



08, 09, 10 e 11 de novembro de 2022
ISSN 2177-3866

REAPROVEITAMENTO E DISPOSIÇÃO DE REJEITOS DA MINERAÇÃO DE FERRO: TECNOLOGIAS E INOVAÇÕES AMBIENTAIS PARA GESTÃO AMBIENTAL

RAISSA HELENA PAIVA APOLINARIO

CENTRO UNIVERSITÁRIO DA FUNDAÇÃO EDUCACIONAL INACIANA PE SABÓIA DE MEDEIROS (FEI)

MARIA TEREZA SARAIVA DE SOUZA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ADMINISTRAÇÃO - PPGA/FEI/SP

Agradecimento à órgão de fomento:

O presente estudo teve suporte da "Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES)".

REAPROVEITAMENTO E DISPOSIÇÃO DE REJEITOS DA MINERAÇÃO DE FERRO: TECNOLOGIAS E INOVAÇÕES AMBIENTAIS PARA GESTÃO AMBIENTAL

1 INTRODUÇÃO

As indústrias de mineração de países em desenvolvimento possuem uma visão negativa em relação ao uso de novas tecnologias, pelo fato da inovação consumir tempo e esforço até a comprovação de resultado (GÜLCAN, 2020). O retorno direto é considerado baixo comparado ao investimento inicial desta nova tecnologia que é alto, ao contrário da ponderação que deveria ser feita, referente aos custos de oportunidade derivados da aplicação dessa nova inovação (GEISSLER et al., 2018). Para cada tonelada de metal extraído dos minérios, gera-se aproximadamente de 2 a 12 toneladas de resíduos de mineração, sendo um grande desafio ambiental para o setor, além de apresentar riscos potenciais ambientais dos descarte de resíduos, como acidificação e contaminação de águas por metais pesados e o risco do armazenamento de resíduos (KINNUNEN & KAKSONEN, 2019). A utilização de tecnologias adequadas e a adoção de inovação ajudam a lidar com os desafios ambientais e atender órgãos reguladores (PIMENTEL et al., 2016).

A indústria de mineração é extrativista intensiva, conseqüentemente gera uma quantidade enorme de rejeitos e resíduos processuais. As mineradoras brasileiras produzem e descartam cerca de 184 milhões de toneladas de rejeitos de minério de ferro anualmente em barragens de rejeitos (DO CARMO E SILVA DEFÁVERI et al., 2019). Este descarte e armazenamento geram riscos e passivos ambientais de alto impacto ao meio ambiente, as catástrofes ocorridas em 2015 e 2019 com o rompimento das barragens de rejeitos são um exemplo destes passivos. O rompimento da barragem do Fundão (Mariana-MG), em 2015, despejou 62 milhões de m³ de lama no ecossistema (DEMAJOROVIC; LOPES; SANTIAGO, 2019) e o rompimento da barragem da Mina Córrego do Feijão (Bromadinho-MG), em 2019, despejou mais de 11×10^6 m³ de resíduos de mineração (ROTTA et al., 2019). Identifica-se que as falhas de barragens de mineração dobraram nos últimos anos, em um período de 1999 à 2019, de modo a reconhecer esse fenômeno global que apresenta alto passivo socioambiental (ARMSTRONG; PETTER; PETTER, 2019).

Uma estratégia para reduzir os desafios dos rejeitos da mineração é investir em métodos de reaproveitamento e no desenvolvimento de tecnologias processuais para evitar a geração significativa de rejeitos finos, de modo a reduzir a pegada ambiental (GRABSCH; YAHYAEI; FAWELL, 2020). O reaproveitamento de rejeitos resulta em benefícios para o meio ambiente na indústria de mineração, como por exemplo, minimização da degradação ambiental, redução dos riscos de incidentes e tragédias relacionadas a disposição de resíduos em grandes áreas, reduz os custos relativos ao armazenamento e monitoramento dos rejeitos, e quando aplicado em outras indústrias há a redução da exploração de materiais naturais para fabricação de novos produtos (BASTOS et al., 2016).

Deste modo, o objetivo da presente pesquisa é analisar como a indústria de minério de ferro utilizam inovações e as tecnologias para fazer a gestão ambiental ligada ao reaproveitamento e disposição de resíduos de minério de ferro, de forma a refletir a respeito dos impactos ambientais e dos riscos para comunidades ao redor. Os resíduos podem gerar passivos ambientais e danos ecológicos, como por exemplo, vazamento de poluentes tóxicos das barragens (WEISHI et al., 2018). Desta forma, a aplicação de tecnologias ambientais para a gestão de resíduos é uma ferramenta essencial para oferecer ao setor de mineração um desempenho ambiental significativo (GALVÃO et al., 2018). A presente pesquisa oferece como contribuição teórica a análise das estratégias de inovação ambiental e gestão ambiental relacionados com os resíduos minerais no contexto brasileiro, ao considerar a questão dos resíduos mineral e seus riscos como um fenômeno global. Como contribuição prática, este

trabalho oferece orientação para gestores e coordenadores da área de sustentabilidade e operações de mineração, assim como direcionamento para criadores de políticas públicas e regulamentações.

Por estas e outras razões que a questão do descarte e disposição de resíduos minerais recebeu enorme atenção da sociedade e governo, resultando em um dos maiores desafios atuais enfrentados pelo setor de mineração (QI; FOURIE, 2019). Neste cenário, o gerenciamento de resíduos minerais está em pauta para regulamentação governamental, de modo a fazer as empresas mineradoras abordarem os impactos ambientais deste tópico da atividade da mineração. Porém as tecnologias atuais, ainda apresentam limitações técnicas como a capacidade de processar a quantidade de rejeito desejado e o alto custo de investimento (WANG et al., 2014).

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Inovação no contexto da indústria de minério de ferro

A indústria de mineração vem sofrendo pressão para solucionar os seus impactos, a fase de operação de extração e processamento são as fases mais intensivas em impacto ambiental e com maior duração ao longo do tempo, até o fechamento da mina (PIMENTEL et al., 2016). Os impactos ambientais desta atividade extrativista são bem notórios, acarretando desafios socioeconômicos e com impactos ambientais as comunidades adjacentes, como pouca diversidade economia e dependência da fonte principal de renda acarretando em vulnerabilidades destas comunidades e ecossistemas perante as operações da indústria de minério de ferro (WASYLYCIA-LEIS et al., 2014).

Como incentivador de mudança deste contexto, surge a inovação ambiental, visto como uma resposta a níveis de preocupações globais em relação aos impactos e riscos associados as atividades de mineração, este imperativo pressiona a empresa a buscar formas de criar uma correlação entre a competitividade do mercado e o desempenho ambiental da mina. Estas inovações ambientais são práticas cada vez mais exigidas pelos *stakeholders* envolvidos na cadeia de valor (WARHURST & BRIDGE, 1996). O principal foco dessa inovação são os resultados ambientais, tais quais: os benefícios tradicionais - mais focados em processos, por exemplo, eficiência, ganhos de eficácia, desempenho aprimorado e ganhos de economia; e os benefícios ambientais e regulatórios - considerados públicos, distanciando os efeitos negativos da sociedade (BENDELL, 2017). Este tipo de inovação com ênfase na tecnologia pode, principalmente, reduzir as externalidades negativas, de forma a revelar-se significativa para as cadeias de valor dos produtos, devido a importância da interconexão entre organizações e países (COSTANTINI et al., 2017).

A inovação ambiental pode ser aplicada em dois níveis distintos, sendo eles: i) em grande escala - mudança de um projeto fabril, aplicação de circuito fechado, entre outros; ou ii) em pequena escala, por exemplo, destinação de resíduos para reciclagem, troca de lâmpadas fluorescentes para LED, entre outros (BENDELL, 2017). A inovação ambiental pode gerar externalidades positivas em suas fases principais, ou seja, na fase de inovação – resultado da pesquisa e desenvolvimento (P&D) aplicado na organização; e na fase da difusão, gerada pela diminuição dos custos externos associados aos riscos de aplicação da inovação comparado com o mercado tradicional (KANDA et al., 2019).

A inovação é essencial para lidar com a complexidade inerente ao setor de minério de ferro, como uma maneira de garantir a resiliência perante as variabilidades do negócio a longo prazo. O setor possui uma capacidade de inovação incremental essencial que garante melhorias e acompanhamentos diante das pressões locais e globais. Porém a área mais crítica para o setor são as de grandes mudanças disruptivas, ou seja, inovações que exigem maior

esforço por desafiar o conhecimento existente (BEARMAN, 2013) e investigar como garantir uma aplicação de inovações ambientais da maneira mais eficiente possível.

A indústria de mineração possui ao longo dos anos avanços por meio da engenharia verde – gestão de resíduos e modificação de processos de produção. Porém estas tecnologias possuem um tempo de amadurecimento para tornarem-se as melhores técnicas disponíveis, até apresentem melhorias econômicas para a organização. Há um aumento significativo dos resíduos do setor de mineração advindo do crescimento da demanda. E devido a legislação ambiental mais rigorosa em relação ao setor, é possível identificar um aumento dos custos referentes a quantidade de rejeitos depositado pelas mineradoras e a restrição ao acesso a novos locais de disposição, relacionados a segurança do espaço e impacto ambiental gerado. Desse modo, diferentes agentes da cadeia de suprimentos, que podem interferir e até impulsionar inovações e resultados melhores (PAJUNEN et al., 2012).

Mesmo com esses benefícios, há algumas barreiras para a implementação de tecnologias limpas na indústria de mineração, tais quais, o investimento de capital inicial, divergência entre custos totais e a energia economizada e a diferença de percepção da sustentabilidade entre o nível corporativo e operacional (KUMAR KATTA et al., 2019). As restrições financeiras são mais limitadoras nas inovações ambientais do que nas tradicionais, assim como dificultam o desenvolvimento de capacidades organizacionais adequadas para a implementação de sistemas que promovem uma inovação ligada a questão ambiental (LEITÃO et al., 2019). A incerteza tanto do mercado quanto do retorno do investimento realizado, são obstáculos expressivos para a implementação da inovação ambiental, pois o tempo de implantação desta inovação é de longo prazo (KARAKAYA et al., 2014), a falta de visualização de resultados imediatos, além da complexidade da aplicação de inovação ambiental no processo (ARRANZ et al., 2019).

Ou seja, considerando este contexto de vulnerabilidade e acirramento de políticas iniciativas ambientais voltadas a sustentabilidade após desastres ambientais, a incorporação de tecnologias por meio da difusão de inovações ambientais que facilitam o consumo de energias renováveis, mitiga impactos ambientais, assim como permite agregar melhorias aos ecossistemas e a população humana das comunidades vizinhas.

2.2 Fluxo e disposição de resíduos minerais

Um dos maiores estados produtores de minério de ferro é Minas Gerais, a área do Quadrilátero Ferrífero, localizada neste estado, era rica em depósitos de minério de ferro de alto teor, porém ao longo de operações de mineração estas jazidas apresentaram um esgotamento do teor, transformando a qualidade do minério de depósito e dificultando os processos já existentes, realizado pela estratificação das partículas de ferro por meio aquoso. No entanto, com a difusão de inovações e o desenvolvimento de melhorias nas plantas de beneficiamento há a possibilidade de processamento e concentração deste material, aliviando os grandes depósitos de resíduos minerais (GOMES; TOMI; ASSIS, 2015). O processamento de minério com menor teor de ferro, origina consequentemente maiores quantidades de rejeitos (ARMSTRONG et al., 2019). Os rejeitos minerais são misturas heterogêneas e sua caracterização é feita considerando três fatores principais: o tamanho do grão, a mineralogia e a morfologia de seus componentes (WANG et al., 2014).

A indústria de mineração gera dois principais resíduos: estéril e rejeitos. O estéril são resíduos sólidos de extração, ou seja, rochas com baixíssimo ou nenhum grau de minério (NORGATE; HAQUE, 2013), que consiste em minérios pobres, sedimentos, solos e aparas (IBRAM, 2016). Os rejeitos, são materiais úmidos advindos do beneficiamento do minério de ferro ou nas etapas seguintes do tratamento de efluentes. Deste rejeito destaca-se dois tipos: rejeitos granulares – granulometria acima de 74 μm (IBRAM, 2016); e finos - lama com partículas de tamanho inferior a 10 μm (DE FREITAS et al., 2019). O maior desafio para as

tecnologias de concentração e tratamento de efluentes, é retirar a umidade do rejeito pela dificuldade de separação sólido-líquido (WANG et al., 2014).

O tipo de depósito para os resíduos advindos da retirada da camada de solo que ocorre no processo de lavra é chamado de pilha de estéril, são construídos perto do poço de mineração com a finalidade de descartar os materiais estéreis, ou seja, rochas que não possuem valor algum e que precisam ser removidos para permitir as operações de extração do minério de ferro. Porém, este tipo de descarte sem controle e gerenciamento pode oferecer dois tipos de impactos: risco de geração de drenagem ácida da mina (AMD) - responsável por impactar o solo e as fontes de águas subterrâneas próximas as operações de mineração – ou interferir no escoamento superficial do solo em que são depositados – resultando em desvios de curso d'água (ANA: IBRAM, 2013). Destaca-se como forma de redução dos impactos deste sistema de disposição a utilização deste resíduo como material para recuperação de voçorocas e preenchimento de cavas exauridas no processo de lavra (IBRAM, 2016).

Para o tratamento dos rejeitos de beneficiamento, atualmente a estratégia mais utilizada é a barragem de rejeitos, construída em vales à jusante das operações de mineração, são feitas de rochas residuais e do próprio lodo do processamento mineral – devidamente preparado (ANA: IBRAM, 2013). Os rejeitos dispostos nas barragens possuem alto teor de água, aproximadamente de 10% a 25% de sólido (IBRAM, 2016). Oferece uma forma de separação por sedimentação dos sólidos suspensos e da água residual restante após o tratamento de efluentes, pois o metal e sólidos dispostos na água ficam em um nível abaixo da água residual (NEDVED; JANSZ, 2006). Apesar de a barragem ser o método mais utilizado pela indústria de mineração, está sujeita a falhas principalmente pelo tipo de estrutura de contenção selecionado, devido a água nos poros do rejeito, elemento gerador de instabilidade (IBRAM, 2016), exigem grandes áreas de ocupação para armazenamento dos rejeitos (KEFENI; MSAGATI; MAMBA, 2017). Possui alto custo de manutenção e monitoramento, além de apresentar um grande passivo ambiental com impacto direto no bioma local da mina e risco as comunidades próximas a barragem (BASTOS et al., 2016).

Há três tipos de estruturas de barragens de contenção para a indústria de mineração, sendo elas, a montante, a jusante e pela linha de centro. O método a montante é o mais utilizado pelas mineradoras por ser considerado simples, de fácil execução e econômico, pois apresenta redução de custo de implementação e permite a menor relação entre volumes de areia e lama (IBRAM, 2016). Porém, é o método mais perigoso (ARMSTRONG et al., 2019). O sistema de contenção a jusante é o mais estável, principalmente, porque nenhuma parte da barragem é construído sobre o rejeito depositado anteriormente e apresenta um maior controle do lançamento e compactação dos rejeitos, permitindo – se necessário – a instalação de sistemas de drenagem durante sua construção e alteamento. Ou seja, possui menor risco de instabilidade. Porém, comparado aos outros métodos, esta estrutura necessita de uma área maior, quantidade significativa de materiais para construção e conseqüentemente maior custo (IBRAM, 2016).

A barragem pelo método de linha de centro consiste em uma estrutura que mescla os dois métodos anteriores, somando vantagens e mitigando as desvantagens. A construção dos alteamentos é realizada verticalmente ao eixo do dique de partida, possibilitando dois pontos principais: redução de custo de implementação; e instalação de zonas de drenagem internas ao longo da fase de alteamento, proporcionando controle da estabilidade da barragem e da retenção da água contida nos poros dos rejeitos (IBRAM, 2016). Alguns fatores não técnicos influenciam as falhas das barragens de rejeitos, entre eles: redução de custos operacionais e de manutenção e de controle; aumento da demanda de mercado; falha na legislação, regulamentação de agências governamentais e na fiscalização (ARMSTRONG et al., 2019).

Deste modo, a crescente preocupação mundial perante as falhas recorrentes nas barragens de rejeitos de mineração é uma importante pressão para que as indústrias do setor

considerem alterações nos seus processos. Atualmente, existem opções de tecnologias de processamento de rejeitos para redução da quantidade de água contida nos resíduos minerais (ARMSTRONG et al., 2019), acarretando em maior estabilidade para a disposição dos resíduos. Outra possibilidade de lidar com os rejeitos da mineração, é a reciclagem e reutilização destes como matéria-prima em novos processos, de modo, a converter o total de rejeitos da mina em coprodutos para outros processos industriais (EDRAKI et al., 2014).

2.3 Tecnologias de redução de água para rejeitos minerais

Um dos principais problemas para o rompimento das barragens é o alto teor de água dos rejeitos, como solução se destaca a tecnologia *thickened tailings*, que possui a desidratação como processo principal. Esta tecnologia reduz o risco de infiltração de íons, além de permitir economia de água e custos para a mineradora (HUAZHE et al., 2020). Os rejeitos advindos desta tecnologia são mais concentrados e não segregantes (GAO; FOURIE, 2019), concentração de aproximadamente 55 a 75% de sólidos (ARMSTRONG et al., 2019), o valor acumulado de sólidos é bem parecido com a tecnologia *paste backfill*, o que difere os processos são as propriedades do fluxo do rejeito (IHLE; KRACHT, 2018). A vantagem desta tecnologia comparada ao método de disposição de rejeitos convencionais é o baixo consumo de água, mitigação da contaminação de águas subterrâneas e superficiais, redução do risco de impactos ambientais e facilidade na reabilitação do solo (GAO; FOURIE, 2019)

O *paste backfill* é uma tecnologia que mistura rejeitos da mineração desidratados, cimento e água que são utilizados para formar um material pastoso, com concentração de sólidos de 70% a 80% aproximadamente. Pode ser adicionado outros componentes como cinzas volantes, gesso e cal, de modo a alterar algumas características específicas do material - força, módulo de elasticidade, resistência à compressão uniaxial, entre outros - a depender da finalidade desta pasta (LIU et al., 2020). É um sistema de disposição de rejeitos adequado para áreas de subsidência passiva e ativa – ou seja, que ainda possuem atividades mineradoras no fundo. Como forma de evitar os problemas e impactos ambientais advindos dos sistemas de disposição tradicionais como desastres primários e secundários – diluição e perda do minério, fluxo de detritos geológicos no fundo do poço e poluição das águas subterrâneas (SUN; WANG; HOU, 2018). Possui uma durabilidade que determina a força e a permeabilidade do aterro da mina, além de reduzir os impactos ambientais advindos da disposição do rejeito, como por exemplo, a drenagem ácida de minas (LIU et al., 2020).

O *Dry Stacking*, conhecido também como empilhamento a seco, é uma das tecnologias que se apresenta como alternativa ao método tradicional de disposição por barragens que está acendendo em significado para a indústria de mineração. Este método retira a umidade dos rejeitos de modo que o teor final fique em torno de 15%, a desidratação pode ser realizada por filtro a vácuo ou a pressão. Os rejeitos secos são mais fáceis de manusear (SCHOENBERGER, 2016) e possuem menos perda de água para o meio ambiente - evaporação, infiltração, arrastamento físico do rejeito, entre outros (NORTHEY et al., 2016). Apesar dos benefícios, como: necessidade de menor espaço para disposição dos rejeitos (FRANKS et al., 2011), separação ideal entre a água e reagentes químicos do rejeito - evitando reações químicas responsáveis tóxicas; apresenta alguns problemas técnicos, como gerenciamento de poeira, erosão dos rejeitos e gerenciamento de águas superficiais e, comparado aos métodos tradicionais, seus custos são mais altos (SCHOENBERGER, 2016).

2.4 Reciclagem e reutilização dos rejeitos de mineração

A reutilização dos resíduos minerais da indústria de minério de ferro envolve uma nova aplicação ou uso dos resíduos da mineração, podendo ser na sua forma original – sem reprocessamento, ou reciclagem, que é a reutilização deste material como matéria-prima em outro processo, ou somente a utilização de componentes valiosos para algum reprocessamento

(EDRAKI et al., 2014). Como alternativas para a reutilização aponta-se o reaproveitamento como utilização destes materiais na indústria da construção civil, de modo a reciclar e reutilizar estes materiais para a produção de produtos sustentáveis e diminuir a extração de matérias-primas naturais (SHETTIMA et al., 2016).

O reaproveitamento gera benefícios tanto ao meio ambiente, como econômicos para a indústria, como por exemplo, minimiza a degradação ambiental, reduz os riscos da disposição de resíduos em grandes áreas, reduz os custos relativos ao armazenamento e monitoramento dos rejeitos, além de reduzir a exploração de agregados naturais para fabricação de novos produtos. A indústria da construção civil apresenta um grande potencial de absorção de coprodutos da indústria de mineração, principalmente pelas características do material reaproveitado compatíveis com alguns produtos (BASTOS et al., 2016).

Alguns exemplos de uso de rejeitos de minério como coprodutos para outros processos produtivos podem ser citados: na infraestrutura rodoviária de forma a melhorar áreas urbanas não pavimentadas (BASTOS et al., 2016), na fabricação de concretos - já que a mistura mineral é um dos componentes essenciais para o concreto de alta tecnologia (WU et al., 2018), rejeitos de minério de ferro - ricos em compostos de hematita e sílica - como catalisadores em processos do tipo Fenton para tratamento de águas residuais (DE FREITAS et al., 2019), como compostos de tijolos ecológicos (WEISHI et al., 2018), na fabricação de argamassa de forma a fornecer propriedades mecânicas aprimoradas (FONTES et al., 2016), como material precursor para o compósito de geopoliméricos (DO CARMO E SILVA DEFÁVERI et al., 2019), como adsorvente dos poços de águas subterrâneas contaminadas com sulfato (SADEGHALVAD; AZADMEHR; HEZARKHANI, 2016) e como pigmento para tintas sustentáveis - apresenta baixo custo e desempenho adequado, oferecendo diversas cores e texturas e evitando assim que a indústria de pigmentos reduza a quantidade de metais pesados na composição das tintas (GALVÃO et al., 2018).

Os resíduos são uma ótima oportunidade para recuperar valor econômico significativo para a indústria de mineração (KINNUNEN; KAKSONEN, 2019). O desenvolvimento de tecnologias apropriadas para lidar com a disposição e o armazenamento dos rejeitos das minas pode reduzir significativamente o impacto ambiental, sendo que a reciclagem e a reutilização destes rejeitos como um coproduto de outros processos é visto como uma alternativa de mantém o valor em potencial do material (KEFENI; MSAGATI; MAMBA, 2017).

A aplicação de um modelo circular na indústria de mineração possui um potencial significativo para a resolução dos desafios advindos da escassez de recursos minerais, poluição ambiental e o desperdício de recursos, podendo agregar lucro econômico para a mineradora (KINNUNEN; KAKSONEN, 2019). O fechamento de ciclos por meio da reciclagem, reutilização e reprocessamento de produtos finais, permite que o valor do material circule por mais tempo na sua cadeia de suprimentos. Resultando na redução de insumos primários e consequentemente na eficiência do processo - evitando perdas desnecessárias (GEISSLER et al., 2018).

3 METODOLOGIA

Essa pesquisa utilizou uma abordagem metodológica qualitativa, por meio do método de estudo de casos múltiplos conforme Yin (2015). O recorte da indústria de minério de ferro, principalmente nas etapas de lavra e beneficiamento, foi realizado conforme Anuário Mineral Brasileiro (ANM) e O Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM), considerados lavra e beneficiamento como as principais etapas deste setor. A definição do objeto de pesquisa baseou-se a importância e relevância de estudar o fenômeno global do impacto da mineração de ferro, principalmente, ao considerar a quantidade gerada de resíduos minerais durante processamento a úmido (IBRAM, 2016) e os eventos recentes grandes tragédias de

rompimento de barragens de rejeitos, ocorridas em Mariana-MG (2015) e Brumadinho-MG (2019) (ARMSTRONG et al., 2019).

A seleção dos casos múltiplos, considerou empresas de grande porte, que atuam no setor de minério na região de Minas Gerais (Brasil), em especial, baseado em número de produção de minério de ferro no estado de Minas Gerais, tendo em conta que o minério de ferro totaliza 73,9% dos 80% das substâncias metálicas total da produção mineral brasileira em 2020. Em produção bruta no ano de 2020, minério de ferro teve 523.305.109 toneladas e minas gerais 322.672.284 toneladas, sendo o maior estado em contribuição de minério de ferro (ANM, 2021). Deste modo, escolheu-se empresas que atuam na região de Minas Gerais e que utilizam o processo à úmido – estratificação do minério de ferro por meio aquoso, que é mais complexo e gera maior quantidade de resíduos minerais com grande concentração de água, sendo um grande desafio para disposição segura. Além dos casos selecionados, optou-se por agregar depoimentos de especialistas para trazer mais robustez ao estudo, para acrescentar informações de agentes diretos e indiretos ao setor aumenta-se os dados para triangulação de informações na análise dos resultados.

Para atender o objetivo de pesquisa proposto, conforme sugerido por Yin (2015), optou-se por utilizar como instrumento de coleta de dados a análise documental de documentos empresariais públicos das companhias de mineração como relatórios de sustentabilidade, documentos de instituições de tecnologia de mineração, entre outros; e entrevistas semiestruturadas, com colaboradores das empresas mineradoras selecionadas como casos e especialistas da área de mineração, conforme pode ser observado no Quadro 01. O acréscimo dos especialistas na relação dos entrevistados foi visando o aumento de dados para a triangulação de dados e robustez da pesquisa.

Quadro 1 – Relação dos entrevistados na pesquisa

	Cargo do entrevistado	Tempo de duração
Mineradora Caso 1	Coordenadora de Desenvolvimento Sustentável – Gerência de Meio Ambiente	48 minutos
	Coordenador de Recursos Hídricos e Monitoramentos Ambientais	1 hora e 08 minutos
	Consultor de Barragens	57 minutos
Mineradora Caso 2	Engenheiro especialista	1 hora e 09 minutos
	Engenheiro especialista	55 minutos
Especialistas	Gerente de Pesquisa e desenvolvimento - Especialista de mineração - Instituto brasileiro de Mineração	1 hora e 15 minutos
	Gerente de Sustentabilidade - Especialista de mineração - Instituto brasileiro de Mineração	1 hora e 15 minutos
	Tecnologista Pleno - Coordenação de Processos Minerais - Centro tecnológico de mineração	34 minutos
	Diretora Executiva - Consultoria de mineração - Especialista em mineração	57 minutos

Fonte: Autoras

As entrevistas foram realizadas por meio de plataformas online, gravadas com consentimento dos entrevistados e transcrita para melhor análise dos dados. Retornou-se a transcrição de algumas entrevistas aos responsáveis para acréscimo de informações e comentários adicionais. Esta pesquisa se fundamentou no protocolo de pesquisa indicado por Yin (2015) para estudo de casos múltiplos, a fim de garantir a credibilidade dos dados coletados e analisados.

Utilizou-se a análise de conteúdo para a sistematização e organização das transcrições das entrevistas, além das informações durante a análise textual. Analisou-se, primeiramente, estudou-se o conteúdo das entrevistas individualmente para cada caso, para posteriormente analisá-los em comparação entre si. Complementando a investigação das entrevistas das

empresas de mineração, com as documentações públicas e privadas e as entrevistas transcritas dos especialistas do setor, como forma de complemento na triangulação dos dados. Para facilitar a análise criou-se quadros sínteses dos resultados coletados e comparativos de cada caso, divididos em dois tópicos principais: reaproveitamento de rejeitos e tratamento e disposição de rejeitos. Para garantir a confiabilidade das informações foi utilizado a triangulação de dados de diferentes fontes de dados, principalmente da análise de documentos públicos e entrevistas.

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A análise e discussão dos resultados foi estruturada em dois tópicos principais: reaproveitamento de rejeitos e tratamento e disposição de rejeitos, apresentados em quadro comparativo entre os casos, para logo em seguida expor a discussão e análise.

4.1 Reaproveitamento de rejeitos na mineração

No Quadro 2 apresentamos os resultados da pesquisa referentes ao reaproveitamento de rejeitos na indústria de minério de ferro, com comparativo entre os casos de estudos.

Quadro 2 - Comparação de itens relacionados ao reaproveitamento de rejeitos minerais

Itens	Caso 1	Caso 2
Estudos de P&D voltados para o reaproveitamento de resíduos sólidos e rejeitos	Sim, com foco na indústria da construção civil	Sim, a priori para consumo interno da empresa e doações para as comunidades vizinhas. Mas com projeção em grandes parceiros, como também nas indústrias locais, de modo a fomentar um <i>hub</i> em torno dos centros produtores de rejeito a fim de facilitar o reaproveitamento
Realização de parcerias para desenvolvimento de projetos de reaproveitamento de rejeitos	Convênios com institutos de pesquisa da região, Minas Gerais, para trabalhar a questão de reaproveitamento dos rejeitos dispostos nas barragens, em vista do valor agregado do rejeito	Parceria com instituto de pesquisas para os diversos projetos visando a diversificação do portfólio
Problemas e dificuldades técnicas para projetos de reaproveitamento de rejeitos	Sim, a quantidade de rejeito é superior a demanda da indústria que vai utilizar o material de reaproveitamento, ou seja, projetos idealizados devem considerar maneiras de se tornarem escaláveis para abarcar a quantidade de rejeitos. Além de planejar o produto de reaproveitamento de forma integrada com a cadeia, para que tenha demanda de mercado, não fazer o produto por fazer	Sim, devido à quantidade de rejeitos já existentes nas barragens, como as que são geradas diariamente no processo é necessário diversificar o portfólio de coprodutos. Além da dificuldade de engajamento e comunicação entre os setores que estão além da mineração, ou seja, setores de base que possuem alto potencial de absorver o volume de rejeitos
Iniciativas com foco no reprocessamento e reaproveitamento dos rejeitos	Reaproveitamento de rejeitos como calçamento para um centro de educação ambiental localizado dentro da mina da mineradora, projetos de confecção de blocos cimentícios de cerâmicos – construção civil, confecção de material propante – indústria de óleo e gás e na construção de micro pelotas – metalurgia	Criação de uma planta piloto de produção de artefatos de rejeitos - pisos intertravados, blocos estruturais e blocos de vedação - instalada dentro da unidade operacional da mineradora

Fonte: Autoras

Como pode ser observado no Quadro 2, a questão de estudos e pesquisa e desenvolvimento (P&D) é importante para as mineradoras estudadas, as duas companhias possuem convênios com institutos de pesquisa externos para trabalhar a questão de

reaproveitamento dos rejeitos dispostos nas barragens. Uma vez que, identificam oportunidade de valor agregado nesse resíduo mineral, tanto para uso interno na mina como para uso externo em outras cadeias de produtos (KINNUNEN; KAKSONEN, 2019; SHETTIMA et al., 2016).

A mineradora 1 possui convênio com centros tecnológicos locais (Minas Gerais) para desenvolvimento de possibilidades de reaproveitamento, para a indústria da construção civil. Como exemplos práticos destes convênios, existe projeto para reaproveitar rejeitos em calçamento do centro de educação ambiental - localizado dentro da mina, produção de blocos cimentícios de cerâmicos – construção civil, confecção de material propante – indústria de óleo e gás e criação de micro pelotas – metalurgia. Já a mineradora 2, possui um *trade off* de iniciativas que focam em tecnologias de baixa complexidade tecnológica e alta atratividade em termos de consumo para o rejeito. De modo a criar um portfólio de projetos diverso, possibilitando a absorção pelo mercado externo, com exemplos práticos como a criação de uma planta piloto de produção de artefatos de rejeitos - pisos intertravados, blocos estruturais e blocos de vedação - instalada dentro da unidade operacional da mineradora, com intuito da destinação ao consumo interno da empresa e doações para as comunidades vizinhas.

Contudo, o problema não é a aplicabilidade do rejeito em outras indústrias e processos, e sim o volume gerado pelos processos e os volumes já dispostos em barragens (KINNUNEN; KAKSONEN, 2019; DO CARMO E SILVA DEFÁVERI et al., 2019). Em consenso entre as mineradoras e especialistas, o alto volume de rejeito de minério de ferro influencia os projetos e a forma de reaproveitamento do rejeito, ou seja, os projetos idealizados devem considerar maneiras de se tornarem escaláveis para a grande quantidade de rejeitos – apesar de custos e grande volume de resíduos - e analisar a viabilidade econômica do projeto. Parcerias apresentam-se como uma solução em desenvolvimento de projetos, entre empresa, universidades e centros tecnológicos – privados e público. Porém, não é uma perspectiva simples, pois não adianta somente projetar produtos com estes rejeitos sem antes pensar em toda a cadeia de forma integrada e no mercado que vai absorver este produto ou resíduo.

Outro ponto importante para conseguir alavancar o reaproveitamento de rejeitos das empresas de mineração, além de mesclar as inovações tecnológicas e parcerias para P&D, é a inovação de modelos de negócios para garantir por mais tempo o valor do recurso no ciclo da empresa ou de outras cadeias (GEISLER et al., 2018; KINNUNEN; KAKSONEN, 2019), como forma de reduzir os danos ambientais. Isto é, pensar nos grandes parceiros, nas indústrias locais e possíveis *hubs* em torno dos centros produtores de rejeito de modo a facilitar o reaproveitamento e integrar todos os agentes da cadeia. Pois, partindo da premissa da criação de valor compartilhado e da mudança de modelo de negócio há a possibilidade da criação de modelos de negócios híbridos, trazendo flexibilidade e possibilitando a absorção dos grandes volumes produzidos; assim como o fortalecimento de parcerias para P&D da empresa mineradora, seja com futuros parceiros ou até mesmo com clientes. É uma forma de diminuir as incertezas (KARAKAYA et al., 2014; ARRANZ et al., 2019; GÜLCAN, 2020) do processo de inovação e reduzir custos, por meio da aproximação da empresa com centros universitários, empresas, fornecedores. Esse pensamento de integração além de auxiliar no reaproveitamento de rejeitos, fomenta o desenvolvimento de tecnologias e melhorias de processos que reduzam a geração de rejeitos (GALVÃO et al., 2018; WANG et al., 2014).

Apesar da regulação e legislação ambiental ficar mais rigorosa em relação ao setor (PAJUNEN et al., 2012), principalmente devido as tragédias de rompimento de barragens (DEMAJOROVIC; LOPES; SANTIAGO, 2019; GONÇALVES et al., 2019), foi identificado outro desafio para o reaproveitamento de rejeitos, a falta de definição da legislação específica sobre o reaproveitamento e destinação deste material, ou seja, falta de certeza sobre as possibilidades de comercialização de um determinado coproduto e qual a responsabilidade da

empresa perante aquele rejeito utilizado como matéria prima. A deficiência de estrutura fiscal, contábil e jurídica, como vista em outros países, se torna um ônus para a empresa, interferindo em novas formas de atuar neste tópico, impedindo o fomento do reaproveitamento de rejeito de mineração no Brasil.

Identificou-se que os estudos e projetos de reaproveitamento de resíduos do setor mineral ganharam grande força a partir dos incidentes com barragens de rejeitos em Mariana-MG, sendo reforçados após o rompimento da barragem de Brumadinho-MG ocorrido em 2019 (ARMSTRONG; PETTER; PETTER, 2019). Evoluindo para um movimento de pressão global que impulsionou as mineradoras a aplicar soluções para disposição dos rejeitos que ofereçam menor risco. O reaproveitamento de rejeitos resulta em benefícios para o meio ambiente e a indústria de mineração, como por exemplo, minimização da degradação ambiental, redução dos riscos de incidentes e tragédias relacionadas a disposição de resíduos em grandes áreas, reduz os custos relativos ao armazenamento e monitoramento dos rejeitos, além de reduzir a exploração de agregados naturais para fabricação de novos produtos (BASTOS et al., 2016).

Porém, é importante que se avalie a real necessidade do produto de reaproveitamento de resíduos, ao analisar toda a cadeia e pensar sua gestão ambiental. Uma vez que planejar o modelo de negócio integrando cadeias refletindo até que ponto este reaproveitamento é amigável para o meio ambiente, ou seja, levar em consideração consumo de energia, emissões de GEE e consumo de água para transformar este resíduo em produto, com base em sua vida útil ao longo do tempo, sua absorção no mercado e sua destinação pós-vida útil.

4.2 Tratamento e disposição de rejeitos minerais

No Quadro 3 apresentamos os resultados da pesquisa referentes ao tratamento e disposição de rejeitos minerais na indústria de minério de ferro, com comparativo entre os casos do estudo.

Quadro 3 - Comparação de itens relacionados ao tratamento e disposição de resíduos minerais

Itens	Caso 1	Caso 2
Principais resíduos minerais dos processos da empresa	Estéril e rejeitos úmidos	Estéril e rejeitos úmidos
Método utilizado na disposição do estéril	Pilha de estéril	Pilha de estéril
Tecnologias e inovações relacionadas a pilha de estéril	Malha de monitoramento para entender a composição do minério antes de perfurar, tecnologia preventiva para evitar o excesso de rejeitos secos	Análise e monitoramento de água das chuvas em espaços das pilhas de estéril para redução de contaminação do solo e lençóis freáticos
Principal método de disposição de rejeitos minerais úmidos	Barragem, alteada pelo método a jusante.	Barragem
Tecnologias e inovações relacionadas a barragem	Espessador como método anterior a barragem para redução da concentração de água da polpa. E	Monitoramento e controle de pontos de impacto físico e geotécnico, ou seja, falhas e fissuras nas barragens
Separação do rejeito úmido	15% lama - rejeito fino - e 85% rejeito arenoso de flotação	Aproximadamente 78% arenoso e 21% rejeito que necessita aperfeiçoamento
P&D de projetos de disposição de rejeitos	Tecnologias de desaguamento - filtragem e ciclonagem. Ainda em fase de bancada.	Tecnologias de empilhamento de rejeito drenado, ainda em escala de bancada e testes experimentais, não aplicado em larga escala nos rejeitos dos processos
Gerenciamento de riscos e parâmetros ambientais	Análise do comportamento geotécnico e espessura do material do rejeito para prever seu	Gerência exclusiva de resíduos minerais para monitorar e definir estratégias de trabalho integradas,

	comportamento e reduzir o impacto ambiental	como forma de melhor lidar com a questão dos rejeitos e melhorar a eficiência do processo
--	---	---

Fonte: Autoras

Como observado no Quadro 3, as duas empresas mineradoras utilizam como forma de disposição de resíduos minerais secos o depósito em pilha – pilha de estéril, considerando o teor de ferro e alumina contido no material para separação como minério ou estéril. Como tecnologia preventiva para evitar o excesso de rejeitos secos, a mineradora do caso 1 utiliza malhas de furos de sonda, aproximadamente a cada 25 metros, como forma de analisar as correlações químicas do depósito e fazer a delimitação antes da explosão do que é estéril e o que é minério. A mineradora 2 realiza o controle geotécnico da pilha de estéril, a fim de evitar contaminação do solo via água da chuva e deslizamento de materiais devido ao comprometimento da estabilidade da pilha. O estéril é o resíduo mineral advindo do processo de lavra, composto em grande maioria de rocha e sedimentos do solo da mina, é um material seco e possui maior solidez e estabilidade. A disposição de resíduos sólidos oferece baixos riscos ambientais (NORGATE; HAQUE, 2013; SCHOENBERGER, 2016 e NORTHEY, 2016), por isso a maioria das tecnologias aplicadas nas mineradoras são de monitoramento e prevenção deste tipo de resíduo.

Para a disposição dos rejeitos úmidos advindos do processo de beneficiamento, as duas empresas utilizam a barragem de rejeitos, apesar do material disposto não conter material contaminante em sua composição e não ofertar grande ameaça de contaminação, ainda assim, este tipo de disposição possui um alto risco ambiental (QI; FOURIE, 2019). As duas mineradoras explicam não haver necessidade de tratamento específico do rejeito ou impermeabilização do solo, sendo necessário apenas a realização de controle de pontos de impacto físico e geotécnico, ou seja, falhas e fissuras nas barragens.

Porém, a mineradora 1, além de utilizar a barragem alteada pelo método a jusante, adota como método anterior o espessador, processo responsável em aumentar a porcentagem de sólidos e conseqüentemente recuperar água que retorna para o processo de produção, a polpa gerada ao final do espessador é direcionada a barragem. Sendo este um método adotado como forma de gestão ambiental e redução dos riscos inerentes da barragem de rejeitos. Outros dois métodos utilizados para redução de impacto ambiental pela mineradora 1 são: o aumento do ângulo de praia da barragem com a adoção de polímeros agregadores de partículas sólidas, que agilizam a decantação das partículas sólidas e tornando mais fácil reutilizar a água no processo; e o multi espigotamento que distribui o despejo dos materiais advindos do processo de espessamento em diferentes pontos pela barragem, evitando que a polpa seja lançada em um único ponto com uma vazão muito alta, o que diminui a precipitação de partículas do rejeito. Já a mineradora 2 utiliza somente tecnologias de controle e monitoramento geotécnico da barragem de rejeitos como forma para redução de riscos.

As duas mineradoras relataram desenvolvimento de projetos de pesquisa (P&D) para outras formas de disposição de rejeitos úmidos, que trazem menor risco ambiental e maior estabilidade na estrutura acomodação de rejeitos (ARMSTRONG et al., 2019; QI; FOURIE, 2019). A mineradora 1 possui iniciativa de projetos, em escala piloto, que utilizam a tecnologia de desaguamento, ou seja, ciclonação e filtragem, são tecnologias responsáveis pelo aumento da porcentagem de sólidos, permitindo a escavação mecânica e empilhamento deste resíduo no lugar desejado. A escala piloto destas tecnologias inclui análise do comportamento geotécnico desse material a longo prazo em diferentes tipos de umidade, como forma análise dos fatores relacionados com o gerenciamento de riscos e parâmetros ambientais de impactos. A mineradora 2 possui estudo de métodos e tecnologias alternativas de disposição por estruturas de empilhamento drenado, ainda em escala de testes.

Outro ponto crítico na questão de disposição de rejeitos são as pressões advindas de exigência regulatória, não por parte de legislação, que por meio de condicionantes ambientais do licenciamento ambiental, podem trazer exigências que motivam a empresa a utilizar novas tecnologias de processos e iniciativas ambientais. Por exemplo, a condicionante 52 que oferece cinco anos para o estudo de alternativas que minimizem a necessidade de uma barragem de rejeito, ou seja, aumente o tempo de vida dessa estrutura que está sendo construída ou que faça com que a empresa não necessite mais de barragem de rejeito. Como constatado em iniciativas da mineradora 1.

Após as tragédias de rompimento de barragens de rejeitos ocorridas no Brasil em 2015 e 2019, o setor de mineração ficou alvo de requisitos legais mais restritivos, como por exemplo: o estímulo por parte da Agência Nacional de Águas (ANA) às implementações de ações orientadas ao aprimoramento da gestão de recursos hídricos, objetivando os efeitos deste tipo de evento referente a segurança hídrica dos cursos d'água e ecossistema localizados a jusante destes barramentos, em que se criou o indicador de Segurança nas Barragens de Rejeitos, de modo a controlar e evitar efeitos negativos às bacias hidrográficas; e a nova lei de descomissionamento das barragens a montante, pois no geral, são mais de 50 barragens a montante no setor mineral brasileiro, sendo um grande processo que impacta e pressiona as mineradoras. Essas exigências influenciam as empresas mineradoras a adotarem novas tecnologias e realizar a gestão ambiental mais rigorosa na mina (PIMENTEL et al., 2016; GALVÃO et al., 2018).

As duas mineradoras possuem diferentes frentes para lidar com a questão de disposição de rejeitos, como sendo as principais abordagens: métodos e tecnologias alternativas de disposição – substituir as barragens e diques por estruturas de empilhamento drenado – porém apresentam limitações de escalabilidade para lidar com os volumes de rejeitos e os custos de operação; tornar as barragens já existentes em modelos mais eficientes por meio de tecnologias e produtos químicos; e o reaproveitamento, que é a utilização deste rejeito como coproduto de outro processo – como item tratado anteriormente nesta seção. Como pode ser visto, as duas empresas possuem projetos para o desenvolvimento de novas formas de disposição de rejeitos ou de melhorar processos já existentes. Vale ressaltar a importância de analisar todo o processo, ou seja, um processo de lavra mais seletivo e um processo de beneficiamento mais eficiente, de modo a reduzir a geração de rejeitos úmidos e resíduos sólidos desde o início do processo mineral.

Identificou-se as empresas estão se atentando mais em relação a investimentos em tecnologias que períodos anteriores, principalmente após os incidentes com barragens. A nova forma de empilhamento de rejeitos apresenta-se como uma nova perspectiva. Porém, aponta-se que esta tecnologia possui dois limitantes, o preço de operação que é alto, além da escalabilidade - capacidade técnica de processamento, que não permite o processamento de grandes quantidades de rejeito. É uma tecnologia promissora e já é testada em escala na mineração de ferro no Brasil, porém apresenta deficiências como a sua escalabilidade e seu preço de operação (WANG et al., 2014), logo, ainda há a ponderação do custo-benefício desta tecnologia em avaliação.

5 CONCLUSÃO

O presente estudo teve como objetivo analisar como a indústria de minério de ferro utilizam inovações e as tecnologias para fazer a gestão ambiental ligada ao reaproveitamento e disposição de resíduos de minério de ferro, de forma a refletir a respeito dos impactos ambientais e dos riscos para comunidades ao redor. Há um consenso entre mineradoras e especialistas em relação ao potencial benéfico de transformação dos rejeitos em novos produtos como uma alternativa sustentável para enfrentar o volume de resíduos, assim como recuperação de valor monetário por meio da venda ou reuso desse resíduo. Entretanto, há

algumas limitações de ordem técnica como a escalabilidade – processamento do alto volume de rejeitos gerados durante a produção; e falta de regulamentação para este coproduto e o custo de desenvolvimento de tecnologias e pesquisas que consigam abarcar o volume de resíduo gerado por esse setor. Além da falta de um arcabouço regulatório em relação a como lidar com estes rejeitos no reaproveitamento – redução de insumo, redução de custos de produção, definição de responsabilidades – que dificultando iniciativas e projetos que possam ser alternativas para disposição atual de resíduos e reduzir os impactos e passivos ambientais das mineradoras.

Neste contexto, os arranjos institucionais e convênios de pesquisa possuem um grande potencial para fomentar a utilização deste material como coproduto em outras cadeias, assim como inovações nos modelos de negócios. Porém, ainda é inicial este movimento, sendo necessário a integração entre as cadeias de suprimento para englobar processos e possibilidades de usos de coprodutos, a fim de manter o valor agregado e criar inovações nos modelos de negócio existentes. A fim de gerar alto potencial para redução da pegada ambiental, além da aplicação de práticas circulares no setor de mineração.

A difusão de inovações ambientais tecnológicas apresenta-se como uma nova perspectiva para lidar com o alto volume de resíduos já dispostos atualmente nas minas, principalmente as tecnologias de desaguamento, que diminuem a concentração de líquido nos rejeitos facilitando sua disposição e seu reaproveitamento, além de diminuir o risco de impacto ambiental. Como visto, as empresas mineradoras já identificaram essa potencialidade, porém há o desafio de tornar essas tecnologias escaláveis ao volume atual de rejeitos e aos investimentos destas tecnologias. Pois, ainda existe o equacionamento do custo-benefício das tecnologias utilizadas para o desenvolvimento ou adoção de novas tecnologias e inovações ambientais para gestão ambiental eficiente das empresas. Um fator que pressiona as empresas por mais estratégias de gestão ambiental corporativa nesse setor foi o aumento das exigências por mais iniciativas sustentáveis da parte das empresas mineradoras, após desastres ambientais ocorridos no setor brasileiro de mineração. Acarretando mais rigidez nos determinantes regulatórios – que aumentaram a fiscalização nas barragens e proibição das barragens do tipo montante.

Este trabalho possui como contribuição teórica a análise das estratégias de inovação ambiental relacionados com os resíduos minerais no contexto brasileiro, ao considerar dois principais pontos, a questão dos resíduos mineral e seus riscos como um fenômeno global e as duas tragédias geradas pelo rompimento de barragens de rejeitos em Minas Gerais-Brasil. Entende-se que é fundamental a análise das tecnologias utilizadas por grandes empresas brasileiras e como o uso e desenvolvimento de inovações interfere na gestão ambiental de setor. Principalmente, ao considerar as expectativas da sociedade civil referente a responsabilidade social e ambiental, estando em pauta o debate e gerando pressão nas empresas mineradoras. Como contribuição prática o presente estudo proporciona orientação para gestores e coordenadores da área de sustentabilidade e operações do setor mineral, assim como direcionamento para criadores de políticas públicas e regulamentações para fomentar políticas que incentivem a reutilização de resíduos em outras cadeias produtivas.

Para sugestões de pesquisas futuras, recomenda-se estudos sobre o tema de gestão de resíduos no setor mineral, não limitado somente ao minério de ferro, que é sensível a impactos socioambientais, a fim de analisar todo o processo, do início ao produto final. Outro ponto importante. Aprofundar pesquisas aplicadas na prática sobre o tema de reaproveitamento de rejeitos, isto é, englobando outras etapas do processo e integração de outras indústrias e cadeias que utilizem este resíduo como matéria-prima. Apontamos também, a relevância do tema de inovações de modelos de negócios de modo a fomentar a circularidade, assim como arranjos institucionais para estimular esses novos modelos de negócios.

REFERÊNCIAS

- ARRANZ, N. et al. Incentives and inhibiting factors of eco-innovation in the Spanish firms. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 220, p. 167–176, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.126>>
- ANA; IBRAM - INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. **Water resource management and the mining industry**. Brasília: ANA; IBRAM, 2013.
- ANM - AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. **Anuário Mineral Brasileiro: principais substâncias metálicas**. Brasília: ANM, 2021.
- ARMSTRONG, M. et al. Accounting for tailings dam failures in the valuation of mining projects. **Resources Policy**, [s. l.], v. 63, n. July, p. 101461, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2019.101461>>
- ARMSTRONG, M.; PETTER, R.; PETTER, C. Why have so many tailings dams failed in recent years? **Resources Policy**, [s. l.], v. 63, n. November 2018, p. 101412, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2019.101412>>
- BASTOS, L. A. de C. et al. Using iron ore tailings from tailing dams as road material. **Journal of Materials in Civil Engineering**, [s. l.], v. 28, n. 10, p. 1–9, 2016.
- BEARMAN, R. A. Step change in the context of comminution. **Minerals Engineering**, [s. l.], v. 43–44, p. 2–11, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.mineng.2012.06.010>>
- BENDELL, B. L. I don't Want to be Green: Prosocial Motivation Effects on Firm Environmental Innovation Rejection Decisions. **Journal of Business Ethics**, [s. l.], v. 143, n. 2, p. 277–288, 2017.
- COSTANTINI, V. et al. Eco-innovation, sustainable supply chains and environmental performance in European industries. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 155, p. 141–154, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.09.038>>
- DE FREITAS, V. A. A. et al. Use of iron ore tailing from tailing dam as catalyst in a fenton-like process for methylene blue oxidation in continuous flow mode. **Chemosphere**, [s. l.], v. 219, p. 328–334, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.12.052>>
- DEMAJOROVIC, J.; LOPES, J. C.; SANTIAGO, A. L. F. The Samarco dam disaster: A grave challenge to social license to operate discourse. **Resources Policy**, [s. l.], v. 61, n. January, p. 273–282, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2019.01.017>>
- DO CARMO E SILVA DEFÁVERI, K. et al. Iron ore tailing-based geopolymer containing glass wool residue: A study of mechanical and microstructural properties. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 220, p. 375–385, 2019.
- DURUCAN, S.; KORRE, A.; MUNOZ-MELENDZ, G. Mining life cycle modelling: a cradle-to-gate approach to environmental management in the minerals industry. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 14, n. 12- 13 SPEC. ISS., p. 1057–1070, 2006.
- EDRAKI, M. et al. Designing mine tailings for better environmental, social and economic outcomes: A review of alternative approaches. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 84, n. 1, p. 411–420, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.04.079>>
- FONTES, W. C. et al. Mortars for laying and coating produced with iron ore tailings from tailing dams. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 112, p. 988–995, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.027>>
- FRANKS, D. M. et al. Sustainable development principles for the disposal of mining and mineral processing wastes. **Resources Policy**, [s. l.], v. 36, n. 2, p. 114–122, 2011.
- GALVÃO, J. L. B. et al. Reuse of iron ore tailings from tailings dams as pigment for sustainable paints. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 200, p. 412–422, 2018.
- GAO, J.; FOURIE, A. Studies on thickened tailings deposition in flume tests using the computational fluid dynamics (CFD) method. **Canadian Geotechnical Journal**, [s. l.], v. 56, n. 2, p. 249–262, 2019.

GEISSLER, B. et al. Striving toward a circular economy for phosphorus: The role of phosphate rock mining. **Minerals**, [s. l.], v. 8, n. 9, 2018.

GOMES, R. B.; TOMI, G. D.; ASSIS, P. S. Impact of quality of iron ore lumps on sustainability of mining operations in the Quadrilátero Ferrífero Area. **Minerals Engineering**, [s. l.], v. 70, p. 201–206, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.mineng.2014.09.019>>

GONÇALVES, I. et al. Revegetation process increases the diversity of total and arbuscular mycorrhizal fungi in areas affected by the Fundão dam failure in Mariana, Brazil. **Applied Soil Ecology**, [s. l.], v. 141, n. April, p. 84–95, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2019.05.008>>

GRABSCH, A. F.; YAHYAEI, M.; FAWELL, P. D. Number-sensitive particle size measurements for monitoring flocculation responses to different grinding conditions. **Minerals Engineering**, [s. l.], v. 145, n. October 2019, p. 106088, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.106088>>

GÜLCAN, E. A novel approach for sensor based sorting performance determination. **Minerals Engineering**, [s. l.], v. 146, n. November 2019, p. 106130, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.106130>>

HUAZHE, J. et al. Water recovery improvement by shearing of gravity-thickened tailings for cemented paste backfill. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 245, 2020.

IBRAM – INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. **Gestão e manejo de rejeitos da mineração**. 1.ed. - Brasília: IBRAM, 2016.

IHLE, C. F.; KRACHT, W. The relevance of water recirculation in large scale mineral processing plants with a remote water supply. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 177, p. 34–51, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.219>>

ILANKOON, I. M. S. K. et al. The current state and future directions of percolation leaching in the Chinese mining industry: Challenges and opportunities. **Minerals Engineering**, [s. l.], v. 125, n. March, p. 206–222, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.06.006>>

KANDA, W. et al. A technological innovation systems approach to analyse the roles of intermediaries in eco-innovation. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 227, p. 1136–1148, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.230>>

KARAKAYA, E.; HIDALGO, A.; NUUR, C. Diffusion of eco-innovations: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 33, p. 392–399, 2014.

KEFENI, K. K.; MSAGATI, T. A. M.; MAMBA, B. B. Acid mine drainage: Prevention, treatment options, and resource recovery: A review. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 151, p. 475–493, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.082>>

KINNUNEN, P. H. M.; KAKSONEN, A. H. Towards circular economy in mining: Opportunities and bottlenecks for tailings valorization. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 228, p. 153–160, 2019.

KUMAR KATTA, A.; DAVIS, M.; KUMAR, A. Assessment of greenhouse gas mitigation options for the iron, gold, and potash mining sectors. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], n. xxxx, p. 118718, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118718>>

LEITÃO, J.; DE BRITO, S.; CUBICO, S. Eco-innovation influencers: Unveiling the role of lean management principles adoption. **Sustainability (Switzerland)**, [s. l.], v. 11, n. 8, p. 1–27, 2019.

LIU, J. et al. Durability of water-affected paste backfill material and its clean use in coal mining. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 250, n. xxxx, p. 119576, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119576>>

NEDVED, M.; JANSZ, J. Waste water pollution control in the Australian mining industry. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 14, n. 12- 13 SPEC. ISS., p. 1118–1120, 2006.

NORGATE, T.; HAQUE, N. The greenhouse gas impact of IPCC and ore-sorting technologies. **Minerals Engineering**, [s. l.], v. 42, p. 13–21, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.mineng.2012.11.012>>

NORTHEY, S. A. et al. Water footprinting and mining: Where are the limitations and opportunities? **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 135, p. 1098–1116, 2016.

PAJUNEN, N. et al. Drivers and barriers of effective industrial material use. **Minerals Engineering**, [s. l.], v. 29, p. 39–46, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.mineng.2011.12.008>>

PIMENTEL, B. S.; GONZALEZ, E. S.; BARBOSA, G. N. O. Decision-support models for sustainable mining networks: Fundamentals and challenges. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 112, p. 2145–2157, 2016.

QI, C.; FOURIE, A. Cemented paste backfill for mineral tailings management: Review and future perspectives. **Minerals Engineering**, [s. l.], v. 144, n. September, 2019.

ROTTA, Luiz Henrique Silva et al. The 2019 Brumadinho tailings dam collapse: Possible cause and impacts of the worst human and environmental disaster in Brazil. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 90, p. 102119, 2020.

SADEGHALVAD, B.; AZADMEHR, A.; HEZARKHANI, A. Assessment of iron ore mineral wastes for sulfate removal from groundwater wells: A case study. **RSC Advances**, [s. l.], v. 6, n. 14, p. 11719–11734, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1039/C5RA21843H>>

SCHOENBERGER, E. Environmentally sustainable mining: The case of tailings storage facilities. **Resources Policy**, [s. l.], v. 49, p. 119–128, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.resourpol.2016.04.009>>

SHETTIMA, A. U. et al. Evaluation of iron ore tailings as replacement for fine aggregate in concrete. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 120, p. 72–79, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.095>>

SUN, W.; WANG, H.; HOU, K. Control of waste rock-tailings paste backfill for active mining subsidence areas. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 171, p. 567–579, 2018.

WANG, C. et al. Current state of fine mineral tailings treatment: A critical review on theory and practice. **Minerals Engineering**, [s. l.], v. 58, p. 113–131, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.mineng.2014.01.018>>

WARHURST, A.; BRIDGE, G. Improving environmental performance through innovation: Recent trends in the mining industry. **Minerals Engineering**, [s. l.], v. 9, n. 9, p. 907–921, 1996.

WASYLYCIA-LEIS, J.; FITZPATRICK, P.; FONSECA, A. Mining communities from a resilience perspective: Managing disturbance and vulnerability in Itabira, Brazil. **Environmental Management**, [s. l.], v. 53, n. 3, p. 481–495, 2014.

WEISHI, L. et al. The properties and formation mechanisms of eco-friendly brick building materials fabricated from low-silicon iron ore tailings. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 204, p. 685–692, 2018.

WU, P. et al. Properties of cementitious composites containing active/inter mineral admixtures. **Polish Journal of Environmental Studies**, [s. l.], v. 27, n. 3, p. 1323–1330, 2018.

YIN, R. K. Estudo de caso: planejamento e métodos. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2015.