico de refratários observada nas últimas décadas está diretamente associada à evolução tecnológica desses materiais e à melhoria contínua dos processos industriais, contribuindo para a competitividade e a sustentabilidade das operações (Duarte, 2024, p. 44-45).

Nesse cenário, é relevante destacar o crescimento do mercado global de insumos refratários, como a dolomita e o óxido de magnésio (MgO). De acordo com The Insight Partners ¹(2024), a aplicação da dolomita na indústria de ferro e aço atingiu mais de 9,34 milhões de dólares em 2021, com projeção de alcançar 12,1 milhões até 2028, impulsionada sobretudo pela expansão industrial na Ásia-Pacífico, Europa e América Latina. Na América do Sul e Central, o valor total de mercado da dolomita para aplicações em ferro e aço foi de US\$ 287,2 milhões em 2020, com o Brasil liderando amplamente a região. Somente o Brasil respondeu por US\$

¹ A Insight Partners é uma empresa líder global em pesquisa de mercado e consultoria, especializada em fornecer relatórios de pesquisa detalhados e prospectivos, insights da indústria e análises baseadas em dados. Disponível em: <https://www.theinsightpartners.com/reports/global-industrial-maintenance-market>. Acesso em: 4 maio 2025.

204,9 milhões, o que equivale a cerca de 71% da demanda sul-americana (The Insight Partners, 2024).

Complementarmente, o relatório da Market Research Future²(2022) aponta que o óxido de magnésio (MgO), fundamental para a fabricação de materiais refratários, representa 42,5% das aplicações globais do composto, com projeção de crescimento de 5,7% ao ano até 2028. Essa mudança indica um avanço tecnológico e um amadurecimento do uso de MgO em processos industriais críticos, especialmente na indústria siderúrgica, que demanda materiais com elevada resistência térmica, estabilidade química e durabilidade.

Desta forma, a incorporação de tecnologias emergentes da Indústria 4.0, como sensoriamento, automação, análise de dados e sistemas integrados, representa uma nova fronteira para a transformação do setor industrial. A Indústria 4.0 também amplia a capacidade de integração entre materiais críticos, processos produtivos e a gestão de ativos industriais, fortalecendo o alinhamento entre manutenção, sustentabilidade e competitividade. A digitalização de ativos, associada a sistemas inteligentes de análise, tem possibilitado maior previsibilidade na operação, redução de desperdícios e decisões estratégicas orientadas por dados, contribuindo para práticas industriais mais resilientes e sustentáveis (Pedruzzi, 2022).

O equilíbrio entre redução de custos, agregação de valor aos clientes e sustentabilidade operacional são discutidas na literatura. Segundo Spezamiglio et al. (2020) a competitividade, inovação e sustentabilidade estão inter-relacionadas e são essenciais para a adaptação dos processos empresariais, especialmente em setores complexos. A inovação é destacada como um fator crucial para a reestruturação de processos organizacionais e desenvolvimento de novos produtos e tecnologias, o que é vital para manter a competitividade e atender às demandas de sustentabilidade.

Além disso, a integração dos conceitos de competitividade e sustentabilidade é fundamental para a construção da competitividade empresarial, conforme discutido por Silva e Souza (2021), que ressaltam a importância da sustentabilidade operacional e da agregação de

² A Market Research Future é uma das principais empresas de análise de mercado. Fornecedores de relatórios globais de pesquisa de mercado e análises de participações. Disponível em: <https://www.marketresearchfuture.com/reports/magnesium-oxide-market-10617>. Acesso em: 4 maio 2025.

valor como componentes-chave em mercados complexos, caracterizados pela alta competitividade, dinâmica regulatória e crescente demanda por práticas responsáveis.

A inovação digital tem se mostrado uma aliada essencial na introdução de tecnologias emergentes, desafiando práticas existentes e promovendo maior eficiência, qualidade e redução de desgaste e resíduos na produção. Oliveira et al. (2019) destacam que a avaliação da competitividade, baseada em indicadores de desempenho econômico, ressalta a eficiência operacional e a sustentabilidade como fatores críticos para setores de alta complexidade, onde margens de erro e desperdícios são menos tolerados.

A Indústria 4.0, também conhecida como Quarta Revolução Industrial, representa uma transformação profunda nos processos produtivos, fundamentada em nove pilares tecnológicos que incluem Internet das Coisas (IoT), inteligência artificial (IA), big data, computação em nuvem e sistemas ciberfísicos. Essas tecnologias viabilizam fábricas inteligentes, maior rastreabilidade, automatização de decisões e integração de sistemas, promovendo eficiência operacional e competitividade global (Gonçalves, 2024; Pacchini et al., 2020).

Conforme Gonçalves (2024), originalmente impulsionada por políticas de inovação na Alemanha e nos Estados Unidos, a Indústria 4.0 vem sendo implementada de forma gradual no Brasil, principalmente a partir da criação da Agenda Brasileira para a Indústria 4.0, em 2018, que prevê linhas de crédito, plataformas de autoavaliação e centros de excelência tecnológica, como o CET 4.0 em Sorocaba.

Segundo Pacchini et al. (2020), apesar dos benefícios evidentes, como a redução de custos operacionais, a adoção dessas tecnologias em países em desenvolvimento enfrenta desafios estruturais importantes. Entre eles, destacam-se a necessidade de elevados investimentos em infraestrutura digital, a adaptação de sistemas produtivos legados e, sobretudo, a qualificação da mão de obra para lidar com ferramentas digitais emergentes (Souza et al., 2024; Beier et al., 2022). A literatura aponta ainda que, para que a Indústria 4.0 contribua efetivamente com os objetivos de sustentabilidade corporativa, é necessário um esforço conjunto entre indústria, governo e instituições de ensino, visando garantir não apenas a digitalização, mas sua integração com práticas ambientais responsáveis (Beier et al., 2022; Souza et al., 2024).

Gonçalves (2024), ao analisar o funcionamento do Centro de Excelência em Tecnologia 4.0 (CET 4.0), evidencia que a adoção tecnológica exige mais do que infraestrutura: requer mudanças culturais, capacitação da força de trabalho e suporte institucional. Portanto, ao focar o setor de refratários, este trabalho não apenas preenche uma lacuna específica da literatura técnica, mas também contribui para o avanço das discussões sobre competitividade, inovação e sustentabilidade industrial no contexto nacional contemporâneo.

Destacam-se também a vulnerabilidade a ataques cibernéticos, que afetam sistemas conectados à nuvem, e a resistência cultural à mudança, principalmente em pequenas e médias empresas, que enfrentam insegurança quanto ao retorno sobre os investimentos e desconfiança em relação à segurança dos dados (Pacchini et al., 2020). Além disso, a integração de tecnologias emergentes exige uma adaptação estratégica abrangente, incluindo o desenvolvimento de novos modelos de gestão e a adoção de ferramentas digitais avançadas (Palma et al., 2017; Vossoughian; Amini, 2021).

Exemplos práticos incluem casos como o da montadora analisada por Pacchini et al. (2020), que, mesmo utilizando dezenas de robôs e redes VPN, ainda não empregava IoT devido às limitações de seus fornecedores e da infraestrutura energética nacional. Já o CET 4.0, em Sorocaba, apesar de bem estruturado, enfrentou dificuldades com a divulgação de sua plataforma de maturidade digital e com a continuidade de seu programa de consultores especializados, revelando a carência de políticas sustentadas de capacitação e suporte técnico às empresas em fase de transição (Gonçalves, 2024).

Conforme observado por Duarte (2005), a indústria de refratários tem uma forte dependência de ativos confiáveis e de elevada eficiência operacional, uma vez que esse setor é responsável pela produção, desenvolvimento e aplicação de materiais inorgânicos e não metálicos com alta resistência a temperaturas extremas. Nesse contexto, as inovações tecnológicas tornam-se essenciais para enfrentar os desafios de um mercado global cada vez mais competitivo e dinâmico. Além disso, a necessidade de integrar práticas sustentáveis às operações industriais tem ganhado protagonismo (Delanhese, 2023).

Segundo Barros e Freitag (2022), práticas sustentáveis não apenas atendem às exigências regulatórias e sociais, mas também promovem vantagem competitiva ao favorecer maior eficiência operacional, redução de desperdícios e melhor aproveitamento dos recursos

naturais. Esse alinhamento estratégico, além de contribuir para a imagem institucional perante a sociedade e os órgãos reguladores, resulta em ganhos financeiros e no fortalecimento da competitividade organizacional.

Isso posto, percebe-se que a Indústria 4.0 tem desempenhado um papel central na transformação de setores industriais complexos, como o de refratários, ao incorporar tecnologias digitais avançadas capazes de ampliar a eficiência operacional, promover práticas sustentáveis e fortalecer a competitividade global. Nesse contexto, destacam-se soluções como sensores inteligentes, plataformas de automação e análise de dados em tempo real, que vêm sendo amplamente utilizadas por empresas do setor, como a RHI Magnesita³, na busca por ganhos em produtividade e redução de impactos ambientais (RHI MAGNESITA, 2024; Milhossi et al., 2023). A implementação de estratégias de digitalização tem proporcionado melhorias significativas no desempenho industrial, sobretudo por meio da otimização da cadeia produtiva, da rastreabilidade de processos e da adoção de modelos de manutenção preditiva com base em inteligência artificial e internet das coisas (IoT) (Duarte et al., 2024; Gonçalves, 2024).

A relevância deste estudo está fundamentada na necessidade de compreensão e aplicação efetiva dos princípios da Indústria 4.0 em setores industriais estratégicos, como o de refratários, cuja operação depende fortemente da confiabilidade dos ativos, da eficiência energética e da redução de desperdícios. A pesquisa contribui ao evidenciar, de forma articulada, os impactos da transformação digital nas dimensões operacional, estratégica e sustentável, oferecendo subsídios teóricos e práticos para a tomada de decisão por parte de gestores e formuladores de políticas industriais. Ao abordar de forma crítica os desafios e as oportunidades decorrentes da digitalização e da integração de tecnologias emergentes, como IoT, big data e automação inteligente, o estudo amplia o entendimento sobre os caminhos para a modernização da indústria brasileira (Gonçalves, 2024; Pacchini et al., 2020).

³ RHI Magnesita é líder global na produção de soluções refratárias, com presença em mais de 70 países e atuação integrada desde a mineração até o fornecimento de sistemas completos para indústrias de alta temperatura, como aço, cimento e metais não ferrosos. Disponível em: <https://www.rhimagnesita.com/pt/about/who-we-are/> Acesso em: 4 maio 2025.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Este artigo tem como objetivo geral analisar de forma crítica a influência das tecnologias da Indústria 4.0 sobre o desempenho operacional da indústria de refratários no Brasil, com ênfase na aplicação prática e estratégica dessas tecnologias pela empresa RHI Magnesita. A proposta é compreender como a transformação digital tem impactado a eficiência, flexibilidade, rastreabilidade e sustentabilidade dos processos industriais, alinhando-se às exigências de competitividade e inovação do cenário global contemporâneo.

A escolha da RHI Magnesita como objeto de estudo justifica-se por sua posição de liderança no setor de refratários, tanto em nível nacional quanto internacional Market Research Future (2022). Fruto da fusão entre a brasileira Magnesita e a austríaca RHI, a companhia consolidou-se como a maior produtora global de soluções refratárias, com presença industrial em mais de 30 países e forte operação no Brasil (RHI MAGNESITA, 2023), destacando-se a exploração da terceira maior mina de magnesita a céu aberto do mundo, localizada em Brumado, na Bahia (Duarte, 2024).

Segundo a Brasil Mineral ⁴(2023) além da relevância operacional a RHI Magnesita é uma empresa líder na aplicação da transformação digital no setor de refratários, com investimentos avançados em tecnologias, como robotização e inteligência artificial com o objetivo de otimizar a cadeia de valor e integrar suas operações de maneira mais eficiente. A RHI Magnesita também tem se destacado por adotar, de forma estruturada, tecnologias associadas à Indústria 4.0 como automação avançada, sistemas de monitoramento digital, blockchain para rastreabilidade de processos e manutenção preditiva baseada em IoT (IBRAM, 2023). Estes elementos a tornam uma referência de modernização industrial em um setor ainda tradicionalmente associado à operação intensiva e à baixa digitalização.

⁴ Brasil Mineral é uma revista e publicação online, líder no setor mineral brasileiro, dedicada a cobrir a mineração, metalurgia e siderurgia. Disponível em: <https://www.brasilmineral.com.br/quem-somos>. Acesso em: 4 maio 2025.

Assim, a análise das estratégias digitais da RHI Magnesita permite compreender de maneira mais precisa como a Indústria 4.0 vem sendo incorporada à realidade brasileira dos refratários, servindo como exemplo representativo das possibilidades e desafios que essa transição tecnológica impõe ao setor.

1.2.2 Objetivos Específicos

A pesquisa se propõe a:

1. Investigar o papel das tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0 como Internet das Coisas (IoT), sistemas ciberfísicos (CPS), análise de big data, computação em nuvem, robótica autônoma e inteligência artificial na modernização dos processos industriais de refratários, especialmente no que se refere à automação, rastreabilidade e integração digital (Duarte, 2024; Gonçalves, 2024);
2. Avaliar, por meio do estudo de caso da RHI Magnesita, os impactos operacionais da digitalização na cadeia de valor, considerando aspectos como produtividade, qualidade, segurança e sustentabilidade (IBRAM, 2023);
3. Analisar como a adoção dessas tecnologias contribui para a redução do consumo específico de refratários (kg/t), melhorando o desempenho operacional em unidades críticas como altos-fornos, convertedores, fornos elétricos e painéis de transporte (Duarte, 2024);
4. Identificar os desafios enfrentados pelas indústrias brasileiras na implementação dessas tecnologias, especialmente no que se refere à capacitação da força de trabalho, integração de sistemas e superação de barreiras culturais e estruturais (Souza et al., 2024);
5. Sintetizar, com base no estudo de caso da RHI Magnesita, as boas práticas, metodologias e ferramentas que podem orientar outras empresas do setor na transição para a Indústria 4.0, promovendo eficiência operacional e alinhamento com critérios de sustentabilidade e competitividade global (IBRAM, 2023).

A estrutura metodológica do estudo apoia-se em uma abordagem qualitativa e exploratória, com uso de dados secundários e estudos de caso, a fim de evidenciar como a Indústria 4.0 pode ser um catalisador para a transição tecnológica e sustentável da indústria refratária brasileira. Todos os objetivos propostos serão respondidos ao longo do trabalho, de forma articulada entre os dados da literatura e os dados secundários obtidos junto a fontes técnicas confiáveis.

1.3 Justificativa

A presente pesquisa justifica-se pela necessidade de compreender de forma aprofundada os impactos da Indústria 4.0 na modernização da indústria de refratários no Brasil, com ênfase em aspectos como eficiência operacional, rastreabilidade e práticas sustentáveis. Esse setor é estratégico para cadeias produtivas de alta temperatura como siderurgia, cimento, vidro e petroquímica nas quais a confiabilidade dos ativos e o desempenho térmico dos materiais refratários são determinantes para a competitividade (Pacchini et al., 2020; Barros; Freitag, 2022).

Segundo Tessarini Junior e Saltorato (2018), a implementação das tecnologias emergentes pode elevar significativamente a eficiência produtiva. Nesse contexto, a transformação digital se consolida como vetor de evolução operacional e ambiental. Tecnologias como Internet das Coisas (IoT), sistemas ciberfísicos, big data e inteligência artificial já demonstram capacidade para ampliar o controle preditivo, reduzir desperdícios e conectar a cadeia de valor de forma dinâmica e responsiva (Duarte, 2024; Pereira; Simonetto, 2018; Borlido, 2017).

Paralelamente, a incorporação de práticas sustentáveis deixou de ser um diferencial e passou a ser uma exigência regulatória e social. O alinhamento a critérios sustentáveis responde às pressões de stakeholders e fortalece a posição competitiva das empresas, sobretudo em mercados sensíveis à sustentabilidade (Barros; Freitag, 2022).

A RHI Magnesita destaca-se pela adoção estruturada de tecnologias digitais, com investimentos consistentes em manutenção preditiva, blockchain para rastreabilidade, robotização e análise preditiva aplicada à tomada de decisão operacional (RHI MAGNESITA, 2023).

Essa atuação não é apenas retórica, como exemplo, tem-se que, entre 2018 e 2023, a empresa reduziu em 12% a intensidade de emissões de CO₂, aumentou para 12,6% o uso de matérias-primas recicladas e passou a investir em soluções de captura e mineralização de carbono, como na parceria com a MCI Carbon. Esses dados evidenciam um modelo concreto de integração entre tecnologia e sustentabilidade, alinhado às regulamentações emergentes como o CBAM europeu (RHI MAGNESITA, 2023).

Ainda que os benefícios da digitalização sejam amplamente reconhecidos, a literatura carece de estudos empíricos que relacionem diretamente tais inovações com o desempenho operacional em indústrias intensivas em energia e insumos. Este trabalho busca preencher essa lacuna, explorando de forma aplicada como as tecnologias digitais podem impulsionar ganhos em produtividade, controle e impacto ambiental no setor de refratários.

Como apontam Luthra e Mangla (2018), os ganhos competitivos da Indústria 4.0 só são alcançados quando integrados a práticas estruturadas de gestão da mudança, qualificação de pessoas e redesenho organizacional. A análise da RHI Magnesita contribui para esse entendimento ao oferecer um estudo de caso representativo, capaz de revelar oportunidades, desafios e caminhos para transformar o setor em um modelo de inovação, sustentabilidade e competitividade no cenário global (Reis; Silva, 2020).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Introdução ao Conceito de Indústria 4.0

A Indústria 4.0, ou Quarta Revolução Industrial, representa uma transformação estruturante no modo como bens e serviços são produzidos e consumidos. Ela é caracterizada pela integração de tecnologias digitais como Internet das Coisas (IoT), Inteligência Artificial (IA), Big Data, sistemas ciberfísicos (CPS), manufatura aditiva e computação em nuvem. Tais tecnologias permitem uma conectividade sem precedentes entre sistemas produtivos, ativos industriais e operações em tempo real, ampliando as possibilidades de automação, rastreabilidade e eficiência operacional (Souza; Oliveira Júnior; Maduro; Lima, 2024).

Historicamente, a evolução da indústria pode ser dividida em quatro grandes fases: a Primeira Revolução Industrial (século XVIII), marcada pela mecanização e uso da energia a vapor; a Segunda Revolução Industrial (século XIX), pela eletrificação e produção em massa; a Terceira Revolução (século XX), com a introdução da eletrônica, informática e automação; e, finalmente, a Quarta Revolução, caracterizada pela digitalização em rede e pela autonomia de decisão entre sistemas conectados (Milhossi; Queiroga; Rodrigues, 2023).

Segundo Gonçalves (2024), a Indústria 4.0 é sustentada por nove pilares: robótica autônoma, simulação, realidade aumentada, integração de sistemas, manufatura aditiva, cibersegurança, computação em nuvem, IoT e Big Data. No entanto, sua implementação depende de fatores estruturais como infraestrutura digital, qualificação da força de trabalho, cultura organizacional e investimentos estratégicos.

Apesar dos avanços prometidos pela Indústria 4.0 como redução de custos, aumento da produtividade e rastreabilidade digital é importante reconhecer que sua implementação depende de fatores estruturais como investimento em infraestrutura, maturidade tecnológica, qualificação da mão de obra e integração organizacional. Como observa Milhossi et al. (2023), é necessário considerar a qualificação da mão de obra, a maturidade tecnológica das empresas, a integração organizacional e a infraestrutura disponível como pilares críticos para o êxito da transformação digital.

Além disso, a literatura recente evidencia que, especialmente no Brasil, a transição para a Indústria 4.0 encontra desafios específicos. Gonçalves (2024) destaca que, embora iniciativas como a Agenda Brasileira para a Indústria 4.0 e o Centro de Excelência em Tecnologia 4.0 (CET 4.0) venham impulsionando a capacitação e a digitalização em nível regional, a baixa adesão por pequenas e médias empresas (PMEs), os altos custos de investimento, e a resistência cultural interna ainda representam barreiras substanciais.

Pacchini et al. (2020) reforçam que aspectos como a interoperabilidade entre sistemas, a ausência de padronização na comunicação entre dispositivos e a vulnerabilidade a ataques cibernéticos tornam-se entraves técnicos significativos. Esses autores também identificam a carência de políticas públicas efetivas de financiamento e a necessidade de maior articulação entre atores da cadeia de suprimentos como fatores críticos.

Atualmente, o Brasil enfrenta desafios estruturais relevantes para consolidar a Indústria 4.0 em seu parque industrial. Embora 69% das indústrias nacionais já façam uso de ao menos uma tecnologia digital, apenas 7% utilizam 10 ou mais das 18 tecnologias analisadas pela Confederação Nacional da Indústria (CNI), ⁵o que evidencia a baixa maturidade digital da

⁵ A Confederação Nacional da Indústria (CNI) é a principal entidade de representação da indústria brasileira. Atua na defesa de políticas públicas, articulação entre os setores produtivo, acadêmico e

maioria das empresas brasileiras (CNI, 2022). Essa limitação é especialmente acentuada entre pequenas e médias empresas, que enfrentam maiores barreiras financeiras, de qualificação técnica e de integração sistêmica (Milhossi et al., 2023; Gonçalves, 2024). Tais obstáculos incluem a fragmentação dos sistemas produtivos, a escassez de mão de obra preparada para lidar com tecnologias emergentes e as dificuldades de acesso a equipamentos e serviços especializados (Duarte, 2024). Iniciativas como o Centro de Excelência em Tecnologia 4.0 (CET 4.0), em Sorocaba, têm buscado impulsionar a digitalização por meio de parcerias entre governo, setor privado e instituições acadêmicas. No entanto, a adesão empresarial ainda é baixa, em especial entre organizações que operam sob modelos associados à Indústria 3.0, dificultando a adoção plena de soluções como Internet das Coisas (IoT), Big Data, inteligência artificial e automação inteligente (Gonçalves, 2024; Milhossi et al., 2023).

Por outro lado, do ponto de vista socioambiental, Souza et al. (2024) e Duarte (2024) apontam que a adoção de tecnologias 4.0 pode potencializar práticas sustentáveis, desde que haja planejamento estratégico voltado à sustentabilidade e ao uso eficiente de recursos. No entanto, esse alinhamento depende diretamente da integração entre inovação tecnológica e gestão corporativa comprometida com resultados de longo prazo.

Portanto, o entendimento da Indústria 4.0 deve considerar não apenas os aspectos tecnológicos, mas também os impactos sociais e ambientais de sua implementação. Isso inclui, por exemplo, a formação de profissionais para operar tecnologias emergentes, o uso estratégico de dados para tomada de decisão e a adaptação dos sistemas de gestão às novas demandas por rastreabilidade e eficiência sustentável (Souza et al., 2024).

2.2 Impactos na Indústria de Refratários

Segundo Duarte (2024), a indústria de refratários é responsável pela produção de materiais resistentes a altas temperaturas, tem papel estratégico em setores como siderurgia, cimento, vidro e metais não ferrosos. Esses materiais revestem fornos, caldeiras e reatores, garantindo segurança térmica e prolongando a vida útil dos equipamentos.

governamental, além de desenvolver estudos e estatísticas sobre o setor industrial. Disponível em: <https://www.portaldaindustria.com.br/cni/institucional/quem-somos/>. Acesso em: 3 jun. 2025.

O setor refratário brasileiro tem sido pressionado a adotar tecnologias da Indústria 4.0 para aprimorar a rastreabilidade, a automação da inspeção de qualidade e a manutenção preditiva dos revestimentos, ampliando a confiabilidade operacional dos sistemas em que estão aplicados (Duarte, 2024; Gonçalves, 2024). Além disso, Segundo Duarte (2024), a indústria de refratários brasileira está entre as mais desenvolvidas do mundo, com produtos de alto desempenho térmico e avanço tecnológico relevante na produção e aplicação de materiais refratários.

Com a chegada da Indústria 4.0, o setor de refratários passou a integrar sensores inteligentes, sistemas ciberfísicos e controle digital para monitorar variáveis como temperatura, vibração e desgaste. Essa digitalização resultou em ganhos significativos de previsibilidade, desempenho e qualidade operacional, especialmente no uso de concretos refratários, ao permitir um controle mais rigoroso durante a etapa de aplicação (Souza et al., 2024).

Além dos benefícios já observados em previsibilidade e performance, a adoção de sensores IoT integrados a sistemas de análise em tempo real tem permitido a construção de modelos preditivos baseados em machine learning para prever falhas antes mesmo da formação de microfissuras. Essa abordagem é especialmente eficaz em concretos refratários de alto desempenho, utilizados em aplicações críticas de fornos rotativos, cubas de fusão e caldeiras de alta temperatura. Conforme apontado por Duarte (2024), o domínio preciso do perfil térmico durante as fases de cura e secagem é um fator determinante para a durabilidade do revestimento refratário, pois evita tensões residuais internas que resultariam em falhas prematuras como trincas, falhas estruturais e delaminações térmicas, ao mesmo tempo em que elevam os padrões de qualidade e durabilidade dos revestimentos (Cardoso, 2012; Duarte, 2024).

Esse avanço tecnológico também tem potencial para reduzir o tempo de parada para manutenção, uma vez que os parâmetros de desgaste passam a ser continuamente monitorados, viabilizando planos de manutenção preditiva altamente eficientes. Como reforçado por Souza et al. (2024), a automação integrada eleva o nível de rastreabilidade e confiabilidade do processo, permitindo decisões baseadas em dados e não apenas em inspeções periódicas visuais ou estimativas empíricas.

Outro avanço é a manutenção preditiva, que utiliza algoritmos de machine learning e sensores de desempenho para prevenir falhas, reduzindo paradas não programadas e aumentando a disponibilidade operacional (Beier et al., 2022). Além disso, práticas sustentáveis

como o reaproveitamento de resíduos e a economia circular têm contribuído para redução da pegada de carbono e otimização de recursos (RHI MAGNESITA, 2023).

Outro impacto relevante é a análise de dados em tempo real por meio de sistemas de big data, que permitem identificar padrões operacionais, prever falhas, otimizar o uso de recursos e tomar decisões de forma mais rápida e assertiva. Esse tipo de análise favorece práticas preditivas e personalizadas, que se alinham com a dinâmica de produção dos setores que utilizam materiais refratários (Souza et al., 2024).

A manutenção preditiva é um dos pilares mais impactados positivamente. Com o uso de algoritmos de machine learning e sensores de desempenho, é possível antecipar falhas e programar intervenções com maior precisão, o que resulta na redução de paradas não planejadas e no aumento da disponibilidade operacional (Beier et al., 2022). Essa abordagem se mostra estratégica especialmente em ambientes industriais de alta carga térmica e demanda contínua, como é o caso das operações em altos-fornos e painéis de transporte.

A integração dessas tecnologias também promove ganhos em sustentabilidade ambiental. Sistemas de controle inteligente, combinados a sensores de eficiência energética, otimizam o consumo de energia e reduzem desperdícios durante a produção e uso de refratários. Além disso, é possível reduzir o impacto ambiental com o uso de materiais reciclados e pela diminuição da pegada de carbono nos processos industriais (Souza et al., 2024).

Portanto, a Indústria 4.0 apresenta-se como um vetor de transformação profunda na indústria de refratários, não apenas por sua capacidade de digitalização e automação, mas por sua contribuição para a sustentabilidade, segurança operacional e melhoria da performance dos materiais refratários em ambientes industriais complexos.

2.3 Indústria 4.0 e Sustentabilidade: Oportunidades, Desafios e Caminhos para uma Transformação Verde e Digital

A Indústria 4.0 tem se consolidado como um vetor de transformação industrial não apenas pela introdução de tecnologias digitais, mas também por seu potencial de fomentar práticas mais sustentáveis no setor produtivo. A integração entre conectividade, automação, inteligência artificial e sistemas ciberfísicos permite avanços significativos na otimização do

uso de recursos, redução de desperdícios e mitigação de impactos ambientais (Barros e Freitag, 2022; Hoffmann, 2019).

Nesse contexto, diversos estudos apontam que a Indústria 4.0 pode funcionar como catalisadora de uma economia circular, especialmente ao viabilizar o reaproveitamento de resíduos industriais como os materiais refratários e à redução das emissões de CO₂ por meio da eficiência energética, tecnologias de captura de carbono e automação de processos críticos (Souza et al., 2024; RHI MAGNESITA, 2024; Duarte, 2024).

Empresas como a RHI Magnesita têm liderado iniciativas nesse campo, adotando soluções tecnológicas para reutilização de insumos refratários, uso de matérias-primas secundárias, eletricidade renovável e tecnologias de rastreabilidade. Segundo seu relatório anual de 2023, tais práticas já vêm resultando em avanços concretos na redução de emissões, alinhando-se aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da ONU (RHI MAGNESITA, 2024).

Contudo, conforme destacam Gonçalves (2024) e Santos, Manhães e Lima (2018), a plena realização dos benefícios da Indústria 4.0 no Brasil ainda encontra barreiras estruturais significativas, como a ausência de políticas industriais integradas, a infraestrutura tecnológica deficiente, a escassez de mão de obra qualificada e a baixa maturidade digital, especialmente entre pequenas e médias empresas. Muitas indústrias nacionais ainda operam sob paradigmas da segunda e terceira revoluções industriais, o que compromete a adoção eficaz das tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0.

Esses autores ressaltam, ainda, que a digitalização não deve ser compreendida apenas como um mecanismo para aumento da produtividade, mas como parte de uma transformação sistêmica, que também engloba os aspectos sociais e ambientais. Há riscos concretos de que a adoção tecnológica, quando realizada de forma fragmentada ou desarticulada, negligencie pilares essenciais da sustentabilidade, como o uso racional de recursos, a inclusão social e a valorização do trabalho qualificado (Gonçalves, 2024; Santos, Manhães e Lima, 2018; Souza et al., 2024).

Para superar esses desafios, é essencial que a integração da Indústria 4.0 ao contexto produtivo nacional seja conduzida por meio de ações coordenadas entre governo, setor privado

e instituições de ensino e pesquisa, criando ambientes propícios à formação técnica continuada, à inovação colaborativa e à adoção de práticas sustentáveis. Iniciativas como o Centro de Excelência em Tecnologia 4.0 de Sorocaba demonstram o potencial dessa articulação ao promoverem o uso de tecnologias digitais em pequenas e médias empresas por meio de parcerias locais (Gonçalves, 2024).

A adoção efetiva da sustentabilidade no contexto da Indústria 4.0 também exige uma reconfiguração estratégica das cadeias produtivas, com foco na valorização de fornecedores locais, redução de deslocamentos logísticos e uso de fontes energéticas limpas. Tecnologias como sensores ambientais inteligentes, sistemas de rastreabilidade e projetos de ecodesign com foco em menor pegada de carbono representam alternativas viáveis, embora ainda subutilizadas na realidade industrial brasileira (Barros e Freitag, 2022; Duarte, 2024).

Dessa forma, a convergência entre Indústria 4.0 e sustentabilidade deve ser compreendida como um processo dinâmico, multidimensional e interdependente, que exige uma abordagem integrada entre inovação tecnológica, governança empresarial e políticas públicas. Esse alinhamento será fundamental não apenas para a competitividade da indústria brasileira, mas também para garantir sua adaptação frente às exigências ambientais e sociais de um mercado global em rápida transformação (Souza et al., 2024; Pacchini et al., 2020).

2.4 Integração Tecnológica e Desempenho Operacional

A integração tecnológica na Indústria 4.0 representa um avanço significativo na forma como os processos produtivos são gerenciados, ao permitir a conectividade em tempo real entre pessoas, máquinas, sensores e sistemas. Essa interconexão amplia as possibilidades de customização, automação, rastreabilidade e eficiência operacional em toda a cadeia de valor, promovendo simultaneamente melhorias em desempenho e sustentabilidade (Borlido, 2017).

A digitalização e a automação têm transformado os sistemas produtivos na indústria refratária. O uso de sistemas ciberfísicos como Manufacturing Execution System (MES), sensores IoT e plataformas de blockchain contribuem para maior rastreabilidade, controle de qualidade e eficiência energética (Souza et al., 2024).

O MES permite a visualização integrada dos processos, o controle do desempenho produtivo em tempo real e a gestão eficiente de recursos, resultando em maior estabilidade operacional, redução de falhas e decisões mais precisas (Borlido, 2017; Hoffmann, 2019).

A empresa RHI Magnesita tem adotado, de forma estruturada, diversas soluções alinhadas à Indústria 4.0, com destaque para a implementação do MES em suas unidades industriais no Brasil. Conforme seu Relatório Anual RHI Magnesita (2023), a empresa conseguiu avanços relevantes na gestão de produção e eficiência energética a partir da integração digital de sistemas. Além disso, o uso de sensores e dispositivos inteligentes possibilitou o monitoramento contínuo de ativos críticos, elevando a rastreabilidade e o controle de qualidade dos processos refratários.

Segundo o relatório anual da RHI Magnesita (2024), a empresa implementou soluções avançadas como a projeção robotizada de materiais refratários, sensores de espectroscopia térmica e contratos inteligentes de manutenção. A projeção refratária robotizada, pioneira no setor siderúrgico brasileiro. Trata-se de um sistema composto por um robô operado remotamente, equipado com câmeras e sensores que monitoram a operação em tempo real. Essa tecnologia foi projetada para realizar intervenções em alto-forno com maior segurança, reduzindo a exposição humana a ambientes de alta temperatura e otimizando a aplicação dos materiais refratários (IBRAM, 2023).

Essas tecnologias contribuem não apenas para a proteção dos operadores, mas também para a padronização da aplicação e o aumento da durabilidade dos revestimentos refratários, elementos essenciais para a sustentabilidade operacional e a performance térmica dos ativos industriais (RHI MAGNESITA, 2024).

Dessa forma, as inovações promovidas pela RHI Magnesita ilustram como a integração digital e a adoção de tecnologias emergentes podem reconfigurar práticas tradicionais, elevando o patamar de eficiência, segurança e responsabilidade ambiental da indústria de refratários. Ao alinhar automação, conectividade e inteligência computacional, a empresa avança na direção de um modelo produtivo mais resiliente, competitivo e sustentável.

2.5 Perspectivas Futuras

As tendências indicam que o setor de refratários seguirá evoluindo com a integração de digital twins, manutenção baseada em IA, rastreabilidade via blockchain e plataformas de análise preditiva. No entanto, o contexto brasileiro apresenta barreiras relevantes como a baixa infraestrutura digital e a necessidade de políticas públicas que incentivem a inovação, especialmente para as PMEs (pequenas e médias empresas) (Gonçalves, 2024; Beier et al., 2022).

Segundo Cavalcante (2019), os avanços tecnológicos impulsionados pela Indústria 4.0 estão progressivamente reconfigurando os fatores de competitividade na indústria de refratários, introduzindo novos paradigmas de gestão de ativos, sustentabilidade e inteligência operacional. A digitalização da cadeia de suprimentos tem potencial para transformar profundamente a forma como os materiais refratários são projetados, produzidos, aplicados e monitorados (Borlido, 2017; Cavalcante, 2019).

Entretanto, no contexto brasileiro, a plena adoção dessas tecnologias enfrenta barreiras estruturais relevantes. Entre os principais desafios destacam-se a limitação de infraestrutura digital, a escassez de profissionais qualificados para operar e interpretar sistemas ciberfísicos e a fragmentação dos sistemas de dados operacionais (Gonçalves, 2024). Tais fatores dificultam a consolidação de um ambiente produtivo totalmente integrado, responsivo e sustentável.

Apesar dessas adversidades, empresas líderes como a RHI Magnesita vêm assumindo papel de protagonismo no processo de transformação digital do setor. A companhia tem investido consistentemente em soluções tecnológicas avançadas, como contratos de performance baseados em indicadores operacionais (KPIs), digitalização de serviços técnicos e uso de plataformas integradas para gestão da manutenção e rastreabilidade térmica de componentes refratários (RHI MAGNESITA, 2023). Essas iniciativas não apenas ampliam a eficiência dos processos internos, mas também fortalecem a proposta de valor ao cliente, ao garantir maior previsibilidade, disponibilidade operacional e conformidade ambiental ao longo dos ciclos produtivos (IBRAM, 2023).

3 METODOLOGIA

Este estudo adota uma abordagem qualitativa e exploratória, fundamentada na revisão de literatura e na análise de dados secundários, com o objetivo de compreender os impactos da

Indústria 4.0 no setor de refratários, com ênfase nos eixos de desempenho operacional, sustentabilidade e integração tecnológica. A escolha por essa abordagem se justifica pela natureza complexa e multifacetada do fenômeno em análise, ainda em consolidação prática no contexto industrial brasileiro, o que demanda uma investigação aberta à construção de significados e à interpretação contextual (Barros; Nishimaru, 2018; Tessarini Junior; Saltorato, 2018).

A utilização de dados secundários e fontes técnicas consolidadas permite identificar tendências e padrões que extrapolam o ambiente interno de uma organização, ampliando a capacidade de análise para além da descrição de práticas isoladas. Conforme reforçado por Borlido (2017), a Indústria 4.0 ainda se encontra em estágio de amadurecimento, o que exige flexibilidade metodológica para capturar seus efeitos reais e potenciais nas operações industriais. Assim, a combinação de fontes documentais atualizadas, relatórios institucionais e evidências bibliográficas forma a base para a análise crítica deste estudo.

A escolha da empresa RHI Magnesita justifica-se por sua atuação destacada em inovação industrial e digitalização de processos, com presença em mais de 30 países e estrutura produtiva de grande relevância no Brasil. A empresa é reconhecida por integrar tecnologias como Internet das Coisas (IoT), inteligência artificial, blockchain e manutenção preditiva em suas unidades fabris. Segundo o Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM, 2023), a RHI Magnesita foi pioneira na América do Sul ao implantar a projeção refratária robotizada em alto-forno, demonstrando maturidade tecnológica e compromisso com práticas sustentáveis e seguras. Além disso, o Relatório Anual 2023 da empresa evidencia iniciativas concretas em digitalização de serviços, contratos inteligentes, rastreabilidade térmica, uso de dados para manutenção preditiva e estratégias alinhadas aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da ONU (RHI MAGNESITA, 2023).

Assim, a RHI Magnesita representa um caso emblemático para investigar como a Indústria 4.0 tem sido implementada na prática em um setor tradicionalmente intensivo em energia, alta temperatura e necessidade de confiabilidade operacional.

3.1 Descrição do Estudo de Caso

O estudo de caso, conforme argumentado por Souza et al. (2024), é uma estratégia eficaz para aprofundar a compreensão de fenômenos complexos em contextos organizacionais em transformação, especialmente quando se busca identificar impactos e oportunidades decorrentes da implementação da Indústria 4.0. Assim, foi adotado neste trabalho como método para examinar, de forma aplicada e crítica, a incorporação de tecnologias digitais no setor de refratários.

A empresa selecionada foi a RHI Magnesita, cujas unidades produtivas e de mineração em operação no Brasil representam um dos maiores e mais relevantes exemplos da adoção de práticas de digitalização e automação industrial no setor (IBRAM, 2023). A escolha baseou-se na sua posição de destaque global, na solidez de sua estratégia tecnológica e na acessibilidade a fontes públicas e institucionais de alta credibilidade.

Durante a fase de coleta de dados secundários, foi realizada uma análise documental e bibliográfica com enfoque qualitativo e exploratório. Foram utilizados como fontes principais:

- Relatórios anuais e de sustentabilidade da RHI Magnesita, os quais forneceram subsídios para compreender a evolução das práticas industriais em digitalização, manutenção preditiva e compromissos sustentáveis no setor de refratários (RHI MAGNESITA, 2024);
- Publicações institucionais do Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM), com ênfase em programas estratégicos relacionados à digitalização e à descarbonização da cadeia mineral brasileira, especialmente no contexto da Indústria 4.0;
- Literatura científica nacional e internacional sobre tecnologias habilitadoras como Internet das Coisas (IoT), sistemas de execução da manufatura (MES), manutenção preditiva, robótica e blockchain, conforme discutido por Borlido (2017), Delanhese (2023), Cavalcante (2019), Hoffmann (2019) e Gonçalves (2024);
- Documentos acadêmicos selecionados por meio de revisão sistemática e crítica (incluindo dissertações e artigos científicos), que abordam a implementação da Indústria 4.0 em contextos industriais de alta complexidade, com destaque para o setor metalúrgico, de manufatura e de materiais refratários, incluindo autores como Borlido (2017), Delanhese (2023), Cavalcante (2019), Hoffmann (2019), Gonçalves (2024), Teixeira (2023) e Souza et al. (2024).

Essa triangulação metodológica proporcionou uma análise abrangente e validada por múltiplas perspectivas, possibilitando uma visão aprofundada dos desafios, das oportunidades e dos impactos da transformação digital no setor refratário.

3.2 Procedimentos de Análise

A análise dos dados foi estruturada em três eixos principais, alinhados aos objetivos específicos da pesquisa: (1) digitalização e desempenho operacional; (2) práticas sustentáveis; e (3) desafios e oportunidades para a integração tecnológica.

A primeira etapa consistiu na sistematização conceitual da Indústria 4.0 e de suas tecnologias habilitadoras, com base em literatura científica nacional e internacional, consolidando os fundamentos teóricos necessários para uma interpretação crítica dos dados. Em seguida, foi realizada a análise documental de fontes institucionais, como relatórios da RHI Magnesita e documentos do IBRAM, com foco em ações práticas voltadas à manutenção preditiva, uso de sensores IoT, automação robótica, rastreabilidade por blockchain e contratos inteligentes.

A análise foi conduzida segundo os princípios da triangulação teórica e da saturação temática, conforme orientações de Bruning et al. (2018), permitindo maior consistência analítica por meio da convergência entre diferentes tipos de fontes secundárias. Embora não tenham sido utilizados dados primários devido a restrições institucionais, a limitação foi compensada com uma investigação documental aprofundada e uma revisão bibliográfica atualizada, garantindo a validade metodológica e a robustez interpretativa.

Adicionalmente, o uso de dados setoriais permitiu identificar barreiras estruturais à digitalização plena na indústria brasileira, como a escassez de infraestrutura tecnológica e de mão de obra especializada, desafios amplamente discutidos por Vello e Volante (2019) e Andrade e Nishimaru (2018), que ainda dificultam a evolução da Indústria 4.0 em ambientes produtivos complexos.

3.3 Considerações sobre Limitações e Contribuições

Reconhece-se que, por não empregar dados primários como entrevistas ou observações diretas, este trabalho apresenta uma limitação quanto à investigação empírica *in loco*. No entanto, a coerência metodológica, a triangulação de fontes e a profundidade da análise documental conferem credibilidade e solidez às conclusões propostas.

A combinação entre revisão teórica e análise de casos reais proporciona subsídios relevantes para gestores industriais, formuladores de políticas públicas e pesquisadores envolvidos com a modernização da indústria brasileira. Ao articular evidências práticas com bases conceituais robustas, o estudo contribui para a compreensão dos impactos da Indústria 4.0 no setor de refratários, apontando caminhos para a inovação sustentável, o reposicionamento estratégico e a transformação digital em cadeias produtivas intensivas em capital e conhecimento.

4 DISCUSSÕES

A implementação de sistemas de manutenção preditiva e a utilização de big data para monitorar e otimizar o desempenho dos ativos são exemplos de como a Indústria 4.0 pode transformar a gestão de manutenção. Conforme explorado por Borlido (2017), essas tecnologias permitem uma abordagem mais proativa e eficiente, reduzindo o tempo de inatividade e os custos de manutenção, ao mesmo tempo em que aumentam a vida útil dos equipamentos.

4.1 Implementação da Indústria 4.0 na RHI Magnesita

A RHI Magnesita tem se destacado na adoção de tecnologias da Indústria 4.0 para transformar seus processos produtivos e operacionais. A criação do Hub Digital em Viena, Áustria, exemplifica esse compromisso, reunindo equipes dedicadas ao desenvolvimento de sistemas avançados de otimização de processos baseados em dados para operações em altas temperaturas, típicas da indústria de refratários (IBRAM, 2020). Segundo o IBRAM (2020), entre as iniciativas implementadas, destacam-se:

- Otimização de Processos Automatizados (APO): Utiliza algoritmos de inteligência artificial para analisar dados operacionais em tempo real, permitindo ajustes automáticos nos processos e melhorando a eficiência e a qualidade dos produtos.

- Quick (QCK): Sistema que acelera a coleta e análise de dados, facilitando a tomada de decisões rápidas e informadas em ambientes de produção dinâmica.
- Termômetro Espectral de Banda Larga (BST): Tecnologia que monitora temperaturas extremas com alta precisão, essencial para processos que operam acima de 1.200 °C, garantindo maior controle e segurança nas operações.

Essas iniciativas refletem a estratégia da empresa em integrar digitalização e automação em suas operações, alinhando-se às tendências globais da Indústria 4.0.

4.2 Resultados Operacionais com base na Transformação Digital da Indústria 4.0

A RHI Magnesita tem demonstrado avanços significativos em seus indicadores operacionais a partir da incorporação de tecnologias associadas à Indústria 4.0. A digitalização de processos, iniciada de forma estruturada a partir de 2019, tem promovido uma integração inteligente desde a extração de matéria-prima até o acabamento dos produtos. Essa transformação tecnológica proporcionou ganhos relevantes em eficiência, confiabilidade e sustentabilidade dos processos, ancorada no uso de sensores inteligentes, automação, sistemas de rastreabilidade, e plataformas de análise de dados em tempo real (RHI MAGNESITA, 2023; RHI MAGNESITA, 2024).

4.2.1 Principais avanços identificados na RHI Magnesita (2024)

- Aumento da disponibilidade de ativos: O monitoramento contínuo das condições operacionais, aliado à manutenção preditiva e à automação de processos, elevou a disponibilidade média de ativos produtivos, especialmente em unidades que passaram por modernização digital (RHI MAGNESITA, 2024).
- Melhoria da eficiência energética: A implantação de algoritmos inteligentes em sistemas de gestão energética permitiu a redução no consumo específico de energia, especialmente em fornos, secadores e caldeiras, conforme demonstrado pelos ganhos de margem mesmo em períodos de menor capacidade produtiva (RHI MAGNESITA, 2024).
- Redução de perdas operacionais: A racionalização da cadeia produtiva, por meio da conexão entre planejamento, controle e execução, contribuiu para minimizar desperdícios de materiais e insumos (RHI MAGNESITA, 2024).

- **Ampliação do uso de matérias-primas recicladas:** O índice de uso de materiais reciclados passou de 10,5% em 2022 para 12,6% em 2023, consolidando a RHI Magnesita como uma das líderes no uso de insumos circulares no setor refratário (RHI MAGNESITA, 2024).
- **Expansão da cobertura de dados em tempo real:** O projeto de modernização do sistema de controle operacional elevou a cobertura de variáveis monitoradas digitalmente, permitindo decisões mais rápidas e precisas em ambiente industrial (RHI MAGNESITA, 2024).

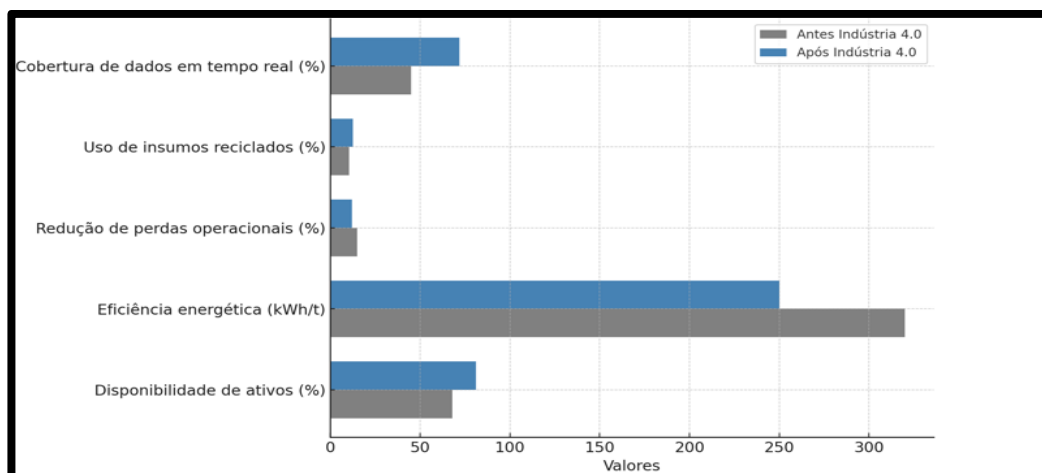
A Tabela 1 apresenta o resultado dos indicadores operacionais antes e após a utilização de tecnologias associadas à Indústria 4.0. Complementarmente, a Figura 1 apresenta uma comparação direta entre os principais indicadores operacionais antes e depois da adoção das tecnologias da Indústria 4.0 na RHI Magnesita.

Tabela 1 – Indicadores de desempenho operacional: antes e após a Indústria 4.0 na RHI Magnesita

Indicador	Antes Indústria 4.0	Após Indústria 4.0
Disponibilidade de ativos (%)	68	81
Eficiência energética (kWh/t)	320	250
Redução de perdas operacionais (%)	15	12
Uso de matérias-primas recicladas (%)	10,5	12,6
Cobertura de dados em tempo real (%)	45	72

Fonte: Elaborado pelo autor com base em RHI MAGNESITA (2023; 2024).

Figura 1 – Indicadores operacionais antes e depois da Indústria 4.0 – RHI Magnesita



Fonte: Elaborado pelo autor com base em RHI MAGNESITA (2023; 2024).

4.3 Benefícios em Sustentabilidade

Além dos ganhos operacionais, a adoção de tecnologias da Indústria 4.0 trouxe benefícios significativos em termos de sustentabilidade. A RHI Magnesita investiu €50 milhões em pesquisa tecnológica e na construção de uma planta piloto focada na captura de CO₂, visando a redução das emissões de carbono em suas operações (IBRAM, 2020).

Outros avanços incluem:

- **Implementação de Práticas de Economia Circular:** Com a linha ANKRAL LC-Series, a empresa incorporou até 50% de materiais reciclados na produção de tijolos de magnésia-espinélio para a indústria de cimento, promovendo a reutilização de resíduos e reduzindo a necessidade de extração de novas matérias-primas (RHI MAGNESITA, 2023).
- **Redução da Intensidade de Emissões de CO₂:** A empresa alcançou uma redução de 12% na intensidade das emissões de CO₂ entre 2018 e 2023, demonstrando seu compromisso com a mitigação das mudanças climáticas (RHI MAGNESITA, 2024).
- **Aumento no Uso de Matérias-Primas Secundárias:** Em 2023, 12,6% das matérias-primas utilizadas eram recicladas, aproximando-se da meta de 15% estabelecida para 2025, evidenciando o avanço na implementação de práticas sustentáveis (RHI MAGNESITA, 2024).

4.4 Vantagem Competitiva e Inovações Tecnológicas

A incorporação de tecnologias avançadas também conferiu à RHI Magnesita uma posição de destaque no mercado global de refratários. A empresa foi pioneira na América do Sul ao implementar a projeção refratária robotizada em altos-fornos, aumentando a precisão na aplicação de materiais e melhorando a segurança dos operadores (IBRAM, 2023). Além disso, a digitalização permitiu:

- **Desenvolvimento de Modelos de Negócio Inovadores:** O lançamento do modelo 4PRO exemplifica a oferta de soluções integradas e personalizadas aos clientes, utilizando dados e tecnologias digitais para otimizar o desempenho dos produtos e serviços (RHI MAGNESITA, 2023).
- **Parcerias Estratégicas:** A colaboração com empresas como a Gerdau resultou na implementação de soluções baseadas em blockchain na indústria do aço, promovendo maior transparência e eficiência nas operações (ACO BRASIL, 2023).

Conforme destacado pela RHI Magnesita (2024), além do impacto na eficiência, a tecnologia agregou valor às práticas de segurança do trabalho, possibilitando um controle mais rigoroso de riscos por meio de inspeções automatizadas e identificação preditiva de condições inseguras. Esse enfoque reduziu a frequência de incidentes e potencializou a cultura de “Zero Harm – No Injuries”, uma vez que os colaboradores passaram a ter acesso a treinamentos interativos e protocolos de emergência atualizados. Dessa forma, a companhia reforçou o compromisso de proteger sua força de trabalho enquanto aprimora a qualidade operacional.

No contexto da sustentabilidade ambiental, a RHI Magnesita tem avançado significativamente, alinhando suas operações a descarbonização e preservação ecológica. A empresa reforçou seu compromisso com a reciclagem de matérias-primas secundárias, ampliando a reutilização de insumos e reduzindo o impacto ambiental de sua cadeia de produção. Além disso, a companhia investiu em parcerias estratégicas para captura e utilização de carbono, destacando a colaboração com a MCi Carbon para mineralização de CO₂, uma tecnologia que transforma emissões gasosas em minerais sólidos reutilizáveis (RHI MAGNESITA, 2024).

Segundo relatório anual da RHI Magnesita, a empresa também registrou avanços notáveis em sustentabilidade, com a reciclagem representando 12,6% de seus produtos em 2023, um aumento significativo em relação aos 10,5% do ano anterior, com a meta de atingir 15% até 2025. Este aumento só foi possível com investimentos em pesquisas somado ao desenvolvimento de novas tecnologias. Esse progresso reflete a adoção de práticas sustentáveis e a integração de materiais reciclados em seus processos, contribuindo para a redução das emissões de CO₂ por tonelada de produto, que caiu de 1,71 t CO₂/t em 2022 para 1,62 t CO₂/t em 2023 (RHI MAGNESITA, 2023).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O artigo teve como objetivo apresentar os conceitos da indústria 4.0 e identificar quais são os benefícios de sua implantação em uma indústria de refratários tendo como referência a RHI Magnesita empresa líder neste segmento. Como método de atingir tal objetivo foi adotada

neste estudo análise teórica e exploratória, baseada na revisão de literatura e no levantamento de dados secundários provenientes de fontes públicas e acadêmicas.

Os resultados obtidos permitem afirmar que a Indústria 4.0 tem se consolidado como vetor estratégico de transformação organizacional na RHI Magnesita. A criação do Hub Digital em Viena e o programa Refractory 4.0 simbolizam esse direcionamento ao promoverem inovação por meio do uso integrado de tecnologias como inteligência artificial, big data, sensores, sistemas MES e automação em tempo real (RHI MAGNESITA, 2023; INDUSTRIAL MACHINERY DIGEST, 2024).

Este trabalho possibilitou avaliar os benefícios adquiridos através do relatório de 2023 da RHI Magnesita, ilustrando como a Indústria 4.0 foi um vetor estratégico para a RHI Magnesita, impulsionando a eficiência operacional e a lucratividade, ao mesmo tempo em que promoveu avanços significativos em segurança. A utilização de sistemas automatizados, análise avançada de dados e gestão conectada de recursos elevou o patamar de desempenho operacional, garantindo solidez financeira e gerando valor para os diversos stakeholders envolvidos.

A análise das inovações implementadas mostra ganhos consistentes na eficiência produtiva e na confiabilidade operacional, sobretudo por meio da manutenção preditiva e da projeção robotizada de refratários em ambientes industriais de alta temperatura. Com o uso de sensores inteligentes e análise preditiva, a RHI Magnesita reduziu significativamente as paradas não programadas e melhorou a rastreabilidade de processos críticos, aumentando a disponibilidade dos ativos e a qualidade final dos produtos (Souza et al., 2024; RHI MAGNESITA, 2024).

A aplicação estratégica de recursos tecnológicos incluiu o uso de sensores inteligentes e de big data na prevenção de falhas, o que minimizou paradas não planejadas em fornos industriais, principal fonte de receita no setor de refratários. Ao integrar dados operacionais em plataformas de análise, a RHI Magnesita conseguiu antecipar necessidades de reparo, aprimorando a confiabilidade do processo fabril e assegurando entregas pontuais aos clientes. Tal ganho de consistência elevou a competitividade e reforçou o potencial de crescimento. Além da eficiência produtiva, a segurança do trabalho foi aprimorada por meio de inspeções automatizadas e da implementação de protocolos preditivos para mitigação de riscos.

Além dos avanços operacionais e ambientais, a transformação digital na RHI Magnesita tem se consolidado como um dos pilares estratégicos no fortalecimento das práticas de segurança do trabalho. De acordo com o relatório anual da empresa, em 2023 foi registrado o menor índice de frequência de acidentes com afastamento desde a abertura de capital da companhia, atingindo 0,16 por 200.000 horas trabalhadas, o que representa uma redução de 20% em relação ao ano anterior (RHI MAGNESITA, 2024).

Esse resultado é atribuído à implementação de uma abordagem preventiva baseada em tecnologias digitais, como inspeções automatizadas, protocolos de controle de risco baseados em dados, sistemas de análise preditiva e campanhas específicas integradas à rotina operacional, como o foco em segurança manual e treinamentos contínuos. Essas ações também incluem a integração de tópicos de segurança nas reuniões de início de turno e a modernização dos processos de capacitação de novos colaboradores, reforçando a cultura preventiva em todos os níveis da organização.

Tais iniciativas reforçam o compromisso da RHI Magnesita com a filosofia "Zero Harm", cuja meta é eliminar fatalidades e incidentes graves por meio de um ambiente de trabalho seguro, digitalmente monitorado e orientado por dados (RHI MAGNESITA, 2023; RHI MAGNESITA, 2024).

Especificamente no campo ambiental, o uso crescente de matérias-primas secundárias, aliado ao investimento em tecnologias de captura e mineralização de CO₂ — como no projeto conjunto com a MCi Carbon — posiciona a empresa como referência em descarbonização industrial. Em 2023, o índice de reciclagem atingiu 12,6%, com meta de 15% até 2025, e a intensidade de emissões caiu para 1,62 t CO₂/t de produto, representando redução de 14% em relação a 2018 (RHI MAGNESITA, 2023; RHI MAGNESITA, 2024).

Por outro lado, no cenário brasileiro, a difusão da Indústria 4.0 enfrenta limitações significativas, principalmente entre as Pequenas e Médias Empresas (PMEs). Dentre os principais entraves estão a infraestrutura tecnológica insuficiente, a escassez de mão de obra especializada e a ausência de políticas públicas robustas de fomento à inovação (Gonçalves, 2024; Milhossi et al., 2023; Souza et al., 2024).

Dessa forma, conclui-se que a adoção de tecnologias digitais na indústria de refratários, como exemplificado pela RHI Magnesita, contribui decisivamente para a elevação da competitividade, sustentabilidade financeira e perenidade do negócio. O caso analisado demonstra que a Indústria 4.0, quando aplicada com visão estratégica, é capaz de impulsionar ganhos operacionais expressivos, ao mesmo tempo em que promove responsabilidade ambiental, social e de governança.

Recomenda-se, portanto, o aprofundamento de estudos sobre a maturidade digital no setor refratário, bem como a análise de modelos de cooperação entre grandes empresas e PMEs como forma de acelerar a transição digital da cadeia produtiva. A construção de indicadores específicos para avaliar o impacto da Indústria 4.0 alinhados aos objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) será essencial para orientar investimentos, políticas e a tomada de decisão gerencial nos próximos anos.

6 REFERÊNCIAS

- ACO BRASIL. Gerdau e RHI Magnesita são pioneiras mundiais no uso de blockchain na indústria do aço. 2023. Disponível em: <https://www.acobrasil.org.br/site/noticia/gerdau-e-rhi-magnesita-sao-pioneiras-mundiais-no-uso-de-blockchain-na-industria-do-aco/>. Acesso em: 2 abr. 2025.
- ANDRADE, M. S.; NISHIMARU, G. Y.; NASCIMENTO, D. N.; FRÓES, N. J. M. Uma revisão sistemática sobre a interação entre Indústria 4.0 e sustentabilidade. 2018. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/328930128_Uma_revisao_sistemica_sobre_a_interacao_entre_industria_40_e_sustentabilidade. Acesso em: 3 dez. 2024.
- BARROS, J. de C.; FREITAG, A. E. B. Sustentabilidade e a Indústria 4.0. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SUSTAINABILITY, 2022. Proceedings [...]. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/358647588_SUSTENTABILIDADE_E_A_INDUSTRIA_40. Acesso em: 3 dez. 2024.
- BEIER, G. et al. Impact of Industry 4.0 on corporate environmental sustainability: comparing practitioners' perceptions from China, Brazil and Germany. *Sustainable Production and Consumption*, v. 31, 2022.
- BORLIDO, D. J. A. Indústria 4.0: aplicação a sistemas de manutenção. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2017.
- BRUNING, C., GODRI, L., & TAKAHASHI, A. R. W. (2018). Triangulação em Estudos de Caso: incidência, apropriações e mal-entendidos em pesquisas da área de

Administração. *Administração: Ensino E Pesquisa*, 19(2), 277–307.
<https://doi.org/10.13058/raep.2018.v19n2.889> Acesso em: 01 abril 2025.

CAVALCANTE, I. M. Indústria 4.0 e suas perspectivas futuras para o Brasil: uma revisão sistemática da literatura. 2019. Monografia (Bacharelado em Administração) – Universidade Federal da Paraíba, Bananeiras, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufpb.br/jspui/bitstream/123456789/15737/1/IMC17092019.pdf>. Acesso em: 01 abril 2025.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA – CNI. Indústria 4.0: 69% das indústrias brasileiras fazem uso de tecnologia digital. 2022. Disponível em: <https://noticias.portaldaindustria.com.br/noticias/inovacao-e-tecnologia/industria-40-69-das-industrias-brasileiras-fazem-uso-de-tecnologia-digital-no-brasil/>. Acesso em: 3 jun. 2025.

DELANHESE, B.C.N.S. Indústria 4.0 e sustentabilidade: análise dos impactos e proposta de diretrizes. Dissertação (Mestrado em Sustentabilidade) PUC Campinas/SP, 2023.

DUARTE, A. K. Encapsulamento cerâmico de resíduos de materiais refratários. 2005. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2005. Disponível em: https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/BUOS-8DMF6N/1/tese_alamarkasanduarte_engmetal_rgica.pdf. Acesso em: 15 dez. 2024.

DUARTE, A. K. Fundamentos à tecnologia de refratários. São Paulo: Blucher, 2024. v.1.

GONÇALVES, D. B. Indústria 4.0 no Brasil: análise da contribuição do Centro de Excelência em Tecnologia 4.0. *Latin American Journal of Business Management*, v. 15, n. 2, jul./dez. 2024. Disponível em: <https://www.lajbm.com.br/journal/article/view/806/429> . Acesso em: 24 mar. 2025.

HOFFMANN, Vanderlei. Gestão da qualidade na Indústria 4.0: uma revisão de literatura. 2019. Monografia (Especialização em Engenharia de Produção) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2019.

IBRAM. RHI Magnesita cria Hub Digital para desenvolver projetos 4.0 para a indústria de refratários. 2020. Disponível em: <https://ibram.org.br/noticia/rhi-magnesita-cria-hub-digital-para-desenvolver-projetos-4-0-para-industria-de-refratarios/>. Acesso em: 2 abr. 2025.

IBRAM. RHI Magnesita inova na aplicação robotizada de refratários em alto-forno na América do Sul.(2023). Disponível em: <https://ibram.org.br/noticia/rhi-magnesita-inova-na-aplicacao-robotizada-de-refratarios-em-alto-forno-na-america-do-sul/> Acesso em: 07 dez. 2024.

IBRAM. RHI Magnesita investe em tecnologia de ponta na prestação de serviços. (2023). Disponível em: <https://ibram.org.br/noticia/rhi-magnesita-investe-em-tecnologia-de-ponta-na-prestacao-de-servicos/> Acesso em: 07 dez. 2024.

IMACHINE. Como a IoT potencializa a manutenção preditiva. 2024. Disponível em: <https://www.imachine.com.br/single-post/como-a-iot-potencializa-a-manutencao-preditiva>. Acesso em: 15 dez. 2024.

INDUSTRIAL MACHINERY DIGEST. RHI Magnesita establishes digital hub for 4.0 projects, 2024. Disponível em: <https://industrialmachinerydigest.com/industrial-news/industry-updates/rhi-magnesita-establishes-digital-hub-for-4-0-projects/>. Acesso em: 06 abr. 2025.

LUTHRA, S.; MANGLA, S. K. Evaluating challenges to Industry 4.0 initiatives for supply chain sustainability in emerging economies. *Process Safety and Environmental Protection*, v. 117, p. 168-179, 2018. DOI: 10.1016/j.psep.2018.04.018. Disponível em: https://admpg.com.br/2019/anais/arquivos/07262019_150700_5d3b488839852.pdf. Acesso em: 7 dez. 2024.

MARKET RESEARCH FUTURE. Global Magnesium Oxide Market Research Report – Forecast to 2028. 2022.

MILHOSSI, J. F.; QUEIROGA, A. P. G.; RODRIGUES, L. C. Indústria 4.0 e a transformação digital. *Revista Observatório de la Economía Latinoamericana*, Curitiba, v. 21, n. 12, 2023.

OLIVEIRA, R.; SANTOS, P.; ALMEIDA, T. Estratégia, fatores de competitividade e contexto de referência das organizações: uma análise arquetípica. 2019. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rac/a/NMSbsGwMYvbJX46vzBkzF4n/?format=pdf>. Acesso em: 15 dez. 2024.

PACCHINI, A. P. T.; SANTOS, J. C. da S.; LOGIUDICE, R.; LUCATO, W. C. Indústria 4.0: barreiras para implantação na indústria brasileira. *Exacta*, v. 18, n. 2, p. 278-292, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.5585/ExactaEP.v18n2.10605>. Acesso em: 3 dez. 2024.

PALMA, J. M. B.; BUENO, U. S.; STOROLLI, W. G.; SCHIAVUZZO, P. L.; CESAR, F. I. G.; MAKIYA, I. K. Os princípios da Indústria 4.0 e os impactos na sustentabilidade da cadeia de valor empresarial. In: 6th INTERNATIONAL WORKSHOP ON ADVANCES IN CLEANER PRODUCTION, São Paulo, 2017.

PEDRUZZI, J. B. Os desafios da gestão da manutenção na indústria 4.0. *Trabalhos de Conclusão de Curso OLIM-506*. Faculdade Anhanguera de Teixeira de Freitas. Disponível em: https://repositorio.pgsscogna.com.br/bitstream/123456789/50519/1/JHONY_BRAMBATI_PEDRUZZI.pdf. Acesso em: 07 abril 2025.

PEREIRA, A.; SIMONETTO, E. Indústria 4.0: conceitos e perspectivas para o Brasil. *Revista da Universidade Vale do Rio Verde, Três Corações*, v. 16, n. 1, p. 1-9, jan./jul. 2018.

REIS, M. F.; SILVA, A. C. O. de S. Revisão bibliográfica sobre as contribuições da Indústria 4.0 para a gestão da qualidade. *Journal of Open Research*, v. 1, n. 3, 2020. Disponível em: <https://journals.stellata.com.br/jor/article/view/26>. Acesso em: 3 dez. 2024.

RHI MAGNESITA. Annual Report 2023. Disponível em: <https://rhimagnesita.com/annual-reports>. Acesso em: 9 dez. 2024.

RHI MAGNESITA. Annual Report 2024. Disponível em: <https://ir.rhimagnesita.com/wp-content/uploads/2025/02/rhim-ar2024-interactive.pdf>. Acesso em: 1 abril 2025.

RHI MAGNESITA. Pioneirismo na América do Sul: aplicação robotizada de refratários em alto-forno. Disponível em: <https://www.rhimagnesita.com/pt/pioneirismo-na-america-do-sul-aplicacao-robotizada-de-refratarios-em-alto-forno/>. Acesso em 9 dez.2024

RHIMAGNESITA. Refractory 4.0 – RHI Magnesita presents latest innovations at METEC 2019. 2019a. Disponível em: <https://www.rhimagnesita.com/refractory-4-0-rhi-magnesita-presents-latest-innovations-at-metec-2019/>. Acesso em: 06 abr. 2025.

SANTOS, M.; MANHÃES, A. M.; LIMA, A. R. Indústria 4.0: desafios e oportunidades para o Brasil. Anais do X Simpósio de Engenharia de Produção de Sergipe. Aracaju: Universidade Federal de Sergipe, 2018. Disponível em: https://ri.ufs.br/bitstream/riufs/10423/2/Industria_4_0.pdf. Acesso em: 15 dez. 2024.

SILVA, J.; SOUZA, M. Competitividade sustentável ou sustentabilidade competitiva: ensaio sobre as bases conceituais da competitividade e sustentabilidade. 2021. Disponível em: https://repositorio.pucrs.br/dspace/bitstream/10923/10136/2/Competitividade_Sustentavel_ou_Sustentabilidade_Competitiva_Ensaio_Sobre_as_Bases_Conceituais_da_Competitividade_e_e.pdf. Acesso em: 15 dez. 2024.

SOUZA, E. M. A.et al. Impactos da Indústria 4.0 na empregabilidade e no planejamento e controle de produção: desafios e oportunidades. Revista DELOS, Curitiba, v. 18, n. 63, p. 1–22, jan. 2025. Disponível em: <https://ojs.revistadelos.com/ojs/index.php/delos/article/view/3543/2133>. Acesso em: 1 abr. 2025.

SOUZA, J. B. de; OLIVEIRA JÚNIOR, N. J.; MADURO, M. R.; LIMA, O. P. de. Impactos da Indústria 4.0 na sustentabilidade no Brasil: uma revisão bibliográfica. Revista de Gestão e Secretariado, v. 15, n. 6, 2024.

SPEZAMIGLIO, B. S.; GALINA, S. V. R.; CALIA, R. C. READ. Competitividade, inovação e sustentabilidade: uma inter-relação por meio da sistematização da literatura. Revista Eletrônica de Administração, 2020. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/read/a/CLMVrrh57LysccqMtFpdQnN/>. Acesso em: 15 dez. 2024.

TESSARINI JUNIOR, G.; SALTORATO, P. Impactos da Indústria 4.0 na organização do trabalho: uma revisão sistemática da literatura. Revista Produção Online, v. 18, n. 2, 2018. Disponível em: <https://producaoonline.org.br/rpo/article/view/2967>. Acesso em: 3 dez. 2024.

THE INSIGHT PARTNERS. Dolomite Market Forecast to 2028 – COVID-19 Impact and Global Analysis. 2024. Disponível em: <https://www.theinsightpartners.com/reports/dolomite-market>. Acesso em: 4 maio 2025.

VELLO, Ana Cristina Pinheiro; VOLANTE, Carlos Rodrigo. O conceito de Indústria 4.0 e os principais desafios de sua implantação no Brasil. Interface Tecnológica, v. 16, n. 2, 2019. Disponível em: <https://revista.fatectq.edu.br/interfacetecnologica/article/view/686>. Acesso em: 1 abr. 2025.

VOSSOUGHIAN, H.; AMINI, M. Impact of Industry 4.0 Technologies on Sustainability in Manufacturing: A Literature Review. Sustainability, v. 12, n. 10, p. 1-25, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/journal/sustainability>. Acesso em: 3 dez. 2024.