

TECNOLOGIAS AMBIENTAIS PARA A REDUÇÃO DE CONSUMO DE ÁGUA E TRATAMENTO DE EFLUENTES NA INDÚSTRIA DE MINERAÇÃO DE FERRO NO BRASIL

1 INTRODUÇÃO

A indústria de minério de ferro é vista como uma das atividades antropogênicas de maiores efeitos negativos ao meio ambiente – tais quais consumo intensivo de recursos limitados, alta geração de rejeitos, contaminação de água e solo, que impactam o meio ambiente a longo prazo (HATJE et al., 2017). Além disso, a indústria de minério de ferro do Brasil está envolvida com grandes desastres socioeconômicos ambientais da mineração (DEMAJOROVIC; LOPES; SANTIAGO, 2019), por meio das tragédias de rompimentos de barragens ocorridas em 2015 e 2019 (THOMPSON et al., 2020), responsáveis pelo colapso de ecossistemas naturais, impacto de comunidades adjacentes, além da morte de trabalhadores e moradores locais (DEMAJOROVIC; LOPES; SANTIAGO, 2019; THOMPSON et al., 2020).

Na indústria de mineração há um passivo ambiental resultante das operações e dos processos. Este contexto provocou uma resposta restritiva e acirrada por parte de órgãos regulatórios e da sociedade civil perante as operações da mineração, exigindo medidas de redução de impactos e práticas de negócios mais sustentáveis (CARNEIRO; FOURIE, 2020). O setor extrativista consta na lista de indústrias com altas atividades potencialmente poluidoras, segundo a Lei nº 6.938 de 1981, regulamentada pela Política Nacional do Meio Ambiente (PNMA) (BRASIL, 2000, Art. 17-B).

Neste setor, o consumo hídrico é maior nas operações de processamento à úmido, utilizado principalmente na etapa de separação sólido-líquido, do minério de ferro e da ganga (NGUYEN; ZIEMSKI; VINK, 2014). Ao utilizar o processamento à úmido, a indústria de minério de ferro é responsável pelo consumo intensivo de água e pela geração de milhares de metros cúbicos de efluentes. Esta água residual possui diferentes componentes físicos e químicos, como por exemplo, partículas de minério de ferro, areia, argila, inorgânicos dissolvidos entre outros (BUDYKINA, 2018), que são descartadas em barragem de rejeitos (NORTHEY et al., 2016). Um impacto ambiental relacionado a estes efluentes do setor é a contaminação de solo e águas advindos da drenagem ácida de minas (AMD), que ocorre quando os componentes de minérios ricos em sulfato entram em contato com a água e o oxigênio, liberando sulfatos na água e solo, de modo a alterando o pH (MOODLEY et al., 2018). Por este motivo, o tratamento dos efluentes é uma atividade essencial para a mitigação dos impactos ambientais do setor de mineração, de modo a prevenir a AMD, e reduzir os impactos ambientais.

O setor utiliza inovações tecnológicas ambientais que permitem o tratamento eficiente de efluentes dos processos de lavra e beneficiamento, otimizam os recursos hídricos nas plantas de operação (NGUYEN; ZIEMSKI; VINK, 2014) e a reciclagem de água nos processos (PIMENTEL; GONZALEZ; BARBOSA, 2016). Essas tecnologias permitem a recuperação de água para recirculação, auxiliam a planta operacional a reduzir o consumo de água nova, além de reduzir o descarte de águas residuais ao final do processo, apresentando diversos benefícios. Além disso, atuam na recuperação das águas residuais após a etapa de separação de sólidos-líquidos (BUDYKINA, 2018).

2 PROBLEMA DE PESQUISA E OBJETIVO

Considerando o cenário de passivos ambientais recentes na indústria de mineração e o rigor de órgãos ambientais que visam a aplicação de práticas sustentáveis, o setor de mineração de ferro utiliza tecnologias e ferramentas para mitigar os impactos e passivos ambientais. Por

consequente, o estudo pretende responder a seguinte questão de pesquisa: Como as tecnologias ambientais podem mitigar os impactos ambientais das operações de consumo hídrico e tratamento de efluentes na indústria de minério de ferro no Brasil?

Para responder ao problema de pesquisa, definiu-se o seguinte objetivo: analisar as tecnologias ambientais utilizadas para mitigar os impactos ambientais das operações de consumo hídrico e tratamento de efluentes na indústria de minério de ferro no Brasil. Deste modo, espera-se que a contribuição deste trabalho seja a elucidação dos principais métodos e tecnologias aplicadas pela indústria de minério de ferro no Brasil para o gerenciamento do consumo de água e tratamento de efluentes. Pois as tecnologias aplicadas na planta operacional de minério de ferro vão determinar a natureza e o volume dos resíduos gerados ao final do processo (DURUCAN; KORRE; MUNOZ-MELELENDEZ, 2006), consequentemente nos passivos e impactos ambientais do setor.

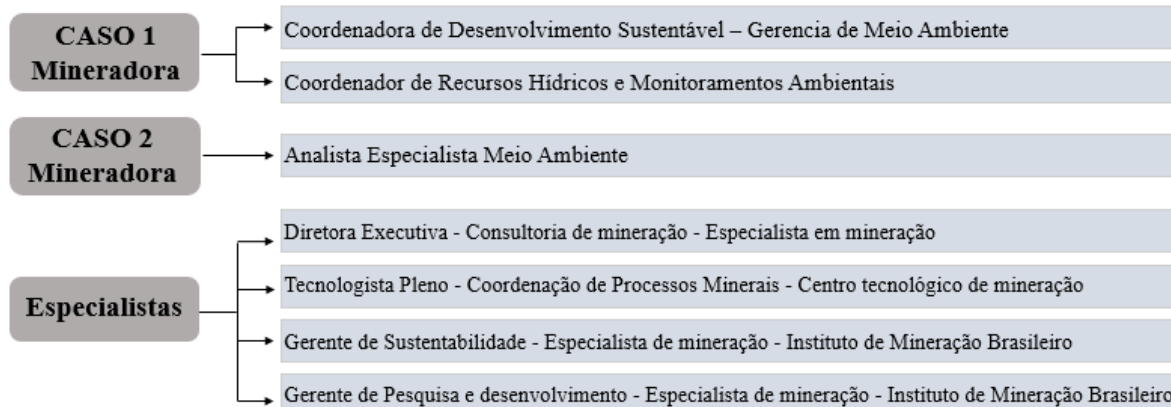
3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O presente estudo utilizou uma abordagem metodológica qualitativa, por meio do método de estudo de casos múltiplos. De forma a permitir o entendimento de fenômenos sociais complexos compreendendo o contexto em que estão inseridos (YIN, 2015). Para o estudo optou-se pelo recorte da indústria de minério de ferro, lavra e beneficiamento, dentro do setor de mineração. Além de considerar as grandes tragédias ambientais de rompimento de barragens de resíduos, envolvendo o setor no contexto Brasil (ARMSTRONG et al., 2019).

Os casos foram selecionados seguindo o objetivo da pesquisa, portanto, optou-se por mineradoras que atuem no contexto Brasil com processamento à úmido de minério de ferro na região de Minas Gerais, principalmente, considerando a importância do Quadrilátero Ferrífero e a produção bruta de minério de ferro em 2017 para a região 406.877.966 toneladas (ANM, 2019). Além de agregar depoimentos de especialistas como forma de acrescentar mais informações a este recorte e melhorar a triangulação de informações na análise dos resultados. Deste modo, utilizou-se como instrumentos de coleta de dados a entrevista semiestruturada e análise documental, isto é, reunindo dados primários e dados secundários – indicados pelos entrevistados. Principalmente como estratégia para compreender a dinâmica do fenômeno e seu contexto único (EISENHARDT, 1989).

As entrevistas semiestruturadas, devido a limitação advinda da pandemia do COVID-19, foram realizadas por meio de plataformas online. A relação dos entrevistados e dos casos do estudo são apresentados na Figura 1.

Figura 1 - Relação dos entrevistados da pesquisa



Fonte: Autoras

Para a etapa de análise dos resultados e preparação para a discussão, foi realizado uma análise individual dos casos para facilitar o entendimento das informações e permitir a criação de quadros sínteses dos resultados coletados. Realizou-se a comparação dos resultados de cada caso, considerando os relatos dos especialistas de forma a complementar as informações e trazer novas perspectivas sobre o fenômeno estudado. As convergências e diferenças entre os casos auxiliam na confirmação e entendimentos das questões de pesquisa, permitindo uma análise profunda e fortalecendo a fundamentação da generalização de teorias (EISENHARDT, 1989). De modo a verificar os resultados de campo com a análise da fundação teórica sobre o tema, respondendo à questão de pesquisa, identificando as contribuições do estudo e elaboração de sugestões de estudos futuros.

4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A água é um produto essencial para a maioria das operações de mineração, sendo utilizada em etapas para concentração de minério e a separação de minerais da ganga (OSSA-MORENO et al., 2018). O gerenciamento de água da mina pode estar sujeito às características geológicas, ao cenário hidrológico da região, às tecnologias aplicadas em cada processo (NGUYEN; ZIEMSKI; VINK, 2014) e às regulamentações e legislações ambientais impostas pelos órgãos regulatórios (AZEVEDO; OLIVEIRA; RUBIO, 2018).

Quadro 1 - Interações da água em etapas operacionais do setor de mineração

Etapa	Utilização da água	Autores
Lavra	<ul style="list-style-type: none"> - Desmonte hidráulico - Supressão e controle da emissão de poeira - Lavagem dos equipamentos 	DURUCAN; KORRE; MUNOZ-MELENDZ, 2006; IBRAM, 2016; NGUYEN; ZIEMSKI; VINK, 2014; OSSA-MORENO et al., 2018
Barragens	<ul style="list-style-type: none"> - Barragens de contenção de sedimentos/ barragem verde: estruturas responsáveis por conter os sedimentos advindos de períodos de chuva. - Barragens de rejeitos: bacia de acumulação de rejeitos gerados nas instalações de beneficiamento de minério e uma forma de acumulação da água, por sedimentação, a ser reutilizada no processo industrial 	DURUCAN; KORRE; MUNOZ-MELENDZ, 2006; IBRAM, 2016; OSSA-MORENO et al., 2018
Pilha de Estéril	<ul style="list-style-type: none"> - Pilhas de estéril podem causar interferência do escoamento superficial, que pode vir a gerar, pequenos desvios de água e drenagem ácida de minas 	ANA; IBRAM, 2013; DURUCAN; KORRE; MUNOZ-MELENDZ, 2006; GALANOPOULOS; SKARPELIS; ARGYRAKI; 2019; IBRAM, 2016; NORTHEY et al., 2016; OSSA-MORENO et al., 2018
Bombeamento da água subterrânea	<ul style="list-style-type: none"> - Bombeamento das águas subterrâneas para a viabilização da lavra 	IBRAM, 2016; NORTHEY et al., 2016; OSSA-MORENO et al., 2018
Beneficiamento	<ul style="list-style-type: none"> - Processo de flotação: processo utilizado na separação de minerais, formando um agregado, em meio aquoso. - Processos de lavagem: Etapas para limpeza do minério para a retirada da ganga, demandando elevados volumes de água. - Concentração gravítica: processo de separação que utiliza a gravidade, do sólido em meio aquoso, para a geração de polpa para cada operação. - Processos hidrometalúrgicos: dissolução do metal de requerido em meio ácido ou alcalino. 	DURUCAN; KORRE; MUNOZ-MELENDZ, 2006; IBRAM, 2016; NGUYEN; ZIEMSKI; VINK, 2014; OSSA-MORENO et al., 2018

Água como meio de transporte	- A água é utilizada como meio de transporte na indústria de mineração, sendo utilizada deste modo nas mais variadas operações, tais como: na lavra como desmonte hidráulico; na lavagem de minérios e nos processos de concentração a úmido.	IBRAM, 2016; NGUYEN; ZIEMSKI; VINK, 2014; OSSA-MORENO et al., 2018
------------------------------	---	--

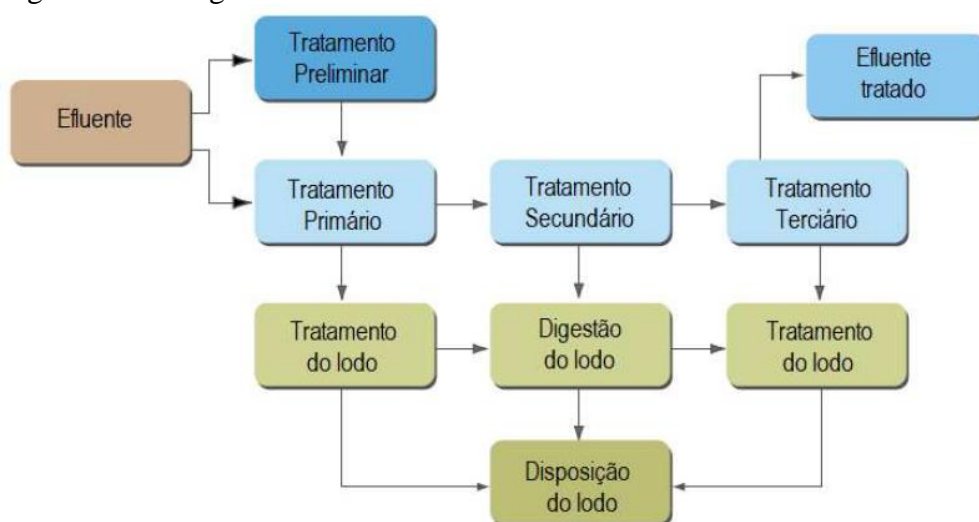
Fonte: Autoras

Nota: Elaborado com base em IBRAM, 2016

Visto que a água residual advinda da mineração do minério de ferro não pode ser descartada diretamente ao meio ambiente, dado que os efluentes possuem componentes complexos que interagem com o meio ambiente gerando uma toxicidade em potencial (OSSA-MORENO et al., 2018). Como uma forma de reduzir o *input* e *output* de água na indústria de mineração, a indústria utiliza o tratamento de efluentes e reaproveitamento de água, de modo a aplicar um controle de qualidade (BUDYKINA, 2018) tanto da água descartada como para a reutilizada.

Considerando que as indústrias de mineração enfrentam um cenário de restrições do uso de recursos e a pressão de políticas públicas e órgãos reguladores, há diversas oportunidades para a introdução de tecnologias e novas formas de desenvolvimento nos processos de mineração e processamento mineral (PESTRYAK, 2015), além de ampliar tecnologias que otimizem o tratamento de efluentes (DRIUSSI; JANSZ, 2006). As tecnologias utilizadas nas operações de produção do minério de ferro influenciam significativamente a natureza e o volume dos resíduos do setor de mineração (DURUCAN; KORRE; MUNOZ-MELELENDEZ, 2006). Os efluentes de mineração englobam diversas substâncias que inutilizam a água tanto para descarte como para retornar ao sistema de produção antes de um tratamento adequado, visto que podem conter, sólidos em suspensão, produtos químicos de reagentes, íons metálicos, óleos, sulfatos, cloretos, silicatos, material orgânico e inorgânico (BUDYKINA, 2018; RUBIO; SOUZA; SMITH, 2002).

Figura 2 - Fluxograma de um sistema de tratamento de efluentes tradicional na mineração



Fonte: ANA: IBRAM, 2013; p. 112

A decisão do sistema de tratamento de efluentes das operações de mineração e a escolha das tecnologias para este sistema, está sujeito a alguns fatores específicos, como por exemplo, as características do efluente – sua forma, biodegradabilidade, compostos tóxicos orgânicos e inorgânicos; a legislação em vigor – a qualidade exigida após este tratamento; entre outros. Tradicionalmente, o sistema de tratamento de efluentes consiste em processos físico, químicos

e biológicos. Geralmente, divide-se em três etapas – primária, secundária e terciária – considerando os diferentes processos – físico, químico e biológico (ANA: IBRAM, 2013). O tratamento preliminar na indústria de mineração é opcional, ou seja, utilizado para reduzir os impactos no tratamento primário (AL-GHOUTI et al., 2019).

Quadro 2 - Tecnologias e processos utilizados nas etapas de tratamento de águas residuais da mineração

Etapas	Definição	Tecnologias e processos
Primária	Processo físico-químico de esclarecimento da água por meio da remoção de sólidos suspensos	<ul style="list-style-type: none"> - Sedimentação - Coagulação - Floculação - Flotação - Desidratação (filtros, centrifugas, prensas)
Secundária	Processo biológico que visa a degradação de compostos orgânicos e inorgânicos, oxidação de nitrogênio da amônia e íons metálicos	<ul style="list-style-type: none"> - Sistemas aeróbicos de crescimento suspenso (lodo ativado, lagoas aeradas); - Sistema aeróbico de filtro fixo (filtro biológico e biodisco); - Sistemas combinados (filtro biológico e filtro lodo ou lodo ativado e filtro biológico); - Sistemas anaeróbicos de crescimento suspenso (digestão anaeróbica, lagoas anaeróbicas e desnitrificação suspensa); - Sistemas anaeróbicos de filme fixo (anaeróbico de desnitrificação de filtro fixo); - Sistemas que associam metabolismos aeróbicos a metabolismos anaeróbicos (lagoas facultativas).
Terciária	Processo físico-químico, ou combinado com processo biológico, visa a remoção de compostos específicos e permaneceram após as duas etapas anteriores	Processos combinados a depender do componente específico que se deseja tratar

Fonte: Autoras

Nota: Elaborado com base em ANA: IBRAM, 2013

O tratamento de efluentes é um processo desafiador uma vez que há diferentes contaminantes com diversas concentrações resultados das operações de beneficiamento e lavra. Havendo grande variedade de métodos que podem compor o sistema de tratamento de água residual, podendo ser utilizados em processo únicos ou em conjunto para a remoção de contaminantes específicos. Sendo complexo a escolha do sistema de tratamento e as tecnologias adequadas, principalmente por fatores como qualidade do efluente, capacidade de produção, qualidade requerida do efluente e custo do tratamento (AL-GHOUTI et al., 2019).

4.1 Tecnologias e métodos do tratamento primário na mineração

O tratamento primário visa a clarificação do meio líquido por meio da retirada de sólidos suspensos dispersos no efluente, de modo a diminuir a turbidez da água. Sendo o foco desta retirada, as técnicas de separação físico-químicas, tais quais, sedimentação, floculação, coagulação, flotação e desidratação (CETEM/MCT, 2010). Os sólidos suspensos compostos nos efluentes são caracterizados em termos de tamanho dos grãos, mineralogia e morfologia, sendo a interação destes fatores com o meio líquido que dita o comportamento da lama de rejeito (WANG et al., 2014).

O método da sedimentação é um fenômeno físico motivado por um campo gravitacional, o processo é considerado barato e operacionalmente simples. Pode ser utilizado da maneira convencional ou em conjunto com outros métodos de agregação (IBRAM; ANA, 2013). Este método é comumente utilizado por meio das barragens de rejeitos, como uma forma em larga

escala para a decantação dos sólidos suspensos (CETEM/MCT, 2010). Este método, dependendo dos componentes do efluente, precisa de um longo tempo de sedimentação das partículas e não consegue atingir sólidos finos dispersos, retendo uma quantidade significativa de água. Oferece riscos ao meio ambiente por meio de interação – vento, evaporação, infiltração, drenagem ácida de mina – que pode impactar a qualidade dos lençóis freáticos e solo (WANG et al., 2014). Além disso pode acarretar riscos as comunidades vizinhas por meio da ocorrência de desastres de rompimento das barragens de sedimentos e rejeitos (LIU et al., 2019).

Referentes aos métodos agregadores, os mais comuns são: a coagulação e a floculação. O método de coagulação é um método que utiliza a adição de substâncias químicas para desestabilizar os sólidos suspensos no líquido, de forma a aglomerar estas partículas e facilitar o processo de sedimentação ou precipitação. O processo de floculação consiste na utilização de aditivos poliméricos e outros aditivos, que em meio aquoso, interagem com a superfície do componente requerido, por meio da adsorção resultando na geração de flocos e consequentemente na clarificação da água residual (WANG et al., 2014). Uma tecnologia que está crescendo na indústria de mineração e utiliza o método de sedimentação e agregação, é o espessador (WANG et al., 2014; CETEM/MCTI, 2013), tecnologia de separação-sólido líquido que permite o tratamento da água para a reutilização, de forma a retirar a água do lodo.

Outro método de tratamento primário, é a flotação, tecnologia flexível que permite diferentes possibilidades de utilizações no processo mineral – tanto para o beneficiamento como no tratamento de efluentes. Há diversas ramificações deste processo, porém o processo de flotação por ar dissolvido (DAF) é o método de flotação mais utilizado no tratamento de efluentes industriais, expandindo-se para o campo da mineração, independente da vazão de efluentes. O diferencial do DAF são as bolhas geradas pelo bico de injeção, que melhor capturam os flocos ou coágulos de forma a agregá-los melhor, resultando na separação mais eficiente. Produzindo uma camada de espessante grossa e estável, não havendo a necessidade de instalar coletor de espuma (RUBIO; SOUZA; SMITH, 2002). O DAF é empregado na etapa final de separação sólido-líquido do tratamento de minério, sendo utilizado para a remoção de componentes prejudiciais como material adsorvente e outras espécies químicas. Esta tecnologia pode ser combinada com outros métodos de tratamento, para extração de compostos orgânicos e inorgânicos, facilitando a reutilização da água residual no processo ou descarte ao meio ambiente sem impactos (CETEM/MCT, 2010).

O método de desidratação, é utilizado quando ainda é necessário retirar água adicional do lodo formado após a desestabilização dos sólidos dispersos no meio aquoso, visa a redução de volume e aumento da resistência deste lodo para atender especificações de disposição segura (WANG et al., 2014). E a técnica da filtração é considerada como simples, uma vez que utiliza um filtro poroso que permite que a água residual transponha, de modo que as impurezas e sólidos suspensos são retidos. Este filtro pode ser de diversos materiais, como por exemplo, pedras, carvão ativado e areia - sendo este último o mais utilizado devido ao baixo custo e a disponibilidade (AL-GHOUTI et al., 2019) ou de tecnologias diferentes como filtro prensas, filtros rotativos, entre outros (CETEM/MCT, 2010).

O tratamento primário enfrenta como desafio os sólidos finos em suspensão, que apresentam resistência na maioria dos processos de tratamento convencionais devido a seu tamanho, sendo extremamente difícil de separar da água residual e contribuindo para o acúmulo de lama nas barragens de rejeitos e os grandes volumes de rejeitos gerados diariamente nos processos. Portanto, a aplicação de tecnologias inovadoras auxilia no tratamento de efluentes, principalmente porque não existe uma única tecnologia para tratamento de efluentes, e sim uma combinação de diversos tipos de tecnologia que mitiguem aos impactos ao meio ambiente (WANG et al., 2014).

4.2 Tecnologias e métodos do tratamento secundário na mineração

A etapa biológica na mineração é considerada como um estágio secundário do tratamento de efluentes e possui como objetivo a estabilização de matéria orgânica ou a extração da matéria orgânica e nutrientes do efluente mineral, por meio de microrganismos específicos que podem reagir com cada tipo de contaminante. Este método contribui com a retirada de sulfato e acidez causado pelos componentes minerais, além de possuir uma eficiência na recuperação de metais contidos nos efluentes (TAO et al., 2019). Os procedimentos utilizados no método biológico podem ocorrer em condições aeróbicas ou anaeróbicas, transformando o material orgânico em outros compostos menos nocivos ao meio ambiente. E na mineração estes processos podem ser utilizados individualmente – como um único processo de tratamento – ou em conjunto. Exemplos de procedimentos de tratamento biológico na mineração: lodo ativado, filtros biológicos, biodisco, lagoas, digestão anaeróbica, entre outros (CETEM/MCT, 2010).

As biotecnologias e os tratamentos secundários apresentam-se como ideais para tratamento de efluentes minerais que possuam compostos orgânicos insolúveis, constituintes inorgânicos e íons metálicos (CETEM/MCT, 2010). Esta etapa secundária demonstra-se tecnologicamente e economicamente viável aos tratamentos convencionais físico-químicos, ganhando crescente apoio. O sistema de tratamento biológico é eficiente, porém está sujeito à vulnerabilidade por componentes tóxicos aos microrganismos que realizam o tratamento (DOBSON; BURGESS, 2007), sendo necessário medidas de controle e monitoramento da toxicidade dos componentes. De modo a evitar problemas com o processo de biodegradação do efluente e resultar em falhas no sistema de tratamento (AL-GHOUTI et al., 2019).

O processo de tratamento de efluentes industriais mais utilizado é o lodo ativado, visto que é considerado como uma tecnologia barata e simples (AL-GHOUTI et al., 2019). No tratamento de efluentes minerais, este método utiliza uma massa ativada de microrganismos em contato com o efluente de forma a estabilizar a matéria orgânica (CETEM/MCT, 2010). Outro método utilizado é o filtro biológico, que utiliza o fundamento do filtro para o tratamento de efluentes. O principal diferencial deste método são os microrganismos – bactérias ou fungos - anexados no filtro biológico, responsáveis pela eliminação dos compostos orgânicos e outros contaminantes, formando uma película viscosa chamada de biofilme (MALAKAR et al., 2017). O processo de desnitrificação biológica é responsável pela redução sequencial de nitrato ou nitrito, utilizado no tratamento de águas residuais como forma de melhorar a qualidade da água (LU; CHANDRAN; STENSEL, 2014).

Outro método utilizado na mineração é a lagoa, especificamente, três tipos: a lagoa aerada, lagoa anaeróbica e a lagoa facultativa (CETEM/MCT, 2010). As lagoas de estabilização de águas residuais são utilizadas em diversas regiões do mundo, consideradas como uma forma de produzir efluente de qualidade satisfatória com menor necessidade de tratamento adicional. O desempenho e a eficiência das lagoas estão sujeitos a fatores ambientais, tais quais, quantidade de luz, temperatura do ambiente, pH, entre outros. A lagoa aerada utiliza bactérias que consomem o oxigênio para estabilizar a matéria orgânica, este oxigênio pode ser fornecido de forma natural ou mecânica (SMYTH et al., 2018). A lagoa anaeróbica utiliza o fenômeno da digestão anaeróbica como metabolismo e depende da decomposição e a degradação da matéria orgânica em substâncias estáveis por meio de microrganismos, que atuam em ambientes deficientes em oxigênio (WAINAINA et al., 2020). E a lagoa facultativa, mistura condições aeróbicas e anaeróbicas, ou seja, possui uma camada anaeróbica no fundo da lagoa - local de sedimentação do lodo - e uma camada aerada na superfície da lagoa, abastecida de forma natural (SMYTH et al., 2018). As barragens de minério de ferro podem agir como um princípio de lagoa biológica, a depender do componente do minério e as tecnologias de tratamento da empresa.

Dependendo das condições do efluente é vantajoso a combinação de sistemas de tratamento que utilizem tecnologias e processos de diferentes condições – anaeróbicas e

aeróbicas (CHAN et al., 2009) ou processos e fenômenos de modo a combinar suas forças e benefícios para obter um tratamento mais eficiente (MALAKAR et al., 2017).

4.3 Tecnologias e métodos do tratamento terciário na mineração

O tratamento terciário é comumente utilizado na mineração após os tratamentos primários ou secundários, com o objetivo de tratar o efluente mineral que contém componentes específicos que não foram extraídos nos tratamentos anteriores e que afetam a qualidade do efluente. Na mineração os tipos de processos utilizados são considerados como processos combinados - combinação de processos físicos, químicos ou biológicos. Estes componentes podem ser íons, compostos orgânicos sintéticos, patogênicos, arsênio, fosfato, sais, cianeto, amônia, entre outros (CETEM/MCT, 2010). A etapa terciária pode utilizar procedimentos mais simples, como por exemplo, precipitação, adsorção, carvão ativado e abrandamento, como forma de retirar os contaminantes específicos dos efluentes de mineração. Os métodos terciários tradicionais para o tratamento de efluentes do setor mineral incluem a neutralização, precipitação química, tratamento microbiológico e separação de membrana. Além de que tecnologias de membrana – ultrafiltração (UF), microfiltração (MF), nanofiltração (NF), osmose reversa (RO) - estão sendo aplicadas para melhorar a reciclagem e eliminar as águas residuais do setor (CUI et al., 2018).

A etapa de tratamento terciário de efluentes minerais pode utilizar também, o método de flotação combinado com outros tipos de método. Principalmente a eletroflotação – combinado com células de eletrocoagulação ou eletrofloculação – que envolve os fatores como densidade da corrente, tipo de material do eletrodo, pH, tamanho da bolha e concentração de eletrólitos (HACHA et al., 2018). Outros métodos são a flotação iônica, a flotação por ar dissolvido (DAF), que são responsáveis pela extração de compostos orgânicos e inorgânicos e de partículas finas e ultrafinas, de forma a garantir a qualidade da água para recirculação e descarte adequado. Outros métodos utilizados no tratamento terciário são os processos oxidativos avançados (OAP) e a desinfecção. O primeiro tratamento objetiva a mineralização dos poluentes - conversão do CO₂ em ácidos minerais - e a desinfecção extrai algum microrganismo patogênico que possa atrapalhar a reutilização da água residual nos processos de mineração, como por exemplo, o processo de cloração que possui o menor custo e é o utilizado com mais frequência no setor (CETEM/MCT, 2010).

Atualmente na mineração utilizam-se amplamente métodos combinados no tratamento de efluentes na mineração, como por exemplo a ultrafiltração e a osmose reversa (CUI et al., 2018), pois a combinação de métodos físicos, químicos e biológicos podem embarcar a retirada de diversos componentes e toxinas presentes no efluente de mineração (CETEM/MCT, 2010), de maneira eficiente e que reduz as externalidades negativas ao meio ambiente.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A discussão dos resultados foi separada, para melhor entendimento, em duas seções: consumo de água e tratamento de efluentes. Descrevendo os resultados juntamente com a análise e discussão da comparação dos dois casos da pesquisa.

5.1 Consumo hídrico no setor de minério de ferro no Brasil

Para os dois casos analisados, os principais consumos de água nas mineradoras de minério de ferro são análogos para o processo de beneficiamento. Utiliza-se para a separação do minério de ferro e ganga, sílica e outros componentes, devido ao processamento ser realizado à úmido. Uma das empresas utiliza água para as etapas de lavra e transporte de minério,

respectivamente, com a supressão de poeira e transporte por meio de mineroduto. Outro ponto que convergem nos dois casos, é que após o uso dos recursos hídricos nas operações, os efluentes são descartados nas barragens, que funciona como um receptor de rejeitos e como separador de partículas sólidas-líquidas, como forma de recirculação de água para o processo.

Como fontes de abastecimentos dos empreendimentos, nos dois casos, há a utilização de captação de água nova, por duas vias, subterrânea proveniente da atividade de rebaixamento do lençol freático durante a criação das cavas - e de rio - captação outorgada por órgãos reguladores; além do uso de água reciclada após tratamento de efluentes. Para os especialistas, as fontes de abastecimento de água na mineração são as mesmas fontes disponíveis para outras indústrias, o setor é mais um usuário dentro de uma bacia hidrográfica. A mineradora é obrigada a seguir a mesma formalidade para o uso da água igual outras empresas, isto é, solicitar ao Comitê de Bacia uma outorga de uso de modo a pleitear a partir de um plano de uso de água, baseado no consumo de suas atividades. Assim como está sujeita a pressão do cenário de escassez de água e estresse hídrico da região de operação, incentivando nos dois casos estudados, a delimitação de metas de redução de captação de água e gerenciamento hídrico eficiente.

A disponibilidade e a sazonalidade hídrica da região em que a mina está situada é um ponto importante referente aos recursos hídricos, uma vez que pode impactar a viabilidade do projeto de mineração, além de contribuir com um maior rigor nas diretrizes ambientais do licenciamento ambiental de órgãos reguladores. Portanto, segundo especialista, as mineradoras sofrem pressão tanto para o controle da quantidade de água consumida no processo como para qualidade desta água na saída do processo de mineração. O retorno ao meio ambiente deve ser controlado tanto em quantidade e como em qualidade da água, para não extrair mais volume do que retorna.

Neste contexto, o gerenciamento de recursos hídricos da mineradora no caso 1 é um gerenciamento integrado, no sentido de avaliar todos os usos da água do empreendimento. A mineradora avalia os usuários dispersos na bacia, analisando seu comportamento referente ao consumo de água, resultando em um banco de dados que permite uma análise regional mais precisa em relação às informações de recursos hídricos, de forma a subsidiar outros estudos, como um plano de segurança hídrica. No caso 2, a mineradora investe não somente em projetos de P&D para desenvolver tecnologias, como em outros tipos de solução – como por exemplo metodologias para mapear, classificar e priorizar os riscos hídricos, visto que os riscos não ficam restritos somente as questões da mineradora. Em atividades suplementares as medidas descritas, no caso 1 a mineradora possui atividades de preservação de gestão florestal - um projeto de cercamento de nascentes de rios - como forma de conservação de recursos hídricos, auxiliando na recarga e armazenamento de água na bacia hidrográfica. E no caso 2 projetos de estudo da biodiversidade - como forma de solucionar problemas, capturar informações para o processo e entender os impactos ambientais das atividades mineradoras.

Quadro 3 - Comparação de itens relacionados ao consumo de água entre os casos da pesquisa

Itens	Caso 1	Caso 2
Principais atividades de consumo de água	Separação da ganga e minério	Separação da ganga e minério
Principais fontes de água	Subterrânea e rios outorgada	Subterrânea e rios outorgada
Possui metas de redução de consumo e consumo eficiente	Sim	Sim
Possui gerenciamento integrado do uso de recursos hídricos	Sim	Sim

Fonte: Autoras

Deste modo, o consumo hídrico da indústria de mineração no Brasil, baseado na análise dos dois casos, está sujeito a característica hídrica da região de localidade da mina, que pode ditar o rigor das regulamentações ao consumo. Assim como as características do depósito do minério que influenciará no processo e tecnologias utilizadas ao longo da operação, isto é, interferindo diretamente no consumo e no uso eficiente da água. De forma que as mineradoras utilizam a combinação de diferentes métodos e tecnologias para o gerenciamento do consumo hídrico de forma eficiente. Principalmente, ao considerar que as tecnologias aplicadas aos processos de mineração podem determinar os efluentes gerados e consequentemente, interferir no gerenciamento hídrico (NGUYEN; ZIEMSKI; VINK, 2014) e tratamento de efluentes.

A água é considerada um recurso indispensável para a indústria de mineração de ferro, que se utiliza de grandes volumes em operações minerais, sendo sua disponibilidade um fator crítico para a empresa (OSSA-MORENO et al., 2018), assim como para os *stakeholders* adjacentes as operações. As empresas mineradoras sofrem uma forte pressão advinda de órgãos ambientais reguladores quando se trata da questão do gerenciamento de água, de maneira a incentivar a procura por métodos, tecnologias (AZEVEDO; OLIVEIRA; RUBIO, 2018) e a análise do contexto hídrico geral. Não somente do recorte da unidade operacional de minério, mas para a região como um todo, mostrando a preocupação e a importância que o recurso hídrico possui para as mineradoras.

Uma das formas apontadas na pesquisa para a redução de consumo de água pelo setor de mineração de ferro, é o incentivo e desenvolvimento de processos para a reutilização de água nos processos minerais. Considerando os benefícios da reutilização de água que são: redução dos custos operacionais, atendimento as exigências ambientais, redução das áreas de represamento dos rejeitos (ARJMAND; MASSINAEI; BEHNAMFARD, 2019) e redução de captação de água nova. Essas medidas são ferramentas importantes para lidar com os desafios da gestão de recursos hídricos no setor.

Percebe-se por meio da análise dos resultados como os temas tratamento de efluentes e consumo de água estão interligados. Em especial porque a água residual não pode ser descartada diretamente nas bacias hidrográficas, por conter diversos componentes tóxicos, que podem gerar passivos ambientais (BUDYKINA, 2018). Além de atentar-se de que para alguns processos específicos da mineração é necessário o tratamento do efluente, a fim de que alguns componentes não interfiram nas operações minerais.

5.2 Tratamento de efluentes no setor de minério de ferro no Brasil

Devido a legislações e licenciamento ambiental, em especial da Agência Nacional de Mineração, as minas dos casos 1 e 2 possuem Estações de Tratamento de Efluentes (ETE) para todos os efluentes gerados – sanitários e industriais. Considerando o efluente industrial mineral, as mineradoras devem atender legalmente o padrão de lançamento definido pelas agências ambientais e órgãos fiscalizadores da região de operação da mina. Em especial, devido a regulamentação ambiental advinda do controle de consumo hídrico, captação e descarte, descrito no tópico anterior.

Para os dois casos do estudo, a água residual do processamento mineral é tratada na barragem de rejeitos, que atua como um grande recipiente para a separação sólido-líquido. No caso 1 em específico, a barragem atua como um reator aeróbico de grande porte, clarificando a água por processos físico-químicos e biológicos. Para o caso 1, a barragem possui uma ETE a jusante, responsável por tratar o efluente industrial que está no seu interior, seguindo a legislação de classificação de corpos d'água, de modo a atender a quantidade e qualidade exigida da vazão residual mínima – água que deve retornar ao o curso d'água. Este sistema específico de ETE, é composto por um sistema físico-químico convencional constituído por flotação, decantação e percolação. É importante ressaltar, que a mineradora do caso 1 utiliza

transporte por mineroduto, separando o minério da água no porto, por meio da tecnologia de estação de filtros cerâmicos rotativos.

No caso 2, a mineradora possui projetos de tratamento de efluentes como forma de reutilização de água nos processos – internos e externos, como forma de trazer benefícios ao meio ambiente e conservação do capital natural. As duas mineradoras possuem parceria para pesquisas e desenvolvimento de soluções tecnológicas com centros de tecnologia, universidades, empresas de consultoria, entre outros. Como exemplo, no caso 2 a mineradora possui o desenvolvimento de tecnologia de monitoramento e sensores automatizados, com tempo de resposta mais curtos, a fim de verificar a qualidade dos efluentes, de modo a reduzir erros e antecipar riscos futuros advindos do desbalanceamento da qualidade destes efluente. Além de monitorar o efluente, este sistema pode auxiliar no controle da qualidade da água para processos de dragagem da barragem, para reprocessamento do material sólido e para reaproveitar o ferro útil, contido nos rejeitos e efluentes.

As entrevistas com especialistas corroboram a existência das parcerias entre mineradoras e centros de tecnologias – público e privado - para criação e viabilização técnica de processos de tratamento de lama e efluentes. O intuito é a redução de impacto ao meio ambiente e de reprocessar estes rejeitos que seriam descartados em barragens, para retirada de material que ainda pode ser reaproveitado como produto útil. Um dos principais determinantes para a procura destas parcerias por parte das empresas, além dos ganhos econômicos, é o ganho ambiental, principalmente após a pressão advinda dos desastres com barragens de rejeitos ocorridos no Brasil (2015 e 2019). Estes eventos originaram um maior rigor para atividades mineradoras de diversas entidades, demandando melhoria na eficiência dos processos, principalmente para questão dos efluentes e rejeitos.

Um desafio apontado pelas mineradoras e especialistas é a escalabilidade de projetos, ou seja, processar o alto volume de efluentes e rejeitos gerados no processo de minério de ferro. Muitas vezes existe uma tecnologia ideal, porém sua capacidade de processamento ainda não está desenvolvida a ponto de lidar com grandes vazões de efluentes, representando uma limitação técnica. Ou é necessário comprar muitos equipamentos para esta capacidade de processamento, interferindo na viabilidade econômica do projeto.

A pesquisa identificou que muitas das tecnologias ainda estão sendo estudadas e observou como principais tecnologias para o tratamento de efluentes as tecnologias de flotação por ar dissolvido (DAF); flotação por coluna; separação magnética; métodos gravíticos de concentração; processos físico químicos com reagentes; tecnologias por membranas; tecnologias por filtração.

Todavia, não é possível generalizar qual o melhor equipamento ou o processo mais eficiente para o tratamento de efluentes. A característica mineralógica do minério de ferro em cada depósito é um fator chave para a escolha das tecnologias e processos selecionados para a operação de mineração de ferro. Quando se trabalha com o processamento a úmido não há uma única tecnologia eficiente, há uma gama de tecnologias disponíveis para a separação sólido-líquido e tratamento de efluentes.

Quadro 4 - Comparação de itens relacionados ao tratamento de efluentes minerais entre os casos da pesquisa

Itens	Caso 1	Caso 2
Métodos de tratamento mais utilizados	Físico-químicos e biológicos	Físico-químicos
Processos de tratamento mais utilizados	Flotação, percolação, decantação, filtros cerâmicos rotativos e reator anaeróbico de fluxo ascendente e descendente	Flotação e decantação
Todas as minas possuem ETE	Sim	Sim
Utilização da barragem de rejeitos como parte do tratamento de efluentes	Sim	Sim

Recirculação de efluentes	Sim	Sim
Retorno de efluentes tratados para cursos d'água	Sim	Sim

Fonte: Autoras

Deste modo, este tema está ligado ao tema de consumo de água e consequentemente, relacionado a legislação rigorosa deste tópico, de forma a determinar a necessidade, a quantidade e a qualidade da água a ser tratada. Principalmente, quando se inclui o contexto de restrições do uso de recursos limitados a pressão e rigor de regulamentações ambientais só aumentam, provocando a oportunidade da introdução de novas tecnologias verdes ao setor de mineração (PESTRYAK, 2015). Portanto, percebe-se como é forte a parceria entre as empresas mineradoras e outros *stakeholders*, como forma de desenvolver métodos e tecnologias mais eficazes que consigam lidar com os dois principais desafios para os processos de tratamento de efluentes na indústria de minério de ferro no Brasil, ou seja, a escalabilidade do projeto e a singularidade de cada depósito mineral.

Há uma complexidade devido a característica e composição geológica de cada depósito de minério de ferro, uma vez que existem diferentes soluções tecnológicas que podem ser utilizados na indústria de mineração (PIETROBELLI; MARIN; OLIVARI, 2018). Por este motivo, observou-se na pesquisa que a maioria dos tratamentos de efluentes utilizados são combinados, podendo utilizar métodos físico-químicos ou biológico, não havendo uma especificidade única entre tratamento primário, secundário e terciário. Com o tratamento adequado há o atendimento de regulamentações ambientais requeridas pelos órgãos ambientais responsáveis, uma taxa significativa para o tratamento de efluentes contendo particulado fino de minério de ferro, na recuperação de água e na recuperação de material útil contido aos rejeitos – que pode ser reutilizado como produto final.

Como o descarte de efluentes de minério de ferro diretamente ao meio ambiente é inadequado devido a componentes que podem gerar passivos ambientais, torna-se fundamental o mapeamento das principais fontes potenciais de poluição advindas de cada atividade mineradora e a forma de transporte destes poluentes até o meio ambiente (CETEM/MCT, 2001). Deste modo, torna-se fundamental as empresas mineradoras possuírem preocupação referente ao tema de tratamento de efluentes, de forma a desenvolver tecnologias eficientes e adequadas, com a possibilidade de reciclagem de água para o processo de produção e redução das barragens de rejeitos - volume e tamanho (ANA: IBRAM, 2013).

6 CONCLUSÃO

O presente estudo teve como objetivo analisar as tecnologias ambientais utilizadas para mitigar os impactos ambientais das operações de consumo hídrico e tratamento de efluentes na indústria de minério de ferro no Brasil. Para alcançar este objetivo foi realizado, primeiramente, uma revisão na literatura como forma de identificar as características e os impactos ambientais referentes ao consumo de água e o tratamento de efluentes da mineração de ferro; mapear na literatura as tecnologias e métodos utilizados para o tratamento de efluentes que podem reduzir os impactos ambientais quando aplicadas ao setor; e explorar na prática quais métodos e tecnologias são realmente aplicados ao setor de minério de ferro, considerando principalmente os processos de lavra e beneficiamento, como forma de entender melhor o setor e quais as principais dificuldades dos temas de consumo hídrico e tratamento de efluentes.

Deste modo, diante das evidências identificadas na pesquisa de campo e a partir da questão que orientou o desenvolvimento do presente estudo, identifica-se que os dois temas – consumo hídrico e tratamento de efluente – estão integrados. Principalmente, quando se considera que há uma alta regulamentação ambiental advindas de órgãos ambientais que exigem o gerenciamento de recursos hídricos, isto é, condições específicas de quantidade e qualidade

de volume de água captado – *input* – e descartado – *output*. E para atender estas exigências é necessário um tratamento de efluentes eficiente, que permite reduzir os impactos ambientais e atender aos diferentes *stakeholders* adjacentes as minas de minério de ferro. As características hidrográficas da região da planta de operação mineral – escassez e sazonalidade hídrica - e os componentes mineralógicos de cada depósito – delimitação de tecnologias - podem interferir e até aumentar o rigor das pressões regulatórias.

Identificou-se que as mineradoras possuem ações e métodos para o gerenciamento hídrico das minas, principalmente delimitação de metas de redução de consumo, como o desenvolvimento de tecnologias que permitam o monitoramento do consumo hídrico e a recirculação de água como forma de evitar a captação de água nova e reduzir a disposição de rejeitos ao final do processo – redução de volume de produtos nas barragens.

Quanto ao tratamento de efluentes, observou-se que as mineradoras no contexto Brasil seguem a regulamentação e licenciamento ambiental referente ao tema, por meio da combinação de diferentes métodos – tratamentos primários, secundários e terciários – e tecnologias. As principais tecnologias utilizadas são físico-químicas, sendo comum nos dois casos o uso das barragens de disposição de rejeitos como forma de sedimentação natural em larga escala. A utilização de barragens ainda é um risco ambiental, ao considerar as duas tragédias recentes no contexto Brasil com desastres do rompimento de barragens de grandes impactos ambientais e sociais (2015 e 2019).

Como forma de reduzir os riscos com barragens, principalmente as já existentes, as escolhas de tecnologias e métodos combinados é um forte aliado. Isto é, tecnologias que possam ser utilizadas previamente, para a separação eficaz da água e sólidos – de modo a permitir melhor estabilidade da barragem. Como tecnologias e métodos que podem ser utilizados na própria estrutura da barragem como forma de acelerar a sedimentação dos particulados sólidos finos e a água. Ou seja, acelerando o processo de separação sólido-líquido, uma das principais funções que a barragem exerce conforme apontado pelas mineradoras dos casos – além da disposição dos rejeitos. Exemplos destes métodos e tecnologias seriam reagentes químicos, que permitam os princípios de coagulação e floculação – tratamento físico - ou até mesmo biotecnologias e bioreagentes – tratamento biológico.

Deste modo, a indústria de mineração de ferro já possui tecnologias para mapeamento e gerenciamento hídrico regional – de modo a englobar tanto a unidade operacional como partes interessadas ao redor. Assim como possuem e aplicam tecnologias no tratamento de efluentes, muitas vezes limitadas por desafios como grande volume de efluentes gerados pelo setor e limitação das características geológicas do minério – que ainda podem dificultar a aplicação em algumas minas de processo à úmido no Brasil. A combinação de tecnologias é vista como uma forma de lidar com estes desafios, de modo a neutralizar os pontos negativos de algumas tecnologias com a combinação de benefícios de outras. Portanto, observa-se uma evolução e mudança de orientação em andamento, de um setor que possui uma carga histórica de impactos ambientais, para a aplicação e desenvolvimento de práticas sustentáveis que visam mitigar os altos passivos ambientais.

A contribuição do presente trabalho foi mapear e investigar quais os principais métodos e tecnologias ambientais são utilizados para o consumo de água e tratamento de efluentes na indústria de minério de ferro no Brasil, a fim de entender o contexto, os principais desafios e oportunidades referentes ao tema.

E como sugestões para pesquisas futuras, recomenda-se progredir no espaço teórico e prático das tecnologias de monitoramento e gerenciamento de recursos hídricos utilizados na indústria de minério de ferro. Analisar os possíveis arranjos institucionais – poder público, empresa, mercado e fornecedores - que podem facilitar e influenciar o desenvolvimento de métodos e tecnologias referentes ao consumo hídrico e tratamento de efluentes, como forma de evolução e orientação sustentável para o setor. Além de adentrar no espaço conceitual e prático

da reciclagem e reutilização de água no setor de minério de ferro, uma das alternativas apontadas para lidar com os desafios do consumo hídrico intensivo desta indústria.

REFERÊNCIAS

- AL-GHOUTI, M. A. et al. Produced water characteristics, treatment and reuse: A review. **Journal of Water Process Engineering**, [s. l.], v. 28, n. September 2018, p. 222–239, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2019.02.001>>. Acesso em: 21 jan. 2020.
- ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (BRASIL); 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, 2019.
- ARJMAND, R.; MASSINAEI, M.; BEHNAMFARD, A. Improving flocculation and dewatering performance of iron tailings thickeners. **Journal of Water Process Engineering**, [s. l.], v. 31, n. June, p. 100873, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2019.100873>>. Acesso em: 13 dez. 2019.
- 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>>. Acesso em: 11 jan. 2020.
- AZEVEDO, A.; OLIVEIRA, H. A.; RUBIO, J. Treatment and water reuse of lead-zinc sulphide ore mill wastewaters by high rate dissolved air flotation. **Minerals Engineering**, [s. l.], v. 127, n. May, p. 114–121, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.07.011>>. Acesso em: 27 jan. 2020.
- BRASIL. Lei nº 10.165, de 27 de dezembro de 2000. **Diário Oficial da União**, Brasília, seção 1, 28 dez. 2000.
- BUDYKINA, T. A. Treatment of wastewater resulting from iron ore beneficiation. **Magazine of Civil Engineering**, [s. l.], v. 82, n. 6, p. 163–169, 2018.
- CARNEIRO, A.; FOURIE, A. Assessing the impacts of uncertain future closure costs when evaluating strategies for tailings management. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 247, 2020.
- CETEM/MCT. **Recursos hídricos e tratamento de águas na mineração**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2001.
- _____. **Tratamento de minérios**. 5. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010.
- CETEM/MCTI. **Tecnologia de rochas ornamentais: pesquisa, lavra e beneficiamento**. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2013.
- CHAN, Y. J. et al. A review on anaerobic-aerobic treatment of industrial and municipal wastewater. **Chemical Engineering Journal**, [s. l.], v. 155, n. 1–2, p. 1–18, 2009.
- CUI, Z. et al. Optimization of novel composite membranes for water and mineral recovery by vacuum membrane distillation. **Desalination**, [s. l.], v. 440, n. November 2017, p. 39–47, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.11.040>>. Acesso em: 16 out. 2019.
- 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>>. Acesso em: 17 fev. 2020.
- DOBSON, R. S.; BURGESS, J. E. Biological treatment of precious metal refinery wastewater: A review. **Minerals Engineering**, [s. l.], v. 20, n. 6, p. 519–532, 2007.
- DRIUSSI, C.; JANSZ, J. Technological options for waste minimisation in the mining industry. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 14, n. 8, p. 682–688, 2006.
- 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.
- EISENHARDT, M. Building Theories from Case Study Research. **The Academy of Management Review**, [s. l.], v. 14, n. 4, p. 532–550, 1989.
- GALANOPOULOS, E.; SKARPELIS, N.; ARGYRAKI, A. Supergene alteration, environmental impact and laboratory scale acid water treatment of cyprus-type ore deposits: Case study of mathiatis and sha abandoned mines. **Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis**, [s. l.], v. 19, n. 4, p. 299–315, 2018.
- HACHA, R. R. et al. Electroflotation of fine hematite particles with *Rhodococcus opacus* as a biocollector in a modified Partridge–Smith cell. **Minerals Engineering**, [s. l.], v. 126, n. July, p. 105–115, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.06.025>>. Acesso em: 12 fev. 2020.
- HATJE, V. et al. The environmental impacts of one of the largest tailing dam failures worldwide. **Scientific Reports**, [s. l.], v. 7, n. 1, p. 1–13, 2017.
- IBRAM – INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. **Gestão e manejo de rejeitos da mineração**. 1.ed. - Brasília: IBRAM, 2016.
- LIU, D. et al. Introducing the hydrate gel membrane technology for filtration of mine tailings. **Minerals Engineering**, [s. l.], v. 135, n. January 2018, p. 1–8, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2019.02.030>>. Acesso em: 29 jan. 2020.
- LU, H.; CHANDRAN, K.; STENSEL, D. Microbial ecology of denitrification in biological wastewater treatment. **Water Research**, [s. l.], v. 64, p. 237–254, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2014.06.042>>. Acesso em: 07 fev. 2020.
- MALAKAR, S. et al. Comparative study of biofiltration process for treatment of VOCs emission from petroleum refinery wastewater—A review. **Environmental Technology and Innovation**, [s. l.], v. 8, p. 441–461, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.eti.2017.09.007>>. Acesso em: 03 fev. 2020.
- MOODLEY, I. et al. Environmentally sustainable acid mine drainage remediation: Research developments with a focus on waste/by-products. **Minerals Engineering**, [s. l.], v. 126, n. November 2016, p. 207–220, 2018. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.mineng.2017.08.008>>. Acesso em: 15 nov. 2019.
- NGUYEN, M. T.; ZIEMSKI, M.; VINK, S. Application of an exergy approach to understand energy demand of mine water management options. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 84, n. 1, p. 639–648, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.04.004>>. Acesso em: 09 dez. 2019.
- 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.

- OSSA-MORENO, J. et al. The Hydro-economics of Mining. **Ecological Economics**, [s. l.], v. 145, n. October 2017, p. 368–379, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.11.010>>. Acesso em: 16 dez. 2019
- PESTRYAK, I. V. Modeling and analysis of physicochemical processes in recirculating water conditioning. **Journal of Mining Science**, [s. l.], v. 51, n. 4, p. 811–818, 2015.
- PIETROBELLI, C.; MARIN, A.; OLIVARI, J. Innovation in mining value chains: New evidence from Latin America. **Resources Policy**, [s. l.], v. 58, n. May, p. 1–10, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2018.05.010>>. Acesso em: 16 nov. 2019.
- 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.
- RUBIO, J.; SOUZA, M. L.; SMITH, R. W. Overview of flotation as a wastewater treatment technique J. **Minerals Engineering**, [s. l.], v. 15, p. 139–155, 2002.
- SMYTH, K. et al. Seasonal variations in cold climate nutrient removal: A comparison of facultative and aerated lagoons. **Journal of Environmental Management**, [s. l.], v. 214, p. 224–231, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.02.098>>. Acesso em: 05 fev. 2020.
- TAO, M. et al. Life cycle assessment on lead–zinc ore mining and beneficiation in China. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 237, p. 117833, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117833>>. Acesso em: 03 fev. 2020.
- THOMPSON, F. et al. Severe impacts of the Brumadinho dam failure (Minas Gerais, Brazil) on the water quality of the Paraopeba River. **Science of the Total Environment**, [s. l.], v. 705, p. 135914, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135914>>. Acesso em: 19 fev. 2020.
- WAINAINA, S. et al. Resource Recovery and Circular Economy from Organic Solid Waste using Aerobic and Anaerobic Digestion Technologies. **Bioresource Technology**, [s. l.], p. 122778, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.122778>>. Acesso em: 07 fev. 2020.
- 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>>. Acesso em: 30 jan. 2020.
- YIN, R. K. **Estudo de caso: planejamento e métodos**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2015.