

ROTAS TECNOLÓGICAS

NOVAS TECNOLOGIAS PARA
O PROCESSAMENTO DE RESÍDUOS
DA MINERAÇÃO



ROTAS TECNOLÓGICAS

NOVAS TECNOLOGIAS
PARA PRODUÇÃO DE H2 VERDE

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA – CNI

Antonio Ricardo Alvarez Alban

Presidente

Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial - SENAI

Antonio Ricardo Alvarez Alban

Presidente do Conselho Nacional

SENAI – Departamento Nacional

Gustavo Leal Sales Filho

Diretor-Geral

ROTAS TECNOLÓGICAS

NOVAS TECNOLOGIAS PARA
O PROCESSAMENTO DE RESÍDUOS
DA MINERAÇÃO



SENAI Serviço Nacional
de Aprendizagem
Industrial

© 2024. SENAI – Departamento Nacional

Qualquer parte desta obra poderá ser reproduzida, desde que citada a fonte.

CNI

Observatório Nacional da Indústria

FICHA CATALOGRÁFICA

S491n

Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial. Departamento Nacional.

Novas tecnologias para o processamento de resíduos da mineração: desenvolvimento de novas rotas tecnológicas / Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial. Brasília : SENAI/DN, 2024.
114 p. : il.

ISBN 978-85-505-0551-0

1. Rotas Tecnológicas 2. Processamento de Resíduos 3. Mineração I. Título

CDU: 622.06

SENAI

Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial

Departamento Nacional

Sede

Setor Bancário Norte

Quadra 1 – Bloco C

Edifício Roberto Simonsen

70040-903 – Brasília – DF

<http://www.portaldaindustria.com.br/senai/>

Serviço de Atendimento ao Cliente - SAC

Tels.: (61) 3317-9989 / 3317-9992

sac@cni.com.br

Projeto ou serviço	Novas Tecnologias para o Processamento de Resíduos da Mineração
Identificação nº	SGT ID 520617 / Nº 230005 – Produto Nacional - DESENVOLVIMENTO DE NOVAS ROTAS TECNOLÓGICAS
Divulgação	Restrita – Cópia controlada
Escopo resumido	Construção de 1 (uma) rota tecnológica: “Novas Tecnologias para o Processamento de Resíduos da Mineração”, com foco em processos de mitigação ou melhoria das características dos resíduos minerais, permitindo sua maior aplicação em novos produtos (economia circular), de forma segura às pessoas e ao meio ambiente.
Empresa	SERVIÇO NACIONAL DE APRENDIZAGEM INDUSTRIAL – DEPARTAMENTO NACIONAL,
CNPJ	33.564.543/0001-90
Classificação	307-7 – Serviço Social Autônomo
Setor	Educação
Site da empresa	https://www.portaldaindustria.com.br/senai/
Endereço	Setor Bancário Norte, S/N. Quadra 01, Bloco C, Edifício Roberto Simonsen, Andar 1 ao 5
Responsável na empresa	Fernanda Fernandes Ministério
Função	Especialista de Desenvolvimento Industrial II
Contato	fernanda.fernandes@senaicni.com.br
Data de início	18/12/23
Data de término	18/07/24
Unidade operacional	Instituto SENAI de Inovação em Tecnologias Minerais (ISI-TM)
Fomento	SENAI-DN / Unidade Operacional: 05100302 / Centro de Responsabilidade: 23.3.07.01.01.35
Gestor do Projeto	Adriano Reis Lucheta
Equipe técnica	Patricia Magalhães Pereira Silva Thais Correa Haber Paula de Freitas Marques Tarcísio Carlos Farias Pinheiro

FIGURAS

Figura 1 - Organização do estudo.....	18
Figura 2 - Representação esquemática de <i>roadmap</i>	26
Figura 3 - Barragem de rejeitos de minério de ferro de empresa Anglo American	32
Figura 4 - Pilha de disposição de estéril.....	34
Figura 5 - Diagrama de taxonomias meso	44
Figura 6 - Análise macro – série histórica.....	45
Figura 7 - Análise macro – origem da inovação.....	46
Figura 8 - Análise macro – instituição de origem.....	47
Figura 9 - Análise macro – área de conhecimento	48
Figura 10 - Distribuição temporal dos artigos pertinentes ao escopo.....	49
Figura 11 - Distribuição dos artigos por país de origem do autor	50
Figura 12 - Distribuição dos artigos por afiliação institucional	51
Figura 13 - Diagrama de taxonomias meso	66
Figura 14 - Número de patentes depositadas entre 2006 e 2023	67
Figura 15 - Distribuição do número das patentes por país de origem.....	68
Figura 16 - Distribuição do número de patentes por tipo de instituição	69
Figura 17 - Principais taxonomias identificadas nas patentes.....	70
Figura 18 - Estágio atual do roadmap tecnológico.....	77
Figura 19 - Recorte do curto prazo do roadmap tecnológico.....	80
Figura 20 - Médio prazo do roadmap tecnológico.....	83
Figura 21 - Longo prazo do roadmap tecnológico.....	86
Figura 22 - Clusters de parcerias do estágio atual.....	92
Figura 23 - Clusters de mesmo foco (1) do estágio atual.....	95
Figura 24 - Clusters de mesmo foco (2) do estágio atual	96

Figura 25 - <i>Clusters</i> de mesmo foco (3) do estágio atual	98
Figura 26 - Parcerias do curto prazo.....	101
Figura 27 - Cluster de mesmo foco (1) do curto prazo	104
Figura 28 - Cluster de mesmo foco (2) do curto prazo	105
Figura 29 - Cluster de mesmo foco (3) do curto prazo	106
Figura 30 - Cluster de mesmo foco (1) do médio prazo	108
Figura 31 - Cluster de mesmo foco (2) do médio prazo.....	109
Figura 32 - Cluster de mesmo foco (3) do médio prazo	110
Figura 33 - Parcerias do longo prazo	113

TABELAS

Tabela 1 - Tipos de resíduos de mineração.....	36
Tabela 2 - Combinações de palavras-chaves testadas e número de artigos encontrados	40
Tabela 3 - Distribuição dos artigos por assunto (taxonomia meso).....	53
Tabela 4 - Distribuição dos artigos da taxonomia material.....	55
Tabela 5 - Distribuição dos artigos da taxonomia processo.....	56
Tabela 6 - Distribuição dos artigos da taxonomia aplicação.....	57
Tabela 7 - Tipos de materiais (resíduos de mineração) identificados na taxonomia material.....	71
Tabela 8 - Principais processos identificados nas patentes.....	72
Tabela 9 - Tipos de aplicação identificadas na taxonomia	72

SUMÁRIO

1 OBJETIVO DO TRABALHO E ESTRUTURA DO RELATÓRIO	17
1.1 Etapa Pré-Prospectiva	18
1.2 Etapa Prospectiva	18
1.3 Etapa Pós-Prospectiva.....	19
1.3.1 Análise estratégica.....	19
1.4 Sobre o Instituto SENAI de Inovação em Tecnologias Minerais	20
CAPÍTULO 1 – CONCEITOS SOBRE PROSPECTIVA TECNOLÓGICA.....	23
1.1 Artigos científicos e documentos de patentes como fonte de informação científica e tecnológica.....	24
1.2 Technology roadmap	25
CAPÍTULO 2 – ETAPA PRÉ-PROSPECTIVA.....	29
2.1 Introdução	29
2.2 Resíduos de mineração	30
2.2.1 Tipos de resíduos de mineração.....	31
CAPÍTULO 3 – DEFINIÇÃO DA ESTRATÉGIA DE BUSCA DE ARTIGOS CIENTÍFICOS.....	39
3.1 Metodologia para seleção das estratégias de busca em artigos	39
CAPÍTULO 4 – ETAPA PROSPECTIVA – ARTIGOS CIENTÍFICOS	43
4.1 Resultados da análise dos artigos científicos	45
4.1.1 Análise macro	45
4.1.2 Análise meso e micro.....	53
4.2 Conclusões sobre a Etapa Prospectiva em artigos científicos	58
CAPÍTULO 5 – DEFINIÇÃO DA ESTRATÉGIA DE BUSCA EM PATENTES CONCEDIDAS	61
5.1 Metodologia para a seleção das estratégias de busca de patentes	61
5.1.1 Seleção das estratégias	61
5.2 Conclusão das estratégias	62
CAPÍTULO 6 – ETAPA PROSPECTIVA – PATENTES CONCEDIDAS.....	65
6.1 Resultados das patentes requeridas e/ou vigentes.....	66
6.1.1 Análise macro	66
6.1.2 Análise Meso e micro	69
6.2 Conclusões sobre a Etapa Prospectiva de patentes em processo de registro ou em vigência.....	73

CAPÍTULO 7 – APRESENTAÇÃO DO ROADMAP TECNOLÓGICO	75
7.1 Estágio atual	76
7.2 Curto prazo	79
7.3 Médio prazo	82
7.4 Longo prazo	85
CAPÍTULO 8 – ANÁLISE ESTRATÉGICA PÓS-ROADMAP TECNOLÓGICO	91
8.1 Análise vertical	91
8.1.1 Estágio atual	91
8.1.2 Curto prazo	99
8.1.3 Médio prazo	107
8.1.4 Longo prazo	111
8.2 Análise horizontal	114
8.2.1 Material	114
8.2.2 Processo	115
8.2.3 Aplicação	115
8.3 Análise dos players envolvidos no reúso de resíduos da mineração	116
8.3.3. Instituições de pesquisa	120
CAPÍTULO 9 – CONCLUSÃO	123
REFERÊNCIAS	126



1 OBJETIVO DO TRABALHO E ESTRUTURA DO RELATÓRIO

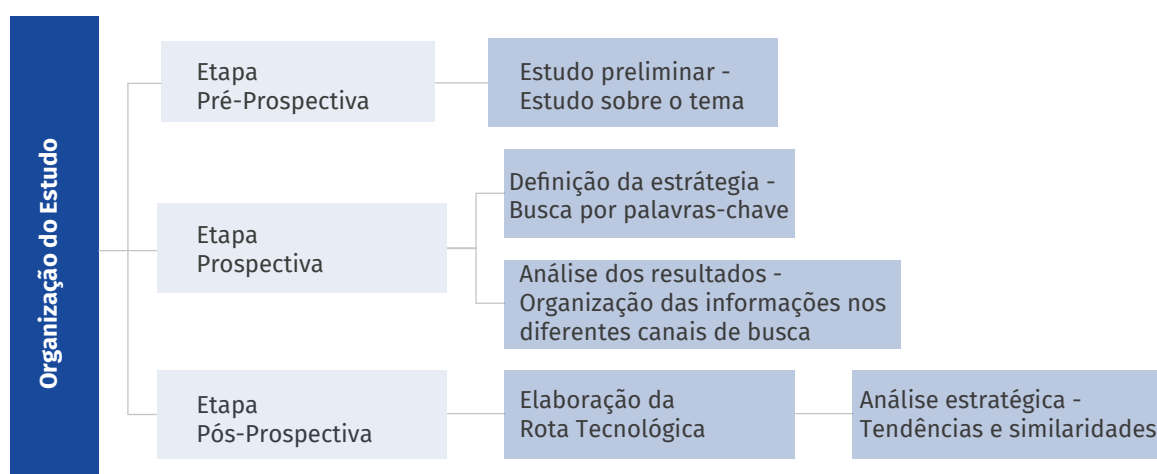
Este trabalho teve como principal objetivo a elaboração de uma nova rota tecnológica, consistindo em levantamentos bibliográficos, de patentes e tecnologias emergentes para o processamento de resíduos da mineração, com foco em processos de mitigação ou melhoria das características dos resíduos minerais (ex. uso para melhoria do solo, novos materiais, construção civil, recuperação de metais, entre outros), permitindo sua maior aplicação em novos produtos dentro dos conceitos da economia circular, de forma segura às pessoas e ao meio ambiente. O tema está contextualizado dentro dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), mais especificamente relacionados aos ODS 9 (Indústria, Inovação e Infraestrutura); ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis); ODS 13 (Ação Contra Mudança Global do Clima); ODS 14 (Vida na Água) e ODS 15 (Vida na Terra), refletindo a crescente necessidade de abordagens inovadoras e responsáveis na gestão e valorização dos resíduos gerados por atividades mineradoras e de transformação (Freitas et al., 2016). Além disso, o projeto também teve como objetivo gerar informações prospectivas estratégicas para apoio aos processos de planejamento tecnológico e de priorização de linhas de pesquisa para as organizações associadas à inovação do Serviço Social da Indústria (SESI) e do Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial (SENAI).

Uma rota tecnológica ou *roadmap* tecnológico apresenta os resultados com base em análise temporal, correlacionando os fatores críticos na relação mercado, produto e tecnologia (De Paulo; Lima, 2022). Este estudo propõe-se a criar um panorama detalhado dos avanços tecnológicos e das práticas emergentes que possibilitam compreender a visão a respeito dos tratamentos e das possibilidades de reúso de resíduos da mineração, de maneira mais eficaz e sustentável (Torquato, 2022). Para a elaboração do projeto, foi aplicada a metodologia desenvolvida pelo Núcleo de Estudos Industriais e Tecnológicos (Neitec), da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). A metodologia foi baseada em uma revisão abrangente de diversas fontes de informação, incluindo documentos técnicos, artigos científicos, patentes, teses e websites de empresas líderes no ramo da mineração. Este levantamento documental abrangeu perspectivas de curto, médio e longo prazo, além de considerar as condições atuais do setor.

A elaboração da rota tecnológica está organizada em quatro grandes etapas específicas, cada uma delas fundamental para a construção de uma visão integrada e estratégica para o futuro da reutilização dos resíduos na mineração. A estrutura do estudo, ilustrada na Figura 1, segue um modelo sistemático e progressivo, garantindo que cada fase contribua para o desenvolvimento de um plano coeso e orientado para ação seguinte e previamente delimitada.

As etapas incluem a análise da situação atual, a identificação de tecnologias emergentes, a formulação de estratégias de implementação e a avaliação de impactos potenciais, tanto tecnológicos quanto mercadológicos. Este processo visa não apenas mapear o futuro tecnológico do setor, mas também propor caminhos práticos para alcançar a sustentabilidade ambiental, econômica e social na mineração.

Figura 1 - Organização do estudo



Fonte: adaptado de Borschiver et al. (2023).

As quatro etapas do estudo foram estruturadas conforme descrição a seguir:

1.1 ETAPA PRÉ-PROSPECTIVA

Esta etapa envolveu um estudo preliminar sobre o tratamento e reúso dos resíduos de mineração. A partir da revisão de literatura, foram definidos os principais conceitos e a estratégia de busca por palavras-chave mais relevantes para coletar os dados secundários.

1.2 ETAPA PROSPECTIVA

Nesta fase, foram analisados os resultados obtidos nas buscas de documentos e patentes. A informação foi organizada e ponderada para identificar as principais tecnologias e práticas emergentes na reutilização dos resíduos da mineração. Esta análise fundamentou a proposta de direções futuras para o setor.

1.3 ETAPA PÓS-PROSPECTIVA

A etapa final incluiu a elaboração da rota tecnológica propriamente dita, baseando-se nas informações coletadas e nas análises realizadas para propor um plano estratégico que alinha as tendências tecnológicas, as necessidades de mercado e as potenciais inovações para a mineração.

1.3.1 Análise estratégica

Paralelamente, realizou-se uma análise estratégica que considerou tendências e similaridades com outras indústrias e tecnologias, auxiliando na identificação de oportunidades e desafios para o setor de mineração.

Diante desse cenário, este relatório foi organizado em nove capítulos, detalhados a seguir, contribuindo com aspectos específicos para a compreensão e o desenvolvimento da “Rota Tecnológica para o Processamento de Resíduos da Mineração”:

- Capítulo 1 – conceitos sobre prospecção tecnológica: introduz as bases teóricas da prospecção tecnológica e da ferramenta de rotas tecnológicas.
- Capítulo 2 – Etapa Pré-Prospectiva: discute o estudo preliminar sobre o tratamento e reúso de resíduos de mineração, estabelecendo o contexto para a rota tecnológica.
- Capítulo 3 – definição da estratégia de busca em artigos científicos: descreve as metodologias empregadas para identificar e selecionar os artigos científicos relevantes.
- Capítulo 4 – Etapa Prospectiva – artigos científicos: analisa as informações coletadas dos artigos científicos, identificando tecnologias emergentes e práticas inovadoras.
- Capítulo 5 – definição da estratégia de busca em patentes: explica as estratégias utilizadas para a pesquisa das patentes mais relevantes para tratamento e reúso dos resíduos de mineração.
- Capítulo 6 – Etapa prospectiva – patentes: avalia as inovações e tendências tecnológicas encontradas nas patentes requeridas ou vigentes, ou em patentes arquivadas.
- Capítulo 7 – apresentação do roadmap tecnológico: mostra a rota tecnológica compilada, destacando os caminhos e as soluções para os resíduos de mineração.
- Capítulo 8 – análise estratégica pós-roadmap tecnológico: realiza uma análise estratégica das informações integradas no roadmap, considerando impactos futuros e direções estratégicas.
- Capítulo 9 – conclusão: sumariza os principais achados do estudo, enfatizando as recomendações e perspectivas para o futuro da gestão de resíduos de mineração.

Ao final do relatório, estão listadas as referências bibliográficas que fundamentam os argumentos e análises apresentadas, garantindo a credibilidade e a fundamentação dos dados utilizados.

1.4 SOBRE O INSTITUTO SENAI DE INOVAÇÃO EM TECNOLOGIAS MINERAIS

O **Instituto SENAI de Inovação em Tecnologias Minerais (ISI-TM)** está localizado em Belém-PA e atua na elaboração e execução de projetos de pesquisa, desenvolvimento e inovação (PD&I) para empresas do setor mineral nacional e internacional. Além disso, o ISI-TM é credenciado como unidade da Empresa Brasileira de Pesquisa e Inovação Industrial (Embrapii) em economia circular na mineração para a execução e o financiamento de projetos voltados para a reutilização de rejeitos e resíduos da mineração em novos produtos para agricultura, construção civil, siderurgia e outras áreas industriais.

Para mais informações, visite o site: <https://www.senaipa.org.br/unidade/isi-tm>.



CAPÍTULO 1 – CONCEITOS SOBRE PROSPECTIVA TECNOLÓGICA

Os estudos de prospecção tecnológica desempenham papel crucial na compreensão das tendências globais e temporais de inovação por setor econômico. Esses estudos não apenas mapeiam tecnologias promissoras, mas também destacam potenciais parcerias estratégicas, facilitando a colaboração intersetorial e impulsionando o avanço tecnológico (Bettencourt et al., 2013). Por meio dessa abordagem, é possível identificar os principais agentes e setores-chave para o desenvolvimento de mercados, alocação de recursos financeiros e formulação de políticas públicas (Baloh et al., 2008).

No contexto das novas tecnologias para o processamento de resíduos da mineração, a prospecção tecnológica é essencial para antecipar e responder às dinâmicas emergentes do setor. Este processo ajuda a definir, claramente, o foco das iniciativas de P&DI, orientando os esforços em direção às soluções mais eficazes e sustentáveis (Jiang et al., 2023).

A rota tecnológica, por sua vez, é uma ferramenta estratégica que sintetiza os insights obtidos pela prospecção tecnológica em um plano de ação claro e orientado. Ela ilustra não apenas a trajetória tecnológica esperada, mas também organiza a sequência de desenvolvimentos necessários para alcançar os objetivos específicos de inovação (Daim et al., 2014). No *roadmap*, a identificação e a priorização dos principais atores envolvidos e dos setores estratégicos são fundamentais para dirigir investimentos e iniciativas políticas de maneira eficiente (Barker; Smith, 1995).

Adicionalmente, a rota tecnológica permite visualizar as interconexões entre diferentes tecnologias e suas aplicações potenciais, facilitando, assim, a integração de novas soluções em práticas existentes (Lavigne; Mouza, 2012). No setor de mineração, isso significa adaptar as tecnologias emergentes para melhorar o tratamento e reúso dos resíduos, minimizando impactos ambientais e maximizando a recuperação de recursos (Favas et al., 2016).

Este capítulo discutirá, em profundidade, a metodologia de construção de uma rota tecnológica, enfatizando sua aplicação prática na indústria de mineração. Serão explorados exemplos relevantes de como esses *roadmaps* têm sido utilizados para transformar o setor mineral.

1.1 ARTIGOS CIENTÍFICOS E DOCUMENTOS DE PATENTES COMO FONTE DE INFORMAÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA

Os artigos científicos e os documentos de patentes são fundamentais ao processo de prospecção tecnológica, fornecendo dados cruciais que alimentam a criação da rota. Essas fontes são vitais para a compreensão da fronteira do conhecimento e das inovações em qualquer campo técnico, incluindo o tratamento e o reúso dos resíduos de mineração (Daim *et al.*, 2014).

- **Artigos científicos:** publicações científicas em periódicos nacionais e internacionais (preferencialmente revisados por pares) são as principais formas utilizadas pela academia e instituições de ciência e tecnologia para a divulgação dos resultados de novas pesquisas e descobertas, possuindo alta credibilidade. Ao oferecer um exame rigoroso das mais recentes inovações e resultados experimentais, os artigos científicos ajudam a definir o estado da arte em tecnologias e métodos. No contexto do tratamento e reúso dos resíduos de mineração, eles podem expor avanços significativos em técnicas de tratamento, reúso com métodos eficientes aderidos a práticas sustentáveis, influenciando diretamente as direções estratégicas da rota tecnológica em desenvolvimento.
- **Patentes:** já as patentes oferecem um vislumbre das aplicações tecnológicas que estão protegidas por direitos exclusivos e potencialmente mais próximas do mercado. Elas detalham invenções ou modelos de utilidade, proporcionando *insights* sobre o que é considerado valioso e inovador no setor. Para os desenvolvedores de *roadmaps*, os documentos de patente podem ser indicadores das tendências tecnológicas emergentes, revelando a direção dos investimentos e desenvolvimentos futuros, inclusive na indústria da mineração.

Ambas as fontes são complementares na construção de uma rota tecnológica, em que os artigos científicos proporcionam a base teórica e a validação de novas ideias e conceitos; e as patentes destacam a aplicação prática das invenções, servindo como bússola para onde a indústria está se orientando em termos das fronteiras do conhecimento e adoção de tecnologias emergentes.

A integração das informações extraídas de artigos científicos e patentes permite que os desenvolvedores do *roadmap* visualizem não apenas onde a tecnologia está atualmente, mas também para onde ela pode evoluir. Essa visão abrangente é crucial para recomendar caminhos estratégicos e sustentáveis que alinhem as capacidades tecnológicas com as necessidades de mercado e socioambientais, especialmente em um campo tão impactante quanto o tratamento e o reúso dos resíduos da mineração.

1.2 TECHNOLOGY ROADMAP

O *technology roadmap* (TRM) é uma ferramenta estratégica destacada por sua versatilidade e abrangência, essencial no contexto da prospecção tecnológica. Essa ferramenta não apenas analisa o ambiente atual, mas também permite o monitoramento de tendências de mercado e concorrentes, traça trajetórias tecnológicas e identifica oportunidades de negócios significativas, sendo vital para o desenvolvimento de estratégias integradas no tratamento e no reúso dos resíduos de mineração (Lavigne; Mouza, 2012).

O TRM é uma ferramenta consolidada de planejamento e gerenciamento que alinha objetivos organizacionais com recursos tecnológicos. Adotada inicialmente por indústrias de manufatura e serviços, essa metodologia é particularmente valiosa para a mineração, em que a coordenação entre inovação tecnológica e práticas sustentáveis é crucial (Daim *et al.*, 2014).

Empresas pioneiras, como IBM e Siemens, foram algumas das primeiras a empregar *roadmaps* tecnológicos, de forma sistemática, nos anos 1980, utilizando-os para direcionar inovações em eletrônica e engenharia (Bettencourt *et al.*, 2013). Na mineração, o uso de *roadmaps* tecnológicos é essencial para planejar o desenvolvimento e a implementação de tecnologias que visam à minimização do impacto ambiental e ao aprimoramento dos processos de recuperação, reutilização e reúso de resíduos (Favas *et al.*, 2016).

Os *roadmaps* tecnológicos funcionam como bússolas estratégicas para as empresas de mineração e políticas públicas, integrando estratégias de negócio e tecnologia para orientar as iniciativas de pesquisa e desenvolvimento.

O Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO), da Austrália, utiliza amplamente a ferramenta de *roadmaps* para avaliar as tendências a longo prazo e a forma como poderão ter impacto nas indústrias e nas nações no futuro. São alguns exemplos de *roadmaps* nas áreas de energia e mineração publicados pelo CSIRO:

- *Renewable Energy Storage Roadmap*: destaca as formas de armazenamento de energia renovável.¹
- *Critical Energy Minerals Roadmap*: apresenta as oportunidades de geração de valor dos bens minerais e setor de manufatura australianos a partir da crescente demanda global por minerais críticos para a transição energética.²
- *CO₂ Utilization Roadmap*: desenvolvido em parceria com o governo australiano e o setor industrial para avaliar riscos e oportunidades associadas a estratégias de captura de carbono em grande escala na Austrália.³

¹ Para mais detalhes, consultar o site: <https://www.csiro.au/en/work-with-us/services/consultancy-strategic-advice-services/CSIRO-futures/Energy-and-Resources/Renewable-Energy-Storage-Roadmap>.

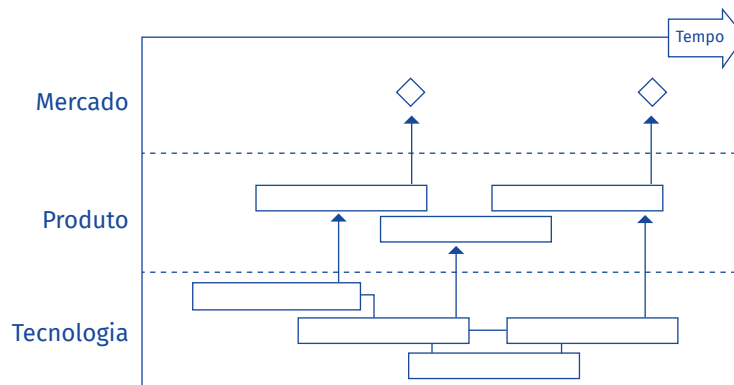
² Para mais detalhes, consultar o site: <https://www.csiro.au/en/work-with-us/services/consultancy-strategic-advice-services/CSIRO-futures/Energy-and-Resources/Critical-energy-minerals-roadmap>.

³ Para mais detalhes, consultar o site: <https://www.csiro.au/en/work-with-us/services/consultancy-strategic-advice-services/CSIRO-futures/Energy-and-Resources/CO2-Utilisation-Roadmap>.

- *National Hydrogen Roadmap*: focado na expansão da produção de hidrogênio em escala industrial e coordenação do investimento entre os principais grupos de partes interessadas.⁴
- *Mining Equipment, Technology and Services Roadmap*: apresenta os riscos e as oportunidades futuras para os setores de equipamentos, tecnologias e serviços, voltados ao setor mineral.⁵

Os *roadmaps* preenchem lacunas tecnológicas e demonstram o caminho para as futuras demandas ambientais, enquanto evidenciam as necessidades de inovação por meio de uma representação gráfica simplificada (Figura 2). Um roadmap inclui múltiplas camadas, como perspectivas comerciais e tecnológicas (Mesquita et al., 2016). Essas ferramentas são essenciais para apoiar as empresas na exploração de rotas evolutivas de P&DI e no monitoramento de iniciativas estratégicas, impulsionando avanços no tratamento e reúso dos resíduos, reduzindo a degradação ambiental e promovendo uma extração de recursos ambientalmente mais responsável (Baloh et al., 2008).

Figura 2 - Representação esquemática de *roadmap*



Fonte: adaptado do Phaal et al. (2003).

A eficácia do *roadmap* tecnológico depende da capacidade de prever e adaptar-se às mudanças do mercado e inovações tecnológicas, assegurando que as operações de mineração sejam sustentáveis, tanto do ponto de vista econômico, quanto ambiental. Esse instrumento é, portanto, fundamental para empresas que aspiram não apenas à liderança tecnológica, mas também ao compromisso com a excelência socioambiental (Hines; Popper, 2009) na área da mineração.

⁴ Para mais detalhes, consultar o site: <https://www.csiro.au/en/work-with-us/services/consultancy-strategic-advice-services/CSIRO-futures/Energy-and-Resources/National-Hydrogen-Roadmap>.

⁵ Para mais detalhes, consultar o site: <https://www.csiro.au/en/work-with-us/services/consultancy-strategic-advice-services/CSIRO-futures/Energy-and-Resources/METS-Roadmap>.



CAPÍTULO 2 – ETAPA PRÉ-PROSPECTIVA

Esta etapa envolve uma análise aprofundada do estado atual da tecnologia e do mercado do tratamento e reúso dos resíduos da mineração, permitindo uma compreensão clara das tendências existentes e das necessidades futuras. Neste capítulo, serão demonstradas as revisões literárias e os estudos de mercado que ajudaram a definir os parâmetros essenciais para a busca e coleta de dados. Esse processo garante que as bases da rota tecnológica sejam solidamente construídas, preparando o terreno para as análises mais detalhadas nas etapas subsequentes da construção do documento.

2.1 INTRODUÇÃO

Atualmente, os resíduos de mineração representam um enorme desafio ambiental e econômico, considerando que o tratamento e o reúso inadequado desses materiais podem proporcionar a contaminação do solo, da água e do ar, bem como riscos à sociedade. Diante do contexto global de sustentabilidade e da crescente preocupação com o impacto ambiental das atividades industriais, há um movimento crescente para a adoção de práticas mais responsáveis e tecnologias avançadas no tratamento e reúso dos resíduos minerais. Em 2015, a Conferência sobre Mudanças Climáticas, realizada em Paris (COP21), estabeleceu objetivos ambiciosos para a redução de impactos ambientais, incluindo o manejo sustentável de resíduos industriais, visando limitar o aumento da temperatura global a menos de 2°C em relação aos níveis pré-industriais (UNFCCC, 2015).

Em resposta a essas exigências globais, o Comitê de Estratégias para a Redução de Impactos Ambientais, formado em 2018, delineou várias abordagens para melhorar a gestão de resíduos até 2050, incluindo os gerados no ambiente industrial de mineração. Essas estratégias incluem a implementação de tecnologias que minimizam a geração de resíduos e fomentam a reciclagem e a reutilização de materiais na própria indústria de mineração (WEF, 2018).

Nesse cenário, a vivência atual de uma “economia circular” torna-se essencial, visando não apenas à redução do impacto ambiental, mas também à criação de políticas públicas eficazes que integrem gestão sustentável de resíduos com inovação tecnológica (Ellen MacArthur Foundation, 2015). O tratamento e o reúso de resíduos de mineração têm se diversificado, incluindo métodos, como estabilização, recuperação de resquícios de metais

de valor comercial e a conversão de resíduos em novos materiais para diversos fins, como, por exemplo, a área de construção civil e agricultura. Tecnologias emergentes, como a biolixiviação e a fitoextração/agromining, mostram-se promissoras, recebendo considerável atenção e investimento, especialmente no setor de recuperação de metais preciosos e raros. Os aspectos detalhados desse contexto preliminar serão explorados nas próximas seções.

2.2 RESÍDUOS DE MINERAÇÃO

Os resíduos de mineração são produzidos em grandes quantidades (milhares a milhões de toneladas) ao longo dos processos de extração e beneficiamento de minérios, englobando uma gama de materiais (como rejeitos, estéreis) e subprodutos (como lamas e efluentes). O tratamento e o reúso adequados dessas matrizes são essenciais, considerando o enorme potencial para causar impactos ambientais graves, incluindo a contaminação de solos e corpos hídricos (Hudson-Edwards, 2016).

De acordo com o Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos (Sinir) do Ministério de Meio Ambiente (MMA), em relação ao grau de risco, os resíduos de mineração podem ser classificados como:

- Classe I – perigosos: rejeitos, solos e rochas contendo substâncias perigosas, óleo de motores, transmissões e lubrificação usados ou contaminados.
- Classe II – não perigosos: resíduos da extração de minérios metálicos e não metálicos, rejeitos não perigosos, sucatas metálicas ferrosas, resíduos de madeira, resíduos sanitários.

O Inventário Nacional de Resíduos Sólidos⁶ demonstra que, em 2020, última atualização da base de dados, foram gerados 43.265.656,64 kg de resíduos para atividade de pesquisa, extração ou beneficiamento de minérios, considerados perigosos, sendo já computada uma massa total de estoque de 125.570,90 kg. Em relação aos resíduos de mineração classificados como não perigosos, foram gerados em 2020 1.538.781.462,37 kg, somados a 7.382.639,72 kg em estoque.

Em relação aos resíduos líquidos/lamas, segundo um relatório da Agência Nacional de Mineração (ANM), o Brasil possui 897 barragens de mineração no cadastro nacional, sendo a grande maioria de baixo (488) e médio (346) risco, sendo 63 classificadas como de alto risco.⁷

Os resíduos de mineração, atualmente, podem ser considerados uma fonte de matéria-prima em potencial, entendido como sendo “o minério do amanhã”. Além de apresentarem menor pegada de carbono na sua reutilização por já terem passado pelos processos de desmonte da rocha e britagem, alguns resíduos minerais, ainda, possuem propriedades de sequestro

⁶ Para mais detalhes, consultar o site: <https://sinir.gov.br/relatorios/inventario-nacional/>.

⁷ Para mais detalhes, consultar o site: <https://app.anm.gov.br/SIGBM/Publico/GerenciarPublico>.

de carbono, podendo capturar cerca de ~ 1.1–4.5 Gt CO₂ anualmente, correspondendo a 31% e 125% das emissões industriais primárias (Bullock et al., 2021).

Os resíduos de mineração têm ampla gama de aplicações, desde a construção civil, podendo ser utilizados como material de base para estradas, produção de blocos, tijolos, pavimentos, agregados miúdos e graúdos, substitutos do clínquer em cimentos, até a agricultura, podendo ser usados como fertilizantes e corretivos do solo (Huang et al., 2023; Sanchez-Ramos et al., 2023; Kasap et al., 2022). No entanto, ainda há desafios significativos para a implementação dessas práticas, incluindo a aceitação pública, o custo de implementação, a durabilidade, a versatilidade e a eficiência nos processos desses materiais produzidos em comparação aos produtos obtidos, a partir das matérias-primas convencionais.

2.2.1 Tipos de resíduos de mineração

A indústria de mineração gera diversos tipos de resíduos, cada um com características e desafios específicos para tratamento e reúso. A classificação é composta basicamente pelos rejeitos, que se referem ao material descartado e/ou após o processo de beneficiamento e o estéril, trata-se do material *in natura*, descartados diretamente na operação de lavra (ANM nº 85/2021). Segundo o art.1º da Resolução ANM nº 85/2021, que atualmente regulamenta o aproveitamento desses materiais –, o estéril é definido como material *in natura*, descartado diretamente na operação de lavra, antes do beneficiamento. Já o rejeito é o material descartado durante e/ou após o processo de beneficiamento.

2.2.1.1 Rejeitos

São os resíduos mais comuns produzidos pela mineração e resultam do processo de beneficiamento do minério para extrair os minerais e/ou metais de interesse. Rejeitos são tipicamente compostos por uma mistura de água, rochas moídas, minerais sem valor econômico e, ocasionalmente, resíduos químicos dos processos de separação. Eles são normalmente armazenados em barragens de rejeitos. A Figura 3 ilustra um exemplo de barragem de rejeitos de minério de ferro da mineradora Anglo American, autorizada pelos órgãos responsáveis e em operação em conformidade com a legislação.

Figura 3 - Barragem de rejeitos de minério de ferro de empresa Anglo American



Fonte: <https://brasil.angloamerican.com/pt-pt/barragem/barragem-de-rejeitos>. Acesso em: 3 abr. 2024.

2.2.1.1.1 Tipos de rejeitos

Os rejeitos de mineração são uma das maiores preocupações ambientais relacionadas às atividades de extração mineral. Esses materiais são o resultado dos processos de beneficiamento de minério, nos quais os minerais de interesse econômico são separados dos materiais sem valor comercial (ganga mineral). Dependendo do tipo de minério e do método de processamento utilizado, os rejeitos podem variar significativamente em composição e propriedades físicas. A seguir, destacam-se os principais tipos de rejeitos encontrados na indústria de mineração com seus principais tipos de tratamento e reúso:

- 1. Rejeitos de flotação:** são gerados a partir de processos de flotação, em que reagentes químicos são usados para separar o mineral desejado das impurezas. Esses rejeitos são, geralmente, compostos por uma mistura de água, minerais finos, metais e reagentes não consumidos. Um exemplo é o rejeito de flotação de cobre, que pode conter sulfetos residuais e produtos químicos de flotação que necessitam de manejo cuidadoso para evitar contaminação ambiental (Silva *et al.*, 2022).
- 2. Rejeitos de lixiviação:** comum na extração de metais, principalmente ouro e cobre, a lixiviação utiliza soluções químicas, como, por exemplo, cianeto ou ácido sulfúrico, para dissolver o metal do minério. Os rejeitos resultantes contêm essas substâncias químicas em conjunto com outros resíduos minerais. Por exemplo, os rejeitos de minas de ouro que utilizam cianetação incluem altas concentrações de cianeto, um composto tóxico, que requer tratamentos específicos antes de seu descarte (Torres, 1996).
- 3. Rejeitos de areias minerais:** provenientes do processamento de minerais, como ilmenita, rutilo e zircônio, esses rejeitos consistem principalmente em minerais de areia não valiosos. Embora tipicamente menos tóxicos, os grandes volumes de areias descartadas podem alterar ecossistemas locais e mudar paisagens, como observado na mineração de areias pesadas (Baltar *et al.*, 2008).

- 4. Rejeitos de beneficiamento seco:** alguns minérios passam por processos de beneficiamento seco, que não utilizam água. Os rejeitos gerados aqui são predominantemente sólidos e incluem uma grande quantidade de pó mineral, em granulometrias de ultra-finos. A gestão desses rejeitos envolve o controle de emissões de poeira e a prevenção da dispersão de partículas no ar, que podem afetar a saúde humana e o meio ambiente. A mineração de ferro frequentemente gera esse tipo de rejeito, especialmente em operações que utilizam a separação magnética ou gravitacional para enriquecer o minério.
- 5. Rejeitos de carvão:** comumente associados à mineração de carvão, esses rejeitos incluem cinzas resultantes da combustão do carvão em usinas termelétricas, bem como partículas finas provenientes da lavagem do carvão, que não foram utilizadas para energia. Esses materiais podem conter uma variedade de contaminantes, incluindo elementos potencialmente tóxicos, compostos orgânicos e enxofre, que exigem tratamentos específicos para minimizar os impactos ambientais (Laskowski, 2001).
- 6. Rejeitos de metais potencialmente tóxicos:** particularmente na mineração de metais, como chumbo, zinco e cobre, os rejeitos podem conter concentrações elevadas de elementos potencialmente tóxicos. Esses componentes são altamente tóxicos e representam sérios riscos à saúde e ao ambiente se não forem adequadamente contidos e tratados. A gestão desses rejeitos inclui a estabilização dos metais para prevenir a lixiviação e a contaminação do solo e das águas subterrâneas.
- 7. Rejeitos ácidos:** a mineração de certos tipos de depósitos de minério contendo sulfetos metálicos pode gerar rejeitos com alto potencial de geração de drenagem ácida de mina (DAM), um efluente extremamente ácido que pode conter metais dissolvidos. Esse é um dos problemas mais significativos e desafiadores na mineração, pois a DAM pode continuar por décadas ou mesmo séculos após o fechamento da mina. Os rejeitos ácidos são uma preocupação particular em minas de sulfeto, em que a exposição dos minerais ao oxigênio e à água resulta na formação de ácido sulfúrico, que pode dissolver elementos potencialmente tóxicos e outros metais, levando à poluição extensa (Anawar, 2015).

A gestão adequada dos rejeitos é crucial para mitigar os impactos ambientais da mineração e para a sustentabilidade do setor. Isso inclui não apenas o tratamento e a disposição segura dos rejeitos, conforme a legislação adequada, mas também a investigação e a implementação de métodos para sua reutilização, reciclagem ou recuperação de materiais valiosos, transformando potenciais passivos ambientais em ativos econômicos.

2.2.1.2 Estéreis

Estéreis são materiais descartados diretamente na operação de lavra e que não passam pelo processo de beneficiamento, os estéreis são removidos para acessar minérios de maior qualidade e não possuem valor econômico significativo (Figura 4). Diferentemente dos rejeitos, os estéreis são frequentemente compostos por grandes blocos de rocha e são geralmente armazenados em pilhas ao ar livre. Embora sejam menos propensos a causar contaminação química, os estéreis podem alterar significativamente a paisagem e causar erosão e problemas de sedimentação nas áreas adjacentes.

Figura 4 - Pilha de disposição de estéril



Fonte: <https://www.noticiasdemineracao.com/empresas/news/1423040/nexa-faz-parceria-para-transformar-pilha-esteril-em-material-construcao>. Acesso em: 3 abr. 2024.

2.2.1.2.1 Tipos de estéreis

Estéreis são camadas de materiais que são removidos durante as operações de mineração para acessar os minérios economicamente valiosos dispostos em camadas mais profundas na litologia. Ao contrário dos rejeitos, que são subprodutos do processamento do minério, os estéreis são tipicamente removidos antes do minério chegar à planta de processamento. Esses materiais podem variar amplamente dependendo do tipo de mina e da localização geográfica. A seguir, destacam-se os principais tipos de estéreis reportados na literatura relacionados à indústria de mineração:

- 1. Estéreis de minas de carvão:** estes são predominantemente compostos de rochas e solos que cobrem as camadas de carvão. Eles podem conter quantidades variáveis de carvão residual, o que pode levar à geração de drenagem ácida de minas se não

forem manejados corretamente. O manejo desses estéreis envolve frequentemente a restauração da paisagem e a revegetação para prevenir a erosão e a contaminação das águas superficiais e subterrâneas (Horn *et al.*, 2023).

- 2. Estéreis de minas de metal:** nas minas de metais, como ouro, cobre, e ferro, os estéreis são geralmente compostos de rocha não mineralizada ou com baixo teor de minério. Esses materiais podem ser armazenados em pilhas de estéril, que precisam ser estabilizadas para evitar deslizamentos de terra e outros problemas geotécnicos. Em alguns casos, as pilhas de estéreis podem ser reprocessadas no futuro, à medida que as tecnologias de extração evoluem e os preços dos metais aumentem (Rodrigues, 2022).
- 3. Estéreis de minas de areia e cascalho:** os estéreis gerados durante a mineração de areia e cascalho incluem solos, vegetação e materiais subordinados que são removidos para acessar os depósitos aluviais. Esses estéreis são frequentemente utilizados para recuperação de terras e outras aplicações de engenharia civil, como material de preenchimento em projetos de construção.
- 4. Estéreis de minas de urânio:** os estéreis das minas de urânio podem conter radionuclídeos e outros elementos tóxicos que exigem cuidados especiais em termos de manejo e disposição. Esses materiais são normalmente confinados em instalações controladas para prevenir a liberação de radiação para o ambiente (Goda, 2020).
- 5. Estéreis de minas de gemas:** na mineração de gemas, como diamantes e rubis, os estéreis incluem uma variedade de materiais rochosos que não contêm gemas de valor comercial. A gestão desses estéreis foca na minimização do impacto visual e na preservação da biodiversidade local, muitas vezes exigindo técnicas de restauração cuidadosa.

A disposição desses estéreis é um componente crucial da mineração responsável, assegurando que esses materiais sejam tratados de maneira que minimizem os impactos ambientais e maximizem a possibilidade de uso futuro. A recuperação e a reutilização de estéreis, bem como a restauração de paisagens pós-mineração, são práticas sustentáveis que ajudam a reduzir o passivo ambiental das operações de mineração.

Além dos resíduos e estéreis, definidos pela legislação vigentes, outros subprodutos podem ser gerados do processo de beneficiamento, tais como: as lamas e os efluentes, conforme descrito a seguir:

- **Lamas:** as lamas são um subproduto do processo de lavagem do minério, consistindo principalmente de partículas finas de rocha, areia e água. Devido à sua alta granulometria e conteúdo de água, as lamas podem ser desafiadoras para manejar e requerem técnicas de desaguamento antes do descarte ou da reutilização (Braga *et al.*, 2010).
- **Efluentes:** a mineração pode gerar grandes volumes de água contaminada, incluindo água de processo, água subterrânea, que entra nas minas, e água pluvial que entra em

contato com materiais contaminados. Essas águas podem gerar a drenagem ácida de minas, que podem conter elementos potencialmente tóxicos, ácidos e outros poluentes que necessitam de tratamento antes de serem liberados no meio ambiente. A gestão eficaz das águas contaminadas é crucial para prevenir a poluição e proteger os recursos hídricos (Gusmão *et al.*, 2021).

O manejo adequado desses resíduos é essencial não apenas para a mitigação de impactos ambientais, mas também para a recuperação de compostos, contribuindo para a sustentabilidade e a eficiência da indústria de mineração. Cada tipo de resíduo requer uma estratégia específica de tratamento e reúso, que pode incluir a minimização da produção de resíduos, o desenvolvimento de tecnologias para tratamento e reciclagem, e a implementação de práticas de manejo responsável. A Tabela 1 apresenta, de forma sintetizada, todos os tipos de resíduos da mineração.

Tabela 1 - Tipos de resíduos de mineração

Tipo de resíduo e subprodutos	Descrição	Características principais	Impactos ambientais
Rejeitos	Produto do processo de beneficiamento do minério para extrair os minerais e/ou metais de interesse.	Composto por água, minerais finos, e produtos químicos. São armazenados em barragens de rejeitos.	Contaminação da água e do solo, riscos de ruptura de barragem.
Estéreis	Materiais descartados diretamente na operação de lavra e que não passam pelo processo de beneficiamento.	Grandes blocos de rocha e solo sem valor econômico. Geralmente armazenados em pilhas ao ar livre.	Alteração da paisagem, erosão, problemas de sedimentação.
Lamas	Subproduto líquido ou semilíquido da lavagem de minérios.	Contém partículas finas de rocha e água, podendo conter resíduos químicos de processamento.	Assoreamento de cursos de água, contaminação de aquíferos.
Efluentes	Água usada nos processos de mineração ou água que entra em contato com resíduos minerais.	Inclui água de processo, drenagem de mina, água de infiltração e água pluvial contaminada.	Poluição de corpos hídricos, drenagem ácida de mina.



CAPÍTULO 3 – DEFINIÇÃO DA ESTRATÉGIA DE BUSCA DE ARTIGOS CIENTÍFICOS

Este segmento do projeto envolveu uma busca e análise de artigos científicos focados no tratamento e reúso de resíduos de mineração, realizada pela plataforma Scopus/Elsevier.⁸ A base de dados Scopus é reconhecida como uma das maiores bases de dados bibliográficas de literatura científica revisada por pares, cobrindo ampla gama de disciplinas e campos de estudo. Essa plataforma oferece uma ferramenta bibliométrica abrangente para rastrear, analisar e visualizar pesquisas globais, facilitando o acesso a desenvolvimentos significativos em ciência e tecnologia.

A escolha de Scopus como ferramenta de pesquisa baseou-se na sua abrangente cobertura temática e quantidade de recursos disponíveis, garantindo que os pesquisadores tivessem acesso à vasta coleção de documentos científicos. Além disso, a base de dados Scopus possui funcionalidades avançadas de pesquisa e indexação, permitindo aos usuários uma navegação eficiente por milhões de publicações e citações. Tais funcionalidades incluem filtros eficazes que facilitam a identificação precisa de artigos relevantes, auxiliando significativamente na coleta e na análise de dados para este estudo.

O objetivo deste capítulo é descrever a metodologia empregada na seleção das estratégias de busca por palavras-chave que fundamentaram as análises prospectivas em artigos científicos. Essa metodologia envolveu a definição precisa de termos de busca alinhados aos objetivos do estudo, garantindo que a revisão da literatura seja tanto relevante quanto abrangente.

3.1 METODOLOGIA PARA SELEÇÃO DAS ESTRATÉGIAS DE BUSCA EM ARTIGOS

A definição do método para seleção das estratégias de busca em artigos científicos é norteadora a fim de garantir que a revisão da literatura seja eficiente e abrangente. Esta seção descreve o processo detalhado usado para determinar os cruzamentos de palavras-chave que foram utilizadas para garantir uma busca efetiva na literatura mundial sobre gestão, tratamento e reúso de resíduos de mineração na base de dados Scopus. O teste das palavras-chave foi essencial para filtrar o enorme volume de literatura disponível e focar nos estudos mais pertinentes aos objetivos do mapeamento.

⁸ Para mais detalhes, consultar o site: <https://www.scopus.com/>.

As palavras-chave iniciais foram selecionadas com base em sua relevância para o campo de estudo e sua frequência de ocorrência em publicações anteriores. As combinações de palavras-chave foram estrategicamente pensadas e determinadas em grupo, a fim de maximizar a captura de artigos científicos pertinentes ao tema do tratamento e reúso de resíduos de mineração.

A primeira busca aplicou o termo “*mining waste*” (Tabela 2) e mostrou-se muito abrangente, trazendo uma enorme quantidade de resultados (132.903 documentos), porém sem foco detalhado. Isso levou à segunda combinação, em que a palavra “*waste*” foi substituída por “*tailings*”, termo mais comum para a descrição dos resíduos de mineração, porém, ainda, resultando em uma quantidade muito grande de documentos (56.792). Continuando o refinamento, a terceira tentativa incluiu os mecanismos de busca booleana (AND/E, OR/OU) em conjunto com as palavras-chave utilizadas nas tentativas anteriores, ainda assim resultando em volume excessivo de documentos (16.545) para a análise detalhada.

Já na quarta tentativa, além da estratégia de busca booleana, também foram incluídos termos referentes à sustentabilidade e à economia circular, como: “*recycling*”, “*reuse*” e “*circular economy*”, visando à inclusão de artigos que abordassem práticas inovadoras e sustentáveis no tratamento e reúso de resíduos de mineração. Essa abordagem permitiu o refinamento da busca, resultando em 1.373 documentos.

Uma quinta tentativa foi realizada reunindo todas as palavras-chave testadas anteriormente e a técnica de busca booleana (AND/E, OR/OU), resultando em 586 documentos mais próximos do foco desejado para a rota tecnológica.

A Tabela 2 apresenta as combinações de palavras-chave utilizadas e o número de artigos encontrados para cada combinação, demonstrando o resultado das diferentes estratégias de busca.

Tabela 2 - Combinações de palavras-chaves testadas e número de artigos encontrados

Nº	Combinações de palavras-chaves	Nº de artigos encontrados
1	“ <i>mining waste</i> ”	132.903
2	“ <i>mining tailings</i> ”	56.792
3	(<i>mining AND tailings OR mine AND tailings</i>) AND (<i>mining AND waste OR mine AND waste</i>)	16.545
4	(<i>mining AND waste OR mine AND waste</i>) AND <i>recycling AND reuse AND “circular economy”</i>	1.373
5	(<i>mining AND tailings OR mine AND tailings</i>) AND (<i>mining AND waste OR mine AND waste</i>) AND <i>recycling AND reuse AND “circular economy”</i>	586

Fonte: elaboração própria.

Após a escolha da quinta tentativa de cruzamento das palavras-chave como a mais adequada ao projeto, com base em informações de títulos e resumo, foram selecionados **56 artigos** para uma análise aprofundada do conteúdo científico, a fim de se obter uma compreensão detalhada do estado da arte das pesquisas sobre o tratamento e o reúso de resíduos de mineração.

Em resumo, a estratégia de busca de artigos utilizou a ferramenta: Scopus, com o cruzamento de palavras-chave: **(mining AND tailings OR mine AND tailings) AND (mining AND waste OR mine AND waste) AND recycling AND reuse AND “circular economy”**, resultando em **586 documentos**, sendo filtrados **56 artigos** como pertinentes para análise humana, no prazo do estudo e na construção da etapa prospectiva da rota tecnológica.



CAPÍTULO 4 – ETAPA PROSPECTIVA – ARTIGOS CIENTÍFICOS

A abordagem adotada foi dividida em três níveis de análise – macro, meso e micro –, cada uma oferecendo uma perspectiva específica sobre os estudos em questão. Em função dos resultados obtidos na etapa anterior, a base de dados completa de 586 documentos foi utilizada apenas para uma análise macro, sendo a seleção dos 56 artigos científicos mais relevantes utilizadas para as análises macro, meso e micro. Por meio dessa abordagem, foi possível identificar publicações, colaborações internacionais e contribuições significativas de diferentes tipos de instituições. Essa introdução estabelece o cenário para um exame detalhado e categorizado, assegurando que cada nível de análise contribua para uma compreensão integral das tendências atuais e futuras em tecnologias de tratamento de resíduos de mineração.

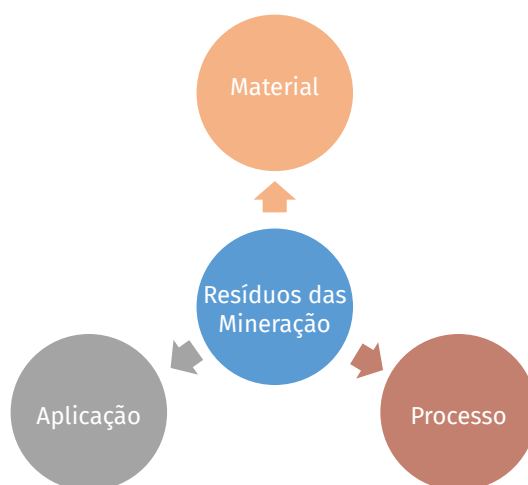
- **Nível macro:** neste nível foi analisada uma visão ampla da produção científica relacionada ao tema do estudo, incluindo os seguintes desdobramentos:

- **Análise temporal (série histórica):** foi examinada a distribuição dos artigos publicados ao longo dos anos, no intervalo temporal estabelecido para o estudo. Isso permitiu identificar tendências, crescimento de publicação e possíveis lacunas temporais das pesquisas científicas na área de conhecimento avaliada.
- **País (origem da inovação):** foi avaliada a distribuição geográfica dos artigos com base no país de origem dos autores, o que nos permitiu identificar líderes globais em pesquisa e padrões de colaboração internacional. Também analisamos as colaborações entre países, observando como autores de diferentes nacionalidades contribuem conjuntamente para a publicação de documentos.
- **Tipo de autor (instituição de origem):** foi investigada a distribuição dos artigos segundo a afiliação dos autores, seja ela um centro de pesquisa, universidade, empresa, seja colaborações entre diferentes tipos de instituições. Essa análise ajudou a entender quais setores e instituições estão mais ativas na pesquisa sobre o tema.
- **Área de conhecimento:** também foi realizado um recorte dos dados de acordo com a área de conhecimento científico.

- **Nível meso:** neste nível, após sua leitura, os documentos foram categorizados de acordo com características relevantes ao tema em estudo:

- **Taxonomias/drivers:** os artigos foram organizados conforme diferentes taxonomias ou *drivers* identificados como centrais ao tema do projeto. Cada categoria foi desenhada para refletir um aspecto significativo da pesquisa, ajudando a estruturar o conhecimento de forma que se destacassem as áreas prioritárias e tendências emergentes. No presente estudo foram identificadas as taxonomias/*drivers*: material, aplicação e processo (Figura 5).

Figura 5 - Diagrama de taxonomias meso



Fonte: elaboração própria.

- **Nível micro:** o nível micro detalhou os objetivos do documento e as particularidades de cada categoria definida no nível meso:

- **Detalhamento das taxonomias:** Nesta seção, cada taxonomia identificada foi explorada em detalhes, proporcionando insights específicos e aprofundados sobre subtemas particulares. Essas análises serviram como base para discussões mais profundas no capítulo seguinte, permitindo uma compreensão mais refinada das nuances da pesquisa.

Esta estrutura de análise garantiu uma avaliação abrangente e detalhada da literatura selecionada, permitindo uma visão das dinâmicas atuais de pesquisa, bem como identificação de tendências emergentes e oportunidades de inovação no campo de estudo.

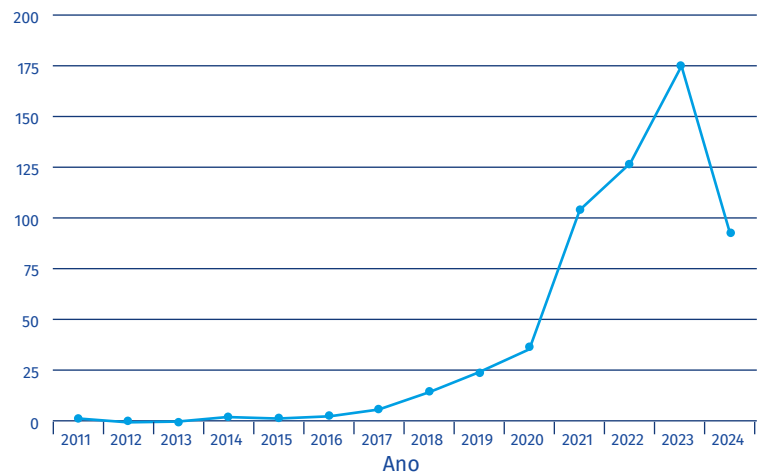
4.1 RESULTADOS DA ANÁLISE DOS ARTIGOS CIENTÍFICOS

4.1.1 Análise macro

Para a análise macro, foi utilizada a ferramenta: “Analyse Search Results”, da plataforma Scopus.

O primeiro dado analisado foi a **distribuição das publicações por ano**, considerando a série temporal entre os anos de 2011 e 2024, conforme ilustrado na Figura 6. A partir dessa análise, foi possível observar um salto significativo das pesquisas voltadas à reutilização de resíduos da mineração a partir do ano de 2020. Apesar da análise parcial (maio/2024), estima-se que essa projeção se mantenha também em 2024.

Figura 6 - Análise macro – série histórica



Copyright © 2024 Elsevier B.V. All rights reserved. Scopus® is a registered trademark of Elsevier B.V.

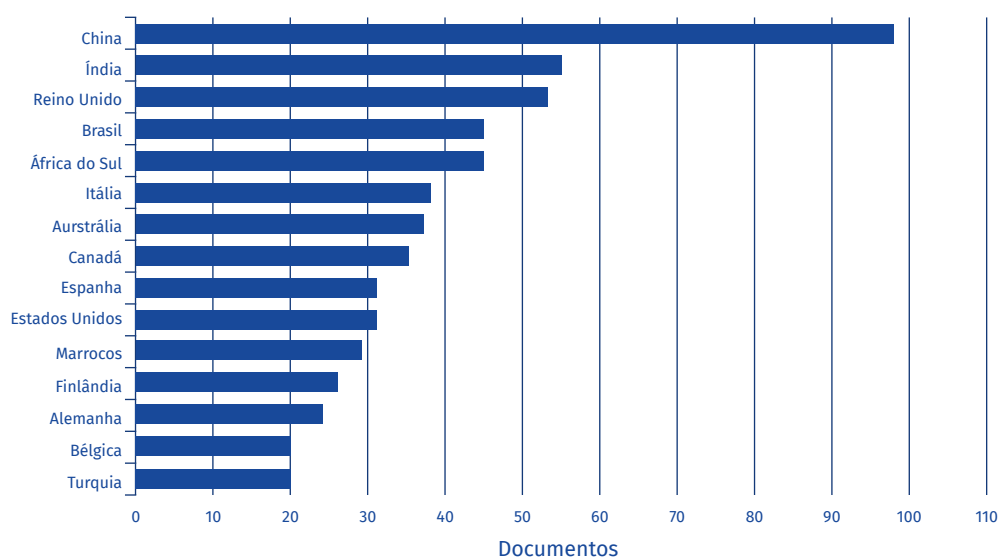
Fonte: base de dados Scopus.

A segunda etapa de nossa análise macro centrou-se na **distribuição geográfica dos documentos**, sugerindo onde os estudos relacionados ao tratamento e reúso de resíduos de mineração estão sendo desenvolvidos, potenciais focos de parcerias internacionais e mercados consumidores sensibilizados para essas tecnologias. Por meio da distribuição por origem da inovação, foi possível identificar e quantificar as contribuições de diferentes países, o que reflete o interesse e o envolvimento global em abordagens sustentáveis e eficazes para esse tema.

A Figura 7 ilustra, claramente, a liderança da China em número de publicações sobre o tema buscado, apresentando quase o dobro de documentos em comparação ao segundo e terceiro colocados no ranking, Índia e Reino Unido, respectivamente. Esse resultado pode ser

diretamente correlacionado com a posição da China como líder mundial na exploração de diversas commodities minerais e elementos críticos e seus esforços recentes para a redução das emissões e o aumento da sustentabilidade na mineração (Du *et al.*, 2024). O Brasil e a África do Sul também apareceram como contribuidores significativos, o que também pode ser atribuído à abundância de operações de mineração e aos desafios ambientais relacionados.

Figura 7 - Análise macro – origem da inovação

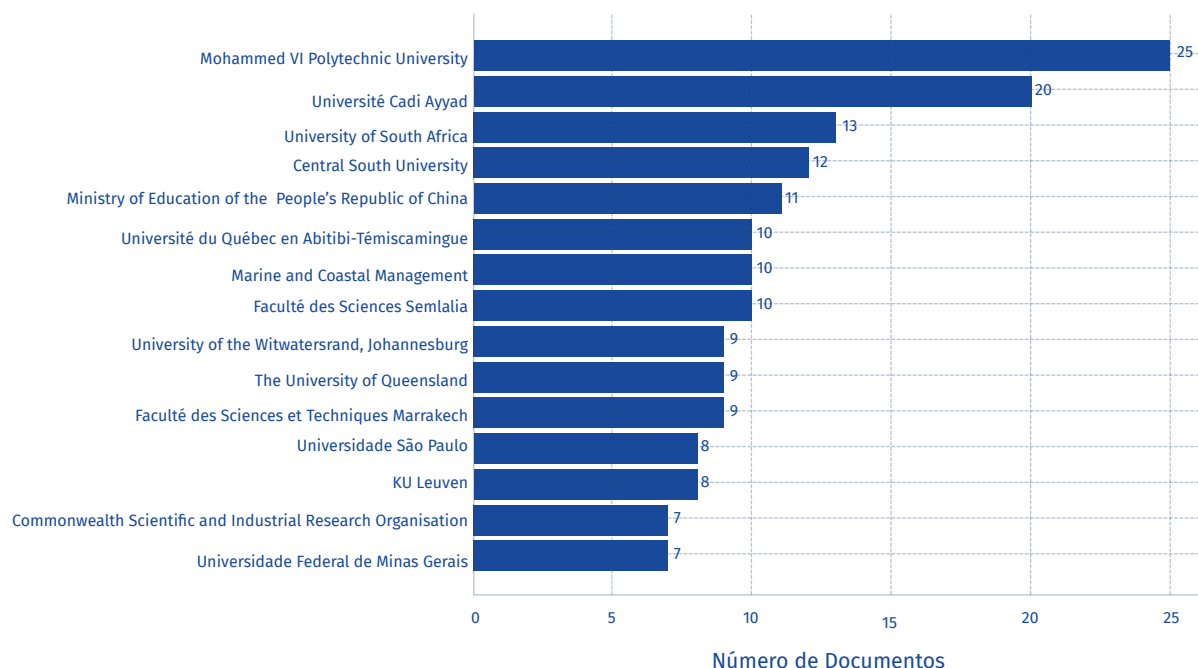


Copyright © 2024 Elsevier B.V. All rights reserved. Scopus® is a registered trademark of Elsevier B.V.

Fonte: base de dados Scopus.

Este panorama global não apenas sublinha a diversidade e a riqueza das pesquisas conduzidas em diferentes contextos geográficos, mas também destaca áreas em que a cooperação internacional e a transferência de conhecimento poderiam ser intensificadas para promover práticas mais eficazes e sustentáveis no setor de mineração. A presença marcante de países com amplas indústrias de mineração e as contribuições significativas de nações com rigorosas regulamentações ambientais fornecem uma base robusta para futuras colaborações internacionais.

A análise dos documentos por **afiliação institucional** (Figura 8) revelou os centros de pesquisa e as universidades que estão na vanguarda da pesquisa sobre o tratamento e o reúso de resíduos de mineração. Analisando a instituição de origem, foi possível identificar quais instituições contribuíram mais significativamente para o corpo de conhecimento nessa área específica nos últimos anos.

Figura 8 - Análise macro – instituição de origem

Fonte: base de dados Scopus.

A University Mohammed VI Polytechnic (UM6P), localizada em Marrocos, liderou o número de publicações resultantes da busca na plataforma Scopus, destacando-se como um potencial centro de relevância em pesquisas ambientais voltadas à mineração. A UM6P possui uma área temática de pesquisas em Mineração Sustentável e Economia Circular, vinculada ao seu polo de Ciência e Tecnologia, com o objetivo de apoiar a sustentabilidade e a inovação na mineração.

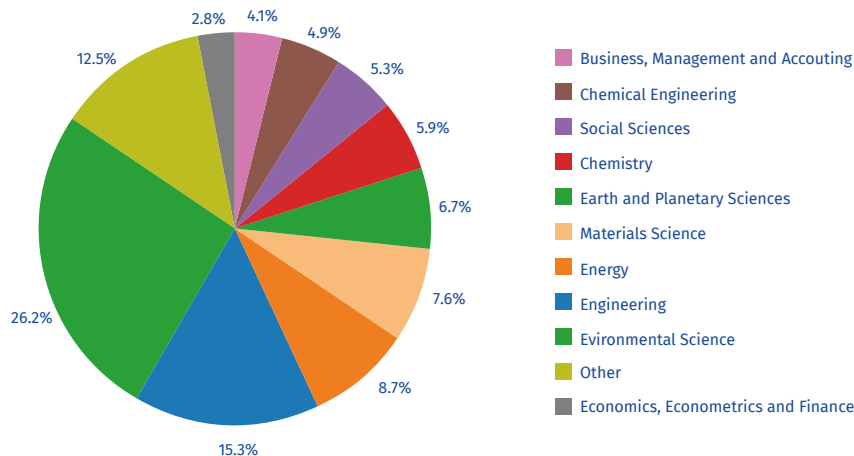
Seguem-se a Université Cadi Ayyad, também localizada no Marrocos, e a University of South África, da África do Sul, ambas com contribuições substanciais que refletem o foco contínuo em questões de sustentabilidade e tecnologias de mineração. Em relações às instituições chinesas, destacaram-se a Central South University e o Ministério de Educação da República Popular da China.

A análise macro de origem também indicou a relevância de instituições canadenses (Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue), australianas (The University of Queensland, Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation-CSIRO), brasileiras (Universidade de São Paulo e Universidade Federal de Minas Gerais), belgas (KU Leuven) e sul-africanas (University of the Witwatersrand) no *ranking* de produções científicas na área temática de tratamento e reúso de resíduos da mineração.

A diversidade de instituições listadas, que incluem universidades e centros de pesquisa de diferentes partes do mundo, evidencia uma rede colaborativa e multidisciplinar trabalhando para abordar os desafios ambientais associados à mineração. Esta análise não apenas destaca as contribuições individuais de cada instituição, mas também aponta para a importância de parcerias internacionais e para o compartilhamento de conhecimento entre países e continentes.

Por fim, na análise macro sobre a distribuição das publicações por **área de conhecimento** (Figura 9), foi possível destacar a área de Ciências Ambientais, com 26,2% das publicações. A predominância de publicações na área temática de Ciências Ambientais, seguida por Engenharia (15,3%), Energia (8,7%) e Ciências dos Materiais (7,6%), reflete a preocupação do tema com o meio ambiente e o aumento da sustentabilidade da mineração, mas, ao mesmo tempo, os desafios técnicos para o desenvolvimento de soluções inovadoras e escalonáveis, dado o grande volume de resíduos gerados anualmente e o legado já existente.

Figura 9 - Análise macro – área de conhecimento

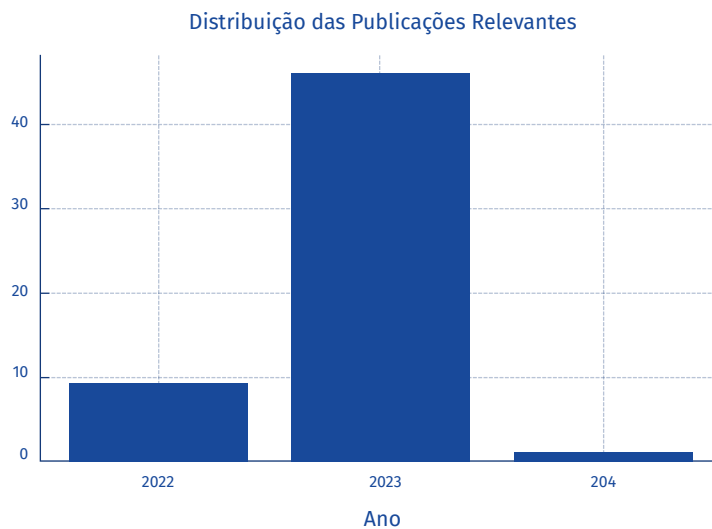


Fonte: base de dados Scopus.

A análise macro também foi repetida considerando apenas o conjunto de 56 documentos selecionados como totalmente aderentes ao escopo do estudo, servindo como uma espécie de “lupa” sobre as principais pesquisas na área de tratamento e reúso de resíduos de mineração.

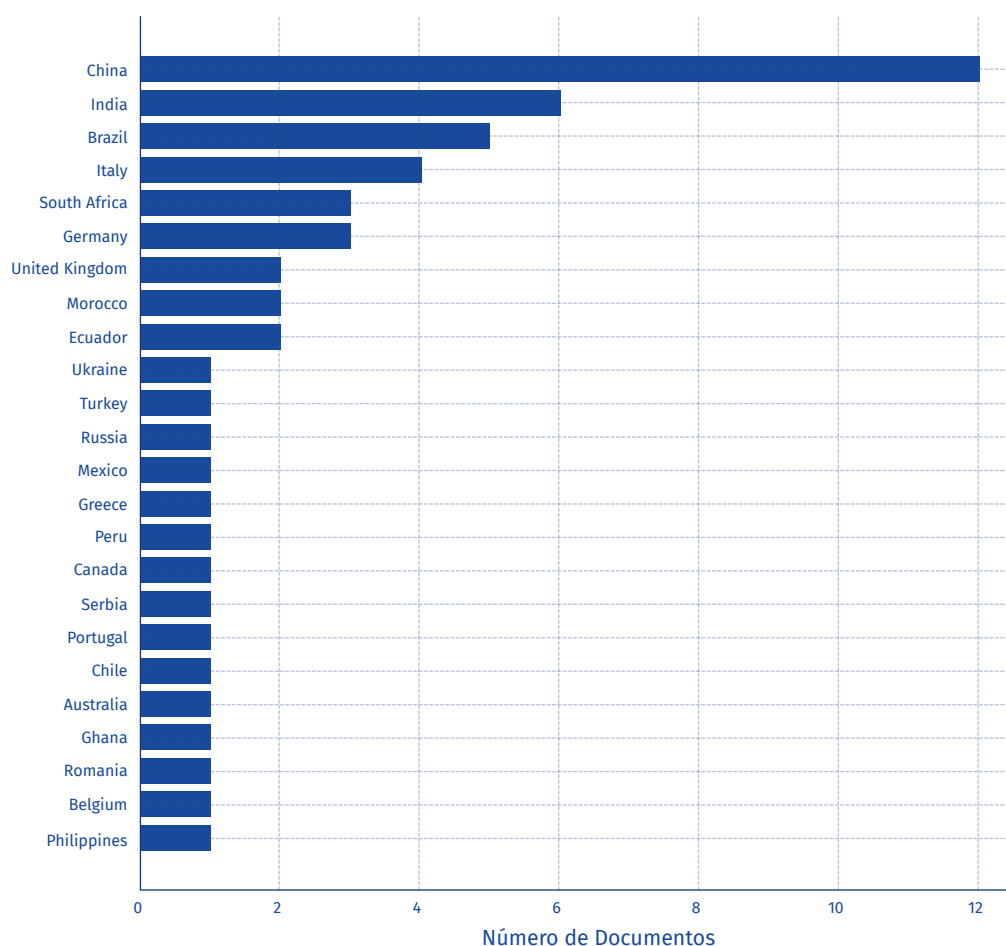
Em relação à **distribuição das publicações por ano**, os documentos selecionados foram publicados nos anos de 2022 (09), 2023 (46) e 2024 (01) (Figura 10).

Figura 10 - Distribuição temporal dos artigos pertinentes ao escopo



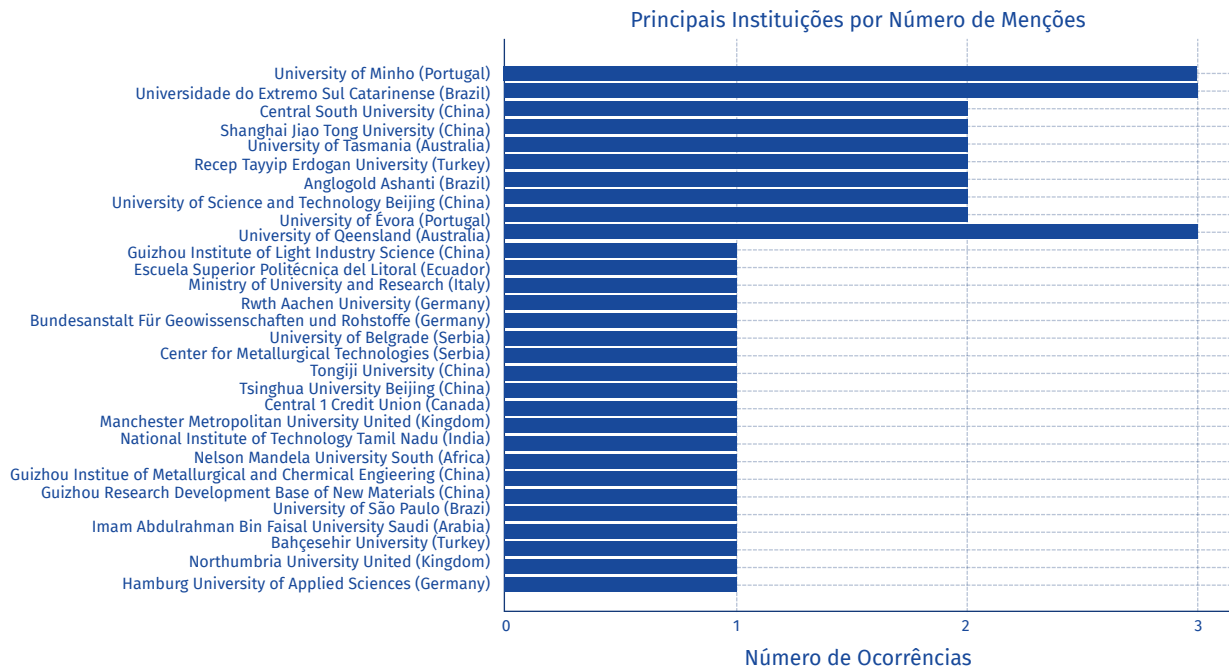
Fonte: base de dados Scopus.

A Figura 11 apresenta o recorte da base de dados em relação à **distribuição geográfica dos documentos**. Nesse caso, observou-se o destaque para publicações da China (12), seguido pela Índia (6), Brasil (5), Itália (04), África do Sul (3), Alemanha (3). Essa distribuição reflete a diversidade geográfica das pesquisas relevantes ao estudo, com uma predominância novamente das publicações oriundas da China, seguida por um conjunto de países que contribuíram com um número menor, porém relevante, de artigos.

Figura 11 - Distribuição dos artigos por país de origem do autor

Fonte: base de dados Scopus.

Detalhando a **afiliação institucional**, apresentada na Figura 12, cita-se o artigo de Wang *et al.* (2023), realizado pela Hubei Province Engineering Research Center for Industrial Environmental Risk Prevention and Emergency Treatment (China), que investigou o processo de lixiviação e a ocorrência de elementos metálicos na escória de cobre. O estudo focou na recuperação de metais a partir da escória de cobre, abordando métodos para reduzir a contaminação ambiental e recuperar metais valiosos remanescentes no resíduo.

Figura 12 - Distribuição dos artigos por afiliação institucional

Fonte: base de dados Scopus.

Dentro da base de dados selecionada, destacou-se a cooperação entre as universidades portuguesas do Minho e de Évora e a Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), em conjunto com a mineradora AngloGold Ashanti, no desenvolvimento de pesquisas para o reaproveitamento de resíduos da mineração de ouro. Lemos et al. (2023a) – no artigo intitulado: *Geochemistry and mineralogy of auriferous tailings deposits and their potential for reuse in Nova Lima Region, Brazil* – analisaram a geoquímica e a mineralogia de rejeitos auríferos, sugerindo a potencial de extração do ouro remanescente e outros metais valiosos, bem como a aplicação dos resíduos como agregados para a construção civil. O mesmo grupo também analisou a composição de efluentes de várias minas da região do Quadrilátero Ferrífero, em Minas Gerais, no artigo *Hydrochemistry, Elements Distribution and Their Potential Recoveries in Gold Metallurgical Treatment Tailings Dams*, apresentando potencial para recuperação de metais e metalóides dissolvidos através da utilização inovadora de nanofibras biossorbentes (Lemos et al., 2023).

Também foram identificadas parcerias relevantes entre a University of Science and Technology Beijing, da China, e a Recep Tayyip Erdogan University, da Turquia. Huang et al. (2023) estudaram a microestrutura e o comportamento mecânico de rejeitos contendo ouro e tungstênio retornados para as áreas mineiradas após processo de cimentação (*cementitious tailings-crushed rock backfill* – CTCRB), bem como o impacto da adição de fibras de polipropileno nas propriedades mecânicas dos aterros de rejeitos cimentados

(Gao *et al.*, 2023). O mesmo grupo também publicou um capítulo de livro intitulado *Recent practices in mine tailings' recycling and reuse*, sobre potenciais utilizações dos rejeitos por meio de métodos convencionais e inovadores de reciclagem e reutilização (Yilmaz *et al.*, 2023). O objetivo principal foi fornecer informações atualizadas sobre as práticas emergentes de reciclagem e reutilização de rejeitos de mineração, destacando casos de estudo, tecnologias inovadoras e estratégias de gestão. A revisão também abordou os benefícios ambientais, econômicos e sociais associados a essas práticas, bem como os desafios e as oportunidades (Yilmaz, *et al.*, 2023).

Outro exemplo de cooperação institucional foi o artigo publicado por Sapsford *et al.* (2023), intitulado *Circular economy landfills for temporary storage and treatment of mineral-rich wastes*, que trouxe um novo conceito de recuperação de valor a partir de resíduos ricos em minerais, em que os materiais são temporariamente armazenados e limpos em depósitos semelhantes a aterros, concebidos para serem posteriormente extraídos. Essa publicação envolveu as universidades de Cardiff, Leeds, West of England e Hull, do Reino Unido.

No âmbito das publicações na América Latina, Cacciuttolo e Cano (2023) da Universidad Católica del Norte (Chile), em conjunto com a Universidad de Huánuco (Peru) – no artigo *Spatial and Temporal Study of Supernatant Process Water Pond in Tailings Storage Facilities: Use of Remote Sensing Techniques for Preventing Mine Tailings Dam Failures* –, realizaram um estudo espacial e temporal dos processos de falhas em barragens de mineração (rejeitos ou resíduos) com foco no monitoramento e gerenciamento dos rejeitos, buscando otimização desses processos.

Por fim, cita-se também o artigo de Kasikov *et al.* (2023), realizado pelo Tananaev Institute of Chemistry, Subdivision of the Federal Research Center Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences (Rússia), que propõe, no artigo *Deep Processing of Dump Slag from the Copper-Nickel Industry*, um método ambientalmente seguro e eficiente para o processamento de escória cobre-níquel, com o objetivo de obter óxido de ferro. O estudo destaca a viabilidade de recuperar óxido de ferro de alta pureza a partir de escória de cobre-níquel, por meio do processo de lixiviação ácida, sendo subprodutos aplicados na indústria da construção.

Esses exemplos ilustram a diversidade e a relevância das pesquisas na área de reutilização de rejeitos de mineração, com contribuições significativas de várias instituições ao redor do mundo, cada uma trazendo novas perspectivas e soluções para os desafios ambientais e de engenharia associados ao tratamento e reúso dos resíduos da mineração.

4.1.2 Análise meso e micro

Com o objetivo de classificar o assunto principal de cada documento, os 56 documentos foram categorizados de acordo com as três taxonomias mesos descritas no capítulo 4. Vale mencionar que um mesmo artigo pode ser classificado em mais de uma taxonomia.

- **Material:** quando o artigo identificou e classificou o tipo de resíduo produzido no ambiente da mineração objeto da pesquisa.
- **Processo:** quando o objetivo do artigo envolveu um processo químico, físico, bioquímico, por exemplo: lixiviação, calcinação, biolixiviação, entre outros, utilizado para o tratamento ou reúso do resíduo mineral.
- **Aplicação:** quando o objetivo do artigo se relacionou ao tipo/área da nova aplicação dos resíduos de mineração processados, por exemplo: construção civil, agricultura, etc.

A Tabela 3 apresenta a distribuição das publicações classificadas pelas taxonomias meso. Em aproximadamente 32% dos documentos, foi possível identificar as taxonomias meso: “material e processo”, enquanto as taxonomias: “aplicação, material e processo” foram identificados em 48,2% dos documentos. A taxonomia **material** isoladamente e o conjunto **aplicação, material** foram identificadas em 14,3% dos documentos cada. Os artigos categorizados apenas como **aplicação e processo** corresponderam a 3,6% e **processos** a 1,8% do total. Essa análise indica a relevância das taxonomias meso selecionadas para a construção da rota tecnológica e a constante associação dos materiais, dos processos e das aplicações nas publicações voltadas ao estudo de reutilização de resíduos da mineração.

Tabela 3 - Distribuição dos artigos por assunto (taxonomia meso)

Taxonomias	Quant.	Artigos (%)
Material, processo	18	32,14
Aplicação, material, processo	27	48,21
Aplicação, material	8	14,29
Aplicação, processo	2	3,57
Processo	1	1,79
Total de artigos	56	100

Fonte: elaboração própria.

Um exemplo de documento apresentando as categorias meso: **material, processo** foi o artigo *Leaching behavior and occurrence of metal elements in copper slag: The key to recycling metals in copper slag*, publicado por Wang et al. (2023). Este artigo avaliou o comportamento da recuperação de metais a partir de escórias de cobre (material), através do processo de lixiviação química.

Um exemplo adicional nessa categoria foi o artigo *Hydrochemistry, Elements Distribution and Their Potential Recoveries in Gold Metallurgical Treatment Tailings Dams*, publicado por Lemos et al. (2023b). Este estudo investigou a hidroquímica e a distribuição de elementos abundantes (Al, Cu e Fe) e elementos críticos (Co, Be, Sb, Ce, Be e La) em drenagem ácida de mina (DAM) (material), avaliando a viabilidade da recuperação desses elementos. O artigo destaca o processo de tratamento em reatores eletroquímicos, que permitiu a recuperação de metais valiosos em diferentes pHs, “abrindo as portas” para uma futura aplicação escalonada de recuperação de metais em DAM.

Um terceiro exemplo foi o artigo *Leaching behavior of copper tailings solidified/stabilized using hydantoin epoxy resin and red clay*, publicado por Zhu et al. (2023). Este estudo avaliou uma nova tecnologia de solidificação/estabilização utilizando resina epóxi hidantoína (HER) e argila vermelha para o tratamento de rejeitos de cobre, e os comportamentos de lixiviação dos rejeitos de cobre solidificados/estabilizados.⁹

4.1.2.1 Taxonomia material

A Tabela 4 apresenta a distribuição dos artigos científicos analisados que mencionaram diferentes tipos de materiais relacionados à mineração e seus resíduos. O ferro (Fe) foi o material mais mencionado, aparecendo em 41 artigos (73,21% do total). O cobre (Cu) foi citado em 9 artigos (16,07%), seguido pelo chumbo (Pb) e ouro (Au), cada um mencionado em 6 artigos (10,71%). O níquel (Ni) apareceu em 4 artigos (7,14%), enquanto o arsênio (As) foi mencionado em 3 artigos (5,36%). O zinco (Zn) foi citado em 2 artigos (3,57%) e o mercúrio (Hg), alumínio (Al) e silício (Si) foram individualmente mencionados em 1 artigo (1,79%). Esta distribuição sugere um ranking de materiais avaliados em estudos de gestão e recuperação de resíduos de mineração, tendo o ferro como o principal material estudado.

Tabela 4 - Distribuição dos artigos da taxonomia material

Material – elementos Químicos	Quant.	Artigos (%)
Ferro	41	73,21
Cobre	9	16,07
Chumbo	6	10,71
Ouro	6	10,71
Níquel	4	7,14
Arsênio	3	5,36
Zinco	2	3,57
Mercúrio	1	1,79
Alumínio	1	1,79
Silício	1	1,79

Fonte: elaboração própria.

⁹ Instituição envolvida: Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals, Central South University, China.

Analizando a Tabela 4, na taxonomia **material** e subcategoria ferro, pode-se citar a revisão de literatura publicada por Athira e Gangaputhiran (2023), destacando o potencial de uso e reutilização de rejeitos de minério de ferro como material de aterro em aplicações estruturais, como muros de contenção, aterros e pavimentos.

Em relação ao elemento Cu, o artigo intitulado *Toward sustainable reprocessing and valorization of sulfidic copper tailings: Scenarios and prospective LCA*, publicado por Adrianto et al. (2023), conduzido pela ETH Zurich (Suíça) e pela University of Bologna (Itália), avaliou os impactos do ciclo de vida (ACV) e o potencial de recuperação de recursos associados à gestão alternativa de resíduos por meio do reprocessamento de rejeitos de minas à escala regional. Os rejeitos sulfídicos de cobre na União Europeia (UE) foram selecionados como estudo de caso. Foram realizadas avaliações prospectivas do ciclo de vida de futuros cenários de reprocessamento, tendo em conta as tecnologias emergentes de recuperação de recursos, as previsões de oferta e procura do mercado e as alterações do sistema energético.

Em relação ao Pb, o trabalho intitulado *Leaching of heavy metal(loid)s from historical Pb–Zn mining tailing in abandoned tailing deposit: Up-flow column and batch tests*, publicado por Yao et al. (2023), teve como objetivo investigar as características de lixiviação em água de metais pesados de rejeitos históricos de minas de Pb-Zn de um depósito de rejeitos abandonado no leste da China.

Na subcategoria do ouro, há o artigo intitulado *Assessment of Natural Radioactivity and Radon Exhalation in Peruvian Gold Mine Tailings to Produce a Geopolymer Cement*, publicado por Liza et al. (2023). Este estudo, conduzido pela Pontificia Universidad Católica del Perú, teve como objetivo avaliar o risco radiológico derivado da exposição a radionuclídeos naturais

contidos em rejeitos de minas de ouro peruanas e determinar se os rejeitos poderiam ser utilizados como matérias-primas em materiais de construção (cimentos geopolímeros).

4.1.2.2 Taxonomia processo

A Tabela 5, referente à taxonomia processo apresenta a distribuição dos artigos científicos analisados que mencionam diferentes processos relacionados aos tratamentos dos resíduos de mineração. A lixiviação foi o processo mais mencionado, aparecendo em 9 artigos (23,08% do total), destacando sua aplicação em estudos de extração de minerais/ metais por solução aquosa. A biolixiviação foi citada em 6 artigos (15,38%), seguida pela adsorção, mencionada em 5 artigos (12,82%). A estabilização foi abordada em 4 artigos (10,26%), enquanto a recuperação de metais foi o foco de 3 artigos (7,69%). Processos de solidificação/estabilização para o tratamento de resíduos também foram citados em 2 artigos (5,13%), juntamente com o tratamento de águas residuais.

Tabela 5 - Distribuição dos artigos da taxonomia processo

Processo	Quant.	Artigos (%)
Lixiviação	9	23,08
Bioliixiviação	6	15,38
Adsorção	5	12,82
Estabilização	4	10,26
Recuperação de metais	3	7,69%
Solidificação/Estabilização	2	5,13%

Fonte: elaboração própria.

Como exemplo de artigo aplicando técnicas de **Lixiviação**, na taxonomia **Processo**, pode-se citar o estudo intitulado *Optimizing metal recovery from slag leaching solutions: Advanced ion exchange techniques for sustainable resource extraction*, publicado por Abeywickrama et al. (2023), em parceria entre a Technische Universität Bergakademie Freiberg e a empresa de engenharia G.E.O.S. Ingenieurgesellschaft mbH, na Alemanha. Neste artigo, foi avaliada a eficácia de colunas de troca iônica na recuperação de íons metálicos de lixiviados de escórias provenientes de uma fábrica chilena de processamento de cobre.

Em contrapartida, para o processo de **Bioliixiviação** na taxonomia **Processo**, destaca-se o artigo intitulado *Valorizing (cleaned) sulfidic mine waste as a resource through bioleaching*, publicado por Helser, Perumal e Cappunyns (2022). Este estudo foi realizado no KU Leuven, Centre for Economics and Corporate Sustainability, na Bélgica, e publicado na revista *Journal of Environmental Management*. No referido estudo, os resíduos de minas provenientes de três locais diferentes foram caracterizados e comparados com os resíduos de minas limpos (ou seja, limpos por métodos de bioliixiviação ou de flotação) e com diferentes tipos de materiais de construção ecológicos contendo 13-80% em peso (limpos e não limpos) de resíduos de minas.

Finalmente, no que se refere ao processo de **adsorção**, há o artigo: *One-step simultaneous biomass synthesis of iron nanoparticles using tea extracts for the removal of metal(loid)s in acid mine drainage*, publicado por Pan, Xie e Chen (2023). Este artigo propôs a síntese simultânea, numa única etapa, de nanopartículas de ferro (NPs Fe) a partir de extratos de chá para a remoção de metais pesados/metaloídes em drenagem ácida de mina (DAM). A pesquisa propôs a remoção de metais pesados/metaloídes da DAM, envolvendo principalmente a formação de NPs de Fe e processos de adsorção, coprecipitação e redução de metais pesados/metaloídes.

4.1.2.3 Taxonomia aplicação

A Tabela 6 refere-se à taxonomia **aplicação** e apresenta a distribuição dos artigos científicos analisados que mencionam diferentes aplicações dos resíduos de mineração tratados, juntamente com a descrição de cada aplicação. A aplicação mais mencionada é a agrícola, aparecendo em 9 artigos (36% do total), destacando a utilização de resíduos de mineração tratados como fertilizantes e corretivos para solos agrícolas. Aplicações de resíduos na construção civil foram citadas em 5 artigos (20%), seguida pelo aproveitamento energético, mencionado em 4 artigos (16%). A reutilização de resíduos em processos industriais foi abordada em 3 artigos (12%), enquanto a remediação e o tratamento de águas residuais foram mencionados em 2 artigos (8%). Esta distribuição destaca o grande desafio na reutilização de resíduos minerais, quase sempre sendo aplicados em produtos de pouco valor agregado, em setores com potencial de consumo de grandes volumes, como a agricultura e a construção civil.

Tabela 6 - Distribuição dos artigos da taxonomia aplicação

Aplicação	Quant.	Artigos (%)
Agrícola	9	36
Construção	5	20
Energético	4	16
Industrial	3	12
Remediação Ambiental	2	8
Tratamento de águas residuais	2	8

Fonte: elaboração própria.

Na categoria de **remediação ambiental**, na taxonomia aplicação, pode-se citar o artigo intitulado *Alkaline industrial wastes – Characteristics, environmental risks, and potential for mine waste management*, publicado por Moyo et al. (2023a). Este estudo avaliou o potencial de reutilização de borras de licor verde (GLD), cinzas de madeira, cinzas de carvão, lamas vermelhas, mexilhões, vieiras e conchas de ostras para controlar a drenagem ácida e metalífera (AMD). Os resultados deste estudo destacaram que os resíduos industriais alcalinos podem ser potencialmente utilizados na remediação a longo prazo da DAM como parte de uma estratégia de gestão integrada de resíduos de minas ambientalmente sustentável e econômica.

Já na categoria de **construção**, há o artigo *Sustainable Mining: Reuse of Clay from Abandoned Areas in the South of Brazil for Ceramic Production Based on a Simplex Design*, publicado por Saviatto et al. (2023), em parceria entre a Universidade do Extremo Sul Catarinense e o Polytechnic Institute of Viana do Castelo, de Portugal. Este estudo avaliou a incorporação de dois tipos de argila, provenientes de áreas de mineração abandonadas no sul do estado de Santa Catarina/Brasil, a argilas plásticas utilizadas na fabricação de blocos e tijolos cerâmicos.

Nesta mesma categoria, o artigo *Phosphate rock waste in the production of cement tile* (Pires *et al.*, 2022), do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, propõe a incorporação de resíduos de rocha (RE) de uma mina de fosfato na produção de azulejos de cimento como substituto parcial do cimento Portland.

4.2 CONCLUSÕES SOBRE A ETAPA PROSPECTIVA EM ARTIGOS CIENTÍFICOS

A análise global das 586 publicações científicas, identificadas pela estratégia de busca selecionada, mostrou uma tendência de crescimento no volume de publicações sobre o tratamento e reúso de resíduos de mineração a partir de 2020. Tal interesse evidencia a crescente preocupação com a gestão adequada dos resíduos minerais, talvez catalisada pelo aumento no rigor da legislação ambiental em alguns países, como a China, por exemplo, mas também pela quebra de paradigmas, atribuindo valor aos resíduos como matérias-primas para outras cadeias produtivas, em alinhamento aos princípios da economia circular e da conservação dos recursos naturais.

No que se refere à origem das inovações, a maioria dos documentos selecionados foram provenientes da China, da Índia, do Reino Unido, do Brasil e da África do Sul, que, com exceção do Reino Unido, possuem a mineração como importante atividade econômica e de geração de empregos. Esse fato indica que os polos de pesquisas atuam de forma próxima aos centros mineradores, sendo apoiados por instituições de pesquisa de outros países.

A maior parte dos artigos analisados foram publicados por pesquisadores associados às universidades e aos centros de pesquisa (72%), embora, em alguns casos, foi identificada a associação com empresas mineradoras e de engenharia nas pesquisas. Destacaram-se na busca as universidades marroquinas University Mohammed VI Polytechnic (UM6P) e Université Cadi Ayyad, com 45 publicações na área de interesse. O Marrocos é um dos principais países exportadores de rochas fosfáticas utilizadas na fabricação de fertilizantes fosfatados, gerando enormes quantidades de resíduos. Também apareceram nas buscas centros de pesquisa tradicionais na área de mineração, como: South Africa University, da África do Sul; The Queensland University e CSIRO, da Austrália; e a Central South University, da China.

A base de dados contendo as 56 publicações mais relevantes foi utilizada para a classificação das taxonomias macro (distribuição por ano, geográfica e institucional) e meso: **materiais, processos e aplicações**. O ferro foi o material mais citado nas publicações, seguido por cobre, chumbo e ouro. Em virtude da necessidade da concentração do ferro e do cobre antes da sua comercialização, processos como a flotação são utilizados em escala industrial, gerando grandes barragens de rejeitos, o que explica o número de pesquisas voltadas ao reaproveitamento e à reutilização desses elementos. A lixiviação foi o processo mais mencionado, aparecendo em 23,08% dos artigos, seguido pela biolixiviação (15,38%) e

adsorção (12,82%). Esses processos são fundamentais para a extração de minerais/metais e a remoção de contaminantes, promovendo a sustentabilidade na gestão de resíduos de mineração. Em termos de aplicações, a utilização de resíduos de mineração na agricultura foi a mais citada, representando 36% dos artigos. Esta aplicação destaca a oportunidade de se usar resíduos tratados como fertilizantes e corretivos para solos agrícolas, reduzindo a pressão pela exploração de novas jazidas minerais e promovendo práticas agrícolas sustentáveis. A construção civil (20%) e o aproveitamento energético (16%) também foram áreas de destaque, mostrando como os resíduos de mineração podem ser incorporados em materiais de construção e utilizados para geração de energia, respectivamente.

A análise bibliográfica nos forneceu uma visão abrangente das tendências e inovações na gestão de resíduos de mineração, destacando a importância da colaboração internacional e a contribuição significativa de universidades e centros de pesquisa. As informações coletadas e analisadas nesta etapa foram essenciais para a construção de uma rota tecnológica que alinhe as tendências emergentes com as necessidades do mercado e promova a sustentabilidade no setor de mineração.



CAPÍTULO 5 – DEFINIÇÃO DA ESTRATÉGIA DE BUSCA EM PATENTES CONCEDIDAS

5.1 METODOLOGIA PARA A SELEÇÃO DAS ESTRATÉGIAS DE BUSCA DE PATENTES

A análise do documento de patentes é parte fundamental do acompanhamento do processo de uma nova tecnologia na visão das empresas. As patentes são excelentes indicadores de inovação, produtividade, estrutura e desenvolvimento de uma nova tecnologia. A patente serve como um meio de disseminação tecnológica, pois o estado da arte é um componente crucial no seu conteúdo. No relatório descritivo, esse estado deve ser exposto de maneira clara, frequentemente ilustrado por citações de outras patentes ou diversas literaturas, com o intuito de esclarecer o avanço no desenvolvimento tecnológico solicitado no pedido de patente.

Entre as diversas bases de dados em que as patentes podem ser consultadas, destacam-se: Instituto Nacional da Propriedade Industrial (Inpi), no Brasil; Escritório de Marcas e Patentes dos Estados Unidos (USPTO); Escritório Europeu de Patentes (EPO); Escritório japonês de Patentes (JPO); Escritório Chinês de Patentes (SIPO); e Organização Mundial da Propriedade Intelectual (PATENTSCOPE).

Em função da grande quantidade de dados e patentes existentes, é importante alinhar a busca nas bases existentes com a metodologia de prospecção, a fim de integrar os diferentes mercados à fonte de consulta. Utilizamos o *software* de busca de patentes *Derwent Innovation - Clarivate*, ferramenta privada, contratada pelo SENAI – Departamento Regional do Pará.

5.1.1 Seleção das estratégias

Conforme mencionado, a busca de patentes foi realizada por meio do *software Derwent Innovation-Clarivate*, utilizando a mesma combinação de palavras utilizadas na busca de documentos pela plataforma *Scopus-Elsevier*: *mining AND tailings OR mine AND tailings) AND (mining AND waste OR mine AND waste) AND recycling AND reuse AND “circular economy”*. No total, foram encontradas 768 patentes a partir de 2006, sendo selecionadas 187 mais aderentes ao tema da rota tecnológica. A análise do subgrupo identificou 99 patentes ativas (*alive*) e 88 arquivadas (*dead*).

Após análise minuciosa das patentes ativas, foram selecionadas 84 para a construção da rota tecnológica, sendo as demais descartadas por estarem repetidas ou fora do escopo. É crucial destacar que foram selecionadas somente as patentes com enfoque no tratamento e na aplicação de resíduos de mineração.

5.2 CONCLUSÃO DAS ESTRATÉGIAS

Conforme exposto anteriormente, foram encontradas 768 patentes, filtradas para 187 e selecionadas as 84 patentes mais relevantes sobre o tema de reutilização de resíduos de mineração, no contexto da economia circular. Este banco de 84 patentes foi considerado para as análises macro, meso e micro, descritas nos próximos tópicos.



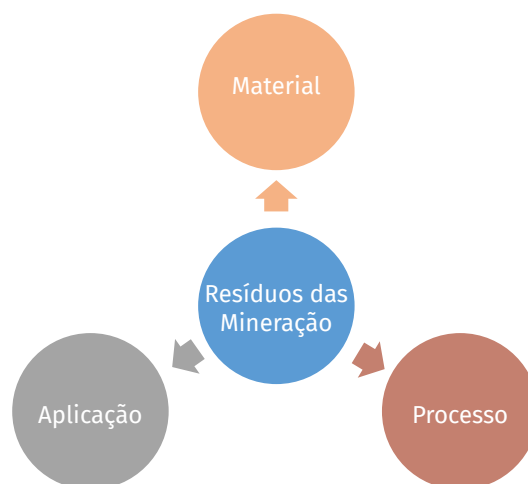
CAPÍTULO 6 – ETAPA PROSPECTIVA – PATENTES CONCEDIDAS

A partir da seleção das patentes e com base na metodologia de prospecção tecnológica apresentada no capítulo anterior, as informações foram analisadas no nível macro, meso e micro.

- **Nível macro:** a análise dos documentos ocorreu de acordo com os seguintes critérios:
 - País: análise da distribuição das patentes depositadas por país de origem do depositante. Ressalta-se que existem documentos depositados em cotitularidade, envolvendo múltiplas nacionalidades.
 - Análise temporal: análise da distribuição do número de patentes em um intervalo temporal.
 - Tipo de instituição: análise da distribuição das patentes de acordo com o tipo de instituição depositante, sendo eles: empresa, universidade, institutos de pesquisa, entre outros.

- **Nível meso:** nesse nível, as patentes foram organizadas de acordo com as categorias estabelecidas relativas ao tema, denominadas de taxonomias/*drivers* identificadas na Figura 13. O diagrama das patentes também teve por base as taxonomias previamente identificadas na etapa dos artigos.

Figura 13 - Diagrama de taxonomias meso

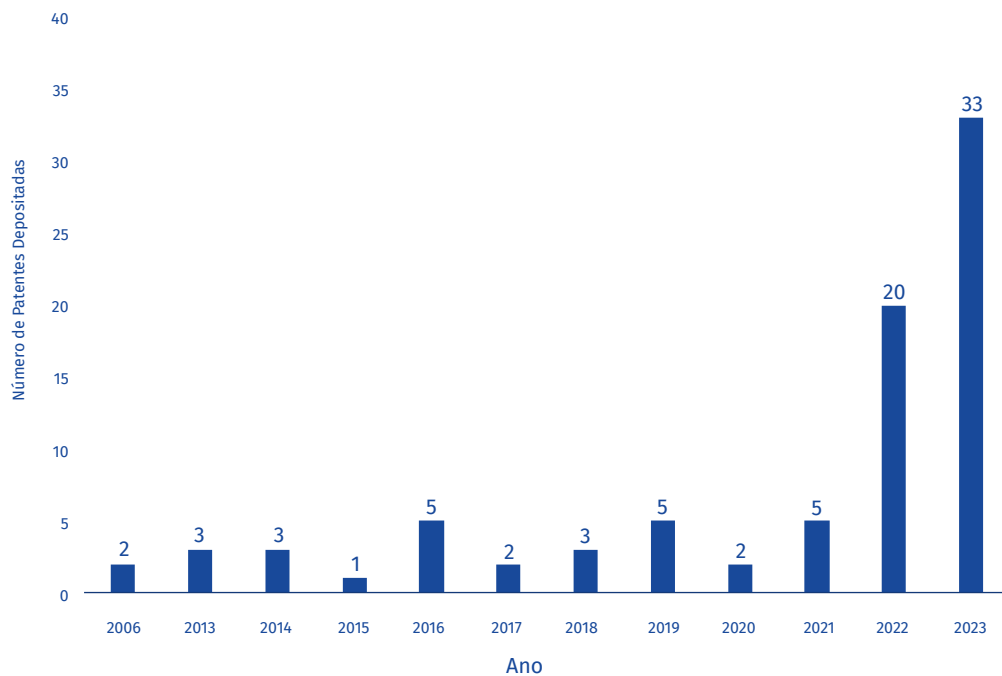


Fonte: elaboração própria.

6.1 RESULTADOS DAS PATENTES REQUERIDAS E/OU VIGENTES

6.1.1 Análise macro

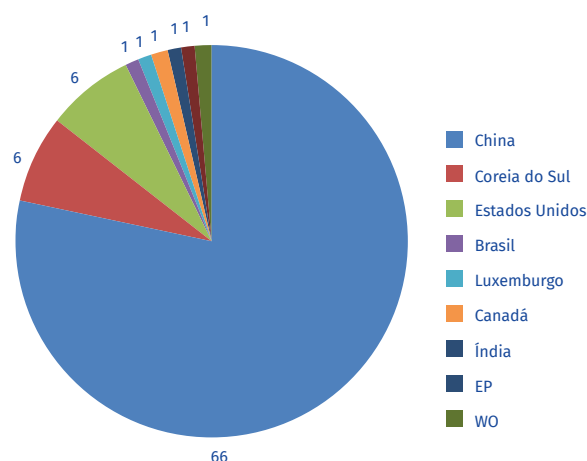
A partir da análise das patentes (Figura 14), observou-se a distribuição temporal das 84 patentes selecionadas entre os anos de 2006 e 2023. Foi possível observar um crescimento significativo no número de patentes sobre o tema nos anos de 2022 e 2023.

Figura 14 - Número de patentes depositadas entre 2006 e 2023

Fonte: elaboração própria.

Na base de dados analisada, foi possível constatar a China como o país com maior número de patentes nesse tema, possuindo 66 patentes, seguida por Coreia do Sul (6), Estados Unidos (6), Brasil (1), Canadá (1), Luxemburgo (1), Índia (1), WO (1) e EU (1), conforme demonstrado na Figura 15.

Figura 15 - Distribuição do número das patentes por país de origem



Fonte: elaboração própria.

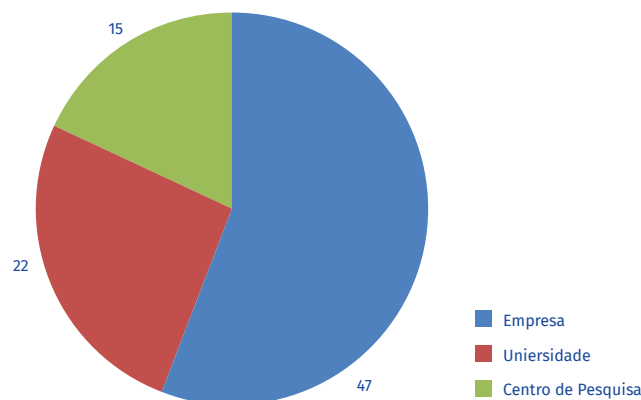
Como exemplo de patente chinesa, pode-se citar a CN214863156U (2019), desenvolvida pela Henan Jianbo New Material Technology CO, denominada: *An environment-friendly device for manufacturing building material by mine tail waste*. Na patente foi proposto um dispositivo ecológico para fabricação de materiais utilizados na construção civil. A empresa Shandong Dayuan Ind CO LTD, na patente CN114716199A (2022), *Preparation of silicon dioxide-gypsum composite material and application of silicon dioxide-gypsum composite material in mine*, descreveu a formulação de um concreto de altíssimo desempenho utilizado na construção de pontes, contendo a mistura de cimento, sílica ativa, areia de quartzo, estêreis de minas e resíduos de construção, com a adição de ácido policarboxílico, agente redutor de água, agente antiespumante, agregado fino de estéril e compactação. Além dessas, também destaca-se a patente CN106000624A (2023), denominada: *A gold tail ore waste recycling method*, depositada pela empresa Shandong Jiuqu Shengji New Building Material Co. Ltd, apresentando um método inovador de reciclagem de resíduos da mineração do ouro, a partir da flotação do quartzo e feldspato com dodecylamine.

Em relação aos players sul-coreanos, há a patente KR1351560B1 (2022), depositada na Coreia do Sul, pela empresa Doosan Enerbility Co., Ltd, denominada *Concrete binder composition for improving early strength, concrete for improving early strength using same, and manufacturing method thereof*, que propõe um novo material de preenchimento das minas fechadas, produzido a partir de rejeitos de ferro, pó de escória, cinzas volantes e clínquer de cimento. Já a University of Seoul possui a patente KR1661133B1 (2016) *Biomineralization microorganisms for cementation of soil and method for cementation of soil using same*, descrevendo um método de biomineralização de solo, com isolados microbianos obtidos de rejeitos de mineração contaminados com elementos potencialmente tóxicos.

A patente brasileira identificada na busca *Processo para produzir agregados para argamassas ou cimentos a partir de rejeito de mineração* – BR BRPI1104410B1 (2021) – foi concedida para a mineradora AngloGold Ashanti, Córrego do Sítio Mineração S.A e descreve um processo para produção de cimento e argamassa a partir de rejeitos da mineração.

Quanto ao último nível da análise macro, cerca de 56% das patentes analisadas foram concedidas para empresas, seguidas por universidades (26,2%) e centros de pesquisas públicos e privados (17,8%).

Figura 16 - Distribuição do número de patentes por tipo de instituição



Fonte: elaboração própria.

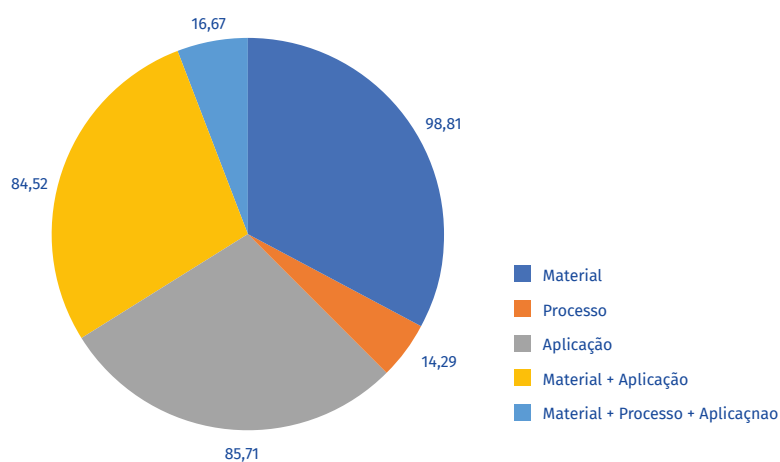
6.1.2 Análise Meso e micro

As taxonomias meso e micro foram as mesmas utilizadas para a classificação dos artigos científicos:

- **Material:** quando o objetivo do artigo se relacionava ao tipo de material proveniente do resíduo de mineração.
- **Processo:** quando o objetivo do artigo se relacionava a um processo específico utilizado no tratamento e reúso dos resíduos de mineração.
- **Aplicação:** quando o objetivo do artigo se relacionava ao tipo de reúso dos resíduos de mineração tratados.

Na Figura 17, pode ser visualizada a distribuição das categorias pelas seguintes taxonomias: material (98,81%); processo (14,29%), aplicação (85,71%), material + aplicação (84,52%) e material + processo + aplicação (16,87%).

Figura 17 - Principais taxonomias identificadas nas patentes



Fonte: elaboração própria.

Como exemplo de patente apresentando a taxonomia meso **material**, destaca-se: *An environment-friendly archaic blue brick and production method*, da Beijing Jiangong Resources Circulation. Nessa patente foi produzido um material para uso na construção a partir de resíduos de silício policristalino e uma mistura com rejeitos de mineração e cal (CN114873969A, 2022).

A patente *Multi-metal vulcanized mine mining, smelting process of solid waste comprehensive utilization method*, da Hubei Polytechnic University, descreve um processo de obtenção de material para ser usado na construção, composto por areia e cascalho produzidos a partir de rejeito, utilizando um processo de lixiviação para atestar a segurança do composto, em atendimento à legislação chinesa (CN109261689A, 2019).

Na patente CN115477559A (2022), *Novel soil improvement microbial agent as well as preparation method and application*, da Beijing Forestry University, foi desenvolvido um inoculante microbiano a partir de um processo utilizando lodo de jardim, que visa melhorar a fertilidade e diversidade de microrganismos benéficos para saúde do solo e o aumento da produtividade.

Aprofundando a análise das categorias, é possível realizar o desdobramento e identificar o tipo de material mais frequente como objeto de estudo das patentes (Tabela 7). Na taxonomia **material**, a classe denominada genericamente como: **resíduos de mineração** correspondeu a 36,90%, sendo considerada como um único ou uma mistura de diferentes tipos de resíduos, sem uma especificação clara dos autores. O segundo tipo de material corresponde a **escória** (19,05%), seguido de cinzas (9,52%), resíduos da mineração de carvão (8,33%), resíduos da mineração de ferro (8,33%) e resíduos da mineração de ouro (7,14%). Os resultados da

classificação meso **material** nas patentes foram bastante diferentes da mesma categoria de classificação dos artigos científicos, que tiveram o ferro como o material mais citado. Essa é nítida diferença no foco das pesquisas acadêmicas, que permitem a visualização de um horizonte de longo, e das patentes, cuja informação reflete o curto prazo. Nessa análise, as tecnologias para o tratamento de resíduos em geral, escórias e resíduos da mineração de ouro já estão mais maduras e próximas das aplicações comerciais.

Tabela 7 - Tipos de materiais (resíduos de mineração) identificados na taxonomia material

Material – resíduos	Patentes (%)
Resíduos de mineração	36,90
Escória	19,05
Ouro	10,71
Cinzas	9,52
Carvão	8,33
Ferro	8,33
Ouro	7,14
Argilas / caulim	5,95
Granitos / pedras	5,95
Calcário / gesso	4,76
Elementos potencialmente tóxicos	3,57
Cobre	3,57
Tungstênio	2,38
Enxofre	1,19
Molibdênio	1,19
Bauxita	1,19

Fonte: elaboração própria.

Na categoria **processo**, a Tabela 8 apresenta os principais processos usados no tratamento e reúso do material proveniente da mineração, destacam-se a: “calcinação” (5,95%), “flotação” (4,76%) e “tratamento microbiológico” (4,76%), seguido de “moagem” (3,57%), “oxirredução” (2,38), entre outros, como: “peletização”, “lixiviação”, “mistura de resíduos” e “sinterização”.

Tabela 8 - Principais processos identificados nas patentes

Processo	Patentes (%)
Calcinação	5,95
Flotação	4,76
Tratamento microbiológico/inoculação	4,76
Moagem	3,57
Oxirredução	2,38
Peletização	2,38
Lixiviação	1,19
Mistura de resíduo	1,19
Sinterização	1,19

Fonte: elaboração própria.

Na categoria **aplicação** (Tabela 9), destacam-se o uso desses materiais em três maiores aplicações: “concreto/cimento” (23,81%), “materiais de preenchimento de cava” (15,48%) e “recuperação ambiental” (14,29%). As demais aplicações são, ainda, aderentes a esses principais blocos de aplicação.

Tabela 9 - Tipos de aplicação identificadas na taxonomia

Processo	Patentes (%)
Concreto/cimento	40,47
Materiais de preenchimento	15,48
Recuperação ambiental	14,29
Novos materiais	10,71
Melhoria do solo	9,52
Recuperação de metais	5,95

Fonte: elaboração própria.

6.2 CONCLUSÕES SOBRE A ETAPA PROSPECTIVA DE PATENTES EM PROCESSO DE REGISTRO OU EM VIGÊNCIA

A análise temporal demonstrou um crescimento no número de patentes, a partir de 2022, visando à produção de novos materiais para aplicações em áreas, como construção civil, preenchimento em cavas, taludes, recuperação ambiental, entre outros. No que se refere à origem de inovação, a China é o principal país com patentes depositadas, correspondendo a 78,6% das patentes, e as empresas tiveram o maior número de patentes concedidas (56%).



CAPÍTULO 7 – APRESENTAÇÃO DO ROADMAP TECNOLÓGICO

Neste capítulo, será apresentada a análise do *roadmap* tecnológico de “novas tecnologias para o processamento de resíduos da mineração”, baseada nas taxonomias e informações obtidas nas etapas prospectivas de artigos e patentes vigentes.

Os dados coletados durante a análise foram representados pelas logomarcas dos players que publicaram os documentos, seja individualmente ou em parceria com outras instituições. As parcerias foram destacadas com logomarcas envolvidas por um quadrado vermelho. Além disso, diferentes documentos com foco similar, ou seja, com as mesmas taxonomias, tiveram suas logomarcas envolvidas por um quadrado preto para facilitar a visualização no *roadmap*. Quando um player possuía múltiplos documentos, foi indicado por múltiplas setas que se originavam de diferentes posições verticais da mesma logomarca.

O *roadmap* incluiu todas as divisões temporais: estágio atual, curto prazo, médio prazo e longo prazo. Nas próximas seções, cada um desses estágios será analisado individualmente. Posteriormente, serão identificados os principais *players* do setor e os principais focos dos documentos em cada horizonte temporal.

- **Estágio atual:** o estágio atual referiu-se às tecnologias e práticas em uso no tratamento e reúso de resíduos de mineração. Este estágio abrangeu as soluções e metodologias que estão implementadas e operacionais nas empresas e instituições. As tecnologias no estágio atual foram amplamente adotadas e validadas, tendo demonstrado eficácia e viabilidade em ambiente real.
- **Curto prazo:** o curto prazo refere-se às inovações e tecnologias que estão em fase de desenvolvimento avançado ou em processo de implementação e que serão operacionais nos próximos um a três anos. Nessa fase, as avaliações são realizadas nas patentes concedidas. Essas tecnologias geralmente estão em fase de testes finais, com planos claros para adoção comercial e operacional iminente. O foco está na melhoria incremental de práticas existentes ou na introdução de novas soluções que já passaram pela fase de pesquisa e desenvolvimento inicial.
- **Médio prazo:** o médio prazo cobre um horizonte temporal de três a sete anos, em que as tecnologias e inovações, ainda, estão em fases intermediárias de desenvolvimento. Essas inovações podem estar em fase de protótipo ou em estágios de testes preliminares. A implementação comercial dessas tecnologias é prevista, mas, ainda, depende de avanços adicionais em pesquisa e desenvolvimento, bem como de testes de viabilidade mais extensivos.

- **Longo prazo:** o longo prazo refere-se às tecnologias emergentes que estão em fases iniciais de pesquisa e desenvolvimento. As informações são baseadas em artigos científicos cuja implementação prática é esperada para além de sete anos. Essas inovações são mais baseadas em hipóteses e geralmente envolvem novas abordagens ou conceitos que, ainda, não foram testados extensivamente. O desenvolvimento dessas tecnologias depende de avanços significativos em ciência e engenharia e pode incluir a criação de novas infraestruturas ou mudanças regulatórias.

Ao analisar cada um desses estágios, identificam-se as tendências tecnológicas e os players que estão liderando a inovação no setor de tratamento e reúso de resíduos de mineração, fornecendo uma visão clara do futuro desenvolvimento e da implementação dessas tecnologias.

7.1 ESTÁGIO ATUAL

O estágio atual apresenta os players que já atuam no desenvolvimento de iniciativas ou práticas relativas ao tratamento e reúso de resíduos de mineração. Essas informações foram coletadas a partir de artigos científicos aplicados, mídias especializadas, relatórios anuais da empresa. As iniciativas identificadas envolvem ampla gama de tecnologias e práticas inovadoras, refletindo os esforços contínuos dos players para aprimorar as tecnologias utilizadas no tratamento e reúso de resíduos de mineração.

Na Figura 18, pode-se visualizar um recorte desse estágio temporal, em que são demonstrados os principais players atuantes no tema de resíduos de mineração no tempo presente.

Nesse estágio, destaca-se o emprego de resíduos de ferro, cobre e ouro, cinzas/carvão e mistura de resíduos como materiais-alvo das empresas. A maioria utiliza os processos de calcinação, flotação, agregados e reatores como forma de processo para tratamento e reúso desses resíduos, sendo voltados para aplicação no tratamento de efluentes na mineração, materiais de preenchimento de cavas e recuperação ambiental. Na Figura 19, é demonstrado que a maioria dos players são de origem chinesa e norte-americanos.

Entre as empresas selecionadas, destaca-se a Veolia, que atua com tecnologias de tratamento de resíduos e recuperação de metais a partir de resíduos de mineração. A empresa desenvolve soluções integradas que combinam tecnologias de purificação de água, tratamento de resíduos sólidos e recuperação de recursos. As inovações da Veolia são focadas em reduzir a pegada ambiental das operações de mineração, promovendo a reutilização de água e a recuperação de metais valiosos.¹⁰

Já a Toray, outra empresa de destaque, é conhecida por seus materiais avançados e tecnologias de membranas. A empresa oferece produtos para adsorção de contaminantes e purificação de água, aplicando suas inovações em membranas para tratamento de águas residuais e recuperação de metais. As tecnologias de Toray são amplamente utilizadas em processos de filtração e purificação, contribuindo para a melhoria da qualidade da água em operações de mineração.¹¹ Recentemente, a empresa desenvolveu um tipo de membrana de nanofiltração para recuperação do lítio a partir da reciclagem de baterias.¹²

A empresa FLSmidth, desenvolve tecnologias de lixiviação e recuperação de metais. A empresa oferece equipamentos e sistemas para extração eficiente de metais e minerais, incluindo técnicas de lixiviação com cianeto, biolixiviação e recuperação de metais valiosos. As soluções da FLSmidth são projetadas para maximizar a recuperação de recursos e minimizar o impacto ambiental, promovendo práticas sustentáveis na mineração.¹³

A Empresa BASF desenvolve produtos químicos para o tratamento de resíduos de mineração e recuperação de metais. A empresa oferece soluções químicas inovadoras para a extração e purificação de metais, aplicando tecnologias avançadas em processos de lixiviação e adsorção.¹⁴

Por fim, a Empresa Aquatech é reconhecida por suas soluções de tratamento de água, desenvolvendo tecnologias para recuperação de metais e purificação de águas residuais de mineração. As soluções da Aquatech incluem sistemas de dessalinização, recuperação de água e tratamento de águas residuais, focando no ciclo de beneficiamento da mineração.¹⁵

10 Para mais detalhes, consultar o site: <https://www.veolia.com/en/climate-change/CO2-emissions/mining-industry-our-solutions-sustainable-future>.

11 Para mais detalhes, consultar o site: <https://www.water.toray/>.

12 Para mais detalhes, consultar o site: <https://valor.globo.com/empresas/noticia/2024/03/19/japonesa-toray-desenvolve-membrana-para-reciclar-bateria-de-ltio.ghml>.

13 Para mais detalhes, consultar o site: <https://www.flsmidth.com/en-gb/products/precious-metals-recovery/elution-strip-systems>.

14 Para mais detalhes, consultar o site: https://energy-resources.basf.com/global/en/mining_solutions.

15 Para mais detalhes, consultar o site: <https://www.aquatech.com/industries/metals-and-critical-minerals/metals-mining-and-recovery>.

7.2 CURTO PRAZO

Neste estágio, os players identificados atuam principalmente com misturas de resíduos, além de resíduos de ferro, cobre e ouro, cinzas/carvão, sendo observado também atuação com argilas. Os processos de lixiviação, biolixiviação, calcinação, misturas reacionais e moagem são utilizadas para o uso concreto/cimento, novos materiais, melhoria do solo e recuperação de metais (Figura 19). A maioria dessas empresas continua sendo de origem chinesa e norte-americana, destacando-se várias companhias que estão na vanguarda dessas inovações.

Figura 19 - Recorte do curto prazo do roadmap tecnológico

RoadMap Tecnológico - Tratamento e Reuso de Resíduos da Mineração									
Curto Prazo									
Material	Ferro								
	Cobre								
	Escória								
	Ouro								
	Cinzas								
	Carvão								
	Pedras / Granitos								
	Argilas								
	Alumínio								
	Mistura de Resíduos								
Processo	Lixiviação								
	Microbiológico								
	Adsorção								
	Estabilização								
	Agregados / Argamassas								
	Solidificação								
	Reatores / Misturadores								
	Calcinção								
	Moagem								
	Flotação								
Aplicação	Recuperação Ambiental								
	Concreto /Cimento								
	Novos Materiais								
	Materiais de Preenchimento								
	Melhoria de Solo								
	Recuperação de Metais								
Tratamento de águas residuais									

Fonte: elaboração própria.

Entre as empresas selecionadas, Anglogold Ashanti SA está focada no tratamento de resíduos para produção de agregados para cimento ou argamassa em etapas de processamento que envolvem britagem, moagem, concentração por gravidade e rejeitos de flotação de minério, em que a etapa de flotação é utilizada para produzir agregados para argamassa ou cimento, conforme evidenciado pela patente (BRPI1104410B1, 2021).

Camel CO LTD (KR2016071252A, 2016) desenvolveu um condicionador de solos utilizando subprodutos de mineração, tais como: rejeitos de molibdênio, solo granítico e minério, que são misturados e podem ser utilizados em ambiente agrícola ou paisagístico.

Univ Qingdao Technology (CN116217165A, 2023) desenvolveu uma patente que descreve um material para ser utilizado em preenchimento de cavidades em ambiente de mineração de ferro. O material é composto por resíduos de ferro, agente de cura, cinzas de carvão, pó mineral, cimento, entre outros.

A Guangzhou Marine Geological Survey (CN115532427A, 2022) desenvolveu métodos para reuso de rejeitos de minérios de cobre que possam ser utilizados em diferentes aplicações industriais, entre os usos, destacam-se a utilização na indústria de cimento como produto de eliminação de incrustação, assim como possível recuperação de metais preciosos.

A Yejing Kekuang Qingdao Technology Dev CO., detentora da patente (CN116574342A, 2023), investe em materiais compósitos verdes de aço-plástico, fabricados a partir de resíduos ultrafinos (pós) utilizados como ganga ou rejeitos de metalurgia, podendo ser utilizado na indústria de construção.

Huaiyin Technology Institute (CN114538872B, 2022) desenvolveu um concreto ecológico utilizando fosfogesso e resíduos de agregados e pedras, com agentes orgânicos, tais como éter, e outros produtos, como pó de borracha e retardador de proteína de gesso.

A Shanxi Tiandi Coal Mechanical Equip CO desenvolveu a patente (CN114197503A, 2022), que utiliza resíduos da mineração de carvão para construção de valas de drenagem ao redor da área minerada.

Univ Chongqing (CN114538876B, 2023) descreve um método de mineralização com monóxido de carbono, compreendendo a mistura de resíduos sólidos industriais/mineração com nitrato de amônio, para criação de um material cimentício.

No curto prazo, espera-se que o mercado veja um aumento na implementação dessas tecnologias, com foco em melhorar a viabilidade comercial, a eficiência nos processos de recuperação de metais e a sustentabilidade dos processos de reuso de rejeitos de mineração. A adoção de tecnologias para produção de novos materiais com mistura de resíduos para emprego – como materiais cimentícios, condicionador de solo, e aditivos em cimentos – devem crescer, impulsionada pela necessidade de práticas mais sustentáveis no setor de mineração.

7.3 MÉDIO PRAZO

Neste estágio temporal, as inovações e tecnologias estão em fases intermediárias de desenvolvimento, com previsão de implementação operacional nos próximos três a sete anos. Essas inovações também são baseadas em patentes que podem estar em fase de protótipo ou em estágios de testes preliminares, com uma expectativa de que avanços adicionais em pesquisa e desenvolvimento sejam necessários para sua viabilidade comercial. O foco está em tecnologias que, ainda, estão sendo refinadas, mas que prometem trazer melhorias significativas para o tratamento e o reúso de rejeitos de mineração.

Nesse estágio, os players estão atuando em materiais denominados como misturas de resíduos, argilas e ouro, aplicando processos, microbiológicos, calcinação, moagem, flotação, agregados e aplicando em concreto/cimento, novos materiais, melhoria de solo, recuperação ambiental e recuperação de metais (Figura 20).

Entre as instituições, destacam-se:

A Xinjiang Tekuo Piao Zheng (Nantong) CO. LTD., com a patente (CN102875044B, 2013), é destaque no desenvolvimento de tecnologias voltadas para materiais utilizados na construção civil. A patente utiliza agregados de rocha vulcânica, rejeitos de minas de argilas e resíduos de minerais, como opala e montmorillonita.

A Guangdong Meizhou Quality Measurement, detentora da patente (CN115057669A, 2018), foca em tecnologias avançadas para o tratamento de rejeitos de calcário, cobre, resinas, entre outros, para uso como material cerâmico, principalmente na produção de tijolos.

A Northeastern University (Boston, MA), com a patente (US20230243259A1, 2023), está na vanguarda do desenvolvimento de sistemas de mineração de fluidização mecânica-micro-ondas. Essa patente descreve um sistema de mineração que utiliza micro-ondas de alta potência para derretimento focalizado e pré-fissuração de minério, incorporando um sistema de mineração mecânica equipado com um gerador de micro-ondas. A inovação foca na otimização dos processos de mineração, permitindo uma extração mais eficiente e sustentável de metais do minério, contribuindo para a proteção ambiental e melhoria na eficiência dos processos industriais.

Beijing Jiangong Resources Circulation (CN114873969A, 2022) desenvolve tecnologias voltadas à fabricação de tijolos coloridos, com base no uso de rejeitos como matéria-prima para uso como agente corante.

A Southeast University, detentora das patentes (CN104591666A, 2015), está investindo em inovações que utilizam resíduos de silício policristalinos para produção de novos materiais de construção.

A Yantai Zhiben Intellectual Property Oper, com a patente (CN105777065B, 2018), produziu um tijolo permeável à água de rejeitos de minas de ouro, preparado através de pré-tratamento de rejeitos de minas de ouro, impregnação em líquido residual de perfuração de petróleo, mistura de componentes específicos de matéria-prima, envelhecimento, granulação, moldagem, sinterização e resfriamento.

Univ Beijing SCI & Technology (CN114550839A, 2022) descreve um método de otimização para utilização, em larga escala, de um material de preenchimento constituído de escória de níquel e areia de rejeito, aplicando testes reológicos para avaliação do material.

Yang YA-LI (2023) desenvolveu um catalisador produzido a partir de rejeito de mina de ouro, sílica gel, alumina, carvão ativado, e uso de um composto contendo cálcio e um composto contendo ferro para ser empregado em processos catalíticos de conversão de resíduos plásticos em novos produtos de valor agregado.

Univ Cent South (CN114538868A, 2022) inovaram ao produzir um material de preenchimento para ser aplicado em áreas mineradas, composto por cimento e resíduos da mineração de

lítio. Esse material é produzido a partir da mistura de rejeitos de espodumênio e pedras residuais e escória de lítio.

Jiangxi Geological Bureau Experimental (CN116655072A, 2023) desenvolveu um dispositivo de dispersão e dissolução de metais pesados em resíduos sólidos de minas.

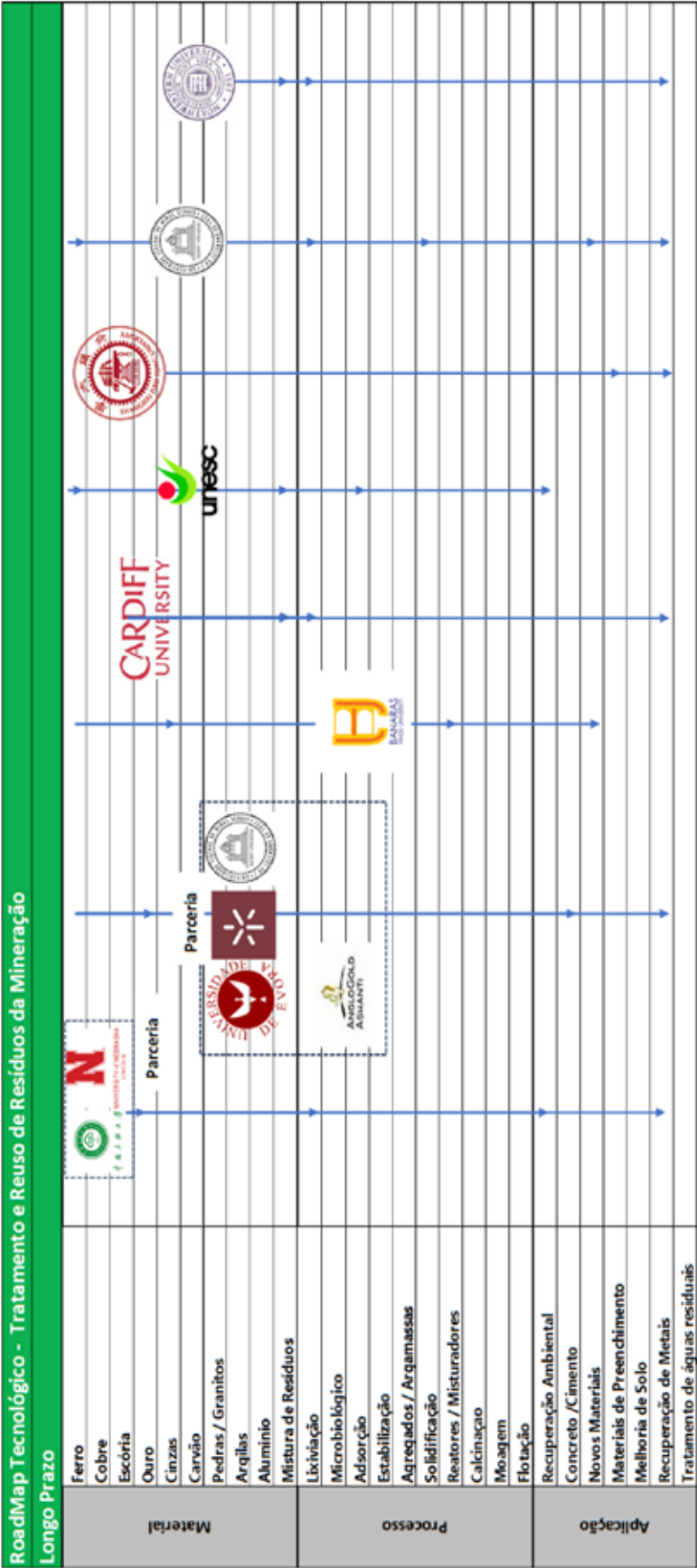
No médio prazo, espera-se que o mercado veja um aumento significativo na adoção dessas tecnologias, com avanços em pesquisa e desenvolvimento que tornam viáveis as soluções prototipadas. As tecnologias de lixiviação avançada, biolixiviação, estabilização e adsorção estarão mais próximas de se tornarem operacionais, promovendo uma gestão de resíduos de mineração mais eficiente e sustentável. O foco será em maximizar a recuperação de metais valiosos e minimizar os impactos ambientais associados à mineração.

7.4 LONGO PRAZO

Estão representados no roadmap (Figura 21) os players observados nos artigos científicos vinculados principalmente a institutos e/ou universidade. Esses estudos referem-se principalmente a materiais, como ferro, cobre, escória, ouro, aplicados nos processos já mapeados anteriormente – tais como lixiviação, biolixiviação/tratamento microbiológico, adsorção, estabilização – e utilizados em recuperação ambiental, novos materiais.

Essas pesquisas são altamente experimentais, em geral em nível de maturidade mais baixo, como, por exemplo, em fase de estado da arte e demonstração de prova conceitual.

Figura 21 - Longo prazo do roadmap tecnológico



Fonte: elaboração própria.

Entres os players identificados, destacam-se as universidades a seguir:

A Banaras Hindu University (2023), na Índia, está pesquisando tecnologias para o reúso de estêreis de carvão, como cinzas volantes ou rejeitos, convertendo-os em materiais avançados com propriedades térmicas específicas, com potencial para uso na fabricação de espumas de alta resistência usadas em aplicações industriais, utilizando a técnica de termoespuma (Pandey *et al.*, 2023).

A Universidade do Extremo Sul Catarinense (Unesc) explora um processo semelhante ao de Fenton para descoloração de efluentes têxteis usando rejeitos de pirita, com foco na influência do ferro dissolvido. Este estudo aborda a aplicação de rejeitos de pirita, ricos em ferro, como catalisadores em processos oxidativos avançados para tratar efluentes têxteis, investigando como o ferro dissolvido dos rejeitos afeta a eficiência da descoloração e a degradação de poluentes (de Oliveira Guidolin *et al.*, 2023).

Na Cardiff University, pesquisadores propõem uma abordagem inovadora para a gestão de resíduos ricos em minerais, em que os materiais são temporariamente armazenados e tratados em aterros projetados para futura mineração. Esse conceito visa a recuperar recursos valiosos, como metais críticos, e promover a sustentabilidade, transformando resíduos em agregados reutilizáveis, em vez de simplesmente aterrá-los. A estratégia busca alinhar a gestão de resíduos com os princípios da economia circular (Sapsford *et al.*, 2023).

A Shanghai Jiao Tong University analisa o fluxo de fósforo resultante das atividades humanas, desde a mineração até o uso em diferentes setores, como agricultura e indústria. O objetivo é identificar oportunidades para recapturar e reutilizar o fósforo de maneira mais eficiente, reduzindo a dependência de recursos naturais e minimizando o impacto ambiental. O estudo busca contribuir ao desenvolvimento de uma economia mais circular no Marrocos, otimizando o uso de fósforo e promovendo práticas sustentáveis de gestão de recursos (Houssini *et al.*, 2023).

Vale ressaltar a parceria internacional entre as universidades como importante fator para o alcance de novas tecnologias. As Universidades de Évora, de Minho e Federal de Minas Gerais (UFMG), em parceria com a mineradora AngloGold Ashanti, estão atuando em conjunto no estudo que abrange a geoquímica e mineralogia de rejeitos auríferos, que utiliza modelagem 3D e análises metalúrgicas para avaliar o potencial de reaproveitamento desses rejeitos e sugere a reutilização desses materiais como agregados para a construção civil e recuperação de outros metais (Lemos *et al.*, 2023b).

Outra parceria a ser destacada ocorre entre a South-Central Minzu University (China) e University of Nebraska-Lincoln (EUA), que colaboram em pesquisas avançadas sobre o comportamento de lixiviação e a ocorrência de elementos metálicos em escória de cobre.

A parceria destaca experimentos de lixiviação dependentes de pH e modelagem geoquímica, com o objetivo de melhorar a eficiência na recuperação de metais e mitigar os impactos ambientais associados à escória de cobre (Wang *et al.*, 2023).

No longo prazo, espera-se que o mercado veja a implementação de tecnologias, resultantes de anos de pesquisa e desenvolvimento. As inovações nessa fase incluem novas metodologias e materiais que atendem ao tratamento e ao reúso de resíduos da mineração. A adoção dessas tecnologias será crucial para enfrentar os desafios ambientais e otimizar a recuperação de recursos minerais, promovendo uma mineração mais sustentável e eficiente.



CAPÍTULO 8 – ANÁLISE ESTRATÉGICA PÓS-ROADMAP TECNOLÓGICO

Neste capítulo serão avaliadas as relações (parcerias e empresa com mesmo foco) relevantes entre os players em termos de direcionamento sobre mercado, produto e tecnologia, com o objetivo de avaliar as similaridades entre os players e as taxonomias.

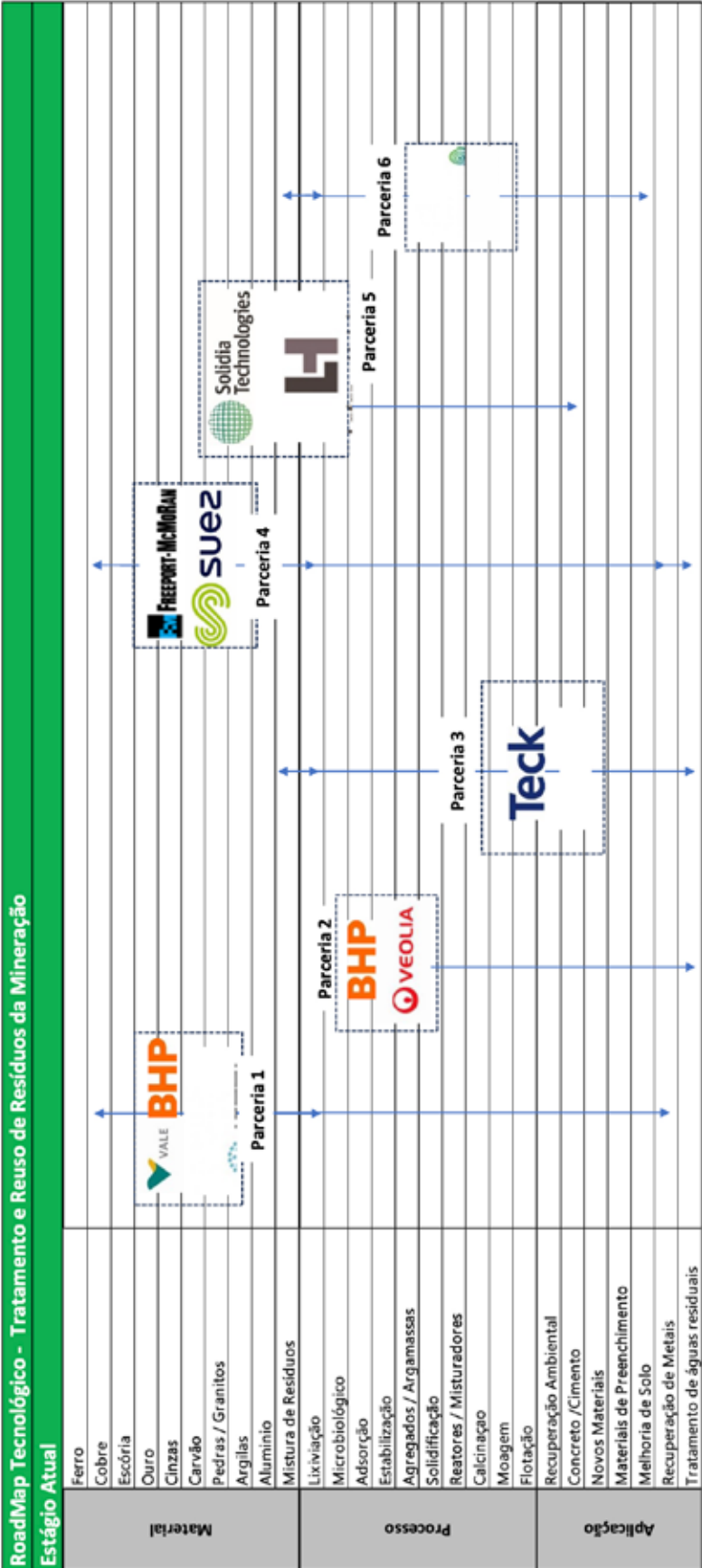
8.1 ANÁLISE VERTICAL

Os clusters de parcerias entre os players analisados colaboram estrategicamente para o desenvolvimento e a implementação das tecnologias mapeadas. Além disso, cluster de mesmo foco possuem visão comum quanto ao futuro do processo tecnológico. Os players serão avaliados em relação às suas tendências drivers “purificação de águas residuais”, “aplicação de resíduos na agricultura”, “construção”, “recuperação de metais valiosos”, considerando os diferentes estágios temporais: estágio atual, curto, médio e longo prazo.

8.1.1 Estágio atual

Neste período, foram identificadas sete parcerias entre diversos tipos de players, conforme ilustradas na Figura 22.

Figura 22 - Clusters de parcerias do estágio atual



Fonte: elaboração própria.

8.1.1.1 Clusters de parcerias do estágio atual

- **Parceria 1:** a Vale e a BHP formaram uma parceria estratégica com a Jetti Resources, uma empresa inovadora em tecnologias de extração de cobre, para o desenvolvimento de novas técnicas de lixiviação. Essa colaboração visa a aplicar a tecnologia de lixiviação catalítica da Jetti para melhorar a recuperação de cobre a partir de rejeitos de mineração e minérios de baixo teor. A tecnologia da Jetti permite a extração eficiente de cobre de depósitos que anteriormente eram considerados inviáveis, promovendo a sustentabilidade e a eficiência no uso dos recursos naturais.¹⁶
- **Parceria 2:** BHP e Veolia estão colaborando para implementar tecnologias avançadas de tratamento de águas residuais em operações de mineração. A parceria visa não apenas a reduzir a poluição, mas também maximizar a reutilização da água, um recurso vital em locais de mineração onde a disponibilidade de água é limitada.¹⁷
- **Parceria 3:** Teck Resources e BQE Water estão colaborando em projetos de tratamento de águas residuais, focados na remoção de selênio e outros contaminantes. Essa parceria, evidenciada pelo contrato-piloto de remoção de selênio, visa a melhorar a qualidade da água em operações de mineração, promovendo a sustentabilidade e a recuperação eficiente de recursos hídricos.¹⁸
- **Parceria 4:** Freeport-McMoRan e Suez colaboraram para implementar soluções avançadas de tratamento de água em operações de mineração de cobre. Essa parceria foca na aplicação de tecnologias inovadoras para purificação e reutilização de água, garantindo que as operações de mineração sejam mais sustentáveis e com menor impacto ambiental. A tecnologia utilizada permite a recuperação de água de processos industriais, promovendo a eficiência no uso de recursos hídricos em áreas onde a disponibilidade de água é limitada.¹⁹
- **Parceria 5:** LafargeHolcim e Solidia Technologies destacam-se por sua colaboração focada em construção civil sustentável. As empresas estão desenvolvendo e lançando um cimento que reduz significativamente as emissões de CO₂ durante a produção. Esta parceria é um exemplo claro de como inovações tecnológicas podem contribuir para a economia circular e a redução do impacto ambiental no setor da construção.²⁰
- **Parceria 6:** Glencore e Umicore: são líderes globais em mineração e tecnologia de materiais, respectivamente, e colaboram em projetos de reciclagem de metais preciosos e recuperação de metais valiosos a partir de resíduos eletrônicos e industriais. Essa

16 Para mais detalhes, consultar o site: <https://magazine.cim.org/en/news/2023/minings-tech-boom-en/>.

17 Para mais detalhes, consultar o site: https://www.veolia.com/sites/g/files/dvc4206/files/document/2017/12/PR_Veolia_Australia_Springvale_041217.pdf.

18 Para mais detalhes, consultar o site: <https://www.bqewater.com/bioteq-secures-contract-selenium-removal-piloting/>.

19 Para mais detalhes, consultar o site: <https://tratamentodeagua.com.br/artigo/reutilizar-agua-fundicao-cobre/>.

20 Para mais detalhes, consultar o site: <https://www.constructiondive.com/news/lafargeholcim-launches-co2-reducing-cement-business/560589/>.

parceria concentra-se em transformar resíduos em recursos valiosos, maximizando a recuperação de metais e promovendo uma economia circular. A tecnologia de processamento avançada desenvolvida por essas empresas é crucial para a recuperação eficiente de metais, como cobalto e níquel, essenciais para baterias e eletrônicos.²¹

8.1.1.2 Clusters de mesmo foco do estágio atual

Além das parcerias, também se identifica a formação de clusters com foco semelhante. Empresas com interesses comuns em processos de lixiviação, biolixiviação e adsorção estão concentradas em áreas geográficas específicas, facilitando a criação de hubs tecnológicos regionais.

Cluster de mesmo Foco 1: neste *cluster*, destacam-se as empresas (Figura 23) que estão trabalhando na **purificação de águas residuais**. Esse hub é formado pelas seguintes empresas e parcerias descritas anteriormente, destacando-se:

Cluster de mesmo foco 1:

- BHP e Veolia.²²
- Teck Resources e BQE.²³
- Freeport-McMoRan e Suez.²⁴

Cluster de mesmo foco 2: neste cluster foram agrupadas empresas com foco em **construção**, entre as sete parcerias mencionadas anteriormente, a seguinte parceria tem foco nesse tipo de aplicação (Figura 24):

Cluster de mesmo foco – foco 2:

- LafargeHolcim e Solidia Technologies.²⁵

21 Para mais detalhes, consultar o site: <https://www.glencore.com/media-and-insights/news/umicore-and-glencore-develop-partnership-for-sustainable-cobalt-supply-in-battery-materials>.

22 Para mais detalhes, consultar o site: https://www.veolia.com/sites/g/files/dvc4206/files/document/2017/12/PR_Veolia_Australia_Springvale_041217.pdf.

23 Para mais detalhes, consultar o site: <https://www.bqewater.com/bioteq-secures-contract-selenium-removal-piloting/>.

24 Para mais detalhes, consultar o site: <https://tratamentodeagua.com.br/artigo/reutilizar-agua-fundicao-cobre/>.

25 Para mais detalhes, consultar o site: <https://www.constructiondive.com/news/lafargeholcim-launches-co2-reducing-cement-business/560589/>.

RoadMap Tecnológico - Tratamento e Reuso de Resíduos da Mineração	
Estágio Atual	
Material	Ferro
	Cobre
	Escória
	Ouro
	Cinzas
	Carvão
	Pedras / Granitos
	Argilas
	Alumínio
	Mistura de Resíduos
Processo	Lixiviação
	Microbiológico
	Adsorção
	Estabilização
	Agregados / Argamassas
	Solidificação
	Reatores / Misturadores
	Calcinção
	Moagem
	Flotação
Aplicação	Recuperação Ambiental
	Concreto / Cimento
	Novos Materiais
	Materiais de Preenchimento
	Melhoria de Solo
Recuperação de Metais	
Tratamento de águas residuais	

Fonte: elaboração própria.

Cluster de mesmo Foco 3: neste *cluster* foram agrupadas empresas atuantes na **recuperação de metais valiosos** a partir de rejeitos da mineração (Figura 25). Nesse cluster há maior número de empresas que estão trabalhando em conjunto para recuperação de metais a partir de extrações alinhadas com a economia circular.

Cluster de mesmo Foco 3:

- Glencore e Umicore.²⁶
- FLSmidth, Metso Outotec e Horizonte Minerals.²⁷

26 Para mais detalhes, consultar o site: <https://www.glencore.com/media-and-insights/news/umicore-and-glencore-develop-partnership-for-sustainable-cobalt-supply-in-battery-materials>.

27 Para mais detalhes, consultar o site: <https://horizonteminerals.com/uk/en/press-releases/2022/completion-of-awards-of-key-process-plant-contracts-at-the-araguaia-nickel-project/>.

Figura 25 - Clusters de mesmo foco (3) do estágio atual

RoadMap Tecnológico - Tratamento e Reuso de Resíduos da Mineração		
Estágio Atual		
Material	Processo	Aplicação
Ferro		
Cobre		
Escória		
Ouro		
Cinzas		
Carvão		
Pedras / Granitos		
Argilas		
Alumínio		
Mistura de Resíduos		
Lixiviação		
Microbiológico		
Adsorção		
Estabilização		
Agregados / Argamassas		
Solidificação		
Reatores / Misturadores		
Calcinacao		
Moagem		
Flotação		
Recuperação Ambiental		
Concreto / Cimento		
Novos Materiais		
Materiais de Preenchimento		
Melhoria de Solo		
Recuperação de Metais		
Tratamento de águas residuais		



Fonte: elaboração própria.

8.1.2 Curto prazo

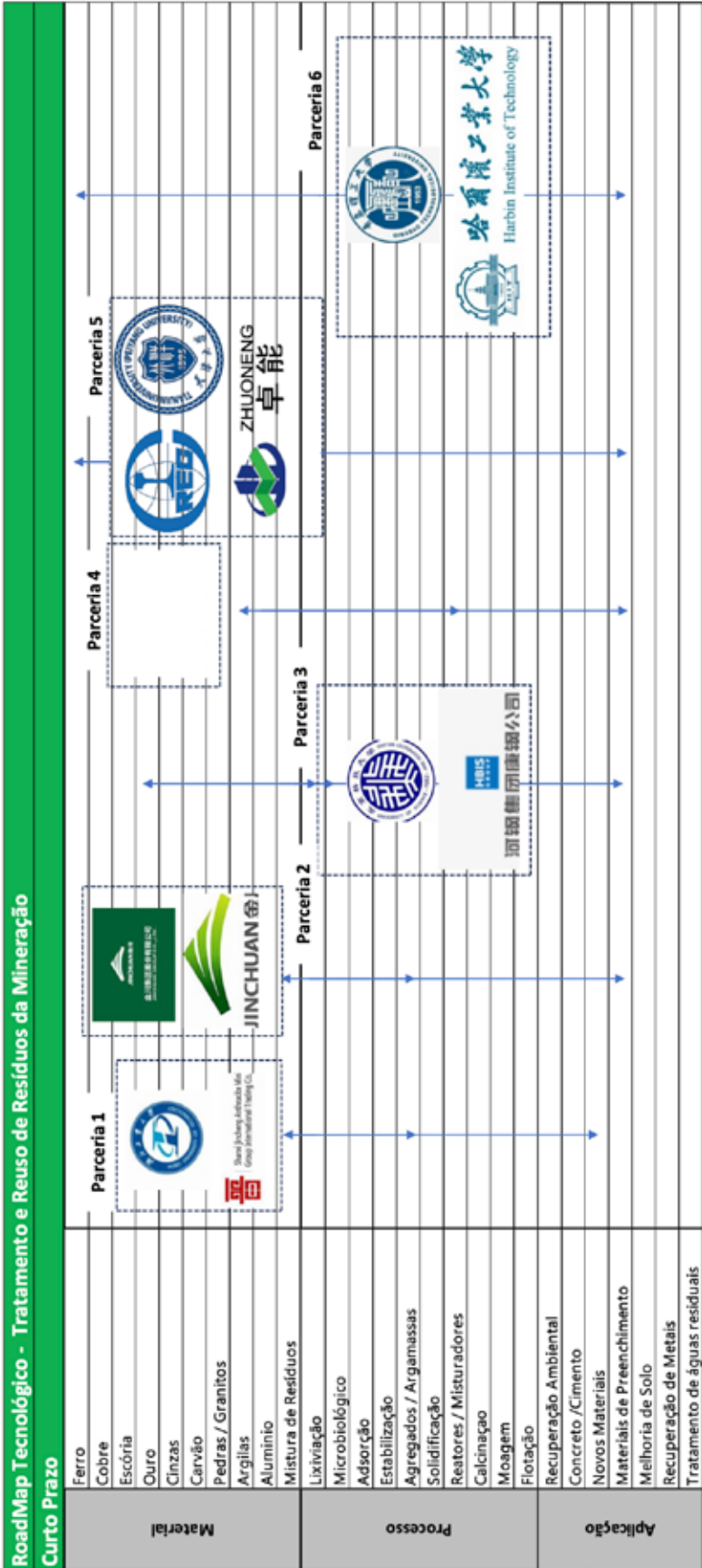
Nesse horizonte temporal, é possível encontrar alguns clusters que indicam tendências no setor de reúso de resíduos de mineração, com expectativa de tornarem-se operacionais nos próximos um a três anos. Tendo como base as principais conjugações da análise meso das patentes concedidas, “material, processo e aplicação”, foram encontrados vários clusters de parceria e clusters de mesmo foco (Figura 26).

8.1.2.1 Clusters de parcerias do curto prazo

- **Parceria 1** – Hubei Yian United Ind CO LTD e Shanxi Jincheng Anthracite Mining IND GR: *A coarse aggregate slurry suitable for conveying under large pipe diameter and preparation method thereof* (CN116143446A, 2023). Essa patente foca no desenvolvimento de uma pasta/polpa de agregado grosso adequado ao transporte sob grandes diâmetros de tubulação, utilizando resíduos sólidos de mineração, como cinzas de carvão e lama residual. A tecnologia promove a eficiência no transporte de materiais pesados e a reutilização de resíduos, contribuindo para práticas mais sustentáveis na gestão de resíduos industriais.
- **Parceria 2** – Jinchuan Group CO LTD E Jinchuan Nickel Cobalt Res & Design Inst: *A high-concentration high-strength filling paste and preparation method thereof* (CN116081982A, 2023). A invenção reivindica uma pasta de enchimento de alta concentração e alta resistência e um método de preparação da mesma, compreendendo: cimento, agregado triturado de resíduos de pedra, areia total de rejeito de tratamento mineral e água.
- **Parceria 3** – Tangshan Iron & Steel Group CO LTD, Beijing Mining & Metallurgical Inst e Univ Beijing Sci & Technology: *Magnesium slag hazardous waste curing treatment and cooperative tailing full solid waste filling mining method* (CN113213868B, 2023). A invenção reivindica um tratamento de cura de resíduos perigosos de escória de magnésio e um método sinérgico de mineração de enchimento total de resíduos sólidos com areia residual, pertencente ao campo técnico de tecnologia cruzada de tratamento de cura de resíduos sólidos e método de mineração de enchimento.
- **Parceria 4** – China Baowu Steel Group e Guyan Technology Dev CO LTD: *Tail sand excitation gel filling material and preparation method thereof* (CN111848099B, 2022). A invenção diz respeito ao domínio técnico do material de enchimento, especificamente a um material de enchimento em gel, produzido a partir de areia residual.
- **Parceria 5** – China Railway Eng Equip Group CO LTD, Tianjin Tianxing Fuda Technology CO LTD, Univ Hebei Eng, Tangshan Zhuoneng Building Material Tech: *A method for preparing mine filling material by tail slag rich in iron waste modified and extracted from iron* (CN115215625A, 2022). A invenção reivindica um método para preparar material de enchimento de mina por meio da extração de ferro modificado com escória residual rica em resíduos de ferro.

- **Parceria 6** – Harbin Institute Of Technology, Univ Qingdao Technology E Qingdao Panyao New Material Eng Res Inst: *Iron tailings mine pit backfilling material and using method thereof* (CN116217165A, 2023). A invenção pertence ao campo de preenchimento e reciclagem de resíduos, especificamente refere-se ao preenchimento de cava de mina com rejeitos de ferro.
- **Parceria 7** – Exxonmobil Corp & Exxon Corp: *Method for treating mine waste* (CA2871177C, 2017). O método inclui a formação de uma corrente floculada pela adição de um primeiro floculante a uma corrente de resíduos derivada de uma extração à base de água de betume de areias betuminosas.
- **Parceria 8** – Univ Henan Polytechnic & Shanghai Inst Technology: *Fluidization co-production method of coal mine waste resource* (CN112253120B, 2023). A invenção refere-se a um método de coprodução de fluidização de recursos residuais de minas de carvão no campo técnico de mineração de carvão.
- **Parceria 9** – Guangdong Taolin Ecology & Environment E Chengmenshan Copper Mine Jiangxi Copper: *Mine microbial community conditioning material and its preparation method and application* (CN114535255A, 2022). A invenção reivindica um material para condicionamento da comunidade microbiana em solo de minas e seu método de preparação e aplicação.
- **Parceria 10** – Dave Trudeep N., Dalal Parish H., Iyer Kannan K. R., Reddy Sandeep A. E. Patil Mahi: *Sustainable pavement subbase material containing landfill mined soil like fraction, and method of pavement subbase construction* (IN448789B, 2023). O método envolve a obtenção de material de fração semelhante a solo extraído em aterro (LMSF), removendo (S1) materiais combustíveis e recicláveis (CM, RM) dos locais de mineração, para obtenção de resíduos finos não plásticos utilizados na construção de sub-base para pavimentação.

Figura 26 – Parcerias do curto prazo



Fonte: elaboração própria.

8.1.2.2 Clusters de mesmo foco do curto prazo

As iniciativas descritas, a seguir, refletem uma tendência crescente na pesquisa e no desenvolvimento de tecnologias que promovem o reúso de resíduos de mineração, transformando passivos ambientais em ativos econômicos. A colaboração entre universidades e empresas é essencial para acelerar a implementação dessas tecnologias, garantindo um futuro mais sustentável para o setor de mineração. A seguir, são detalhadas as empresas atuantes nesse nicho (Figuras 27, 28, 29)

Clusters de mesmo foco “materiais para filtração e purificação de águas residuais” – Foco 1:

- Sinosteel Xingtai Machinery & Mill Roll (CN114368961A, 2022).
- Univ Yantai (LU502162B1, 2022).

Clusters de mesmo foco “aplicação de resíduos na agricultura” – Foco 2:

- Guangdong Taolin Ecology & Environment e Chengmenshan Copper Mine Jiangxi Copper (CN114535255A, 2022).
- Cleveland-Cliffs Inc. (US10351482B1, 2019).

Clusters de mesmo foco “construção” – Foco 3:

- Richangsheng Building New Material Desig (CN116082019A, 2023).
- Yantai Zhiben Intellectual Property Oper (CN105777065B, 2015).
- Nantong Tongzhou Junlang Construction Engineering (CN102924116B, 2013).
- Nantong Bangshun Building Material Technology Deve (CN102898181B, 2013).
- Xinjiang Tekuo Piao Zheng (Nantong) CO. LTD. (CN102875044B, 2013).
- Southeast University (CN104591666A, 2015).
- Beijing Jiangong Resources Circulation (CN114873969A, 2022).
- Richangsheng Building New Material Desig (CN116082019A, 2023).
- Henan Jianbo New Material Technology CO (CN214863156U, 2021).
- Guangzhou Marine Geological Survey (CN115532427A, 2022).
- Henan Inst Geological Survey (CN115929254A, 2023).
- Beijing New Building Material Gen Factor (CN116354626A, 2023).
- Univ Huaihua (CN107382216B, 2020).
- Univ Xian SCI & Technology (CN113511868A, 2021).

- Shandong Dayuan Ind CO LTD (CN114716199A, 2022).
- China Baowu Steel Group (Former Baosteel Group Corp) | Guyan Technology Dev CO LTD. (CN111848099B, 2022).
- Angang Steel CO LTD. (CN114890811A, 2022).
- Yejing Kekuang Qingdao Technology Dev CO (CN116574342A, 2023).
- Univ China Geosciences Beijing (CN116830996A, 2023).
- Korea Institute of Geoscience & Mineral Resources (KR1658887B1, 2016).

Figura 27 – Cluster de mesmo foco (1) do curto prazo

RoadMap Tecnológico - Tratamento e Reuso de Resíduos da Mineração		
Curto Prazo		
Material	Processo	Aplicação
Ferro		
Cobre		
Escória		
Ouro		
Cinzas		
Carvão		
Pedras / Granitos		
Argilas		
Alumínio		
Mistura de Resíduos		
Lixiviação		
Microbiológico		
Adsorção		
Estabilização		
Agregados / Argamassas		
Solidificação		
Reatores / Misturadores		
Calcinção		
Moagem		
Flotação		
Recuperação Ambiental		
Concreto / Cimento		
Novos Materiais		
Materiais de Preenchimento		
Melhoria de Solo		
Recuperação de Metais		
Tratamento de águas residuais		

Mesmo foco 1

Fonte: elaboração própria.

Figura 29 - Cluster de mesmo foco (3) do curto prazo

RoadMap Tecnológico - Tratamento e Reuso de Resíduos da Mineração		
Curto Prazo		
Material	Ferro	
	Cobre	
	Escória	
	Ouro	
	Cinzas	
Processo	Carvão	
	Pedras / Granitos	
	Argilas	
	Alumínio	
	Mistura de Resíduos	
	Lixiviação	
	Microbiológico	
	Adsorção	
	Estabilização	
	Agregados / Argamassas	
Aplicação	Solidificação	
	Reatores / Misturadores	
	Calcinacao	
	Moagem	
	Flotação	
	Recuperação Ambiental	
	Concreto /Cimento	
	Novos Materiais	
	Materiais de Preenchimento	
	Melhoria de Solo	
	Recuperação de Metais	
	Tratamento de águas residuais	

Fonte: elaboração própria.

8.1.3 Médio prazo

Neste horizonte temporal, é possível encontrar alguns clusters (Figuras 30, 31, 32) que indicam tendências no setor de reúso de resíduos de mineração. Tendo como base as principais taxonomias identificadas na análise meso das patentes depositadas (processo), foram encontrados vários clusters de mesmo foco. Não foram mapeadas as parcerias nesse horizonte temporal, dando enfoque aos clusters.

8.1.3.1 Clusters de mesmo foco do médio prazo

Clusters de mesmo foco na produção de “materiais de preenchimento” – Foco 1:

- Univ Beijing Sci & Technology (CN114550839A, 2022).
- Univ Cent South (CN114538868A, 2022).

Clusters de mesmo foco na “recuperação de metais” – Foco 2:

- Northeastern University (Boston, MA) (US20230243259A1, 2023).
- Southeast University (CN104591666A, 2015). Jiangxi Geological Bureau Experimental (CN116655072A, 2023).

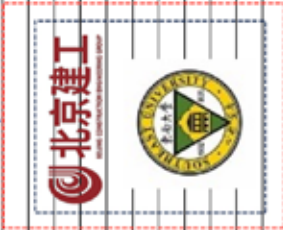
Clusters de mesmo foco na “construção civil” – Foco 3:

- Xinjiang Tekuo Piao Zheng (Nantong) CO. LTD (CN102875044B, 2013).
- Guangdong Meizhou Quality Measurement (CN115057669A, 2018).
- Beijing Jiangong Resources Circulation (CN114873969A, 2022).
- Yantai Zhiben Intellectual Property Oper (CN105777065B, 2018).

Figura 30 - Cluster de mesmo foco (1) do médio prazo

RoadMap Tecnológico - Tratamento e Reuso de Resíduos da Mineração		
Médio Prazo		
Material	Ferro	
	Cobre	
	Escória	
	Ouro	
	Cinzas	
	Carvão	
	Pedras / Granitos	
	Argilas	
	Alumínio	
	Mistura de Resíduos	
Processo	Lixiviação	
	Microbiológico	
	Adsorção	
	Estabilização	
	Agregados / Argamassas	
	Solidificação	
	Reatores / Misturadores	
	Calcinacao	
	Moagem	
	Flotação	
Aplicação	Recuperação Ambiental	
	Concreto /Cimento	
	Novos Materiais	
	Materials de Preenchimento	
	Melhoria de Solo	
	Recuperação de Metais	
Tratamento de águas residuais		

Mesmo foco 1




Fonte: elaboração própria.

Figura 31 – Cluster de mesmo foco (2) do médio prazo

RoadMap Tecnológico - Tratamento e Reuso de Resíduos da Mineração		
Médio Prazo		
Material	Ferro	
	Cobre	
	Escória	
	Ouro	
	Cinzas	
	Carvão	
	Pedras / Granitos	
	Argilas	
	Alumínio	
	Mistura de Resíduos	
Processo	Lixiviação	
	Microbiológico	
	Adsorção	
	Estabilização	
	Agregados / Argamassas	
	Solidificação	
	Reatores / Misturadores	
	Calcinacao	
	Moagem	
	Flotação	
Aplicação	Recuperação Ambiental	
	Concreto /Cimento	
	Novos Materiais	
	Materiais de Preenchimento	
	Melhoria de Solo	
	Recuperação de Metais	
	Tratamento de águas residuais	

Mesmo foco 2



Fonte: elaboração própria.

Figura 32 – Cluster de mesmo foco (3) do médio prazo

RoadMap Tecnológico - Tratamento e Reuso de Resíduos da Mineração		
Médio Prazo		
Material	Ferro	
	Cobre	
	Escória	
	Ouro	
	Cinzas	
	Carvão	
	Pedras / Granitos	
	Argilas	
	Alumínio	
	Mistura de Resíduos	
Processo	Lixiviação	
	Microbiológico	
	Adsorção	
	Estabilização	
	Agregados / Argamassas	
	Solidificação	
	Reatores / Misturadores	
	Calcinacao	
	Moagem	
	Flotação	
Aplicação	Recuperação Ambiental	
	Concreto / Cimento	
	Novos Materiais	
	Materiais de Preenchimento	
	Melhoria de Solo	
	Recuperação de Metais	
Tratamento de águas residuais		

Mesmo foco 3

Fonte: elaboração própria.

8.1.4 Longo prazo

Neste estágio temporal, identificaram-se 12 clusters de parcerias, com destaque aos apresentados na Figura 33, e que envolvem diversos tipos de players. Desses, 11 são parcerias entre universidades e centros de pesquisa, 1 entre universidades e empresas.

8.1.4.1 Parcerias entre universidades

- **Parceria 1 – South-Central Minzu University (China) e University of Nebraska-Lincoln (United States) e Hubei Dajiang Environmental Co:** focada no desenvolvimento de novas tecnologias de lixiviação e recuperação de metais a partir de escória de cobre, visando à melhoria da eficiência na reciclagem de resíduos industriais. O estudo investiga o comportamento de lixiviação e a ocorrência de elementos metálicos em escória de cobre para aprimorar os processos de recuperação de metais (Wang et al., 2023).
- **Parceria 2 – University of Minho (Portugal) e University of Coimbra (Portugal):** voltada à análise geoquímica e mineralógica de rejeitos auríferos, com o objetivo de identificar e desenvolver estratégias de remediação ambiental sustentável. A pesquisa analisa a geoquímica e mineralogia de rejeitos auríferos, destacando a importância de práticas de remediação para a proteção ambiental (Lemos et al., 2023).
- **Parceria 3 – University of Science and Technology Beijing e Recep Tayyip Erdogan University (Turkey):** direcionada à investigação da microestrutura e comportamento mecânico de rejeitos de mineração de ouro/tungstênio com diferentes porcentagens de rocha triturada, para uso como preenchimento cimentício (Huang et al., 2023).
- **Parceria 4 – University of Antofagasta (Chile) e University of Santiago (Chile):** este estudo demonstra os impactos ambientais associados à extração de cobre de baixo teor, que exige o uso de mais recursos e gera maior quantidade de resíduos quando o processo ocorre via flotação. Além disso, no estudo é proposta uma análise de multicritério, para priorizar as barragens em função do valor comercial existente (Monardes et al., 2023).
- **Parceria 5 – Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP, Peru) e University Simón Bolívar e Óbuda University (Hungary):** a pesquisa busca avaliar o risco radiológico derivado da exposição de radionuclídeos contidos em rejeitos de minas de ouro peruanas, com intuito de determinar se esses rejeitos podem ser utilizados como matéria-prima para uso na construção civil. (Liza et al., 2023).
- **Parceria 6 – Escuela Superior Politécnica del Litoral, Ecuador; Mexican Geological Survey (SGM) e Instituto de Investigación Geológico y Energético (Equador):** estuda a viabilidade de reutilizar rejeitos da mineração de ouro para fabricação de blocos de concreto, para tal uso foram realizados testes de lixiviação para avaliar o risco de potencial de liberação elementos tóxicos (Méndez et al., 2023).

- **Parceria 7 – ETH Zurich e University of Bologna:** avalia os impactos do ciclo de vida e potencial de recuperação dos recursos associados à gestão de resíduos de cobre sulfídrico – investigando os cenários para o reprocessamento com base nos impactos relacionados à energia e toxicidade (Adrianto et al., 2023).

Parcerias entre universidades e empresas:

- **Parceria 1 – University of Minho (Portugal), Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG, Brazil) e AngloGold Ashanti (Brazil):** focada na análise geoquímica e mineralógica de rejeitos auríferos na região de Nova Lima, Brasil, com o objetivo de identificar zonas de enriquecimento de ouro e explorar o potencial de reúso desses resíduos, incluindo a recuperação de outros metais e a reutilização de resíduos na construção civil.

Esses exemplos ilustram a diversidade e a abrangência das parcerias no longo prazo, em que a colaboração entre diferentes tipos de players é essencial para promover a inovação e a sustentabilidade no setor de mineração.

8.1.4.2 Clusters de mesmo foco do longo prazo

A análise deste item teve como base as principais combinações da análise dos artigos, focando em “purificação de águas residuais”, “aplicação de resíduos na agricultura”, “construção”, “recuperação de metais valiosos”. Nesse sentido, foram identificados cinco clusters de mesmo foco.

Clusters de mesmo foco “purificação de águas residuais” – Foco 1:

- *Rethinking gold mining wastewater treatment with an integrated process of membrane distillation and membrane contactors for minimal waste discard and resource recovery* (Moreira et al., 2023).

Clusters de mesmo foco “aplicação de resíduos na agricultura” – Foco 2:

- *Characteristics of Nickel Laterite Mine Waste in Caraga Region, Philippines and Its Potential Utilization* (Balbin et al., 2023).
- *Alkaline industrial wastes – Characteristics, environmental risks, and potential for mine waste management* (Moyo et al., 2023).

Clusters de mesmo foco “recuperação de metais valiosos” – Foco 3:

- *Optimizing metal recovery from slag leaching solutions: Advanced ion exchange techniques for sustainable resource extraction* (Abeywickrama et al., 2023).

8.2 ANÁLISE HORIZONTAL

A análise horizontal aborda as tendências e inovações nas patentes relacionadas a materiais, processos e aplicações, identificando como essas tecnologias estão evoluindo e se integrando ao setor de reúso de resíduos de mineração.

8.2.1 Material

A análise das patentes relacionadas ao material revela diversas inovações focadas na utilização de resíduos de mineração, como matérias-primas alternativas. As principais tendências incluem:

1. **Reutilização de resíduos vulcânicos e attapulgita:** nessas patentes, há utilização de attapulgita para produção de materiais compósitos para construção sem a necessidade de queima, demonstrando um avanço significativo na sustentabilidade dos materiais de construção sem uso de uma rota de calcinação (CN102924116B, CN102898181B, CN102875044B).

2. **Produção de agregados para construção:** as patentes exemplificam a utilização de rejeitos da mineração de ouro para produzir agregados para cimento e argamassas (BRPI1104410B1); resíduos de mineração e de calcário em conjunto com a lama vermelha para produção de agregados de baixo peso (KR1658887B1), pó de carvão mineral e resíduos de bentonita (CN102898181B, CN105777065B) e resíduos de granito (CN116082019A) para a produção de blocos cerâmicos, entre outros exemplos, promovendo a economia circular e reduzindo a necessidade de extração de novos recursos.
3. **Síntese de zeólitas a partir de resíduos de mineração (WO2022259268A):** nesse caso, há o uso de resíduo da mineração na síntese de zeólitas. Estas são materiais que podem ser utilizados como adsorventes, fertilizantes, em purificação, entre outros, agregando valor aos resíduos que, de outra forma, seriam descartados.

8.2.2 Processo

Os processos inovadores para o reúso de resíduos de mineração estão centrados em melhorar a eficiência na extração dos metais de interesse, ainda, presentes no resíduo, assim como promover a reúso em processos sustentáveis no ponto de vista da cadeia industrial, as principais inovações incluem:

1. **Lixiviação e biolixiviação de metais:** esta patente destaca técnicas avançadas de lixiviação e biolixiviação para recuperação de metais valiosos de rejeitos de cobre, promovendo uma extração mais eficiente e sustentável.
2. **Produção de fertilizantes biominerais (US10351482B1):** a utilização de processos microbianos para converter resíduos de mineração em fertilizantes biominerais é um exemplo de como a biotecnologia pode transformar passivos ambientais em ativos agrícolas.
3. **Produção de clínquer de cimento (CN114804680A):** este processo inovador utiliza rejeitos de mineração no processo de calcinação de clínquer, melhorando a eficiência térmica e a sustentabilidade na produção de cimento.

8.2.3 Aplicação

As aplicações das inovações em reúso de resíduos de mineração demonstram um potencial significativo para transformar diversos setores. As principais aplicações incluem:

1. **Materiais de construção ecológicos (CN116082019A, CN114873969A, CN214863156U):** o desenvolvimento de dispositivos e métodos para fabricar materiais de construção ecológicos a partir de resíduos de mineração demonstra o compromisso com a sustentabilidade na indústria da construção.

2. **Condicionadores de solo (KR2016071252A, US10351482B1):** a aplicação de subprodutos da mineração como condicionadores de solo promove a recuperação ambiental e o uso sustentável dos resíduos na agricultura.
3. **Tratamento e reciclagem de metais dos resíduos:** recuperação de cloretos metálicos a partir de óxidos metálicos utilizando resíduos da mineração de carvão (US20190292050A1), desulfurização de resíduos de enxofre por micro-ondas (CN115837393A), reciclagem de resíduos da mineração de ouro (CN106000624A).

Essas análises horizontais demonstram como a integração de novos materiais, processos e aplicações pode transformar a gestão de resíduos de mineração, promovendo a sustentabilidade e a inovação em diversos setores.

8.3 ANÁLISE DOS PLAYERS ENVOLVIDOS NO REÚSO DE RESÍDUOS DA MINERAÇÃO

A análise dos players envolvidos no reúso de resíduos da mineração revela uma rede diversificada de empresas, universidades e instituições de pesquisa que estão na vanguarda da inovação nesse campo. Esses players desempenham papéis cruciais no desenvolvimento e implementação de tecnologias que transformam passivos ambientais em ativos econômicos. A seguir, são listadas as empresas e instituições que mais se destacam por terem múltiplos documentos em um mesmo estágio temporal e/ou repetidos em diferentes períodos.

8.3.1 Empresas

1. FLSmidth (Dinamarca) atua no curto prazo em colaboração com a Metso Outotec e a Horizonte Minerals no projeto Araguaia, focado na produção de níquel no Brasil. A FLSmidth é responsável por fornecer equipamentos e soluções de processamento mineral, com foco na maximização da eficiência da extração de níquel e minimização do impacto ambiental das operações de mineração.
2. Vale (Brasil), uma das maiores produtoras de minério de ferro do mundo, atua no curto e médio prazo com parcerias estratégicas com a Jetti Resources e a Tetra Tech. Em parceria com a Jetti Resources, a Vale desenvolve técnicas de lixiviação catalítica para melhorar a recuperação de cobre a partir de rejeitos de mineração e minérios de baixo teor (patente: US20200016972A1, 2020). Com a Tetra Tech, a Vale busca soluções inovadoras para o tratamento e o reúso de rejeitos de mineração de ferro.
3. BHP (Austrália) uniu-se à Vale e à Jetti Resources para aplicar a tecnologia de lixiviação catalítica da Jetti, visando à recuperação de cobre. A BHP atua no curto prazo, promovendo a sustentabilidade e a eficiência no uso dos recursos naturais.²⁸

²⁸ Para mais detalhes, consultar o site: <https://magazine.cim.org/en/news/2023/minings-tech-boom-en/>.

4. Rio Tinto (Reino Unido) colabora com a Tata Steel no desenvolvimento de tecnologias para recuperação e reúso de resíduos de mineração de ferro. A empresa atua no curto prazo, trazendo sua expertise em mineração e processamento de minerais para transformar rejeitos em materiais úteis para construção e outras indústrias.
5. Glencore (Suíça), uma das maiores empresas de *commodities* e mineração do mundo, estabeleceu uma parceria com a Trevali Mining Corporation para desenvolver tecnologias de recuperação de metais a partir de rejeitos de mineração de zinco. A Glencore atua implementando processos inovadores de lixiviação e biolixiviação.²⁹
6. Barrick Gold (Canadá) formou uma joint *venture* com a Newmont Corporation chamada Nevada Gold Mines, focada no desenvolvimento e na implementação de tecnologias avançadas de recuperação de ouro a partir de rejeitos de mineração. Atua no curto prazo, otimizando processos de lixiviação e recuperação de metais preciosos (patente: US10882677B2, 2020).
7. Newmont Corporation (Estados Unidos), em parceria com a Barrick Gold, busca aumentar a eficiência da extração de ouro e reduzir o impacto ambiental das operações de mineração em conjunto com a Nevada Gold Mines. A Newmont atua com tecnologias avançadas de lixiviação e recuperação de ouro (patente: US10882677B2, 2020).
8. Anglo American (Reino Unido) colabora com a Umicore para desenvolver tecnologias de recuperação de metais preciosos e críticos a partir de rejeitos de mineração. A empresa atua no médio prazo, visando à extração eficiente de metais, como platina, paládio e ródio, promovendo a economia circular e a sustentabilidade ambiental (patente: US10914320B2, 2021).
9. Umicore (Bélgica), especializada em materiais avançados e tecnologias de reciclagem, trabalha com a Anglo American para criar processos inovadores que transformam rejeitos de mineração em fontes valiosas de metais. A empresa atua no médio prazo, desenvolvendo tecnologias de recuperação de metais preciosos e críticos (patente: US10914320B2, 2021).
10. Teck Resources (Canadá), uma das principais empresas de mineração diversificada do Canadá, colabora com a Aurubis AG para desenvolver tecnologias de recuperação de cobre e metais preciosos a partir de resíduos de mineração. Teck Resources atua no médio prazo, implementando processos avançados de lixiviação e recuperação (patente: US10710654B2, 2020).
11. Aurubis Ag (Alemanha), líder mundial em produção de cobre e reciclagem de metais, trabalha com a Teck Resources para melhorar a eficiência na extração de metais e reduzir o impacto ambiental das operações de mineração. A empresa atua no médio

²⁹ Para mais detalhes, consultar o site: <https://investingnews.com/daily/resource-investing/base-metals-investing/zinc-investing/glencore-trevali-mining-zinc-leverage/>.

prazo com tecnologias avançadas de recuperação de cobre e metais preciosos (patente: US10710654B2, 2020).

12. Freeport-Mcmoran (Estados Unidos), uma das maiores produtoras de cobre do mundo, uniu forças com a Suez para desenvolver tecnologias de recuperação de metais e tratamento de águas residuais em operações de mineração de cobre. A empresa atua no curto prazo, criando processos eficientes de purificação de água e extração de metais valiosos dos rejeitos de mineração (patente: US10926626B2, 2021).
13. Suez (França) é líder global em soluções de gestão de água e resíduos, colabora com a Freeport-Mcmoran para melhorar a sustentabilidade das operações de mineração, reduzindo o impacto ambiental e promovendo a reutilização de recursos. A empresa atua no curto prazo com tecnologias de purificação de águas residuais e recuperação de metais (patente: US10926626B2, 2021).
14. Veolia (França) é líder em gestão de água e resíduos, colabora em diversas iniciativas para recuperação de metais e tratamento de resíduos de mineração. Veolia atua no curto prazo, com patentes focadas em tecnologias de purificação de águas residuais e recuperação de metais valiosos (patente: US10508238B2, 2019).
15. Toray Industries (Japão) é especializada em materiais avançados e tecnologias de filtração. A empresa atua no curto prazo, desenvolvendo membranas de filtragem para recuperação de metais e purificação de águas residuais em operações de mineração (patente: US10364223B2, 2019).
16. Aquatech (Estados Unidos) é especializada em soluções avançadas de tratamento de água e águas residuais, atuando no curto prazo com tecnologias inovadoras para reúso de resíduos de mineração. A empresa desenvolve processos para recuperar metais e purificar águas residuais, promovendo a sustentabilidade nas operações de mineração (patente: US10808256B2, 2020).
17. Basf (Alemanha) é uma das maiores empresas químicas do mundo, com forte foco em inovação e sustentabilidade. A empresa atua nos curto e médio prazos desenvolvendo tecnologias para recuperação de metais e tratamento de resíduos de mineração. As soluções da Basf incluem processos químicos avançados e materiais inovadores para melhorar a eficiência e reduzir o impacto ambiental das operações de mineração (patente: US10676492B2, 2020).

8.3.2 Universidades

1. Universidade Federal de Minas Gerais- UFMG (Brasil): em parceria com a AngloGold Ashanti, desenvolveu uma patente focada no uso de rejeitos de mineração para produção de agregados para concreto e argamassas. Essa parceria promove a sustentabilidade

na construção civil. A UFMG é requerente da patente *Process for producing aggregates for mortars or concrete using mining waste* (patente: BRPI1104410B1, 2021).

2. University of Science and Technology Beijing (China): é uma das principais universidades da Ásia, atuando amplamente no campo da utilização integrada de recursos (Huang; Cao; Yilmaz, 2023). Foi a depositante principal das patentes: *Magnesium slag hazardous waste curing treatment and cooperative tailing full solid waste filling mining method* (CN113213868B); *Preparation method for tailing barren rock-made high-strength concrete containing coal ash* (CN102765889B) e *Optimization method of scale and high-value utilization of nickel slag in mining of filling method* (CN114550839A).
3. Northeastern University (Estados Unidos): está na vanguarda da pesquisa sobre a utilização de micro-ondas no tratamento de minérios e reciclagem de resíduos (CN115837393A, US20230243259A1).
4. Hebei University Of Architecture (China): desenvolve pesquisas para aplicação de resíduos de mineração em concretos de alta resistência, destacando-se na inovação de materiais sustentáveis. A Hebei University of Architecture é depositante das patentes: *A tailings concrete, common concrete composite beam and construction method thereof* (CN106869401B, 2019) e *mixing the iron tailings and construction waste of high-strength concrete and preparation method thereof* (CN107382216B).
5. China University of Mining and Technology (China) foi a depositante de três patentes presentes na base de dados analisada para a construção do roadmap, sendo elas: *A method for preparing cementing filling material by multi-source industrial waste residue cooperating with ultra-fine tailing* (CN116639945A); *A metal mine ecological restoration and reconstruction surface soil based on all-solid waste and preparation method thereof* (CN116830996A) e *A full-solid waste mine filling carbon sealing paste and preparation method thereof* (CN114956750A).
6. University of Cape Town (África Do Sul): em parceria com Stanford University e a University of Toronto, trabalha em biolixiviação para extração de metais, com publicações científicas que são parte de um esforço de longo prazo.
7. Tsinghua University (China): colabora com a University of Melbourne, Technische Universität München e a Universidade de São Paulo (USP) no desenvolvimento de processos avançados de biolixiviação para extração de cobre e níquel, contribuindo com pesquisas de longo prazo.
8. University of Melbourne (Austrália): trabalha com Tsinghua University e Technische Universität München em biolixiviação, publicando pesquisas que fazem parte de uma estratégia de longo prazo.

9. (Reino Unido): em parceria com ETH Zurich e a Universidade Estadual de Campinas (Unicamp), foca na purificação de águas residuais contaminadas por elementos potencialmente tóxicos, contribuindo com pesquisas e patentes que são parte de uma estratégia de longo prazo.
10. University of Sydney (Austrália): em parceria com Nanyang Technological University, Indian Institute of Technology e Hanyang University, trabalha na purificação de águas residuais, com pesquisas que são parte de uma estratégia de longo prazo.
11. California Institute of Technology – Caltech (Estados Unidos): em parceria com University of British Columbia e Instituto Tecnológico de Monterrey, trabalha na estabilização e reutilização de resíduos perigosos em aplicações industriais, contribuindo com pesquisas de longo prazo.
12. University Of British Columbia (Canadá): colabora com a Caltech e o Instituto Tecnológico de Monterrey na estabilização de resíduos perigosos, publicando artigos científicos e pesquisando estratégias de longo prazo.
13. Instituto Tecnológico de Monterrey (México): em parceria com Caltech e University of British Columbia, trabalha na estabilização e reutilização de resíduos perigosos, contribuindo com pesquisas e estratégias para longo prazo.
14. University of Oxford (Reino Unido): colabora com Eth Zurich e National University of Singapore na estabilização de resíduos perigosos, com pesquisas e estratégias a longo prazo.
15. Seoul National University (Coreia do Sul): colabora com University of Manchester e Peking University na recuperação de materiais raros, contribuindo com artigos científicos e estratégias para longo prazo.

8.3.3. Instituições de pesquisa

1. Changchun Gold Research Institute Co. Ltd. (China) foi o depositante das patentes: *A method for comprehensively treating cyaniding tail ore pulp by using gold mine waste stone field percolate* (CN115849629A) e *Resource utilization method of copper-containing waste slag* (CN116282716A).
2. Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (Kigam) (Coreia do Sul) é um dos principais centros de pesquisa na área de geoquímica do mundo, tendo concedida as patentes: *Method for Preparing Light Weight Aggregate Using Gold Mine Tail* (KR1658887B1) e *Ceramic Sinter with Low Water Absorbency Using Waste Mine Tailing From Tungsten Mine and Method For Manufacturing Ceramic Sinter* (KR602728B1).

3. Institute of Multipurpose Utilization of Mineral Resources Chinese Academy of Geological Science (China). Esse instituto realiza pesquisas sobre depósitos minerais, petrologia, mineralogia e levantamento e avaliação de recursos minerais, tendo concedida a patente: *A method for recycling and using copper ore tailings and eliminating the scale in large scale* (CN115532427A).
4. Newalkar Aditya: focada na preparação de zeólitas para uso na remoção de impurezas de rejeitos de mineração, com a patente *Synthesis of Zeolite Nanosheets from Mining Waste*. O tratamento é realizado a partir de uma mistura de solução alcalina, sinterização e sementes de zeólitas (WO2022259268A1, 2022).
5. Changsha Xiangpu Technology Co Ltd. (China): desenvolve métodos inovadores para tratamento de efluentes de rejeitos de flotação de tungstênio, na patente: *A flotation tungsten mine tailing wastewater recycling technology* a técnica descrita que envolve processos de agitação, uso de floculantes, escoamento para preenchimento subterrâneo, bombeamento e realização de preenchimento subterrâneo. (CN107352696B).



CAPÍTULO 9 – CONCLUSÃO

Por meio da prospecção tecnológica realizada a partir da busca e do estudo de documentos, publicações e patentes, bem como das análises estratégicas do *roadmap* tecnológico (horizontal, vertical e players), foi possível obter um panorama estratégico envolvendo o setor de tratamento e reúso de resíduos de mineração.

Observou-se um crescimento significativo no número de publicações e patentes, a partir de 2020, abordando o tema de tratamento e reaproveitamento de resíduos da mineração, mostrando a crescente preocupação do setor acadêmico e industrial com o aumento da sustentabilidade da mineração. Esse interesse pode ser derivado da própria sensibilização do setor para práticas mais sustentáveis; identificação de oportunidade econômicas/financeiras de aplicação dos resíduos em novos produtos/processos, seguindo os princípios da economia circular; e/ou aumento do rigor na legislação dos países mineradores. Mesmo que não haja uma razão única, a continuidade das pesquisas na área é extremamente necessária para criação de soluções inovadoras para mitigação de características perigosas de alguns resíduos, incorporação de grandes volumes e agregação de valor aos novos produtos/processos obtidos a partir dos rejeitos e resíduos da mineração.

A análise macro dos artigos científicos revelou que a produção científica está concentrada em regiões com grandes operações de mineração e desafios ambientais significativos, como China, Índia e Brasil. Em relação à análise macro das patentes, a China, seguida por Estados Unidos e Coreia do Sul, foram os países de maior destaque. A colaboração internacional é fundamental ao avanço das tecnologias de tratamento de resíduos, com parcerias destacadas entre instituições de pesquisa e indústrias de diferentes países.

A grande presença de universidades nos mais diversos recortes temporais sinaliza o estágio inicial desse tipo de tecnologia, destacando-se a Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), a University of Queensland e a Mohammed VI Polytechnic University, com atuação não somente a longo prazo, mas também ao longo do mapa. Pode-se observar a presença incipiente de players que atuam com tecnologias emergentes, destacando-se, por exemplo, empresas/universidades, como a Changsha Mining Research Institute Co. Ltd, Central South University e Hubei Polytechnic University, que possuem atividades no estágio atual e patentes reivindicadas.

Destaca-se também a presença de clusters de parceria e de mesmo foco nos estágios atual e no longo prazo, envolvendo universidades, estações de tratamento de resíduos e empresas privadas, indicando que a aplicação dessas tecnologias que visa à escalabilidade e viabilidade dos novos tratamentos está exigindo grande esforço de diferentes atores do cenário mineral.

Entre as principais tendências dos documentos analisados, destaca-se o foco das inovações nas taxonomias de materiais, processos e aplicações. O uso de tecnologias de lixiviação, biolixiviação e adsorção foram identificados, muitas vezes, integrados ao tratamento de resíduos, sendo um indicativo de viabilidade para o uso comercial dessas tecnologias. Os processos de recuperação de metais, estabilização e solidificação dos resíduos nas próprias minas desativadas também obtiveram ênfase, dada a necessidade de tornar os resíduos mais seguros e economicamente viáveis para reutilização.

Especificamente, os resíduos de flotação e lixiviação foram identificados como áreas-chave para inovações tecnológicas devido ao seu potencial de recuperação de metais valiosos, como cobre, ouro e níquel. Além disso, os rejeitos de areias minerais e beneficiamento seco mostraram-se promissores para reutilização em materiais de construção, oferecendo alternativas sustentáveis para a indústria da construção civil.

A gestão dos diferentes tipos de resíduos de mineração, como rejeitos, estéreis, lamas e águas contaminadas, foi detalhada, mostrando a diversidade de desafios e soluções aplicáveis a cada tipo de resíduo. A integração de tecnologias emergentes, como a biolixiviação e a estabilização química, foi identificada como crucial para a melhoria da gestão de resíduos, minimizando os impactos ambientais e promovendo a recuperação de recursos valiosos.

Vale ressaltar, ainda, outra tendência interessante observada na aplicação dos resíduos tratados. O uso integrado dos resíduos e rejeitos de mineração na agricultura e construção civil tem sido trabalhado fortemente, como forma de torná-los mais viáveis econômica e ambientalmente, uma vez que esses dois setores são os com maior potencial de absorver os grandes volumes gerados na mineração. Esses resíduos podem ser usados como aditivos para solos agrícolas ou como materiais para produção de blocos, pavimentos e composição de cimentos e concretos, contribuindo para a economia circular.

Desse modo, as análises estratégicas dos resultados da fase pós-prospectiva e do roadmap tecnológico forneceram um modo de identificar as tendências e/ou rotas dominantes em determinado setor, processo ou produto. No entanto, cabe ressaltar que a inovação é um processo mais amplo do que as estratégias individuais, sendo um processo cíclico e sistêmico. Desse modo, uma inovação tecnológica, organizacional ou mercadológica, se tomada individualmente, tem impacto limitado sobre seu entorno.

Para a análise do processo de inovação, não se deve esquecer do conjunto de atores envolvidos, incluindo a própria sociedade, e em interação, a importância das políticas de ciência, tecnologia e inovação (CT&I), a influência dos grupos de interesses e as pressões que caracterizam os caminhos seguidos por empresas e demais instituições participantes do processo.

Em suma, a elaboração deste roadmap tecnológico para tratamento e reúso de resíduos de mineração demonstra que, apesar dos desafios, as oportunidades para inovar e transformar

a gestão de resíduos são imensas. Com uma abordagem colaborativa e integrada, é possível alinhar as tendências tecnológicas com as necessidades do mercado e restrições ambientais, promovendo um futuro mais sustentável e eficiente para a indústria de mineração. A implementação das estratégias e tecnologias emergentes identificadas neste estudo é crucial para alcançar uma gestão de resíduos mais eficaz e ambientalmente responsável, beneficiando não apenas o setor de mineração, mas a sociedade como um todo.

REFERÊNCIAS

- ABEYWICKRAMA, J. et al. Optimizing metal recovery from slag leaching solutions: Advanced ion exchange techniques for sustainable resource extraction. **Journal of Water Process Engineering**, v. 56, p. 104482, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.104482>. Acesso em: 11 fev. 2025.
- ADRIANTO, L. R. et al. Toward sustainable reprocessing and valorization of sulfidic copper tailings: Scenarios and prospective LCA. **Sci Total Environ.**, v. 871, p. 162038, maio, 2023. Disponível em: [10.1016/j.scitotenv.2023.162038](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162038). Acesso em: 11 fev. 2025.
- ANAWAR, H. M. Sustainable rehabilitation of mining waste and acid mine drainage using geochemistry, mine type, mineralogy, texture, ore extraction and climate knowledge. **Journal of Environmental Management**, v. 158, p. 111-121, 2015.
- ATHIRA, S; GANGAPUTHIRAN, S. A. Critical Review on Potential Use of Iron Ore Tailings as Structural Fill Material. 2022. **Lecture Notes in Civil Engineering Soil Behavior and Characterization of Geomaterials**, p. 69-78. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-981-19-6513-5_6. Acesso em: 11 fev. 2025.
- BALBIN, A. et al. Characteristics of Nickel Laterite Mine Waste in Caraga Region, Philippines and Its Potential Utilization. **Nat. Environ. Pollut. Technol.**, v. 22, p. 1267-1276, 2023.
- BALOH, Peter et al. Building strategic partnerships for managing innovation outsourcing. **Strategic outsourcing: an international journal**, v. 1, n. 2, p. 100-121, 2008.
- BALTAR, C. A. M. et al. Titânio: minerais de titânio. LUZ, A. B.; LINS, F. A. F. **Rochas e minerais industriais: usos e especificações**. 2. ed. Rio de Janeiro: CETEM, 2008.
- BARKER, Derek; SMITH, David J. H. Technology foresight using roadmaps. **Long Range Planning**, v. 28, n. 2, p. 21-28, 1995.
- BETTENCOURT, Luís M. A.; TRANCIK, Jessika E.; KAUR, Jasleen. Determinants of the pace of global innovation in energy technologies. **PloS One**, v. 8, n. 10, p. e67864, 2013.
- BORSHIVER, S.; SILVA, A. L. R. Technology roadmap: planejamento estratégico para alinhar mercado-produto-tecnologia. BULLOCK, L. A. et al. Global Carbon Dioxide Removal Potential of Waste Materials From Metal and Diamond Mining. **Front. Clim.**, v. 3, p. 694175, 2021.
- CACCIUTTOLO, C.; CANO, D. Spatial and Temporal Study of Supernatant Process Water Pond in Tailings Storage Facilities: Use of Remote Sensing Techniques for Preventing Mine Tailings Dam Failures. **Sustainability**, v. 15, p. 4984, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su15064984>. Acesso em: 11 fev. 2025.

DAIM, Tugrul U.; PIZARRO, Melinda; TALLA, Rajasree. **Planning and roadmapping technological innovations**. Switzerland: Springer, 2014.

DE OLIVEIRA, Guidolin, T. et al. Fenton-like process evaluation of textile effluent discolouration using pyrite tailings: Influence of dissolved iron. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 11, n. 6, p. 111081, 2023. ISSN 2213-3437. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.111081>. Acesso em: 11 fev. 2025.

DE PAULO, Alex Fabianne; LIMA, Breno Augusto Pinto. Análise Sobre O Desenvolvimento Científico: um estudo baseado em rotas de conhecimento. **Brazilian Journal of Information Science**, v. 16, p. 12, 2022.

DU, K et al. Construction Practices of Green Mines in China. **Sustainability**, 2024, 16, 461. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su16010461>. Acesso em: 11 fev. 2025.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. **Towards a circular economy: business rationale for an accelerated transition**. [S.l.]: Ellen MacArthur Foundation, 2015.

FAVAS, P.J.C. et al. Acid mine drainages from abandoned mines: hydrochemistry, environmental impact, resource recovery, and prevention of pollution. In: PRASAD, M. N. V.; KOPPE, J. C.; KAZA, R. K. (Eds.). **Environmental materials and waste**. Cambridge: Academic Press, 2016.

FREITAS, Carlos Machado de; SILVA, Mariano Andrade da; MENEZES, Fernanda Carvalho de. O desastre na barragem de mineração da Samarco: fratura exposta dos limites do Brasil na redução de risco de desastres. **Ciência e Cultura**, v. 68, n. 3, p. 25-30, 2016.

GAO, B.; CAO, S.; YILMAZ, E. Effect of content and length of polypropylene fibers on strength and microstructure of cementitious tailings-waste rock fill. **Minerals**, v. 13, p. 142, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/min13020142>. Acesso em: 11 fev. 2025.

GODA, R. T. **Imobilização física de resíduo proveniente do tratamento de águas ácidas de uma instalação de mineração de urânio**. 67 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas, 2020.

GUSMÃO I. C. D. et al. **Os impactos Ambientais causados pela atividade mineradora**. In: CONGRESSO TÉCNICO DA ENGENHARIA E DA AGRONOMIA. 2021.

HELSE, J.; PERUMAL, P., CAPPUYNS, V. Valorizing (cleaned) sulfidic mine waste as a resource for construction materials. **J Environ Manage**, v. 319, p. 115742, out. 2022. Disponível em: [doi:10.1016/j.jenvman.2022.115742](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115742). PMID: 35849929. Acesso em: 11 fev. 2025.

HORN, E.; GUIMARÃES, R. S.; SILVA, S. W. **Avaliação do potencial de geração de drenagem ácida em área de manejo de carvão**. CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 32. 2023.

HOUSSINI, K. et al. Measuring anthropogenic phosphorus cycles to promote resource recovery and circularity in Morocco. **Resources Policy**, v. 81, p. 103415, 2023. ISSN 0301-4207. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2023.103415>. Acesso em: 11 fev. 2025.

HUANG, Z.; CAO, S.; YILMAZ, E. Microstructure and mechanical behavior of cemented gold/tungsten mine tailings-crushed rock backfill: effects of rock gradation and content. **J Environ Manage**, v. 1, n. 339, p. 117897, ago. 2023. Disponível em: doi: 10.1016/j.jenvman.2023.117897. PMID: 37043913.

HUDSON-EDWARDS, K. Tackling mine wastes. **Science**, v. 352, n. 6283, p. 288-290, 2016.

JIANG, Jingbo et al. From prospecting to mining: a review of enabling technologies, LCAs, and LCCAs for improved construction and demolition waste management. **Waste Management**, v. 159, p. 12-26, 2023.

KASAP, T.; YILMAZ, E.; SARI, M. **Effects of mineral additives and age on microstructure evolution and durability properties of sand-reinforced cementitious mine backfills**, 2022.

KASIKOV, A. G. et al. Deep processing of dump slag from the copper-nickel industry. **Metals**, v. 13, n. 1265, 2023. <https://doi.org/10.3390/met13071265>. Acesso em: 11 fev. 2025.

LASKOWSKI, J. **Coal Flotation and Fine Coal Utilization**. [S.l.]: Elsevier Science, 2001.

LAVIGNE, Nancy C.; MOUZA, Chrystalla. Epilogue: designing and integrating emerging technologies for learning, collaboration, reflection, and creativity. In: **Emerging technologies for the classroom: a learning sciences perspective**. Nova York: Springer, 2012.

LEMOS, M. et al. Geochemistry and mineralogy of auriferous tailings deposits and their potential for reuse in Nova Lima Region, Brazil. **Sci Rep**, v. 13, p. 4339, 2023a. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-31133-6>. Acesso em: 11 fev. 2025.

LEMOS, M. G. et al. Hydrochemistry, elements distribution and their potential recoveries in gold metallurgical treatment tailings dams. **Water**, v. 15, p. 2714, 2023b. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/w15152714>. Acesso em: 11 fev. 2025.

LIZA, R. et al. Assessment of Natural Radioactivity and Radon Exhalation in Peruvian Gold Mine Tailings to Produce a Geopolymer Cement. **Atmosphere**, v. 14, p. 588, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/atmos14030588>. Acesso em: 11 fev. 2025.

MONARDES V.; SEPÚLVEDA J. M. Multi-criteria analysis for circular economy promotion in the management of tailings dams: a case study. **Minerals**, v. 13, n. 4, p. 486, 2023.

MÉNDEZ, D. et al. Use of Tailings as a Substitute for Sand in Concrete Blocks Production: Gravimetric Mining Wastes as a Case Study. **Sustainability**, Switzerland, 2023.

MESQUITA, Pedro Paulo Dias; CARVALHO, Pedro Sérgio Landim de; OGANDO, Laura Duarte. **Desenvolvimento e inovação em mineração e metais**, Rio de Janeiro, mar. 2016.

MOREIRA, Victor et al. Rethinking gold mining wastewater treatment with an integrated process of membrane distillation and membrane contactors for minimal waste discard and resource recovery. **Chemical Engineering Journal**, p. 146906. 2023. Disponível em: 10.1016/j.cej.2023.146906. Acesso em: 11 fev. 2025.

MOYO, A et al. Alkaline industrial wastes: characteristics, environmental risks, and potential for mine waste management. **Environ Pollut**, v. 15, n. 323, p. 121292, abr. 2023. Disponível em: doi: 10.1016/j.envpol.2023.121292. PMID: 36804887. Acesso em: 11 fev. 2025.

PAN, Z; XIE, R.; CHEN, Z. One-step simultaneous biomass synthesis of iron nanoparticles using tea extracts for the removal of metal(loid)s in acid mine drainage. **Chemosphere**, v. 337, p. 139366, out. 2023. Disponível em: doi: 10.1016/j.chemosphere.2023.139366. PMID: 37391078. Acesso em: 11 fev. 2025.

PANDEY, V. Aneconomicandsustainableapproachtotransformaluminosilicate-richsolidwaste to functionally graded composite foam for high-temperature applications. **Chemosphere**, v. 338, p. 139588, out. 2023. Disponível em: doi:10.1016/j.chemosphere.2023.139588. PMID: 37478988. Acesso em: 11 fev. 2025.

PHAAL, R. et al. Starting-up roadmapping fast. **Research Technology Management**, v. 46, n. 2, p. 52-58, 2003.

PIRES, M. et al. Phosphate rock waste in the production of cement tile. **Results Eng.**, v. 16, p. 100701, 2022.

RODRIGUES, A. B. M. **Propriedades e qualidade ambiental de estéril e rejeito da mineração de manganês no sudeste da Amazônia**. 63 f. Dissertação -(Mestrado em Agronomia) Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém, 2022. Disponível em: <http://repositorio.ufra.edu.br/jspui/handle/123456789/1946>. Acesso em: 11 fev. 2025.

SANCHEZ-RAMOS, D. et al. Sustainable use of wastes as reactive material in permeable reactive barrier for remediation of acid mine drainage: batch and continuous studies. **J Environ Manage**, v. 1, n. 345, p. 118765, nov. 2023. Disponível em: doi:10.1016/j.jenvman.2023.118765. PMID: 37604103. Acesso em: 11 fev. 2025.

SAPSFORD, D. J. et al. Circular economy landfills for temporary storage and treatment of mineral-rich wastes Proceedings of the Institution of Civil Engineers. **Waste and Resource Management**, v. 176, n. 2, p. 77-93, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1680/jwarm.22.00008>. Acesso em: 11 fev. 2025.

SAVIATTO, E.; ZACCARON, A.; NANDI, V. S. et al. Sustainable mining: reuse of clay from abandoned areas in the south of Brazil for ceramic production based on a simplex design. **Materials (Basel)**, v. 16, n. 19, p. 6466, set. 2023. Disponível em: doi: 10.3390/ma16196466. PMID: 37834603; PMCID: PMC10573413. Acesso em: 11 fev. 2025.

SILVA, R. et al. **Otimização da rota de processo para obtenção do pellet feed magnético a partir do rejeito da flotação do minério de cobre.** 2022. XIX ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS E METALURGIA EXTRATIVA ARMAÇÃO DE BÚZIOS, Rio de Janeiro, 2022.

TORQUATO, Frederico Campos Regazoni. **Sustentabilidade no reaproveitamento de rejeitos de mineração: uma revisão sistemática sobre as diferentes técnicas.** Dissertação -(Mestrado) Pontifícia Universidade Católica de CAMPINAS. PUC-CAMPINAS. 2022. Disponível em: https://repositorio.sis.puc-campinas.edu.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/16714/cea_ppgsust_disserta%C3%A7ao_torquato_fcr_.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Acesso em: 11 fev. 2025.

TORRES, V. M. **Diagnóstico de lixiviação para minérios de ouro.** Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1996. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3134/tde-06082024-102600/pt-br.php>. Acesso em: 09 ago. 2024.

UNFCCC. **Adoption of the Paris Agreement. FCCC/CP/2015/L.9/Rev.1.** Paris: United Nations Framework Convention on Climate Change, 2015.

WANG, Lanbin et al. Leaching behavior and occurrence of metal elements in copper slag: The key to recycling metals in copper slag. **Journal of Hazardous Materials Advances**, v. 12, 2023, 100374, ISSN 2772-4166, <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2023.100374>. Acesso em: 11 fev. 2025.

WANG, L. et al. Leaching behavior and occurrence of metal elements in copper slag: The key to recycling metals in copper slag. **Journal of Hazardous Materials Advances**, 2023.

WEF. **The Global Risks Report 2018.** 13 ed. Geneva: The World Economic Forum, 2018.

Yao, Y. et al. Leaching of heavy metal(loid)s from historical Pb-Zn mining tailing in abandoned tailing deposit: up-flow column and batch tests. **J Environ Manage**, v. 325(Pt A), p. 116572, jan. 2023. Disponível em: doi: 10.1016/j.jenvman.2022.116572. PMID: 36419286. Acesso em: 11 fev. 2025.

YILMAZ, E.; KOOHESTANI, B.; CAO, S. Recent practices in mine tailings' recycling and reuse. In: QI, C.; BENSON, C. H. (Eds.). **Managing mining and minerals processing wastes, concepts design and applications.** Amsterdam: Elsevier, 2023.

ZHU, K. et al. Leaching behavior of copper tailings solidified/stabilized using hydantoin epoxy resin and red clay. **J. Environ. Manag.**, v. 345, p. 118876, 2023.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA – CNI

Antonio Ricardo Alvarez Alban
Presidente

DIRETORIA DE DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL

Rafael Esmeraldo Lucchesi Ramacciotti
Diretor De Desenvolvimento Industrial

Observatório Nacional da Indústria

Marcio Guerra Amorim
Superintendente do Observatório Nacional da Indústria

Marcello José Pio
Fernanda Fernandes Ministerio
Juliano Antonio Sebben
Suzana Borschiver
Andreza Lemos da Silva
Equipe Técnica

Adriano Reis Lucheta
Patrícia Magalhães Pereira Silva
Thais Correa Haber
Paula de Freitas Marques
Tarcísio Carlos Farias Pinheiro
Autores

DIRETORIA DE COMUNICAÇÃO

André Nascimento Curvello
Diretor de Comunicação

Superintendência de Publicidade e Mídias Sociais

Mariana Caetano Flores Pinto
Superintendente de Publicidade e Mídias Sociais

XXXXXXX XXXXXXXXX
Produção Editorial

DIRETORIA CORPORATIVA

Cid Carvalho Vianna
Diretor Corporativo

Superintendência de Desenvolvimento Humano

Renato Paiva
Superintendente de Desenvolvimento Humano

Gerência de Educação Corporativa

Priscila Lopes Cavichioli
Gerente de Educação Corporativa

Alberto Nemoto Yamaguti
Normalização

XXXXXXXXXXXXX
Consultor

XXXXX
Revisão Gramatical

Alessandro Mendes
Projeto Gráfico e Diagramação

 www.cni.com.br

 [/cnibrasil](https://www.facebook.com/cnibrasil)

 [@cnibr](https://www.instagram.com/cnibr)

 [/cniweb](https://www.youtube.com/cniweb)

 [/company/cni-brasil](https://www.linkedin.com/company/cni-brasil)



SENAi  Serviço Nacional
de Aprendizagem
Industrial