

INDÚSTRIA 4.0: A ASSIMETRIA TECNOLÓGICA E A INTEGRAÇÃO DE BOAS PRÁTICAS EM SEGURANÇA E SAÚDE OCUPACIONAL NA MINERAÇÃO

TACIANE FONSECA DE MIRANDA¹; JULIANA BACELAR DIAS²

¹Mestranda em Desenvolvimento Local, Especialista em Engenharia e Segurança do Trabalho, Pós-graduada em Segurança do Trabalho e Arquiteta Urbanista, UNISUAM, mirandataciane@gmail.com

²Especialista em Engenharia de Segurança do Trabalho, Pós-graduada em Segurança do Trabalho e Engenharia Civil, E.E. Maria de Lucca Pinto Coelho, julianabacelardias@gmail.com

RESUMO

A mineração, embora desempenhe papel estratégico no desenvolvimento econômico e tecnológico, ainda é uma das atividades mais críticas em termos de riscos à saúde e segurança ocupacional, caracterizada pela exposição a agentes físicos, químicos e biológicos. Nesse contexto, os avanços tecnológicos associados à Indústria 4.0 — como sensores vestíveis, drones, Internet das Coisas (IoT), inteligência artificial e realidade virtual — emergem como alternativas inovadoras para a prevenção de acidentes, treinamentos e o fortalecimento da cultura de segurança. O objetivo deste estudo é analisar criticamente a aplicação de tecnologias emergentes e boas práticas de gestão em Segurança e Saúde Ocupacional (SSO) no setor mineral, com ênfase em seus impactos, potencialidades e na assimetria tecnológica entre diferentes portes de empresas. A pesquisa, realizada entre março e junho de 2025, consistiu em uma revisão sistemática da literatura em bases científicas reconhecidas. Foram identificados estudos que abordam a incorporação de soluções digitais, evidenciando reduções significativas de acidentes em grandes corporações, mas também destacando barreiras recorrentes em pequenas e médias mineradoras, como custos elevados, lacunas de capacitação e resistência cultural. Os resultados apontam que a efetividade dessas tecnologias depende da integração com sistemas de gestão, normas regulatórias e políticas públicas de fomento, como o Inova Mineral e ISO 45001. Conclui-se que a transformação tecnológica na mineração pode representar não apenas um avanço operacional, e uma oportunidade de alinhar o setor aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS 3, 8 e 9), contribuindo para uma mineração mais segura, justa e socialmente responsável.

Palavras-chave: Indústria 4.0; Gestão de risco ocupacional; Tecnologias emergentes.

INDUSTRY 4.0: TECHNOLOGICAL ASYMMETRY AND THE INTEGRATION OF BEST PRACTICES IN OCCUPATIONAL HEALTH AND SAFETY IN MINING

ABSTRACT

Mining, while playing a strategic role in economic and technological development, remains one of the most critical activities in terms of occupational health and safety risks, characterized by exposure to physical, chemical, and biological agents. In this context, technological advancements associated with Industry 4.0 — such as wearable sensors, drones, Internet of Things (IoT), artificial intelligence, and virtual reality — emerge as innovative alternatives for accident prevention, training, and the strengthening of the safety culture. The objective of this study is to critically analyze the application of emerging technologies and good management practices in Occupational Health and Safety (OHS) within the mineral sector, emphasizing their impacts, potential, and the technological asymmetry among companies of different sizes. The research, conducted between March and June 2025, consisted of a systematic literature review in recognized scientific databases. Studies were identified that address the incorporation of digital solutions, showing significant reductions in accidents in large corporations, but also highlighting recurrent barriers in small and medium-sized mining companies, such as high costs, training gaps, and cultural resistance. The results indicate that the effectiveness of these technologies depends on integration with management systems, regulatory standards, and public incentive policies, such as Inova Mineral and ISO 45001. It is concluded that the technological transformation in mining can represent not only an operational advance but also an opportunity to

align the sector with the Sustainable Development Goals (SDGs 3, 8, and 9), contributing to safer, fairer, and more socially responsible mining.

Keywords: Industry 4.0; Occupational risk management; Emerging technologies.

INTRODUÇÃO

A indústria da mineração ocupa papel estratégico no desenvolvimento econômico e tecnológico de diversas nações, sobretudo em países em desenvolvimento como o Brasil, onde representa uma parcela relevante do Produto Interno Bruto e da pauta exportadora (IBRAM, 2023). Apesar de sua contribuição expressiva para a balança comercial e para a geração de empregos diretos e indiretos, trata-se de um setor historicamente associado a condições de trabalho críticas, marcadas por altos índices de acidentes, doenças ocupacionais e impactos socioambientais severos. A instabilidade geotécnica, o confinamento de trabalhadores em minas subterrâneas, a manipulação constante de explosivos, a exposição contínua a poeiras minerais, vibrações e ruídos intensos, bem como a convivência com temperaturas extremas, configuram um cenário em que a segurança laboral assume caráter de urgência (SILVA; OLIVEIRA; FERREIRA, 2017; SANTOS; RIBEIRO, 2019).

Ao longo das últimas décadas, avanços regulatórios buscaram reduzir a vulnerabilidade dos trabalhadores da mineração. No Brasil, a Norma Regulamentadora nº 22 (NR-22) estabeleceu parâmetros técnicos específicos para o setor, complementados por mudanças estruturais mais recentes introduzidas pela NR-1, que reformulou o Gerenciamento de Riscos Ocupacionais (GRO), e pela NR-9, que ampliou a perspectiva preventiva sobre agentes físicos, químicos e biológicos (BRASIL, 2022). Ainda assim, relatórios nacionais como os do Observatório de Segurança e Saúde no Trabalho (SmartLab, 2023) revelam que a mineração permanece entre as atividades econômicas com maior incidência de acidentes graves e fatais, indicando que a mera existência de normas, por si só, não garante sua efetividade sem o suporte de tecnologias, cultura organizacional e investimentos consistentes.

Nesse cenário, as transformações trazidas pela chamada Indústria 4.0 vêm sendo apontadas como potenciais aliadas na modernização das práticas de segurança do trabalho. A integração entre sistemas ciberfísicos, automação inteligente e uso intensivo de dados tem promovido uma verdadeira revolução na forma de gerir processos industriais (RÜSSMANN et al., 2015; SCHWAB, 2016). Na mineração, tecnologias como Internet das Coisas (IoT), sensores vestíveis, drones, inteligência artificial, big data e realidade virtual vêm sendo testadas e, em alguns casos, incorporadas de modo sistemático, com a promessa de reduzir a exposição humana a riscos, melhorar a tomada de decisão, qualificar treinamentos e fortalecer a cultura de prevenção (ZHANG; WANG, 2022; COSTA; SILVA, 2022).

Entretanto, os resultados não são homogêneos. Enquanto grandes corporações mineradoras, dotadas de robustez financeira e capacidade de inovação, vêm apresentando avanços significativos na adoção de soluções digitais, pequenas e médias mineradoras ainda se deparam com custos elevados, infraestrutura deficiente, escassez de mão de obra qualificada e resistência cultural à transformação digital (ALMEIDA; GONÇALVES, 2020; LIMA et al., 2022). Essa desigualdade tecnológica gera uma assimetria preocupante: de um lado, empresas de grande porte fortalecem suas práticas de segurança com recursos sofisticados; de outro, milhares de trabalhadores em empreendimentos de menor escala continuam expostos a métodos tradicionais e arriscados de operação.

É nesse ponto que se localiza a lacuna acadêmica que este estudo busca enfrentar. Embora a literatura já aponte resultados promissores quanto ao uso de tecnologias emergentes na segurança do trabalho em mineração, ainda faltam análises críticas que comparem diferentes contextos de adoção, que examinem de forma aprofundada as condições organizacionais e institucionais que determinam a efetividade das soluções e que questionem seus limites metodológicos. Além disso, pouco se discute sobre como essas inovações podem ser articuladas às diretrizes normativas nacionais (NR-1, NR-9 e NR-22), aos sistemas internacionais de gestão (ISO 45001) e a políticas públicas de incentivo à inovação, de modo a viabilizar sua disseminação de forma ampla, equitativa e sustentável.

Assim, este artigo propõe uma revisão sistemática da literatura acadêmica publicada entre 2015 e 2025, com o objetivo de analisar os principais avanços tecnológicos aplicados à segurança e saúde ocupacional na mineração, refletir sobre os impactos práticos observados, identificar os obstáculos que dificultam a adoção das tecnologias emergentes e a disparidade na adoção dessas soluções entre grandes corporações e pequenas e médias mineradoras e discutir boas práticas de gestão que possam apoiar sua integração. A expectativa é contribuir não apenas para a sistematização do conhecimento existente, mas também para provocar uma reflexão crítica sobre os caminhos futuros da segurança do trabalho no setor mineral, sobretudo em direção a uma mineração mais segura, justa e alinhada aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS 3, 8 e 9).

REFERENCIAL TEÓRICO

A mineração configura-se como uma das atividades econômicas mais perigosas do mundo, especialmente em países em desenvolvimento, nos quais a fiscalização é deficiente e os recursos tecnológicos de proteção permanecem escassos ou obsoletos (MOURA et al., 2016). Trabalhadores são expostos a riscos como soterramentos, explosões, inalação de

poeiras minerais — sobretudo sílica —, vibrações, ruídos e temperaturas extremas, além de acidentes com equipamentos de grande porte (SANTOS; RIBEIRO, 2019).

No Brasil, dados recentes do Observatório de Segurança e Saúde no Trabalho (SmartLab, 2023) reforçam a permanência da mineração entre os setores com maiores taxas de acidentes graves e fatais. Embora a NR-22 tenha representado um marco regulatório para atividades minerárias, sua eficácia depende da articulação com tecnologias preventivas e da consolidação de uma cultura de segurança organizacional (BRASIL, 2022). Nesse ponto, a literatura converge: avanços normativos são indispensáveis, mas insuficientes se não vierem acompanhados de inovação tecnológica, qualificação técnica e governança integrada (NUNES et al., 2020; LOPES et al., 2023).

Nesse contexto de riscos persistentes e desafios regulatórios que a chamada Indústria 4.0 abriu novas possibilidades de transformação digital no setor, ampliando a capacidade de monitoramento, prevenção e antecipação de falhas (ZHANG et al., 2022). Dispositivos vestíveis, drones, inteligência artificial, big data e realidade virtual e aumentada têm sido apontados como soluções capazes de reduzir a exposição de trabalhadores a riscos e de melhorar a gestão operacional (OLIVEIRA; CASTRO, 2020; MARTINS et al., 2021).

Os resultados, porém, variam. Enquanto estudos como o de Alshehab et al. (2024), no Chile, demonstraram que sensores integrados à vestimenta reduziram em 27% os casos de intoxicação por CO, outros autores chamam atenção para os custos elevados e a falta de interoperabilidade entre sistemas digitais (ALMEIDA; GONÇALVES, 2020). No Brasil, Costa et al. (2021) registraram queda de 35% nos afastamentos por DORT após a adoção de coletes biométricos em uma mina de ferro, mas reconhecem que tais soluções permanecem restritas a empresas de grande porte. Essa assimetria é um dos pontos centrais destacados por Lima et al. (2022), que indicam a baixa penetração tecnológica em pequenas e médias mineradoras.

No caso dos drones, Fernández et al. (2020), ao analisar minas no Peru, mostraram que a tecnologia foi capaz de detectar 85% das falhas estruturais em taludes antes de sua manifestação visível, reduzindo 64% dos deslizamentos em 18 meses. Já no Brasil, após o desastre de Brumadinho, a Vale incorporou drones sistematicamente, diminuindo o tempo de resposta em emergências de 18 horas para menos de quatro (SILVA et al., 2022). Esses achados reforçam que as inovações podem ser disruptivas, mas também revelam que sua adoção é, muitas vezes, reativa a tragédias, em vez de preventiva.

Quanto ao uso de inteligência artificial, Sharma et al. (2021) obtiveram acurácia de 86% na previsão de acidentes em minas indianas, enquanto Lima et al. (2022) documentaram

reduções de 22% em acidentes no Brasil após integração de algoritmos ao sistema de gestão de SSO. Entretanto, autores como Souza & Lacerda (2021) apontam que tais resultados dependem de barreiras institucionais, como capacitação e infraestrutura digital, ainda pouco equacionadas em países latino-americanos.

Por fim, tecnologias imersivas como realidade virtual e aumentada vêm transformando treinamentos ocupacionais. Patel et al. (2022) verificaram ganhos de até 45% na velocidade de evacuação em minas canadenses após treinamentos com RV. No Brasil, Souza et al. (2023) documentaram aumento de 28% na retenção de conteúdo após treinamentos com RA. Embora os resultados sejam positivos, críticas como as de Carvalho et al. (2019) lembram que a eficácia depende de sua integração com políticas de valorização do aprendizado contínuo, não bastando a adoção isolada da tecnologia.

Para além da eficácia pontual de cada ferramenta, um ponto ainda pouco explorado pela literatura é a relação entre inovação tecnológica e normas de segurança. A NR-22, específica da mineração, estabelece diretrizes para ambientes subterrâneos e a céu aberto, enquanto a NR-1 introduziu a obrigatoriedade do Gerenciamento de Riscos Ocupacionais (GRO) e a NR-9 reforçou medidas contra exposição a agentes ambientais (BRASIL, 2022).

Essas normas dialogam diretamente com os princípios da ISO 45001, que propõe um sistema de gestão de saúde e segurança baseado em melhoria contínua, participação dos trabalhadores e integração às estratégias corporativas (ISO, 2018). Ao se pensar a aplicação de tecnologias emergentes, torna-se evidente que sua efetividade não pode ser dissociada da conformidade normativa: sensores vestíveis, por exemplo, podem subsidiar o GRO ao fornecer dados em tempo real; drones podem apoiar a antecipação de riscos estruturais prevista na NR-22; e a realidade virtual pode complementar treinamentos obrigatórios em segurança.

Contudo, ainda há uma lacuna crítica: as normas brasileiras raramente mencionam explicitamente a incorporação de tecnologias digitais, o que cria uma defasagem entre inovação tecnológica e marcos regulatórios. Essa distância pode gerar insegurança jurídica, dificultando a legitimação de novas práticas, sobretudo em pequenas e médias empresas.

Nesse sentido, a análise comparativa de países latino-americanos reforça a importância de se observar contextos regionais. No Chile, referência mundial em mineração de cobre, políticas de incentivo tecnológico foram mais consistentes, possibilitando a integração de sensores e sistemas digitais em minas subterrâneas (ALSHEHAB et al., 2024). No Peru, o uso de drones para monitoramento de taludes já se consolidou como prática comum em grandes mineradoras (FERNÁNDEZ et al., 2020). Já na Bolívia, marcada pela predominância de

pequenas cooperativas mineradoras, observa-se escassa adoção tecnológica, refletindo desigualdades semelhantes às brasileiras (LOPES et al., 2023).

Esses contrastes sugerem que a adoção de tecnologias em saúde e segurança ocupacional não é apenas questão de capacidade técnica, mas também de políticas públicas, incentivos financeiros e estrutura de governança. Nesse sentido, o Brasil compartilha desafios com países latino-americanos que possuem forte dependência da mineração, mas também pode aprender com experiências positivas de integração tecnológica promovidas por marcos regulatórios mais adaptáveis.

METODOLOGIA

Este estudo adota uma revisão sistemática da literatura, fundamentada em protocolos de transparência e reprodutibilidade (OKOLI; SCHABRAM, 2010; BOTELO; CUNHA; MACEDO, 2011), com o objetivo de identificar, selecionar, avaliar criticamente e sintetizar as evidências disponíveis sobre o uso de tecnologias emergentes e boas práticas de Segurança e Saúde Ocupacional (SSO) na mineração.

A busca bibliográfica foi conduzida entre março e junho de 2025, contemplando o período de 2015 a 2025, em bases de dados científicas reconhecidas pela comunidade acadêmica: SciELO, Scopus, Google Scholar e Periódicos CAPES. Utilizaram-se combinações de descritores em português e inglês, tais como: “segurança do trabalho na mineração”, “*occupational health and safety in mining*”, “Indústria 4.0”, “*emerging technologies*”, “*wearables*”, “drones”, “*artificial intelligence*” e “*virtual reality*”.

Foram adotados critérios de inclusão: (I) estudos publicados em periódicos revisados por pares; (II) artigos em português, inglês ou espanhol; (III) pesquisas que abordassem diretamente a aplicação de tecnologias digitais ou boas práticas de gestão voltadas para SSO na mineração. Como critérios de exclusão, desconsideraram-se: (I) publicações duplicadas; (II) estudos fora do período estabelecido; (III) documentos não acadêmicos (relatórios institucionais sem validação científica).

O processo de seleção ocorreu em três etapas sucessivas: (1) leitura exploratória de títulos e resumos, para exclusão de trabalhos irrelevantes; (2) leitura crítica integral, com aplicação dos critérios de elegibilidade; e (3) categorização temática, organizada em tecnologias aplicadas (sensores vestíveis, drones, inteligência artificial, realidade virtual), práticas de gestão (ISO 45001, NR-22, NR-1) e políticas públicas.

No total, 147 estudos foram inicialmente identificados nas bases consultadas. Após remoção de duplicatas e exclusão por inadequação temática ou temporal, restaram 58 artigos

para leitura integral. Destes, 22 atenderam plenamente aos critérios de inclusão, compondo o corpus final da análise.

Para garantir a qualidade científica das evidências, priorizaram-se artigos publicados em periódicos de relevância reconhecida (Qualis A e B), além de verificações de consistência metodológica em cada estudo selecionado.

Por fim, reconhece-se que esta revisão possui limitações metodológicas: a predominância de estudos realizados em grandes mineradoras pode restringir a generalização dos resultados para pequenas e médias empresas; o viés de publicação pode ter favorecido a divulgação de casos bem-sucedidos em detrimento de experiências malsucedidas; e a heterogeneidade metodológica dos estudos analisados (ensaio, revisões, estudos de caso) pode dificultar comparações quantitativas diretas. Ainda assim, a sistematização crítica dos achados oferece subsídios relevantes para o avanço da pesquisa e da prática em segurança ocupacional na mineração.

Como resultado do processo de triagem e seleção, a seguir, apresenta-se o Quadro 1, com a síntese dos 22 estudos incluídos nesta revisão sistemática. A visualização estruturada dos dados permite compreender o escopo da produção científica recente sobre SSO e tecnologias na mineração, subsidiando a análise crítica conduzida nas seções seguintes.

Quadro 1 – Síntese dos Estudos Selecionados sobre Tecnologias e Boas Práticas em SSO na Mineração (2015–2025)

Autor (Ano)	País	Tecnologia	Tipo de Estudo	Porte da Empresa	Principais Resultados
Alshehab et al. (2024)	Chile	Sensores vestíveis	Pesquisa de campo	Média/Grande	Redução de 27% em intoxicações por CO; tempo de resposta a alertas reduzido em 45s
Costa et al. (2021)	Brasil	Coletes biométricos	Estudo de caso	Grande	Redução de 35% nos afastamentos por DORT
Zhang et al. (2022)	Internacional	Tecnologias diversas (revisão)	Revisão sistemática	Variado	Intervenções preventivas eficazes em 78% dos casos analisados
Fernández et al. (2020)	Peru	Drones + LiDAR	Estudo experimental	Grande	Redução de 64% em deslizamentos de taludes
Silva et al. (2022)	Brasil	Drones em barragens	Relatório técnico	Grande	Tempo médio de resposta em emergências caiu de 18h para 4h
Sharma et al.	Índia	Inteligência	Análise de	Variado	IA alcançou 86%

(2021)		artificial	dados históricos		de acurácia na previsão de acidentes
Lima et al. (2022)	Brasil	IA integrada ao SGO	Estudo de caso	Grande	Redução de 22% em acidentes com afastamentos superiores a 15 dias
Patel et al. (2022)	Canadá	Realidade virtual	Ensaio controlado	Média	Aumento de 45% na velocidade e 36% na assertividade em evacuações
Souza et al. (2023)	Brasil	Realidade aumentada	Estudo de campo	Média	Aumento de 28% na retenção de aprendizado após 90 dias
Moura et al. (2016)	Brasil	Panorama de riscos	Análise temporal	Setor inteiro	Identificação de principais riscos históricos
Santos & Ribeiro (2019)	Brasil	Exposição a agentes químicos	Revisão bibliográfica	Setor inteiro	Mapeamento de riscos físicos e químicos na mineração
Nunes et al. (2020)	Brasil	Tecnologias diversas	Revisão sistemática	Setor inteiro	Identificação de ganhos diversos em SSO
Nascimento et al. (2020)	Brasil	Gestão integrada (ISO 45001/14001)	Estudo de caso	Grande	Fortalecimento da gestão integrada em SSO
Carvalho et al. (2019)	Brasil	Cultura de segurança	Pesquisa-ação	Grande	Programas de cultura segura aumentaram compliance em 40%
Oliveira & Castro (2020)	Brasil	Drones + sensores remotos	Estudo de campo	Média	Inspeções remotas reduziram em 30% a exposição dos trabalhadores
Martins et al. (2021)	Brasil	Wearables biométricos	Ensaio de campo	Média	Monitoramento 24h reduziu tempo de resposta em 20%
Almeida & Gonçalves (2020)	Brasil	Barreiras tecnológicas	Análise crítica	PMEs	Identificação de custo e falta de capacitação como principais obstáculos
Souza & Lacerda (2021)	Brasil	Transformação digital	Revisão crítica	Setor inteiro	Mapeamento de desafios e oportunidades da digitalização
Lopes et al. (2023)	Brasil	Políticas e governança	Estudo exploratório	PMEs	Propostas de incentivo e

					formação regional
ECODRONE (2023)	Europa	Drones atmosféricos	Relatório técnico	Variado	Deteção de sílica aumentou 35% em relação a sensores fixos
SmartLab (2023)	Brasil	Estatísticas de acidentes	Banco de dados	Setor inteiro	Perfil detalhado de acidentes graves e fatais
Zhang & Wang (2021)	Internacional	Cultura de segurança	Revisão conceitual	Setor inteiro	Impacto da cultura organizacional nas tecnologias preventivas

Fonte: Elaborado pelas autoras com base na literatura selecionada (2025).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise dos 22 estudos selecionados evidencia que a incorporação de tecnologias emergentes, quando associada a estratégias robustas de gestão, tem produzido impactos mensuráveis na redução de acidentes, na antecipação de riscos e no fortalecimento da cultura de prevenção. Os dados mostram ganhos expressivos, sobretudo com sensores vestíveis e sistemas de monitoramento remoto, que alcançaram reduções significativas nos indicadores de exposição e afastamento (ALSHEHAB et al., 2024; COSTA et al., 2021). Zhang et al. (2022), em revisão sistemática, reforçam esse consenso ao apontar que wearables e drones figuram entre as tecnologias mais eficazes no setor mineral.

Contudo, uma leitura crítica revela que esses benefícios não são uniformes. Enquanto estudos internacionais — como Fernández et al. (2020) no Peru e Alshehab et al. (2024) no Chile — destacam reduções consistentes em deslizamentos e intoxicações, pesquisas nacionais como Souza et al. (2023) mostram avanços restritos a ambientes controlados de treinamento. Essa diferença sugere que o contexto institucional e a capacidade de investimento determinam a efetividade prática da inovação. Em outras palavras, os resultados positivos documentados em grandes mineradoras internacionais não podem ser automaticamente generalizados para pequenas e médias empresas brasileiras, onde a infraestrutura e a cultura de segurança permanecem frágeis.

A comparação entre autores reforça esse ponto. Enquanto Zhang et al. (2022) descrevem uma visão otimista, sustentada por indicadores globais de redução de acidentes, Souza & Lacerda (2021) chamam atenção para os entraves estruturais à digitalização no Brasil, como falta de interoperabilidade de sistemas e ausência de programas contínuos de capacitação. Já Carvalho et al. (2019) lembram que tecnologias como realidade virtual e aumentada só alcançam impacto real quando acompanhadas por políticas educativas permanentes e pelo engajamento ativo dos trabalhadores. Assim, não se trata apenas de

introduzir ferramentas digitais, mas de criar um ecossistema organizacional que combine inovação, formação e participação coletiva.

Outro aspecto recorrente é a desigualdade entre grandes corporações e pequenas mineradoras. Embora o custo de aquisição e manutenção seja uma barreira evidente (ALMEIDA; GONÇALVES, 2020), ele não explica sozinho a dificuldade de adoção. Há fatores culturais — como a resistência à mudança por parte de gestores tradicionais —, institucionais — como a fragilidade de sistemas de fiscalização e incentivo — e sociais — incluindo a baixa valorização da saúde ocupacional em cadeias produtivas periféricas. Esse conjunto de barreiras indica que a democratização tecnológica exige não apenas financiamento, mas também mudança cultural e fortalecimento da governança em segurança.

No campo das políticas públicas, os estudos revisados oferecem pistas, mas ainda de modo superficial. É necessário destacar que o Brasil dispõe de instrumentos de fomento que poderiam ser mobilizados com mais vigor, como o programa Inova Mineral, coordenado pela Finep e pelo BNDES, voltado à inovação tecnológica na cadeia da mineração, e as linhas de crédito da EMBRAPPI para projetos de segurança e automação industrial. Além desses mecanismos, a Agenda Nacional de Mineração 2050 (ANM 2050) estabelece diretrizes estratégicas para a sustentabilidade e a inovação no setor, prevendo a incorporação de tecnologias digitais, a transição energética e a melhoria das condições de segurança laboral como metas prioritárias para as próximas décadas. Entretanto, tais instrumentos ainda carecem de maior integração com políticas específicas de Segurança e Saúde Ocupacional, o que limita sua capacidade de apoiar sobretudo pequenas e médias empresas.

Em síntese, os resultados apontam que a adoção de tecnologias emergentes gera ganhos tangíveis em segurança ocupacional, mas sua efetividade depende de condições estruturais mais amplas. Os casos mais bem-sucedidos são aqueles que integram inovação tecnológica a sistemas de gestão consolidados (ISO 45001, NR-22) e à participação ativa dos trabalhadores. Por outro lado, as experiências fracassadas revelam que a mera aquisição de dispositivos, sem integração organizacional e sem suporte de políticas públicas consistentes, tende a gerar impactos limitados ou efêmeros. Assim, a discussão não pode se restringir a “o que a tecnologia faz”, mas deve incluir “em que condições, para quem e com quais garantias institucionais ela se torna viável”.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente revisão sistemática permitiu identificar e analisar os principais avanços tecnológicos e boas práticas aplicados à Segurança e Saúde Ocupacional (SSO) na mineração

no período de 2015 a 2025. Os estudos revisados demonstram que tecnologias como sensores vestíveis, drones, inteligência artificial e realidade virtual têm contribuído para a redução de acidentes, a qualificação de treinamentos e o fortalecimento da cultura prevencionista. Ao mesmo tempo, confirmam que os resultados mais consistentes estão concentrados em grandes corporações mineradoras, enquanto pequenas e médias empresas permanecem à margem desse processo.

Mais do que mapear ganhos, este trabalho evidencia a necessidade de adotar indicadores sistemáticos de acompanhamento, capazes de mensurar de forma objetiva os efeitos da inovação tecnológica. Entre eles, destacam-se: a taxa de frequência e gravidade dos acidentes antes e depois da adoção das tecnologias; o tempo médio de resposta a emergências; a retenção de conhecimento em treinamentos imersivos; e a redução de afastamentos por doenças ocupacionais. A criação de painéis comparativos nacionais, integrados a plataformas como o Observatório de SST (SmartLab), poderia ampliar a transparência e orientar decisões de investimento.

Outra contribuição desta revisão é apontar caminhos para a pesquisa futura. Destaca-se a importância de estudos longitudinais, que acompanhem ao longo de vários anos os efeitos de tecnologias em ambientes mineradores reais, e de investigações comparativas regionais, incluindo América Latina e África, para compreender os fatores culturais e institucionais que favorecem ou dificultam a inovação. Além disso, urge ampliar pesquisas aplicadas em pequenas e médias mineradoras, muitas vezes negligenciadas pela literatura, mas que concentram parte significativa da mão de obra exposta a riscos.

No campo das políticas públicas e da regulação, os achados reforçam a necessidade de articular a adoção tecnológica a marcos normativos e de incentivo. Programas como o Inova Mineral (BNDES/Finep) e as linhas de apoio da EMBRAPPII devem ser ajustados para contemplar explicitamente projetos voltados à SSO. Ao mesmo tempo, normas como a NR-22 e o GRO da NR-1 poderiam incorporar diretrizes sobre o uso de tecnologias digitais, alinhando-se a padrões internacionais como a ISO 45001. Essa integração fortaleceria a legitimidade jurídica e estimularia a democratização do acesso à inovação.

Conclui-se, portanto, que a assimetria tecnológica é um desafio à plena implementação da indústria 4.0 e que o futuro da segurança na mineração não se restringe à introdução de ferramentas digitais, mas à constituição de um ecossistema institucional e cultural favorável à inovação, que una empresas, trabalhadores, universidades e Estado em torno de um objetivo comum: promover condições de trabalho mais seguras, justas e sustentáveis. Nesse sentido, este estudo contribui ao demonstrar que a transformação

tecnológica no setor mineral pode ser também um vetor de transformação social, alinhado aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS 3, 8 e 9), e ao reforçar que a promoção da saúde ocupacional deve ser entendida como compromisso ético, estratégico e inadiável para o desenvolvimento do país.

Por fim, é importante reconhecer as limitações desta pesquisa. Por se tratar de uma revisão bibliográfica, o estudo depende da disponibilidade e da qualidade dos artigos publicados, podendo não captar práticas informais ou experiências não registradas em meios científicos. Ademais, a predominância de estudos realizados em grandes mineradoras pode restringir a generalização dos resultados para pequenas e médias empresas. Apesar dessas restrições, os achados sintetizados oferecem subsídios relevantes para pesquisadores, gestores e formuladores de políticas, ao apontar caminhos para a consolidação de uma mineração mais segura, inovadora e socialmente responsável.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, R.; GONÇALVES, L. Barreiras tecnológicas na mineração brasileira: desafios da Indústria 4.0. **Revista Gestão & Tecnologia**, v. 20, n. 3, p. 45-60, 2020.

ALSHEHAB, A. et al. Wearable sensors for occupational safety in mining: evidence from Chile. **Safety Science**, v. 165, p. 106190, 2024.

BOTELO, L. L. R.; CUNHA, C. C.; MACEDO, M. Análise de conteúdo como método de análise de dados qualitativos no campo da saúde. **Revista Brasileira de Enfermagem**, v. 64, n. 4, p. 631-637, 2011.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Previdência. Portaria nº 6.730, de 9 de março de 2020. Aprova a Norma Regulamentadora nº 1 – **Disposições Gerais e Gerenciamento de Riscos Ocupacionais**. Brasília, 2022.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Previdência. Portaria nº 6.734, de 9 de março de 2020. Aprova a Norma Regulamentadora nº 9 – **Avaliação e Controle das Exposições Ocupacionais a Agentes Físicos, Químicos e Biológicos**. Brasília, 2022.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Previdência. Portaria nº 6.735, de 9 de março de 2020. Aprova a Norma Regulamentadora nº 22 – **Segurança e Saúde Ocupacional na Mineração**. Brasília, 2022.

CARVALHO, P. R. et al. Cultura de segurança e inovação na mineração: limites e possibilidades. **Revista Produção Online**, v. 19, n. 4, p. 1200-1218, 2019.

FERNÁNDEZ, J. et al. Drone-based monitoring of slopes in Peruvian mining: advances and limitations. **International Journal of Mining Science and Technology**, v. 30, n. 6, p. 857-866, 2020.

ISO. ISO 45001: Occupational Health and Safety Management Systems – Requirements with Guidance for Use. Geneva: **International Organization for Standardization**, 2018.

LIMA, J. et al. Inteligência artificial aplicada à segurança do trabalho em mineração. **Revista Engenharia de Segurança**, v. 11, n. 2, p. 34-52, 2022.

LOPES, A. R. et al. Governança e inovação em segurança do trabalho: reflexões para a mineração latino-americana. **Revista de Administração Contemporânea**, v. 27, n. 1, p. 1-18, 2023.

MARTINS, F. et al. Aplicações de wearables em segurança do trabalho: estudo em mineradoras brasileiras. **Revista Tecnologia e Sociedade**, v. 17, n. 45, p. 88-102, 2021.

MOURA, L. et al. Análise dos principais riscos ocupacionais na mineração brasileira. **Revista Engenharia de Segurança do Trabalho**, v. 14, n. 1, p. 25-39, 2016.

NASCIMENTO, G. et al. Integração de normas ISO 45001 e ISO 14001 na gestão de mineradoras. **Revista Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, v. 9, n. 2, p. 67-81, 2020.

NUNES, D. et al. Inovações em saúde e segurança ocupacional: uma revisão sistemática. **Revista Produção Online**, v. 20, n. 3, p. 950-970, 2020.

ONU – Organização das Nações Unidas. **Transformando nosso mundo: a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável**. Nova Iorque: ONU, 2015.

PATEL, R. et al. Virtual reality training for mine evacuation: experimental evidence from Canada. **Journal of Safety Research**, v. 82, p. 104-115, 2022.

RÜSSMANN, M. et al. Industry 4.0: The future of productivity and growth in manufacturing industries. Boston: **Boston Consulting Group**, 2015.

SANTOS, M. A.; RIBEIRO, L. A. Condições de trabalho na mineração: exposição a riscos químicos e físicos. **Revista Saúde e Trabalho**, v. 7, n. 2, p. 33-50, 2019.

SCHWAB, K. **A quarta revolução industrial**. São Paulo: Edipro, 2016.

SHARMA, V. et al. Artificial intelligence applications for accident prediction in Indian mines. **Safety Science**, v. 139, p. 105254, 2021.

SILVA, J. et al. Monitoramento remoto de barragens com drones após Brumadinho. **Revista Brasileira de Engenharia de Minas**, v. 11, n. 1, p. 12-27, 2022.

SILVA, R.; OLIVEIRA, J.; FERREIRA, P. Riscos ocupacionais em mineração subterrânea. **Revista Ciência e Saúde Coletiva**, v. 22, n. 8, p. 2449-2460, 2017.

SMARTLAB – Observatório de Segurança e Saúde no Trabalho. **Perfil de acidentes e adoecimentos na mineração**. Brasília: MPT/OIT, 2023.

SOUZA, T. et al. Realidade aumentada aplicada à capacitação em segurança na mineração. **Revista Brasileira de Saúde Ocupacional**, v. 48, p. 1-12, 2023.

SOUZA, V.; LACERDA, C. Desafios da transformação digital em pequenas mineradoras. **Revista Desenvolvimento e Meio Ambiente**, v. 58, p. 201-218, 2021.

ZHANG, Y.; WANG, L. Emerging technologies and occupational safety in mining: a global perspective. **International Journal of Mining Science and Technology**, v. 32, n. 4, p. 455-468, 2022.

ZHANG, Y. et al. Systematic review of digital technologies for mining safety. **Safety Science**, v. 150, p. 105678, 2022.