



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO - UFOP
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS - DEMIN



GUSTAVO MIGANI OLIVEIRA

**ELABORAÇÃO DO PLANO DE FECHAMENTO DE MINA OBSERVANDO OS
PRECEITOS DA ECONOMIA CIRCULAR NA MINERAÇÃO**

Ouro Preto – MG
2023

GUSTAVO MIGANI OLIVEIRA

ELABORAÇÃO DO PLANO DE FECHAMENTO DE MINA OBSERVANDO OS
PRECEITOS DA ECONOMIA CIRCULAR NA MINERAÇÃO

Monografia submetida à apreciação da banca examinadora de graduação em Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte dos requisitos necessários para a obtenção de grau de Bacharel em Engenharia de Minas.

Orientador: Prof. Dr. José Fernando Miranda.

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

O482e Oliveira, Gustavo Migani.

Elaboração do plano de fechamento de mina observando os preceitos da economia circular na mineração. [manuscrito] / Gustavo Migani Oliveira. - 2023.

83 f.: il.: color., tab..

Orientador: Prof. Dr. José Fernando Miranda.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia de Minas .

1. Minas e mineração - Planejamento. 2. Desativação de minas. 3. Desenvolvimento sustentável - Economia circular. I. Miranda, José Fernando. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 622.88

Bibliotecário(a) Responsável: Sione Galvão Rodrigues - CRB6 / 2526



FOLHA DE APROVAÇÃO

Gustavo Migani Oliveira

Elaboração do Plano de Fechamento de Mina Observando os Preceitos da Economia Circular na Mineração

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Minas

Aprovada em 05 de abril de 2023

Membros da banca

Dr. José Fernando Miranda - Orientador (Universidade Federal de Ouro Preto)
PhD. Hernani Mota de Lima - (Universidade Federal de Ouro Preto)
Dr. Henrique Nogueira Soares- (Universidade Federal de Ouro Preto)

José Fernando Miranda, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 05/04/2023



Documento assinado eletronicamente por **Jose Fernando Miranda, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 07/04/2023, às 15:47, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0505505** e o código CRC **5DC320BE**.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por trilhar meus caminhos e pela oportunidade que me foi dada de cursar e adquirir este título tão importante.

Aos meus pais Inácio e Mônica que se empenharam tanto para que este sonho se realizasse.

Ao meu irmão Gabriel (*In Memoriam*) meu parceiro de vida e agora protetor.

À toda minha família pela base e exemplo de todas as coisas mais valiosas que tenho nesta vida.

À grandiosa e tradicional Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, ao Departamento de Engenharia de Minas – DEMIN e Fundação Gorceix pelo excelente ensino gratuito.

À amada República Xequê Mate, por aprendizados adquiridos e todos os irmãos que fiz por lá. Que sua existência seja eterna e possa formar muitas outras pessoas de bem.

Aos conceituados professores e amigos que encontrei neste caminho Adriana Cristina Cardoso Rodrigues, Ricardo Azoubel da Mota Silveira, Hernani Mota de Lima, José Margarida da Silva, Carlos Enrique Arroyo Ortiz e ao meu orientador José Fernando Miranda.

À Associação Desportiva da Escola de Minas – ADEM e Futsal - UFOP por todos os aprendizados, pelos bons momentos e amigos.

À SEMINAS por toda representatividade e amizades feitas.

RESUMO

Os projetos de mineração têm influência direta sobre a sociedade, seja no fornecimento de matérias-primas e de criação de fonte de renda, como no desequilíbrio do ambiente onde está inserida e nos métodos de disposição de rejeito praticados. Diante dos impactos ambientais, a busca pelo desenvolvimento sustentável a partir de projetos circulares está crescendo cada dia mais e as políticas e investimentos para sua implantação estão aumentando paralelamente. As mudanças encontradas no processo de transição abrangem aspectos ambientais, sociais e econômicos, principalmente. Esse trabalho tem como objetivo geral levantar parâmetros qualitativos e apresentar métodos sustentáveis dentro do processo de elaboração de um plano de fechamento de mina que obedeça aos preceitos da economia circular a partir da revisão da literatura acerca do tema. Após a revisão e a partir das práticas sustentáveis encontradas, realizou-se uma análise SWOT dos pontos fracos e fortes, fraquezas e oportunidades encontradas em cada ação sustentável adotada.

Palavras-chave: Fechamento de Mina, Economia Circular, Mineração, Práticas Sustentáveis.

A B S T R A C T

Mining projects have a direct influence on society, whether in supplying of raw materials and creation of source of income, as in the imbalance of the environment and in the methods of disposal of tailings practiced where it operates. Faced with environmental impacts, the search for sustainable development based on circular projects is growing every day and policies and investments for its implementation are increasing in parallel. The changes found in the transition process cover environmental, social and economic aspects, mainly. This work has the general objective of raising qualitative parameters and presenting sustainable methods within the process of elaborating a mine closure plan that obeys the precepts of the circular economy based on the literature review on the subject. After the review and based on the sustainable practices found, a SWOT analysis was carried out of the strengths and weaknesses, opportunities and threats found in each sustainable action adopted.

Keywords: Mine closure, Circular economy, Mining, Sustainable Practices.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Framework do sistema de negócio circular.	20
Figura 2: Síntese dos Fundamentos de uma Economia Circular.	22
Figura 3: Etapas da vida de uma mina em cenários diferentes.	27
Figura 4: Recuperação da vegetação de capeamento de pilhas de estéril.	29
Figura 5: Impactos pelo fechamento das minas na Austrália nos anos de 1981 a 2005.	31
Figura 6: Estudos obrigatórios para licenciamento das atividades de escavação nos respectivos países.	32
Figura 7: Iniciativas relacionadas à mineração em sintonia com princípios de EC. ..	41
Figura 8: Exemplos de objetos provenientes da pratica de <i>upcycle</i>	46
Figura 9: (A) Peneira vibratória da planta de beneficiamento da mineradora MINERITA, (B) hidro ciclone da planta de beneficiamento da mineradora MINERITA e (C) correias transportadoras para armazenamento do sínter feed na mineradora MINERITA.	48
Figura 10: (A) Vista geral do galpão, (B) vista dos silos de armazenamento do material e (C) correias transportadoras do sínter feed na mineradora MINERITA.	49
Figura 11: Blocos produzidos e utilizados no complexo BLOCOITA.	50
Figura 12: Tijolos fabricados com 0%, 5% e 15% de composição de rejeito, respectivamente (de cima para baixo). E após os processos de queima e secagem (Da esquerda para a direita).	51
Figura 13: Resultado da média de perda mássica medidos nas amostras dos tijolos analisados.	52
Figura 14: Enchimento de vazio gerado pela lavra de ouro na mina de Barrick Gold Corporation no Canadá.	53
Figura 15: Muro de contenção/barricada com drenagem em teste na Mina Raleigh.	54
Figura 16: Rocha estéril utilizada na drenagem de águas de chuva.	57
Figura 17: Uso de rocha estéril como muro de contenção do talude de barragem de rejeito.	57
Figura 18: Rocha estéril utilizada como pavimento nas vias de acesso a mina da Nexa na cidade de Aripuanã – MT.	58
Figura 19: Pavimentação realizada com rocha estéril no Canteiro da Andrade Gutierrez na mina da Nexa no complexo Aripuanã - MT.	58
Figura 20: Exemplo de um fluxograma de sistema de tratamento de águas provenientes de drenagem ácida.	63
Figura 21: Estrutura em perfil de uma <i>wetland</i>	64

Figura 22: Wetland construída para tratar a água proveniente do bombeamento da mina subterrânea da empresa NEXA situada no complexo da cidade de Aripuanã-MT.....	65
Figura 23: Exemplo de esquema em perfil de <i>wetland</i> em sistema híbrido de tratamento.	66
Figura 24: Projeto Jardim do Éden, em Cornwall na Inglaterra.	69
Figura 25: Estádio Municipal de Braga, “A pedreira”, localizado na cidade de Braga em Portugal.	70
Figura 26: Ópera de Dalhalla, na Suécia.	71
Figura 27: Perguntas chave para o desenvolvimento do plano de fechamento de mina dentro dos preceitos da economia circular.	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Principais causas de interrupção das atividades em minerações e suas famílias.	25
Tabela 2: Resultado da média de retração medidos em amostras dos tijolos.	51
Tabela 3: Análise SWOT das propostas da economia circular contidas nos projetos de mineração e fechamento de mina estudadas e apresentadas por este trabalho, avaliando os aspectos ambientais, econômicos e sociais.	75

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais

EC – Economia Circular

EPF Órgão público *Établissement Public Foncier*

EIA - Estudos de Impacto Ambiental

GRI - *Global Reporting Initiative*

IBAMA - Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis

IBRAM - Instituto Brasileiro de Mineração

ICMM - *Internacional Council on Mining and Metals*

IDH - Índice de Desenvolvimento Urbano

MMSD - *Mining, Minerals and Sustainable Development*

MCEP - *Mining Certification Evaluation Project*

ODS - Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

ONGs - Organizações Não Governamentais

NRM's - Normas Reguladoras de Mineração

PBA - Projeto básico ambiental

PRAD - Recuperação de Áreas Degradadas

PCA - plano de controle ambiental

RCA - Relatório de controle ambiental

RAP - Relatório ambiental preliminar

RIMA - Relatórios de Impacto Ambiental

SWOT - *Strengths, Weaknesses, Opportunities and Threats*

SISNAMA - Sistema Nacional do Meio Ambiente

UE - União Europeia

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	Formulação do Problema	12
1.2	Justificativa.....	13
1.3	Objetivos	15
1.3.1	Objetivo Geral.....	15
1.3.2	Objetivos Específicos	15
1.4	Metodologia.....	15
1.5	Estrutura do Trabalho.....	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1	A Evolução da Mineração no Âmbito da Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável.....	17
2.2	Conceitos e Teorias sobre Economia Circular	19
2.3	Ações de Fechamento de Mina.....	24
2.3.1	Na Lavra Subterrânea	27
2.3.2	Na Lavra a Céu Aberto	28
2.3.3	No Brasil	29
2.3.4	No Mundo	30
2.4	Histórico de Exigências do Plano de Fechamento de Mina no Brasil	33
2.4.1	Trâmites para Criação e Aprovação de Lei: Licenciamento Ambiental..	34
2.5	A Economia Circular no Âmbito da Mineração (Nacional e Mundial) e suas Propostas	37
2.6	Fechamentos de Mina Associado à Economia Circular	44
2.6.1	Upcycle.....	45
2.6.2	Reutilização do Rejeito	46
2.6.3	Revitalização e Reutilização da Água.....	59
2.6.4	Recuperação e Reutilização de Áreas Mineradas	67
3	ANÁLISE SWOT DE UM PLANO DE FECHAMENTO DE MINA QUE OBEDECE AOS PRECEITOS DA ECONOMIA CIRCULAR	72
4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	77
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	78

1 INTRODUÇÃO

O termo mineração surgiu a partir do século XVI, quando pesquisadores começaram a estudar os minerais pensando em compreender as formas, funções e valores desses produtos (FLORES; LIMA, 2012). Sendo uma atividade lucrativa e de extrema importância para o desenvolvimento humano, os investimentos na mineração foram altos desde então. Desse modo, foi possível desenvolver o mundo como conhecemos. Prédios, eletrônicos, iluminação elétrica, utensílios domésticos, automóveis e até o papel e vestimentas só são possíveis graças à mineração (SIMINERAL, 2022).

Damasceno (2017) afirma que a mineração tem sido vital para o desenvolvimento da humanidade, do crescimento tecnológico e industrial pelo mundo. Os minerais e metais têm sua importância econômica e, além disso, estão presentes na vida do homem moderno. Os processos de extração, processamento e beneficiamento mineral devem se consolidar no contexto de Desenvolvimento Sustentável e crescer com base no aproveitamento racional dos recursos naturais buscando um equilíbrio sistemático entre homem e natureza.

Diante da relação entre a mineração e o desenvolvimento sustentável, autores como Lebre, Corder e Golev (2017), e entidades governamentais nacionais, como o Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM, 2019) veem uma oportunidade de negócios que foi denominada de transição para uma economia circular no setor.

Conforme o IBRAM (2019), esse modelo transitório contribui para que o aumento da competitividade empresarial seja alcançado de forma sustentável, por meio do uso racional dos recursos naturais e do desenvolvimento de novas cadeias produtivas, com geração de emprego e renda. Além disso, a transição para a economia circular requer investimentos para que as empresas, sejam mineradoras ou de outros setores, possam adquirir tecnologias e desenvolver processos que conduzam suas atividades para um modelo circular, além da discussão e implantação de políticas públicas específicas.

Korhonen, Honkasalo e Seppala (2018), afirmam que a ideia de ciclos de materiais existe desde os primórdios da industrialização, acompanhada do argumento

que reduz os impactos ambientais negativos e estimula novas oportunidades de negócios já durante o nascimento da industrialização. Mas o fluxo de rendimento linear tem dominado o desenvolvimento global causando sérios danos ambientais. Ao contrário da reciclagem tradicional, a política prática e a economia circular orientada para os negócios enfatizam a reutilização de produtos, componentes e materiais, remanufatura, reforma, reparo, cascata e atualização, bem como energia solar, eólica, biomassa e utilização de energia derivada de resíduos em todo o valor do produto em seu ciclo de vida da cadeia.

Enquanto o modelo tradicional não considera a finitude dos recursos naturais que impactam diretamente a produção, o modelo circular os integra e propõe resgatá-los num sistema regenerativo de produção que se baseia em um modelo conceitual e prático em que o valor dos produtos, materiais e recursos se mantêm na economia pelo maior tempo possível, pois que estes retornam ao ciclo produtivo, mesmo que em outras cadeias. Torna-se assim evidente que o movimento em direção à EC exigirá mudanças na cultura organizacional, acarretando em mudanças nos processos produtivos em geral, da mineração inclusive. A EC propõe um modelo de “fazer e refazer/usar e reusar” os recursos e produtos em formas inovadoras e mais eficientes de produzir e consumir (DUTHIE; LINS, 2017).

1.1 Formulação do Problema

Os projetos de mineração quando executados tem influência direta sobre a sociedade em geral e principalmente àqueles mais próximos ao seu local de implantação. Seja positivamente na forma de fornecimento de matérias-primas e tecnologias, criação de fonte de renda, de impostos e cursos profissionalizantes, impulsionando assim o desenvolvimento e condicionamento dos processos fundamentais relacionados a evolução do ser humano. Porém, em contramão, a mineração também contribui para alguns fatores negativos como a disposição de rejeitos, drenagem ácida, alteração de meio ambiente onde está inserida, poluição sonora, poluição através de material particulado, vibrações do tipo oscilação do solo, erosão ambiental, entre outros (FLORES; LIMA, 2012). Contudo, esses impactos negativos podem ou não permanecer no meio ambiente logo após a conclusão das

atividades, dependendo diretamente da seriedade com que a empresa ou instituição financeira tratará dos processos de fechamento de mina.

Conforme Flores e Lima (2012), as questões relativas ao encerramento das operações dos empreendimentos mineiros, conjuntamente com as questões ambientais e sociais que atingem a mineração, são preocupações que exigem atuação, reflexão e investimentos por parte das empresas do ramo. Para que o desenvolvimento de soluções técnicas criativas que viabilizam o fechamento de minas respeitando os preceitos da economia circular e legislação ambiental ocorra, é necessário a aceitação do papel social e de sua inserção no meio da mineração. O atendimento às expectativas das comunidades envolvidas nesses projetos é essencial.

O atual e tradicional modelo linear de extração-produção-uso-despejo de material e fluxo de energia do sistema econômico moderno é insustentável. A economia circular proporciona o sistema econômico com um modelo de fluxo alternativo, que é cíclico (KORHONEN; HONKASALO; SEPPALA, 2018). Logo, existem inúmeras alternativas para que as empresas de mineração diminuam seus custos com materiais, uma vez que serão reutilizados e reaproveitados grande ou toda parte de resíduo gerado, potencializando consideravelmente os lucros que podem ser obtidos.

Dessa forma, na conjunção dos aspectos apresentados surge um questionamento inevitável: No processo de fechamento de mina, como as empresas de mineração podem contribuir para diminuir os impactos ambientais e sociais da região onde ocorre a extração, potencializando seus ganhos através da reutilização de resíduos que seriam descartados, utilizando métodos que seguem os preceitos da economia circular?

1.2 Justificativa

O fechamento de mina deve sempre ser pensado como uma das fases na vida de um projeto de mineração. Seus principais objetivos visam assegurar que a saúde e a segurança pública não serão comprometidas no futuro. E que os recursos ambientais não serão expostos a futuras deteriorações físicas e químicas. A principal

forma de assegurar que as medidas serão cumpridas é exercer desde o início do projeto ações e iniciativas que visam o bem estar e saúde da população local, criando projetos de incentivo e conscientização que se sustentam a longo prazo. Além de garantir que o uso da área pós-mineração será um benefício à comunidade, criando ferramentas de controle de poluição, como tratamento de esgoto, tratamento da água do beneficiamento mineral, criação de procedimentos pró ambientais de despejo de rejeitos. Tudo isso pode ser feito através da contratação de mão de obra especializada ou terceirização a partir de empresas *experts* no ramo.

Os termos de escopo e responsabilidades de um projeto de fechamento de mina vêm se expandindo rapidamente. As partes interessadas, dentre elas governos, empresas, comunidades impactadas, organizações não governamentais (ONGs), instituições financeiras e outros componentes da sociedade, tem se preocupado com as melhores práticas existentes para atingir seus objetivos (CARVALHO, 2013). Governos e órgão ambientais firmam compromissos em cumprir metas que são pré-estabelecidas em conferências mundiais no seguimento ambiental, retornando em forma de incentivos fiscais e de destaque entre as demais empresas e países que não se enquadram no cumprimento dessas metas.

A justificativa para implantação de inovações e garantia da efetividade destas mudanças torna-se um desafio nos processos da mineração, visto à complexidade destes processos e ao grande montante de capital investido sem funcionalidade comprovada. Porém, há potencial na aplicação do modelo de economia circular no setor de mineração de forma a lidar com os desafios da escassez de recursos minerais, com o desperdício ao longo dos processos e equilíbrio ambiental, na qual a tecnologia estimula o potencial do modelo (KINNUNEN; KAKSONEN, 2019).

Desse modo, o sistema como um todo tem a ganhar. Tanto a sociedade, que terá novas tecnologias sendo trazidas para sua região, gerando oportunidades, novas fontes de renda e perspectiva de aumento do desenvolvimento humano. Quanto ao setor ambiental, este se beneficiará de processos cíclicos, com menos impactos ao equilíbrio do ecossistema, menor alteração do habitat natural da fauna e flora local, que são ocasionadas a partir das atividades de extração, disposição de rejeitos de forma inapropriada e poluição de mananciais através do escoamento de água contaminada. Paralelamente caminha o setor econômico local, que será fomentado

em razão da arrecadação de impostos dos encargos atribuídos aos novos serviços que serão prestados e do minério comercializado, assim como o comércio de um modo geral, que em função da necessidade de atender as novas demandas trazidas pela mineração surgirão oportunidades de investimento e expansão de pequenas empresas.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo geral foi levantar parâmetros ambientais qualitativos e apresentar melhorias nos métodos e processos de elaboração de um plano de fechamento de mina obedecendo aos preceitos da economia circular.

1.3.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos foram:

- Realizar um estudo de revisão da literatura acerca evolução da mineração no âmbito da agenda 2030 para o desenvolvimento sustentável, dos conceitos e teorias sobre economia circular, das ações tomadas no fechamento de mina, do histórico de exigências do plano de fechamento de mina no Brasil, da economia circular no âmbito da mineração nacional e mundial e dos fechamentos de mina associados a economia circular utilizando-se de artigos científicos e base de dados disponíveis na literatura atual.
- Apresentar exemplos de ações praticadas por empresas do ramo da mineração que estão em concordância com a economia circular.
- Construir a matriz SWOT de um plano de fechamento de mina que atenda aos princípios da economia circular.

1.4 Metodologia

Este trabalho foi desenvolvido por meio da revisão bibliográfica acerca do tema da economia circular associada ao fechamento de empreendimentos minerários.

Foram realizados estudos da implementação de técnicas sustentáveis na mineração com o intuito de se chegar a um modelo de fechamento de mina que leva em consideração a economia circular em primeiro plano.

Neste estudo analisou-se a competência de negócios relacionados a rejeitos de minérios com potencial econômico a partir de uma pesquisa bibliográfica sobre economia circular, bem como as oportunidades, necessidades e desafios na valorização destes rejeitos. A pesquisa reúne diversidade de opiniões sobre o tema e integra diferentes pontos de vista sobre novos negócios e fluxos de resíduos nas indústrias de mineração, na ordem de 1) impulsionadores/oportunidades, 2) necessidades e 3) desafios e gargalos.

Além disso, este estudo apresenta práticas adotadas por empresas de mineração e como elas vêm se ajustando a essa nova proposta que é encerrar os empreendimentos minerários através de práticas da economia circular.

E, por último, uma análise SWOT foi desenvolvida a partir de ações que vêm sendo realizadas durante o processo de extração e do fechamento de minas nacionais e internacionais, além de parâmetros qualitativos acerca dos pontos fortes de fracos de cada uma dessas práticas e também das oportunidades e fraquezas encontradas no ambiente externo à mineração.

1.5 Estrutura do Trabalho

No primeiro capítulo faz-se uma breve introdução acerca da importância da mineração em um contexto mundial e seus desafios para um desenvolvimento sustentável, contendo a formulação do problema, a justificativa, o objetivo geral e específico, a metodologia, bem como a estrutura do trabalho. O segundo capítulo refere-se a revisão bibliográfica acerca da economia circular associada ao fechamento de mina e suas projeções para o futuro, dando ênfase ao estudo da literatura a respeito de exemplos de práticas adotadas na mineração. No terceiro capítulo foi feita uma análise SWOT dessas práticas encontradas, evidenciando seus pontos fortes e fracos, assim como oportunidades e fraquezas externas. No quarto capítulo e por último foram feitas as considerações finais do trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 A Evolução da Mineração no Âmbito da Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável

Com aumento da população mundial no último século e projetando a demanda industrial para o futuro, indica uma curva crescente na produção de matéria-prima no setor mineral e agrícola. Isso desencadeia a ampliação da valorização dos produtos do ramo mineral/metalúrgico e de fertilizantes. Em consequência da valorização, reservas minerais de baixo teor que antes não eram economicamente viáveis para extração passarão a ser e quanto menor for o teor do minério extraído, maior será a geração de resíduos e rejeitos provenientes da planta de beneficiamento. Levando em conta o sistema de produção-consumo linear, todo o material estéril gerado neste processo será depositado no meio ambiente, necessitando cada vez mais de área e desencadeando maior alteração do ecossistema local. (NEVES, 2016).

Atualmente a sustentabilidade é tema recorrente frente as questões voltadas ao desenvolvimento industrial, assunto bem destacado por Horowitz (2006). Em virtude ao destaque dado pelos meios de comunicação e à importância da consciência ambiental aos olhos dos órgãos governamentais das principais potências mundiais, iniciativas globais foram tomadas a fim de controlar e regulamentar a atividade minerária, como por exemplo a formação do ICMM (*Internacional Council on Mining and Metals*), do MMSD (*Mining, Minerals and Sustainable Development*), GRI (*Global Reporting Initiative*) e MCEP (*Mining Certification Evaluation Project*). Diante desse contexto, Horowitz retrata que mineração sustentável exige a valorização da logística de dúvidas e gerência de riscos ligados ao desenvolvimento de recursos naturais. De certa forma, as empresas mineradoras operam com volumes elevados de materiais e em locais mais remotos, onde, na literatura, se deduz que as comunidades atuam com o ecossistema sensível e as mineradoras o agente agressor, necessitando de reguladores mundiais, como por exemplo o ICMM, para realizar a função de superintendente internacional em termos de condutas sustentáveis na mineração, além de alentador às mesmas (HOROWITZ, 2006).

Em 2015, o secretário-geral das nações unidas criou e programou os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) em conjunto com a malha de soluções de

Desenvolvimento Sustentável das nações Unidas (SDSN). Uma agenda global contendo 17 ODS e 169 metas para a realização de projetos sustentáveis foi sancionada em setembro de 2015 e incluída no acordo internacional intitulado "transformando nosso mundo: a agenda 2030 para o desenvolvimento Sustentável", ou seja, visa desenvolver um plano de ações de desenvolvimento sustentável de organizações e governos em um período de 15 anos (2015 a 2030). Os ODS descrevem a continuidade dos ODM (Objetivos de Desenvolvimento do Milênio), que foram criados para erradicar a pobreza entre 2000 e 2015 (ONU, 2015).

No campo da mineração, em 2017 foi elaborado o relatório "Atlas: Mapeando os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável na Mineração" (LEWIS, 2017) que consiste em um processo pelo qual as organizações e empresas ligadas a mineração se relacionem com cada um dos ODS, que busquem atingir as metas estabelecidas pela própria ONU para o setor de extração de minerais. Esse relatório aconselha e direciona cada objetivo para se integrar no core business da empresa, ou seja, como a empresa pode agregar os ODS sem modificar o predominante objetivo do produto entregue e também apresentar as formas de fomentar o procedimento de aderência ao plano de ações sustentáveis por meio de parcerias entre empresas, governo e/ou sociedade (LEWIS, 2017).

Com base em pesquisas/entrevistas nasceu o relatório Atlas, ou seja, tendo a contribuição de 60 especialistas da indústria, da sociedade civil, de governos, universidades, organizações internacionais e de instituições financeiras, no período de junho de 2015 a agosto de 2015. Esse documento é fundamental para traçar as metas necessárias para se obter harmonia entre desenvolvimento e sustentabilidade. Nele estão detalhados cada item dos ODS apontando como a indústria de mineração pode colaborar para detectar possibilidades entre as partes interessadas e impulsionar meios para firmar os ODS (LEWIS, 2017).

Com base na análise técnica desse relatório é possível inferir o quão importante e impactante esse documento é para mineração. Tanto positivamente quanto negativamente as informações contidas no relatório são expostas pelo fato de serem instaladas em regiões e áreas ecologicamente sensíveis, afastadas e menos favorecidas. Conclui-se que atividades minerais estão suscetíveis à geração de impactos parciais ao meio ambiente e às comunidades locais, mas ao mesmo tempo

são responsáveis pelo progresso e evolução da região em termos de infraestrutura e tecnologia, além de gerar renda e movimentar positivamente a economia local, gerando empregos e promovendo inovações no ramo da ciência e saúde (IBRAM, 2020).

De acordo com IBRAM (2020), as condutas defendidas pela comunidade sustentável vêm sendo altamente favorecidas há décadas no Brasil. Isso pode ser demonstrado ao se confrontar a quantidade de ações voltadas à gerência e controle dos riscos ao meio ambiente aplicadas pelas empresas minerárias hoje em dia em comparação ao passado. Cada vez mais frequentes, temas relacionados ao cuidado e responsabilidades que as empresas devem ter ao desenvolver seus negócios em ambientes vulneráveis são profundamente discutidos e estressados durante as tomadas de decisão. Por exemplo, práticas de extração, processamento, armazenamento e despejo de minerais que antes eram comuns, agora vem sendo questionadas e setores como os de inovação e excelência nos núcleos das mineradoras tem responsabilidade direta no desenvolvimento e aplicação dessas atividades.

Por esta razão, é aconselhável melhorar a comunicação em termos de alinhamento propósitos entre as empresas mineiras e outras instituições que seguem o regime sustentável, no intuito de levar e trazer informações dos centros operacionais destas organizações e aplicar modelos socio/econômico/ambiental de referência no mercado em projetos no setor mineral, mantendo desse modo um acordo comunitário positivo.

2.2 Conceitos e Teorias sobre Economia Circular

A Economia Circular apresenta um conceito que disponibiliza diversas oportunidades para a economia e a indústria brasileira, agregando e recuperando valor de modo mais resiliente e sustentável. Mas para que a Economia Circular ganhe escala e realize todo o seu potencial é necessário criar as condições facilitadoras para essa transição, como educação de melhor qualidade, políticas públicas específicas, infraestrutura voltada a circularidade e tecnologias inovadoras.

De acordo com Ellen Macarthur Foundation (2013), para a implantação de um modelo de produção segue os preceitos da economia circular é preciso que se interrompa o retrógrado método linear de consumo de bens. Faz-se necessário uma mudança no *mindset* corporativo em tratar as fases dos bens de consumo como cadeias de valores. Por exemplo, o minério em forma de matéria prima é uma cadeia de valor, o minério beneficiado e concentrado se transforma em outra cadeia de valor e o bem de consumo que chega até os consumidores são outra cadeia.

Três pontos são cruciais para que as empresas de hoje em dia incorporem a economia circular nos seus negócios. O primeiro é uma proposta de valor, pois para que uma companhia se mantenha no mercado e cumpra com os seus deveres trabalhistas é necessário sempre levar em consideração a viabilidade econômica, incluindo das inovações implantadas durante o desenvolvimento de seu produto. Segundo ponto é estabelecer entre as cadeias de valor conexões que tendem a circularidade, onde se direcione todo o tipo de resíduo gerado durante a produção. O terceiro ponto é o reaproveitamento de todo e qualquer subproduto independente da sua fase e estado, conectando as cadeias de valores no sentido “inverso” do fluxo linear de consumo, regenerando os resíduos e garantindo assim o aumento de sua vida útil (ELLEN, 2013).

Observa-se na Figura 1 o framework ilustrado do Sistema de Negócio Circular.

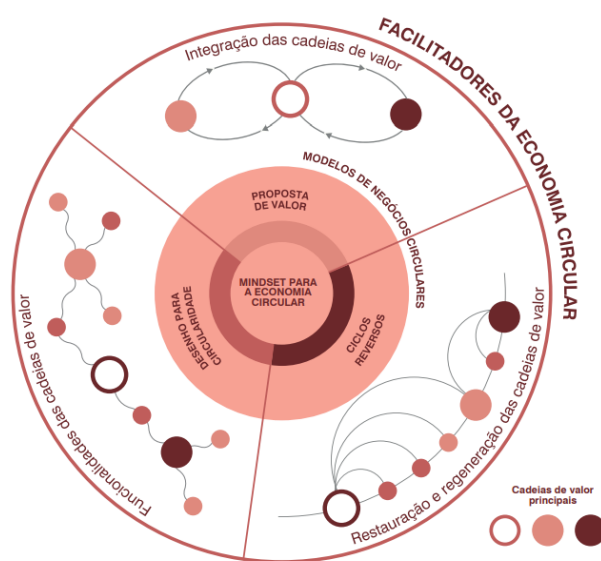


Figura 1: Framework do sistema de negócio circular.

Fonte: (ELLEN, 2013).

Segundo Duthie e Lins (2017) a Economia Circular (EC) tem sido vista como uma alternativa em potencializar o uso de recursos na economia, desenvolvendo métodos que viabilizam economicamente o reaproveitamento de materiais que antes seriam descartados, em contraposição à tradicional economia linear (EL), baseada no modelo extrair, produzir, usar e descartar. Na abordagem tradicional e linear de consumo, ao relacionar crescimento econômico com o IDH (Índice de desenvolvimento humano) interpreta-se que eles são convergentes, impactando diretamente no bem-estar e qualidade de vida da população. Mas o modelo linear de consumo não pondera precisamente as futuras consequências e impactos ao meio ambiente e ao bem estar coletivo a longo prazo, devido a sua forma de explorar os bens e recursos como inesgotáveis. Já a economia circular apresenta uma outra proposta de utilização dos recursos naturais, propondo meios de prolongar ao máximo a vida útil dos bens de consumo, diminuindo a extração descontrolada dos recursos não renováveis.

A compreensão contemporânea da Economia Circular e suas aplicações práticas em sistemas econômicos e processos industriais evoluíram para incorporar diferentes características e contribuições de uma variedade de conceitos que compartilham a ideia de malhas fechadas (GEISSDOERFER *et al.* 2016). Algumas das influências teóricas mais relevantes na essência da Economia Circular são *Cradle to cradle: Remaking the Way We Make Things* (MCDONOUGH; BRAUNGART, 2002), Leis da ecologia (COMMONER, 1971), Economia em loop e performance (STAHEL, 2010), Design regenerativo (Lyle, 1994), Ecologia industrial (GRAEDEL; ALLENBY, 1995), Biomimética (BENYUS, 2002) e a Economia azul (PAULI, 2010).

Segundo Su *et al.* (2013), o conceito da Economia Circular foi levantado por dois economistas ambientais britânicos, Pearce e Turner (1990). Na publicação 'Economia de Recursos Naturais e Meio Ambientes', Pearce e Turner assinalaram que uma economia aberta tradicional era desenvolvida sem nenhum objetivo com a reciclagem e que tratava o meio ambiente como um reservatório de resíduos.

No entanto, sob a primeira lei da termodinâmica, em que a energia total e a matéria permanecem constantes em um sistema fechado, o sistema aberto pode e deve ser convertido em um sistema circular ao considerar a relação entre o uso dos recursos e dos resíduos residuais. Em outras palavras, com os problemas ambientais

existentes e a escassez de recursos, Pearce e Turner (1990) sugeriram a necessidade de contemplar a terra como um sistema econômico fechado: aquele em que a economia e o meio ambiente não são relacionadas por interligações lineares, mas por uma relação circular. Por intermédio de uma análise sobre a relação entre os sistemas econômico e natural, propôs um circuito fechado de fluxos de materiais na economia, que foi denominado “economia circular”.

Em síntese, a CNI (2018), afirma que a Economia Circular pode ser entendida como uma proposta de modelo econômico que integra diversas escolas e linhas de pensamento, tais como: Ecologia Industrial, Engenharia do Ciclo de Vida, Gestão do Ciclo de Vida, Economia de Performance, entre outros.

Geissdoerfer *et al.* (2016) definem a Economia Circular como um sistema regenerativo no qual a entrada e o desperdício de recursos, emissão e vazamento de energia são minimizados pela desaceleração, fechamento e estreitando os laços de material e energia. Isso pode ser alcançado através de projetos duradouros, com foco na inserção da manutenção, reparo, reutilização, remanufatura, reforma e reciclagem dentro dos processos de produção.

Observa-se na Figura 2 o resumo dos princípios e processos circulares em dois ciclos: os biológicos e os tecnológicos. Esses ciclos agregam valor à lógica econômica linear, que é representada pelo centro do diagrama.

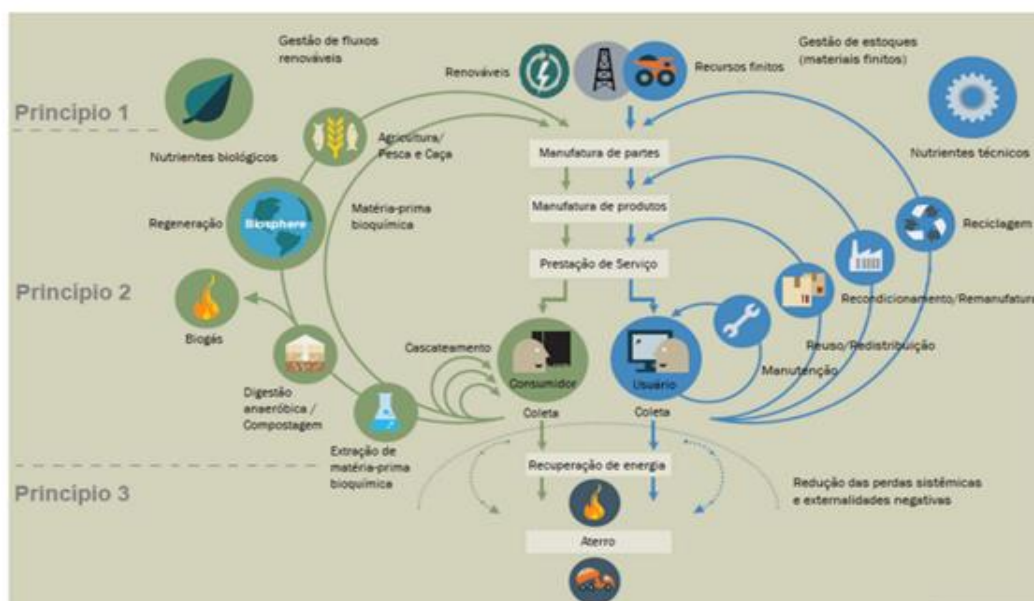


Figura 2: Síntese dos Fundamentos de uma Economia Circular.

Fonte: (APOLINÁRIO, 2020, p. 27).

Este diagrama da economia circular ilustra diversos fluxos que englobam os processos usados para contemplar a economia circular. Cada loop, ou ciclo reverso, é uma oportunidade de recuperar valor e gerar benefícios em sustentabilidade, ou seja, reaproveitar bens que seguiriam a linearidade do modelo tradicional de consumo e chegaria ao final da vida útil nos lixões e aterros. Quanto menor o loop, mais valor é mantido ou recuperado e mais interessante é a oportunidade, pois não é necessário gastar energia novamente processando o bem material até que o mesmo esteja pronto para o mercado. Por exemplo, um celular quebrado que pode ter suas peças trocadas e ser reutilizado por mais tempo, ao invés de ser demolido, separado seus componentes e elementos, processados novamente até que toda tecnologia por trás do aparelho seja recuperada para possibilitar sua reutilização.

De acordo com a publicação de Apolinário (2020) no Acervo – Revista do Arquivo Nacional, existem três princípios básicos que devem ser seguidos para que a Economia Circular funcione e exerça papel positivo no âmbito social, ambiental e econômico.

O primeiro princípio visa a preservação e desenvolvimento do capital natural, por meio da gestão de estoques finitos e de fluxo de recursos renováveis, incentivando o funcionamento do diagrama representado pela Figura 2 através do inter-abastecimento das cadeias dentro do sistema, estimulando a circularidade no fornecimento de matérias primas para a mão de obra. Devem-se selecionar os recursos que melhor atendem ao projeto de sustentabilidade, assim como o processo e tecnologia mais eficaz, sendo possível criar a recirculação de materiais posteriormente pelo sistema proposto pelo diagrama (APOLINÁRIO, 2020).

O segundo princípio visa aperfeiçoar o rendimento dos ciclos da economia circular, tanto o biológico como o técnico, pois a contribuição para a economia advém da circularidade dos materiais e recursos. O ideal é preservar a energia e valor dos materiais na utilização dos ciclos mais próximos, estendendo a vida útil do produto maximizando o número de ciclos e o tempo gasto em cada um (APOLINÁRIO, 2020).

O terceiro princípio visa o gerenciamento das externalidades negativas do sistema, promovendo a eficácia do sistema, englobando a redução de danos a ecossistemas, a sociedade, mitigando a poluição, melhorando o uso da terra, a poluição do ar, da água e da gestão de resíduos (APOLINÁRIO, 2020).

2.3 Ações de Fechamento de Mina

Iniciar a atividade de extração mineral é resultado de um longo processo de pesquisa e trabalho em busca de se analisar a viabilidade econômica do empreendimento. Diversas variáveis podem inviabilizar a boa execução do projeto como o desaquecimento do mercado consumidor, locais de carregamento e transporte, dimensionamento e localização da planta de processamento/beneficiamento e das áreas de disposição de estéril e rejeitos. São necessários inúmeros estudos para que a atividade se efetive de fato.

Porém, além de se preocupar com a viabilidade da extração, também é necessário a cautela durante o encerramento das atividades mineiras. Em muitos países, como no Brasil, é necessário a apresentação de uma Avaliação de Impacto Ambiental - AIA durante a fase inicial do empreendimento. (SÁNCHEZ, SÁNCHEZ, NERI, 2013, p.61)

Além destas condições, também deve-se avaliar o meio social no qual a atividade está inserida. Recursos devem ser voltados para o desenvolvimento e bem estar da população local, assim como para o meio ambiente, durante e após o exercício da atividade.

Tal importância deve ser dada durante a análise de implantação do negócio, pois a abertura e fechamento de uma mina significa fortes mudanças para a comunidade anfitriã como um todo. Na abertura, por exemplo, mudanças radicais ocorrem no ambiente de extração, muitas vezes permanente, cidades e vilas ao redor recebe uma grande quantidade pessoas migrantes, causando um desequilíbrio do comércio local e inflação de preços. Do mesmo modo que no fechamento pode haver impactos socioeconômicos como desemprego em massa, abandono de imóveis, falência de negócios e diminuição considerável da arrecadação tributária (OLIVEIRA, 2006, p. 50).

Toda jazida mineral é um bem finito que tem prazo de esgotamento de acordo com a produção empregada ou viabilidade econômica cessada a partir de fatores econômicos de mercado. Essas e outras variáveis podem acarretar no suspensão temporária ou fechamento prematuro do empreendimento mineiro. Observa-se na

Tabela 1 as principais causas de interrupção de uma mina, seja ela temporária ou definitiva (SÁNCHEZ, SÁNCHEZ, NERI, 2013, p. 26):

Tabela 1: Principais causas de interrupção das atividades em minerações e suas famílias.

Família	Causas
Climático/ Geológico/Gerencial	Acidentes operacionais e/ou mal dimensionamento. (Exemplo: deslizamentos de taludes ou rupturas de barragens de rejeito). Eventos externos e/ou mal dimensionamento. (Exemplo: Ruptura de escavações subterrâneas)
Político	Mudanças políticas, legislativas e administrativas (Exemplo: Aumento de impostos, leis mais rígidas.)
Social	Pressão social (Exemplo: Decisões judiciais motivadas por coerção da sociedade e da mídia)
Gerencial	Dimensionamento inexato da jazida e teores minerais. Decisões gerenciais acerca de ativos, fusões ou aquisições empresariais. E mudanças na composição dos sócios e acionistas. Erros operacionais e de dimensionamento que causam elevado custo para extração/beneficiamento.
Econômico	Queda no valor do mineral extraído. Inutilização do mineral extraído a partir de mudanças tecnológicas ou de malefícios a saúde.
Judicial	Fraudes, sonegação ou comercio ilegal.

Fontes: (OLIVEIRA, 2006, p. 25 e 26) e (SÁNCHEZ, SÁNCHEZ, NERI, 2013, p. 45).

O fechamento de mina é a fase final de um empreendimento mineiro e para que ele seja correto e ocorra da melhor forma possível, deve ser elaborado um Plano de Fechamento de Mina. Ele é desenvolvido ao decorrer da fase inicial de implantação da mina e se estende até o final da operação. Nele são levantados todos os pontos pertinentes a segurança, integridade ambiental e manutenção de áreas modificadas. Todos estes aspectos são analisados e estabelecidos a fim de se executar o fechamento de mina, que é composto por três subfases (SÁNCHEZ, SÁNCHEZ, NERI, 2013, p. 26):

1. Desativação ou descomissionamento da mina (No inglês, *mine decommissioning*);
2. Pós-fechamento (*post-closure*);
3. Monitoramento e manutenção (*care and maintenance*).

A desativação ou descomissionamento se caracteriza pelo encerramento das atividades de extração, início da implantação de contenções ambientais, estabelecimento de medidas de segurança e de estabilidades de áreas modificadas pela mineração, desmobilização de pessoal e de equipamentos, remoção das instalações desnecessárias e execução de projetos sociais voltados a reabilitação do ofício (SÁNCHEZ, SÁNCHEZ, NERI, 2013 p. 38).

Já o pós-fechamento é a fase onde foram realizadas todas as atividades de desativação da mina visando atingir os objetivos traçados durante o planejamento de fechamento da mina (OLIVEIRA, 2006, p. 34).

A fase de monitoramento e manutenção não ocorre em 100% dos casos de fechamento de mina. Somente é necessário quando pré-estabelecidos no plano de fechamento de mina em cenários onde deve-se prestar o cuidado permanente da área (SÁNCHEZ, SÁNCHEZ, NERI, 2013, p. 39). Estes casos são mais comuns em minerações onde há disposição de rejeitos em barragens, minas subterrâneas sem preenchimento de vazios, minas onde o minério remanescente pode poluir o ambiente ou prejudicar a saúde da fauna local. Tarefas de monitoramento do índice pluviométrico, acompanhamento da recuperação da fauna e flora local e de estabilidade de taludes são práticas observadas nesta etapa.

Observam-se na Figura 3 todas as etapas da vida de uma mina desde o início até o estudo da viabilidade até o fechamento definitivo.



Figura 3: Etapas da vida de uma mina em cenários diferentes.

Fonte: (OLIVEIRA, 2006, p. 43)

2.3.1 Na Lavra Subterrânea

As minas subterrâneas são empreendimentos de extração mineral que possuem jazidas mais profundas que as minas a céu aberto, inviabilizando assim o tradicional método de cavas devido ao volumoso material que deve ser retirado até que se chegue no mineral minério de interesse. Devido a essa característica, a complexidade do desenvolvimento e da lavra é maior neste tipo de extração mineral, necessitando de uma frota de equipamentos específicos e de mão de obra especializada. Todos estes fatores retornam um custo maior de produção e atenção redobrada nas etapas de pesquisa, elaboração do Plano de Aproveitamento Econômico – PAE e Plano de Fechamento de Mina.

O plano de fechamento de minas subterrâneas difere do plano de minas a céu aberto devido às suas características de projeto operacional e principalmente à sua profundidade. Por estarem a um nível abaixo do lençol freático, as escavações subterrâneas necessitam de bombeamento constante da água de suas galerias e fundo de rampa para a superfície. No final das operações e interrupção do bombeamento de infraestrutura, as galerias e espaços de lavra das minas subterrâneas se enchem de água proveniente da superfície e de aquíferos. Pelo

restante de minério ainda estar exposto no subsolo, esta água se contamina de metais pesados e resíduos gerados na extração, como óleos, graxas e até restos de explosivos.

Algumas ações de fechamento de mina podem ser adotadas na mineração subterrânea a fim de se controlar ou diminuir os danos causados ao meio ambiente. Por exemplo o preenchimento dos vazios gerados pela lavra com material estéril ou ligas de cimento evita a subsidência (afundamento) do solo na superfície e diminui a área de contato da água com minerais contaminadores em potencial. Outros exemplos são a modificação das drenagens da superfície direcionando-as para fora do emboque da mina, tratamento de águas contaminadas e o plantio de espécies que consomem muita água na região à superfície da mina (OLIVEIRA, 2006, p. 37).

2.3.2 Na Lavra a Céu Aberto

As minas a céu aberto possuem um método de lavra a partir de cavas, uma ou mais, dependendo das características e disposição dos corpos minerais. A escavação mineral nela é facilitada por não possuir grandes preocupações na contenção do maciço rochoso detonado, que muitas das vezes não precisa de tratamento após as detonações. E por não necessitar de equipamentos rebaixados para o deslocamento em galerias. Alguns dos impactos ambientais causados são desmatamento da vegetação, rebaixamento do lençol freático em minas mais escavadas e profundas, estruturação de áreas para disposição de estéril e rejeitos.

O plano de fechamento de mina da lavra a céu aberto difere do plano de minas subterrâneas nos projetos de execução, mas as adversidades tratadas em ambos casos são muito semelhantes. A maioria delas ligadas a estabilidade de estruturas rochosas, contaminação da água, isolamento da área, restauração da fauna e flora nos locais onde se é possível e construção de novos fluxos de drenagem de água.

Os métodos de controle e contenção destes impactos são constituídos por ações de isolamento de áreas de risco, por exemplo as cavas que podem estar cheias de água e contaminadas por metais pesados. O preenchimento de cava com matéria estéril e rejeito, quando a cava é de pequeno porte. O direcionamento da água,

através de drenos artificiais, para fora das áreas de risco e de preservação de talude. Plantio de vegetação de origem local e replantação das espécies locais.

Outro importantíssimo ponto a ser citado é a garantia da estabilidade dos taludes das pilhas de estéril e a recuperação da vegetação de cobertura para harmonizar visualmente com o ambiente. Essa prática vem sendo muito praticada, por não necessitar de grandes investimentos e ser de fácil execução. Observa-se na Figura 4 um bom exemplo desta prática.



Figura 4: Recuperação da vegetação de capeamento de pilhas de estéril.

Fonte: (GEOESTAVEL, 2023).

Diante disso, é possível apontar que os impactos ambientais sucedidos a partir do fechamento de mina afetam diferentes bens ambientais, reputados, como aqueles que formam o patrimônio ambiental nacional, onde os bens naturais (integrantes do meio ambiental natural) e bens artificiais (integrantes do meio ambiente cultural e do meio ambiente urbano) (MILARÉ, 2007, p. 202).

2.3.3 No Brasil

Para se iniciar legalmente a atividade de extração mineral no Brasil são necessários passar por várias etapas até que se inicie de fato a extração de minério.

O licenciamento ambiental é uma das etapas iniciais mais importantes e lentas do processo. Ele é regido pela Constituição Federal de 1988, e regulamentado pelo Código de Mineração e Leis específicas, podendo conter atos normativos da Agência Nacional de Mineração (ANM), Ministério de Minas e Energia (MME) e Ministério do Meio Ambiente (CONAMA, 1990).

Abordando a fase de fechamento de mina, ela deve ser considerada no decorrer das operações, pois o quanto antes se planejar como será a fase final da mina, melhor se executa o fechamento e menos se gasta com a reestruturação das edificações. A atual legislação ambiental brasileira exige que se apresente juntamente com o Estudo de Impacto Ambiental – EIA e o Relatório de Impacto Ambiental – RIMA, o Plano de Recuperação de Área Degradada – PRAD.

O documento que rege o fechamento de mina no Brasil e que também está inserido em outros países é a Avaliação de Impacto Ambiental – AIA. Ela é desenvolvida através da análise dos estudos de impacto ambiental e do Plano de Recuperação da Área Degradada. Dentro do processo de AIA, são feitas além de análises laboratoriais, visitas em campo são feitas a fim de se investigar melhor as alternativas de restauração da área utilizada.

Atualmente no Brasil são necessários diversos tipos de estudos de impactos ambientais para atividades mineiras, como o plano de controle ambiental (PCA), o relatório de controle ambiental (RCA) e o relatório ambiental preliminar (RAP). O estudo de impacto ambiental é desenvolvido como todos outros estudos. Primeiro se traçam os objetivos, segundo, elabora-se uma metodologia e por último se executa o que foi planejado (SÁNCHEZ, 2013, p.182).

O plano de fechamento de mina no Brasil é norteado pelos impactos apontados na AIA e regido pelas ações determinadas no PRAD e tem como principal fundamento o estudo de impacto ambiental apresentado no início das atividades mineiras de extração e aprimorado durante as etapas de operação.

2.3.4 No Mundo

Sabe-se que além do Brasil, ao redor do planeta existe uma quantidade significativa de minas abandonadas. A preocupação da maioria dos países que

possuem minas encerradas sem a execução de um plano de fechamento é sobre o uso futuro da área minerada e a capacidade de manutenção e desenvolvimento da comunidade ao redor do empreendimento. Com base em informações apontadas pela FEAM, a Europa é desbravadora na pesquisa e gerenciamento de minas abandonadas e, em diversos países europeus, existem órgãos de responsabilidade do governo destinados tão somente à reabilitação de tais mina (DAMASCENO, 2017).

Dias (2013) apresenta gráficos compilados a partir de estudo preparado pelo autor australiano Laurence em relação aos principais impactos ambientais ocorridos no fechamento de minas na Austrália entre os anos de 1981 e 2005, conforme observa-se na Figura 5.

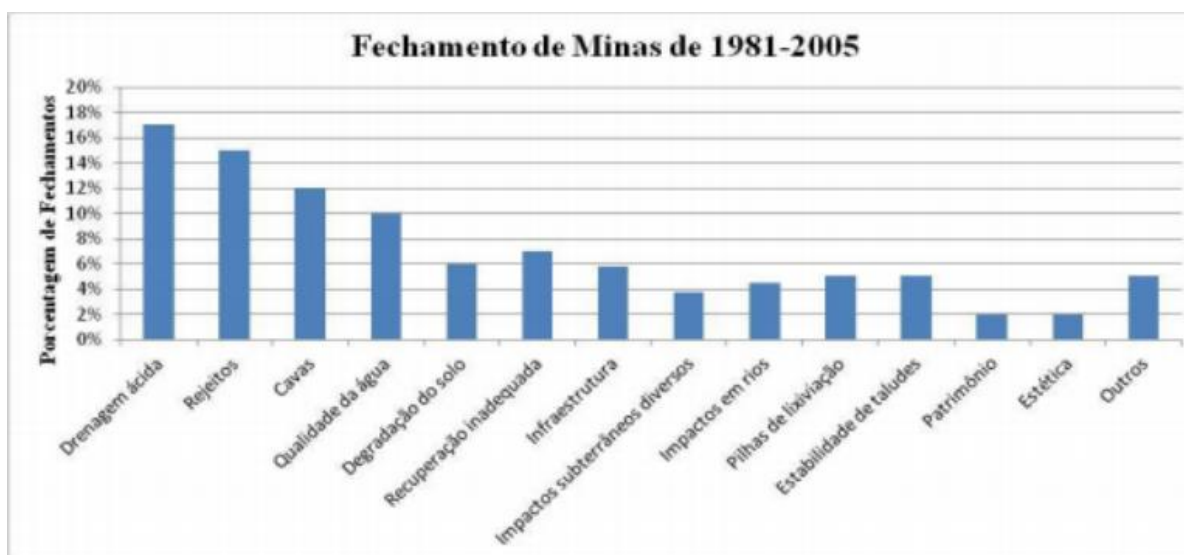


Figura 5: Impactos pelo fechamento das minas na Austrália nos anos de 1981 a 2005.

Fonte: (DIAS, 2013, p. 78).

Em Portugal por exemplo, a entidade competente responsável pela reabilitação de minas abandonadas é a Empresa de Desenvolvimento Mineiro (EDM), que, de acordo com o Regulamento nº. 198-A/01 pelo qual foi licenciada. Além de empreendimentos mineiros, a EDM pode conduzir áreas que tiveram a degradação causadas por outras atividades no país (CARVALHO, 2011).

Na França, a agência pública *Établissement Public Foncier* (EPF) trabalha para restaurar áreas industriais e de mineração degradadas e promove sua incorporação ao ambiente urbano para novos usos. Entre 1991 e 200, a EPF reabilitou aproximadamente .752 hectares de áreas industriais (a maioria localizada em bacias

minerárias) na região de Nord-Pas-de-Calais, mundialmente famosa pela mineração de carvão (FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE, 2016).

Países como os Estados Unidos criaram um programa de informação online chamado *Abandoned Mine Land Portal*, que promove ampla informação sobre as minas abandonadas do país (cerca de 500 mil) e destaca seus riscos ambientais e humanos. Países como Chile e Peru também estão trabalhando para realizar pesquisas e estudos para identificar e mapear minas abandonadas para melhor gerenciar e controlar essas áreas (FUNDAÇÃO ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE, 2016).

Observa-se na Figura 6 um levantamento dos estudos detalhados que são necessários para a apresentação, análise e aprovação das atividades de extração nos respectivos países (SÁNCHEZ, 2013).

JURISDIÇÃO	ESTUDO DETALHADO	ESTUDO SIMPLIFICADO
África do Sul	Relatório de impacto ambiental (<i>environmental impact report</i>)	Relatório de âmbito (<i>scoping report</i>)
Austrália Ocidental	Estudo de impacto ambiental (<i>public environmental review</i>)	Avaliação inicial (<i>assessment on proponent information</i>)
Chile	Estudo de impacto ambiental	Declaração de impacto ambiental
China	Declaração de avaliação de impacto ambiental	Formulário de impacto ambiental
Estados Unidos	Estudo de impacto ambiental (<i>environmental impact statement</i>)	Avaliação ambiental (<i>environmental assessment</i>)
França	Estudo de impacto	Notícia de impacto
Moçambique	Estudo de impacto ambiental	Estudo ambiental simplificado

Figura 6: Estudos obrigatórios para licenciamento das atividades de escavação nos respectivos países.

Fonte: (SÁNCHEZ, 2013, p. 137)

As ações empregadas durante a fase de fechamento de mina são norteadas pelos estudos e análises dos impactos gerados durante a fase de desenvolvimento e lavra dos empreendimentos mineiros. A legislação que rege as ações de encerramento das atividades difere de um país para outro, porém a essência é mesma e vai de encontro a restauração das áreas de degradação ambiental, reabilitação da fauna e flora local e não contaminação das bacias hidrográficas da região por águas contaminadas.

2.4 Histórico de Exigências do Plano de Fechamento de Mina no Brasil

O fechamento de minas tem sido um tema muito debatido nos últimos anos. Os órgãos reguladores começaram a exigir que as empresas de mineração tenham um planejamento para encerrar o negócio. No entanto, poucas minas foram fechadas de acordo com um plano pré-estabelecido, as medidas de fechamento ainda se confundem com ações de reabilitação de áreas degradadas, a experiência adquirida ainda não é compartilhada com os profissionais do setor e ainda faltam progressos no conhecimento.

A mineração está fortemente instalada na história brasileira e possui até os dias de hoje relevante participação no desempenho do PIB. Com a chegada dos portugueses, manifestou-se a curiosidade e o interesse pelas riquezas minerais brasileiras, em específico a busca pelo ouro. Foram criadas expedições para se adentrar território com o intuito de se explorar as terras em busca de riquezas, devido ao elevado número de afloramento de minérios (LIMA, 2009).

Conforme Lima (2009), a relevância dessa atividade na época era rentável que nas primeiras décadas 1700, mais de 100 mil pessoas deixaram Portugal para tentar buscar ouro em solo brasileiro. Com isso, iniciam as colonizações em cidades, recebendo uma explosão de novos moradores, de forma desorganizada. Exemplo dessas cidades são Sabará, Caeté, Vila Rica, Mariana, São José de Rey e São João del Rey (CARVALHO, 2011).

Durante o século XVII. a produção de ouro no Brasil reestrutura as principais regiões como Minas Gerais, Goiás, Mato Grosso e São Paulo. A partir dos anos 60, o garimpo migrou para a Região Amazônica que se tornou uma forte produtora. Essa atividade perdeu um grande passivo ambiental, devendo ser destacados os passivos ambientais dos garimpos de Tapajós, Poconé, Rio Madeira, Gurupi, Alta Floresta, Peixoto de Azevedo e Serra Pelada (FARIAS, 2002, p. 16).

O início da exploração de minerais no Brasil, desde os colonizadores não se atualizou nas questões de regulamentação, ou seja, a exploração é desorganizada não respeitando a relação desenvolvimento e preservação do meio ambiente. É possível concluir que está enraizado a fraca cooperação da relação mineração e meio

ambiente até mesmo nos dias de hoje, não sendo realizadas as atividades de forma correta para se garantir um futuro equilibrado (CARVALHO, 2011).

Durante séculos, os empreendimentos minerários foram simplesmente abandonados e seus efeitos passaram despercebidos. Antes do advento do movimento ambientalista na década de 1970, as mineradoras tinham poucas responsabilidades quando decidiam encerrar seu processo produtivo (CENTENO, 2017).

Geralmente, se a cava final e as pilhas de rejeitos fossem cercadas, e as aberturas e passagens inferiores desobstruídas, as mineradoras ficavam isentas de responsabilidade futura dentro e ao redor da área. Terminado o evento, restava apenas a paisagem degradada. Este fato contribuiu para a reputação da indústria de mineração como um "vilão" ambiental. No entanto, isso mudou nas últimas décadas (GONÇALVES, 2017).

De fato, somente em 1989 a política ambiental nacional passou a exigir que as mineradoras entregassem os Planos de Recuperação de Áreas Degradadas – PRAD, de acordo com a Constituição de 1988, juntamente com Estudos de Impacto Ambiental - EIA e seus respectivos Relatórios de Impacto Ambiental – RIMA (SÁNCHEZ, 2013).

2.4.1 Trâmites para Criação e Aprovação de Lei: Licenciamento Ambiental

No Brasil, em meados da década de 1970, incorporou-se a legislação federal o licenciamento ambiental como um dos instrumentos da política do meio ambiente. Porém em um passado além antes do surgimento do licenciamento ambiental, o governo ainda interferia nas aberturas destas empresas de mineração. O Código Florestal de 1934 tornou obrigatório a obtenção da autorização para o desmatamento de florestas em propriedade privadas e o aporte de lenha para alimentar maquinários a vapor (NERI, 2013).

O Decreto de Lei nº134/75 sobre licenciamento ambiental promulgado no Rio de Janeiro tornou obrigatória a prévia autorização para operação ou funcionamento de instalação ou atividades real ou potencialmente poluidoras. Dois anos depois, o Decreto nº 1633/77 declarou obrigatório o licenciamento de atividades

poluidoras, tornando o estado o responsável por emitir as licenças de instalação e operação (SÁNCHEZ, 2013).

A Lei nº 997/76, promulgada em São Paulo, deu origem ao Sistema de Prevenção e Controle da Poluição do Meio Ambiente, regimentado pelo Decreto nº 8.468/76 e posteriormente modificado. Originalmente, este decreto instituiu internamente às Licenças de Registro duas concessões denominadas Licença de Instalação e Licença de Funcionamento (SÁNCHEZ, 2013).

Após a inclusão da AIA à legislação brasileira, a análise de impactos das atividades potencialmente poluidoras passou a abranger não somente questões ambientais, mas também socioculturais, regionais e econômicas. De acordo com Sánchez (2013) os requisitos para a obtenção da licença era:

A construção, instalação, ampliação e funcionamento de estabelecimentos e atividades utilizadoras de recursos ambientais, considerados efetiva ou potencialmente poluidores, bem como os capazes, sob qualquer forma, de causar degradação ambiental, dependerão de prévio licenciamento de órgão estadual competente, integrante do Sistema Nacional do Meio Ambiente – Sisnama, e do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis – Ibama, em caráter supletivo, sem prejuízo de outras licenças exigíveis (Art. 1º, Lei nº 6938/81).

Portanto, qualquer forma de degradação oriunda da atividade humana deveria obter licenciamento para realização das atividades. Aquelas que já estavam em funcionamento teriam um prazo para apresentação dos relatórios de riscos e controle para futura obtenção das licenças.

De acordo com a constituição brasileira, a regulamentação brasileira de mineração depende da atuação dos três níveis de governo, federal, estadual, municipal e distrito federal, para estabelecer diretrizes e regulamentos, bem como concessão, controle e cumprimento da legislação de mineração. Na Constituição da república Federativa do Pau-Brasil emitida em 1988 e ainda em vigor, isso está claramente expresso em seu art. artigo 20, IX. ponto, § 1 (CONSTITUIÇÃO FEDERAL, 1988):

Art. 20 - São bens da União:

IX - Os recursos minerais, inclusive os do subsolo;

Parágrafo 1º - É assegurado, nos termos da lei, aos Estados, ao Distrito Federal e aos Municípios, bem como a órgãos da administração direta da União, participação no resultado da exploração de petróleo ou gás natural, de recursos hídricos para fins de geração de energia elétrica e de outros recursos minerais no respectivo território, plataforma continental, mar

territorial ou zona econômica exclusiva, ou compensação financeira por essa exploração.

Em arte. 174, § 3º, “O Estado proverá prioridade à regulamentação das atividades de mineração em cooperativas, tendo em vista a proteção do meio ambiente e a promoção econômica e social dos mineradores”. Todos os recursos minerais pertencem à associação e cabe apenas a ela criar mecanismos regulatórios para essa atividade. No artigo 22 explica: “Art. 22 - É competência exclusiva da associação legislar: XII - Jazidas, minas, outros recursos minerais e metalurgia ” (CONSTITUIÇÃO FEDERAL, 1988).

E na da Constituição (1988) em seu artigo 23, explica: Art. 23 - São competências usuais aos sindicatos estados, federações e municípios: XI - registrar, fiscalizar e verificar as atribuições de enquete e exploração de recursos hídricos e minerais em seu território.” Ainda no art. 225, § 2º da Constituição (1988), impõe aos exploradores de recursos minerais a responsabilidade de reparar os danos ambientais causados pela atividade minerária, consistindo na obrigação de “recuperar o meio ambiente degradado, de acordo com a solução técnica competente exigida pelo público, na forma de lei.” Falando especificamente sobre a questão ambiental, o Decreto nº 97.632, de 10 de abril de 1989, explicita que:

Art. 1º Os empreendimentos que se destinam à exploração de recursos minerais deverão, quando da apresentação do Estudo de Impacto Ambiental - EIA e do Relatório do Impacto Ambiental - RIMA, submeter à aprovação do órgão ambiental competente, plano de recuperação de área degradada. Parágrafo único. Para os empreendimentos já existentes, deverá ser apresentado ao órgão ambiental competente, no prazo máximo de 180 (cento e oitenta) dias, a partir da data de publicação deste Decreto, um plano de recuperação da área degradada.

Art. 2º Para efeito deste Decreto são considerados como degradação os processos resultantes dos danos ao meio ambiente, pelos quais se perdem ou se reduzem algumas de suas propriedades, tais como, a qualidade ou capacidade produtiva dos recursos ambientais. Art. 3º A recuperação deverá ter por objetivo o retorno do sítio degradado a uma forma de utilização, de acordo com um plano preestabelecido para o uso do solo, visando a obtenção de uma estabilidade do meio ambiente (BRASIL, 1989).

Diante de inúmeros relatórios, leis e portarias, documentos que auxiliam e contribuem para melhoria e preservação do meio ambiente, tem-se o estudo de impacto ambiental (EIA) que trata com relevância de todo processo de avaliação de impacto ambiental, ou seja, são com base e objetivo nesse documento que serão tomadas as principais decisões quanto à efetividade ambiental de um projeto, quanto

à demanda de medidas atenuada ou compensatórias e quanto ao tipo e à obtenção dessas medidas. Dado o caráter público do processo de AIA, esse documento servirá de base para as negociações que poderão se estabelecer entre empreendedor, governo e partes interessadas (DNPM, 2002).

Existem inúmeros estudos ambientais, incluindo o próprio EIA, o plano de controle ambiental (PCA), o relatório de controle ambiental (RCA) e o relatório ambiental preliminar (RAP), além de estudos de aplicação limitada a certos tipos de empreendimentos, como o plano de recuperação de áreas degradadas (Prad), empregado no setor de mineração, e o projeto básico ambiental (PBA), empregado para projetos do setor elétrico (DIAS *et al.*, 2016).

Entende-se que esses estudos se baseiam nos procedimentos e princípios do EIA, que será aqui apresentado. Essa metodologia básica para planejamento e elaboração de um estudo de impacto ambiental pode, portanto, com adaptações, ser utilizada para qualquer um dos estudos ambientais (DIAS *et al.*, 2016)

O encerramento da mina tem um impacto direto na sustentabilidade global da área de influência do projeto, sendo compreensível a obrigatoriedade de um plano de fechamento para minimizar os impactos socioeconômicos e ambientais das atividades de mineração e proporcionar à sociedade civil maior proteção quanto à sustentabilidade (DIAS *et al.*, 2016).

2.5 A Economia Circular no Âmbito da Mineração (Nacional e Mundial) e suas Propostas

A economia circular é considerada como um conceito guarda-chuva, ou seja, não pode ser definida objetiva e superficialmente. Ela abrange um conjunto de conceitos já existentes, não relacionados anteriormente, conectando-os a conceitos contemporâneos e resultando em uma nova interpretação e gestão dos resíduos e ciclo de recursos (BLOMSMA; BRENNAN, 2017). Associando-a à mineração, a EC propõe a reutilização de resíduos, restauração do ambiente e ecossistema e desenvolvimento em comunhão com a sociedade, cultura e ecossistema local.

A principal essência da economia circular é a compreensão de que o aproveitamento dos recursos pode ser otimizado e os resíduos e emissões no sistema reduzidos através da circularidade (GEISSDOERFER *et al.*, 2017). É uma estratégia

focada na interconexão das cadeias de recursos e energia para adquirir um conjunto de medidas-chave que aplicados à um circuito fechado de produção (MA *et al.*, 2015) realiza a projeção do produto desde a fabricação até o descarte pós-consumo.

De acordo com Lèbre *et al.* (2017) há um consenso generalizado de que a redução da extração de recursos primários – portanto, das atividades de mineração em geral – é um requisito básico para o desenvolvimento sustentável. No entanto, os metais primários ainda serão necessários ao longo da transição para uma sociedade mais sustentável e não seria razoável pensar que a reciclagem de produtos em fim de vida irá substituir a extração de minério inteiramente, em um futuro próximo ou distante. Portanto, é construtivo dedicar esforços de pesquisa para explorar o papel da indústria de mineração em uma EC e identificar caminhos de transição para que a mineração progrida em direção a práticas mais sustentáveis. Alternativamente, não incluir o setor de mineração na pesquisa de EC resultaria em oportunidades perdidas para recuperação técnica e economicamente viável (agora ou no futuro) de minerais valiosos que atualmente são descartados como rejeito de plantas de beneficiamento, bem como oportunidades perdidas de abordar e remediar alguns dos legados de mineração do passado.

A economia circular está em evidência em agendas políticas, por meio de pacotes de incentivo governamental ou por regulamentação, principalmente na União Europeia (EU) - *EU Circular Economy Package* (2015) (VELENTURF *et al.*, 2019), na China com a lei *Circular Economy Promotion Law* (2009) – objeto de metas de políticas oficiais (JESUS; MENDONÇA, 2018; GENG *et al.*, 2012) e na Holanda (KORHONEN; HONKASALO; SEPPÄLÄ, 2018), entre outros.

A mineração sugere a extração de recursos minerais de forma linear, buscando a não reutilização de resíduos e cada vez mais o aumento da produção. Porém a economia circular abre portas para aperfeiçoar e equilíbrio entre os ecossistemas, tanto ambiental quanto econômico, trazendo propostas de projetos que trabalham a partir de ciclos fechados de produção, de forma a gerar mínima extração de recursos virgens, mitigando o desperdício e otimizando a utilização de fontes de energias renováveis (ÉLEÓNORE, GLEN, ARTEM, 2017). Desta forma, o gerenciamento de energia e água do sistema é realizado por meio do fechamento do fluxo de recursos

renováveis de tal forma a eliminar as perdas no transporte, uso, reciclagem e reaproveitamento de energia.

Segundo Reuter *et al.* (2013), estudos da década passada apontam grande potencial de escassez de reservas de altos teores minerais. Essas descobertas apontam firmemente na direção da reciclagem, já que recursos podem ser usados preferencialmente para reciclar materiais ao invés de extrair minerais, incluindo minerais críticos necessários para a futura infraestrutura energética de fato. Esta escassez citada tem potencial para tornar a reciclagem uma necessidade e não uma escolha. Também segundo o autor, a reciclagem muda não só a escala e localização de produção, mas também centros de valor na cadeia de produção e consumo.

De acordo com Jacks (2013) a economia circular na indústria de mineração foi considerada pouca clara em relação a necessidade de implantação de forma mais eficiente e de transmitir aos colaboradores do ramo a EC como valores que deveriam fazer parte dos núcleos das empresas minerárias. Com base nas entrevistas feitas pelo autor citado, a valorização de rejeitos na mineração indústria está atualmente em estado inicial no mundo. Poucas mineradoras põem em prática novas possibilidades em torno do rejeito. Porém, mesmo que o potencial de valorização dos rejeitos permanece pouco explorada, os entrevistados reconhecem um potencial claro para o futuro. O pensamento de longo prazo é enfatizado diferenciando minas com várias expectativas de vida. Nas operações com expectativa de vida mais longa, o pensamento de longo prazo e a utilização de materiais são mais prováveis em uma perspectiva mais ampla.

A gestão de recursos renováveis energéticos deve-se a ameaça da garantia de segurança energética, ou seja, falha no fornecimento ininterrupto de recursos energéticos - tradicionalmente combustíveis fósseis - a um preço acessível, faz com que as indústrias invistam cada vez mais em avanços tecnológicos e equipamentos de produção de forma a aumentar o abastecimento de energia, que atendem as demandas de produtividade e que reduzem o impacto negativo ao meio ambiente (PROSKURYAKOVA; ERMOLENKO, 2019). Por exemplo, de acordo com Stahel (2014), a Suécia reduziu em 50% o imposto sobre vendas de produtos consertados para reutilização e tornaram deduzida de imposto as despesas trabalhistas relacionadas a estes serviços.

Na Austrália, foi criado o projeto *Wealth from Waste* (Riqueza de Restos) para aperfeiçoar a reciclagem e reuso de resíduos; como também o Mapeamento de Minas Urbanas com indicadores *Proxy* e *SIG*, para antecipar e precisar possíveis fontes secundárias de metais e minerais (CSIRO, 2015).

Na Austrália, pesquisadores ressaltam que além da necessidade de soluções técnicas para viabilizar o reuso de minerais que são subprodutos de plantas de beneficiamento de mineradoras, também é necessário a reformulação da taxaço de impostos praticados sobre produtos manufaturados através da reutilização de matéria prima (GOLEV, LÈBRE & CORDER, 2017, p.6). Destaca-se a inviabilidade da sobretaxação de materiais reutilizados, pois caso contrário, desestimularia a indústria a praticar ações voltadas a EC.

No Reino Unido, destaca-se a o programa de ações *Waste & Resources* (WRAP) apoiado por governos de vários países, por diversas iniciativas privadas e por cidadãos. O projeto tem como valores o não desperdício de recursos naturais, assim como a reutilização e reciclagem de todo bem que se usa. Seu objetivo principal é tornar o mundo um lugar mais sustentável através de metas a serem cumpridas até o ano de 2025 (LÈBRE at. al., 2017). Seu foco está voltado para o setor alimentício, têxtil e de produção e descarte de plástico. De acordo com o boletim informativo do programa, algumas das metas a serem cumpridas até 2025 são potencializar esforços para envolver mais pessoas na redução do desperdício de alimentos no Reino Unido e em todo o mundo, usando intervenções testadas e comprovadas por meio da campanha de mudança de comportamento *Love Food Hate Waste* desenvolvida por eles, efetivar que 100% das embalagens plásticas serão recicláveis ou compostáveis e 70% serão efetivamente reciclados ou compostados, entre outra dezenas de metas sustentáveis.

Outras iniciativas estão destacadas na Figura 7, com práticas sendo desenvolvidas no cenário da mineração internacional e nacional (CSIRO, 2015; CEC, 2017; CETEM-MINERALIS, 2017; EMF, 2017a) e que apontam para possibilidades de sintonia entre a mineração e os princípios da EC.

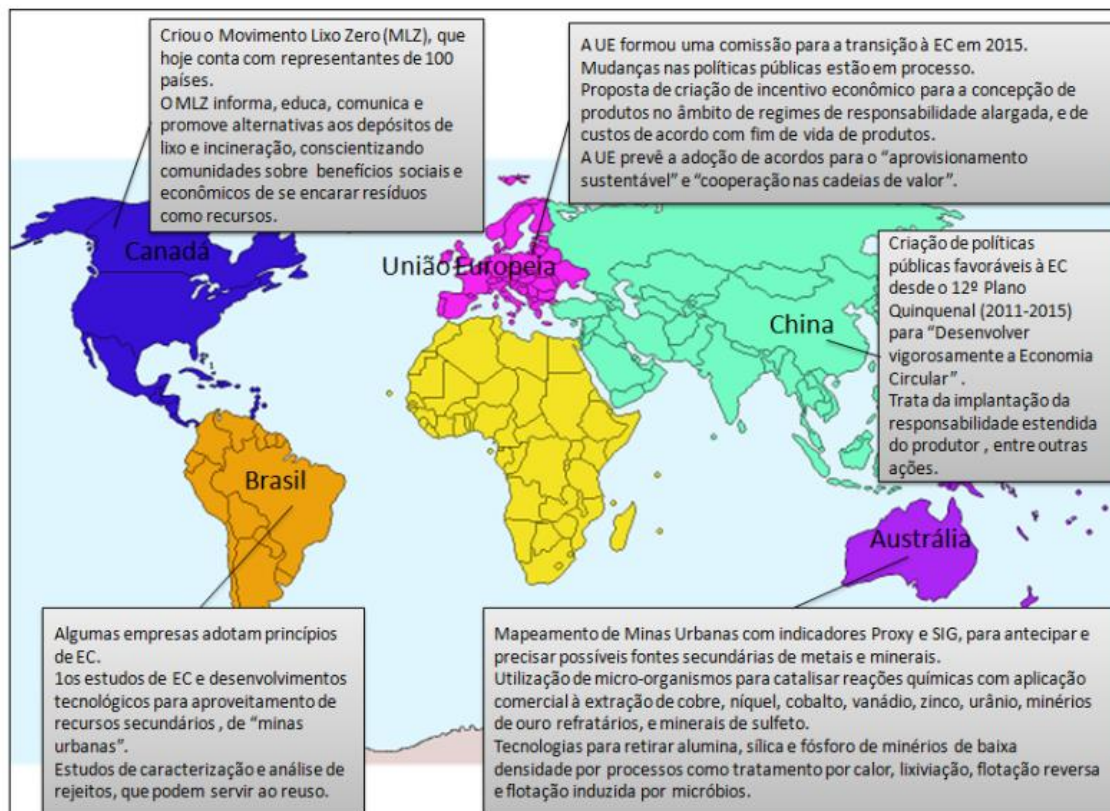


Figura 7: Iniciativas relacionadas à mineração em sintonia com princípios de EC.

Fonte: (BEARMAN, 2013).

Com o levantamento de dados de produção mineral dos últimos anos, percebeu-se que os países da União Europeia (UE) assumem a dianteira para a transição à EC e são também os que mais importam de alguns dos principais produtores de bens minerais, como China, EUA, Canadá, Austrália, Brasil (USGS, 2017). Em um contexto macroeconômico, países europeus são em grande parte membros da OECD e podem ter peso em decisões no mercado internacional. Os mesmos têm se preocupado em financiar e desenvolver pesquisa em tecnologias e capacitação para desmonte de peças e reaproveitamento de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (RIBEIRO-DUTHIE & LINS, 2017).

Ao tratar-se de desenvolvimento político no Brasil, temos algumas políticas públicas como leis e órgãos que regulamentam o seu desenvolvimento ecológico. Um grande exemplo disso é a Política Nacional de Resíduos Sólidos, estabelecida pela Lei nº 12.305/10. A lei outorga principalmente a regulamentação, não geração, redução, reutilização, reciclagem e tratamento de resíduos sólidos, assim como o tratamento correto final, ambientalmente falando de rejeitos. Portanto, o

gerenciamento de resíduos nas cidades brasileiras está caminhando lentamente para patamares elevados, segundo a ABRELPE (2018) - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais - o índice de recuperação dos resíduos recicláveis cresceu apenas 10% entre os anos de 2012 e 2017. Isso demonstra quanto o nosso país carece de desenvolver formas de aplicação da Economia Circular para que este índice evolua mais rapidamente.

As regulamentações e diretrizes legais motivam e apoiam a implementação da economia circular e de processos industriais circulares, sendo significativos para criação de um cenário ideal para atingimento das práticas deste tema, além de ressaltar a necessidade de evolução na parte legal (SEHNEM *et al.*, 2019). Na aplicação do conceito de EC, os agentes públicos e políticos possuem uma grande influência, tanto positiva, por meio de infraestruturas legais, fomentando pesquisas e trazendo consciência social, quanto negativas, relacionando dificuldades de aplicação a fatores financeiros e falta de disponibilidade de soluções técnicas (JESUS; MENDONÇA, 2018) e barreiras à conscientização social.

A rápida aceleração da demanda consumidora e conseqüentemente extrativista resultou em um crescimento exponencial do uso de recursos não renováveis, aumentando a exposição do sistema a riscos como interrupção de fornecimento e esgotamento dos recursos de capital natural. Os riscos advindos da interrupção do fornecimento, como por exemplo, a volatilidade dos preços de matérias-primas e a provisão de recursos de energia renovável impactam diretamente a indústria e sua cadeia de valor do produto como um todo, sendo necessária a criação de redes compartilhamentos – de produtos e conhecimentos – por todos os *stakeholders* da cadeia (EMF, 2015). Deste modo, a EC aparece como uma excelente alternativa de garantia de fornecimento de matéria prima para o mercado, pois se tratando de processos cíclicos, toda energia que compõe o sistema pode ser reutilizada. E pela EC se tratar de um conceito contemporâneo, existe muito espaço no mercado e amplas possibilidades tecnológicas a serem desenvolvidas sobre os processos de execução deste novo modelo de utilização de recursos, potencializando-o como fator motivador para implantação da economia circular dentro do âmbito da mineração.

O setor de mineração está sujeito a variabilidades, tanto no sistema de extração como no processamento. As áreas de variabilidade são: depósito de minério, características geológicas da rocha, localização, consistência, teor, resistência, mineralogia, preços da *commodity* do minério, requisitos fixos do cliente, entre outros (BEARMAN, 2013). A partir da pesquisa mineral estima-se o modelo do corpo de minério a ser extraído, porém boa parte da estimativa da reserva é inferida, podendo apresentar características não identificadas durante a fase de pesquisa do subsolo, acarretando em contratempos e até paralização temporária das atividades. As principais características que afetam significativamente a viabilidade econômica de extração e que podem apresentar surpresas durante a fase de produção são teor (variações de décimos da porcentagem de teor podem trazer decréscimos no faturamento bruto na casa de milhões, principalmente em mineradoras de ouro), fraturas da rocha (quando se trata de minas subterrâneas, associando as famílias de fratura aos processos de contenção e estabilidade do maciço rochoso, o custo de produção pode aumentar significativamente), variações dos preços de mercado devido a demandas consumidoras e variações dos insumos utilizados na planta de beneficiamento, por exemplo.

Em virtude das dificuldades de lidar com o material geológico natural, a mineração não pode ser comparada a alguns setores da indústria. (BEARMAN, 2013). Deste modo, a inovação é essencial para lidar com a complexidade inerente ao setor de mineral, como uma maneira de garantir a resiliência perante as variabilidades dos negócios em longo prazo. O setor minerário possui uma capacidade de inovação incremental essencial que é capaz de propor melhorias e acompanhamentos diante das adversidades locais e globais de produção. Porém a área mais crítica para o setor são as de grandes mudanças revolucionárias, ou seja, inovações que exigem maior esforço por desafiar o conhecimento existente (BEARMAN, 2013) e propõe aplicação de inovações da maneira mais eficiente possível, como a economia circular a título de exemplo.

Geissler *et al.* (2018) destaca que por meio das inovações de todos os tipos - tecnológica, de processos, organizacional, ambiental, social, cultural, entre outras - ocorre o fechamento de ciclos e início de outros, ou seja, a transição entre sistema de consumo linear e o sistema circular ocorrerá de forma gradual e o tempo induzirá

de forma natural a redução dos impactos ambientais advindos da atividade minerária. Portanto, as ferramentas da Economia Circular precisam ser aperfeiçoadas e empregadas para que os resíduos recicláveis possam ser recuperados e assim reaproveitados.

2.6 Fechamentos de Mina Associado à Economia Circular

Os principais objetivos do fechamento regulamentado e planejado de uma mina são garantir o bem estar e saúde humana e garantir o equilíbrio do ecossistema realizando a manutenção da estabilidade química e física das matérias e resíduos remanescentes da mina, possibilitando a reutilização da área uma vez que as atividades estejam encerradas (OLIVEIRA, 2006). Ao englobar os preceitos da economia circular nos processos de fechamento de mina, acrescentamos aos objetivos citados acima a reinserção de toda ou parte da matéria e resíduo existente na etapa do fechamento de volta ao ciclo operacional do mercado. Neste parágrafo destacam-se algumas dessas práticas sustentáveis e exemplos desenvolvidos por empresas modelos do mercado.

Nas últimas décadas, apareceram diversas abordagens visando acrescentar valores sustentáveis relevantes em todas as etapas na vida útil de uma mina. Várias organizações e empresas do setor mineiro implementaram princípios e estratégias de sustentabilidade para estabelecer o compromisso responsável social e ambiental com o desenvolvimento de recursos. Uma dessas organizações é o ICMM. Ele estabeleceu os 10 princípios para que se efetive o desenvolvimento sustentável nos núcleos das empresas (TAYEBI-KHORAMI *et al.*, 2019). São eles:

1. Relações éticas e boa governança;
2. Integrar o desenvolvimento sustentável na tomada de decisões;
3. Respeito pelos direitos humanos;
4. Estratégias eficazes de gerenciamento de riscos;
5. Desempenho de saúde e segurança;
6. Desempenho ambiental;
7. Conservação da biodiversidade e ordenamento do território;
8. Projeto responsável, uso, reutilização, reciclagem e descarte de materiais;

9. Contribuição social;
10. Engajamento, comunicação e relatórios verificados independentemente.

Segundo Tayebi-Khorami *et al.* (2019), esses 10 princípios abrangem muitos tópicos associados à sustentabilidade e são semelhantes aos padrões internacionais de gestão sustentável, incluindo a *Rio Declaration*, *Global Reporting Initiative*, Diretrizes Operacionais do *World Bank*, as Convenções da Organização Internacional do Trabalho (OIT) e os Princípios Voluntários sobre Segurança e Direitos Humanos. Idealmente, segundo os mesmos autores, para se pensar e desenvolver uma estrutura de sustentabilidade e compromisso com a sociedade deve-se conectar atividades de nível corporativo e operacional e envolver profissionais técnicos.

2.6.1 Upcycle

A economia circular traz consigo conceitos de reutilização, reaproveitamento, reciclagem, recuperação, reuso e reprocessamento. Uma alternativa que engloba esses conceitos citados e que pode ser utilizada tanto na mineração quanto em outros ramos de negócio é o *Upcycle*. O *upcycling* compõe-se de processos sustentáveis que reutilizam o material a partir de sua forma “natural”. Segundo Ecycle (2023) o termo foi criado pelo ambientalista alemão Reine Pilz no ano de 1994, mas se popularizou em 2020 a partir do lançamento do livro *Cradle to cradle: rethinking the way we make things* escrito pelo arquiteto Willian McDonough e pelo químico Michael Braungart.

O *upcycle* consiste na reutilização de utensílios e materiais com o objetivo final de criar novos objetos de variadas funções que seriam descartados, sem alterar a originalidade do material primário, consumindo desse modo pouca energia no processo e maximizando o ganho ambiental. Por reaproveitar e recuperar materiais que seriam descartados, o *upcycle* vem na contra mão da extração mineral. Porém, nos processos e durante a vida útil de uma mina, existe várias oportunidades para se aplicar o *upcycling*. Por exemplo, na recuperação e reuso de pneus de equipamentos, hastes e tirantes descartados durante a atividade de perfuração e contenção de frentes na lavra subterrânea, peças e componentes de equipamentos em final de vida, tambores de óleo e aditivo, entre outros. Observa-se na Figura 8 algumas imagens

que exemplificam o produto final desta técnica não tão recente, mas que está em ascensão no mundo atual.



Figura 8: Exemplos de objetos provenientes da prática de *upcycle*.

Fonte: (ECYCLE, 2023).

2.6.2 Reutilização do Rejeito

Se tratando de mineração e fechamento de mina, de acordo com levantamentos destacados por Demirkan *et al.* (2022), o rejeito das plantas de beneficiamento é o principal passivo ambiental deixado pelas mineradoras. Rejeito pode ser definido como todos os materiais residuais provenientes do processo de extração: estéril; rejeitos; escória; e minério lixiviado. O que os distinguem é a etapa em que ele é formado e se contém ou não teores dos minerais destinados à extração.

Durante a etapa de fechamento de mina, tratar o rejeito considerando os princípios da economia circular significa realizar parcela considerável das ações sustentáveis, pois, como citado anteriormente, ele é responsável por grande parcela de todo passivo ambiental gerado pela atividade extrativista. Nesse caminho, o potencial de reprocessamento de resíduos de mineração é altíssimo, já que o material mineralizado descartado ou simplesmente inexplorado em uma mina tem a competência de trazer benefícios econômicos e reduzir os impactos ambientais (ÉLEÓNORE *et al.*, 2017).

Franks *et al.* (2011) desenvolveu um conjunto de sete princípios para guiar a tomada de decisões em relação ao descarte de rejeitos de mineração e que estão em comunhão com a economia circular. São eles: (1) Os resíduos de mineração e processamento mineral devem ser gerenciados de forma que sejam fisicamente e quimicamente estáveis; (2) os rejeitos que interagem com o meio ambiente devem ser inertes; (3) os rejeitos que não são inertes devem ser isolados de forma a limitar a interação e subsequente mobilização; (4) os rejeitos devem ser contidos, ou seja, delimitados geograficamente e gerenciados com uma pegada mínima que limite a interação com o ambiente circundante; (5) os resíduos devem ser geridos de forma a considerar as condições ambientais e sociais locais de cada localidade; (6) os rejeitos devem ser gerenciados de forma a minimizar o uso de água e energia e a necessidade de gerenciar ativamente os resíduos após o fechamento da mina; e (7) deve ser dada preferência a tecnologias que melhorem os impactos do descarte de resíduos na sociedade e no meio ambiente e ofereçam oportunidades de reutilização, caso sejam adotadas.

Neste subtópico o rejeito retratado é aquele proveniente da planta de beneficiamento e que ainda contém teores do mineral extraído. Devido a essa característica do rejeito, além da futura possibilidade de reprocessamento e separação dos minerais de interesse ainda remanescente no material, minerações sustentáveis vêm buscando desenvolver a fabricação de tijolos e peças pré-moldadas para a construção civil a partir da reutilização de rejeitos.

A título de exemplo, de acordo com IBRAM (2020), a Vale criou um projeto-piloto em sua unidade na Mina do Pico, no Complexo de Vargem Grande em Minas Gerais, com o intuito de desenvolver e fabricar pré-moldados. A companhia estima que serão reaproveitadas cerca de 30 mil toneladas de rejeito de minério de ferro proveniente da barragem, produzindo cerca de 3,8 milhões de peças pré-moldadas que serão consumidos internamente e parte doadas para prefeituras, parques e comunidades.

Outro exemplo acontece na companhia Minério Itaúna LTDA – MINERITA que desenvolveu em seu processo de beneficiamento a concentração do *sínter feed* que é rico em sílica (areia), elemento ideal e muito utilizado em ligas de concreto, e que antes era descartado como rejeito na forma de polpa. A partir de adaptações

realizadas na planta de beneficiamento e que podem ser observadas nas imagens abaixo, a companhia tornou-se capaz de concentrar e armazenar a sílica na faixa granulométrica entre 0,0105mm a 6,3mm (sínter feed), com o objetivo de reutilizar este material em outros setores do negócio e até mesmo comercializá-lo (FEAM, 2013).

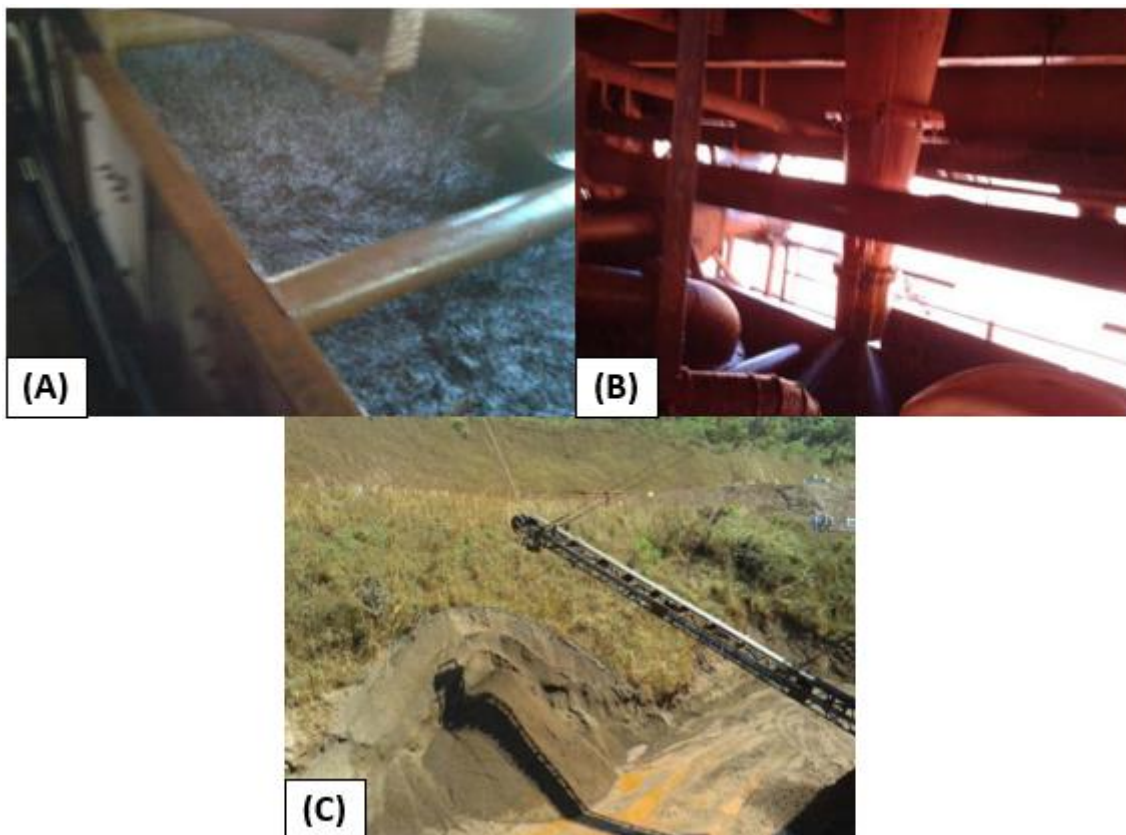


Figura 9: (A) Peneira vibratória da planta de beneficiamento da mineradora MINERITA, (B) hidrociclone da planta de beneficiamento da mineradora MINERITA e (C) correias transportadoras para armazenamento do sínter feed na mineradora MINERITA.

Fonte: (FEAM, 2013).

A partir do potencial econômico do novo produto da planta, a mineradora em parceria com o SENAI realizou testes quanto a resistência mecânica e absorção de água de blocos pré-moldados produzidos a partir da sílica extraída. Após a realização de alguns ajustes para tratar o teor de ferro presente no material, os blocos produzidos obtiveram resultados excelentes para a utilização em meios fios, muros para cercamento e calçamento intertravado para trânsito de veículos leves a pesados, com laudos emitidos pelo SENAI.

Visando potencializar os ganhos econômicos, uma planta de fabricação de peças pré-moldadas foi implantada no site da MINERITA em Lagoa das Flores no município de Itatiaiuçu para produção e comercialização dos produtos. Denominada BLOCOITA, o galpão constitui-se de equipamentos necessários para a produção automatizada das peças, dentre eles prensas, misturadores, silos e correias transportadoras, como observado na Figura 10.

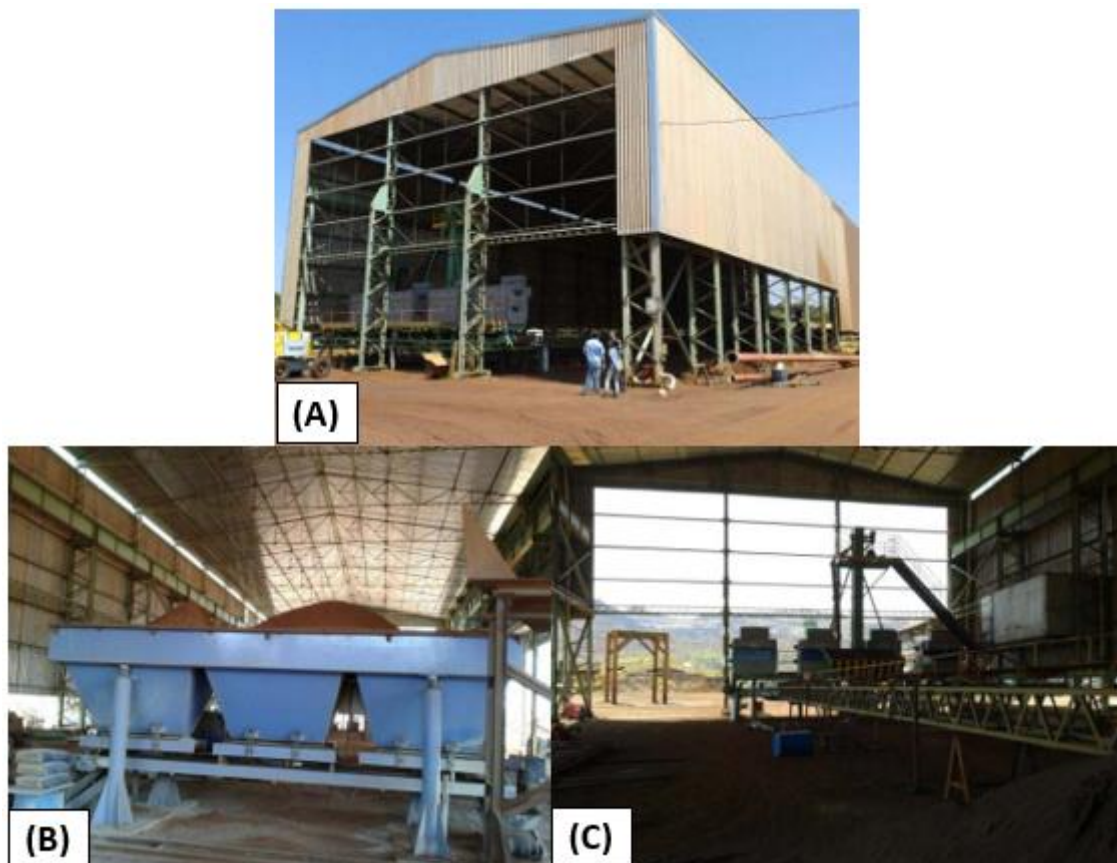


Figura 10: (A) Vista geral do galpão, (B) vista dos silos de armazenamento do material e (C) correias transportadoras do sinter feed na mineradora MINERITA.

Fonte: (FEAM, 2013).

A BLOCOITA produz em média 3 milhões de blocos pré-moldados por ano, representando apenas 20% da capacidade total de produção da planta, que podem ser utilizadas em calçamentos de vias de veículos e de pessoas, conforme se observa na Figura 11.



Figura 11: Blocos produzidos e utilizados no complexo BLOCOITA.

Fonte: (FEAM, 2013).

Segundo FEAM (2013), constatou-se que a taxa de permeabilidade dos blocos é maior que asfalto, promovendo desta forma maior abastecimento do solo e do lençol freático pelas águas da chuva e minimizando efeitos de enchentes e processos erosivos. BLOCOITA foi projetada para recuperar até 85 mil toneladas de areia por ano, o que corresponde a 13% de todo rejeito lançado em barragens pela mineradora. A produção pode alcançar cerca de 15 milhões de blocos de concreto por ano.

O resultado deste empreendimento confirma um dos pilares sustentados pela economia circular dentro da mineração, um material que antes era descartado em forma de pasta em barragens de rejeito, hoje é produto da planta de beneficiamento, processado e comercializado potencializando os ganhos do empreendimento, além de contribuir positivamente para a sustentabilidade.

De acordo com o estudo realizado por Severo (2019), outra alternativa que vem sendo utilizada para o reaproveitamento do rejeito lamoso a base de sílica, minerais ferrosos e/ou metálicos é a fabricação de tijolos refratários. A partir dos testes realizados em laboratório, certificou-se que amostras de até 15% do material composto por rejeito de minério de ferro apresentaram bons parâmetros de absorção de água, retração, perda mássica ao fogo, dureza, aparência e firmeza, conforme observa-se na Figura 12. O rejeito sílico-ferroso utilizado para fabricação destes tijolos são de origem da planta de beneficiamento da mineração Pedreira Um Valemix, localizadas no município de Catas Altas – MG e foram cedidos pelos professores do CEFET-MG Campus de Araxá.

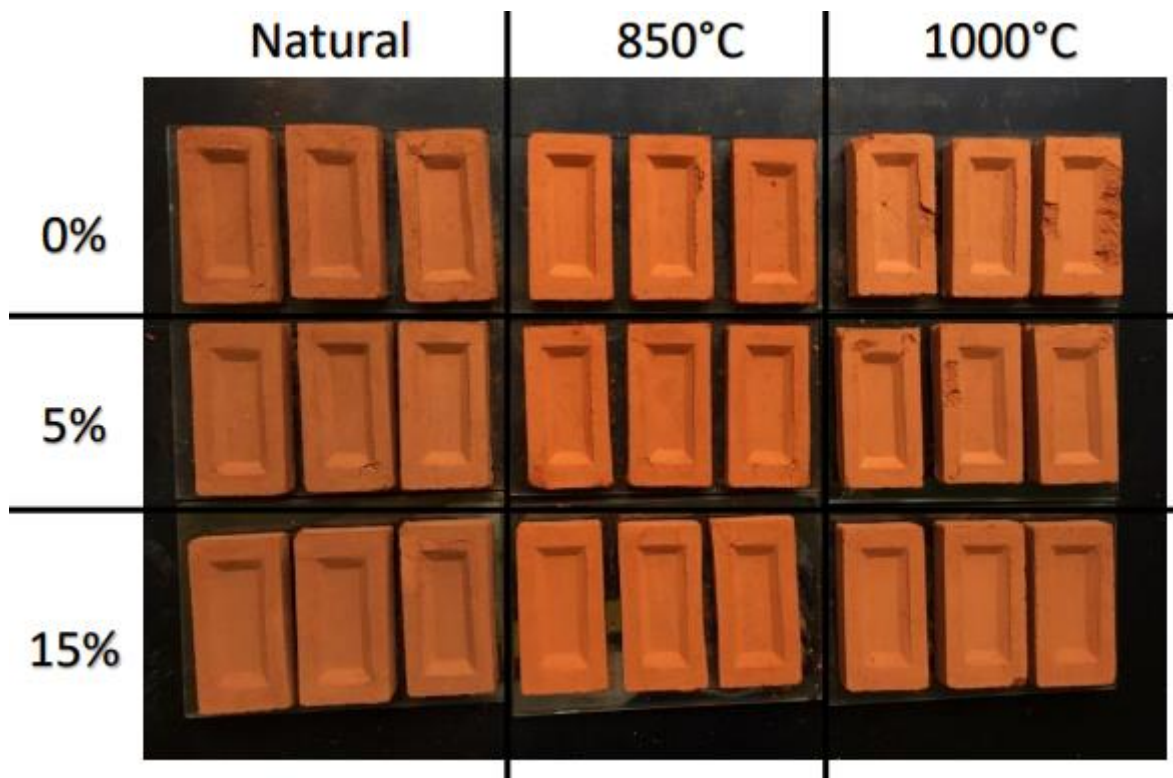


Figura 12: Tijolos fabricados com 0%, 5% e 15% de composição de rejeito, respectivamente (de cima para baixo). E após os processos de queima e secagem (Da esquerda para a direita).

Fonte: (SEVERO, 2019).

Observa-se na Tabela 2 o resultado obtido na média de retração das amostras de tijolos.

Tabela 2: Resultado da média de retração medidos em amostras dos tijolos.

Secagem	Amostra	Retração (%)	Média retração (%)		
			0%	5%	15%
1000 °C	1	2,23	2,36	1,76	1,09
	2	2,42			
	3	2,43			
850 °C	4	1,84	1,73	1,18	0,67
	5	1,62			
	6	1,72			
Natural	7	0,14	0,18	0,00	0,00
	8	0,16			
	9	0,25			

Fonte: (SEVERO, 2019).

Observa-se na Figura 13 o resultado da média de perda mássica medidos nas amostras dos tijolos analisados.

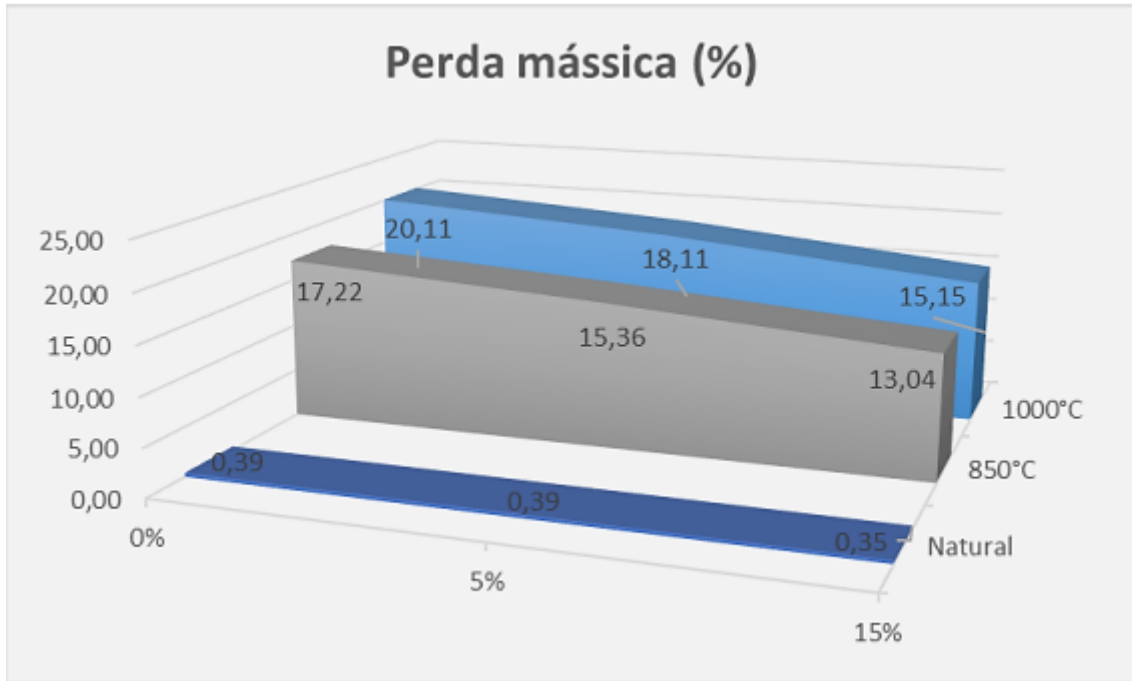


Figura 13: Resultado da média de perda mássica medidos nas amostras dos tijolos analisados.
 Fonte: (SEVERO, 2019).

Outro método que vem sendo utilizado em minas subterrâneas e que está em concordância com os preceitos da economia circular é o *Backfill*. Esta técnica consiste na disposição de uma mistura de rejeito em pasta mais outros materiais ligantes, formando assim uma espécie de liga de concreto, nos vazios gerados pela lavra do minério. O *backfill* consiste no método de preencher os vazios que seriam deixados e agir como sustentação do solo, diminuindo a subsidência (afundamento) do solo, além de reutilizar e redirecionar a disposição de rejeitos na mineração subterrânea diminuindo desse modo o passivo ambiental.

Segundo Tailling (2022), para que a técnica *Backfill* de disposição e preenchimento de vazios a partir do rejeito ocorra de forma ideal é importante processar o rejeito para que ele esteja em forma de pasta homogênea, não havendo distinção das partículas. Esta particularidade facilita o transporte da mistura até o subsolo, que é feito através de bombeamento encanado. Materiais ligantes como cimento, cal, meta caulim, cinza volante, entre outros podem ser adicionados a pasta de rejeito a fim de se chegar em parâmetros ideais de resistência a compressão, permeabilidade e escoamento, viscosidade, umidade, tensão ao cisalhamento e ângulo de repouso, conforme ilustrado na Figura 14.



Figura 14: Enchimento de vazio gerado pela lavra de ouro na mina de Barrick Gold Corporation no Canadá.

Fonte: (TAILLING, 2022).

Existem alguns tipos de *backfill* usados em minas subterrâneas. Os mais utilizados são o *pastefill*, *hydraulicfill*, *rockfill* e *cementedfill*. Todos eles têm o mesmo objetivo que é reutilizar um material que seria descartado e armazenado como passivo ambiental preenchendo os vazios decorrentes da lavra subterrânea, proporcionando maior estabilidade do maciço rochoso e conseqüentemente do solo, como estabelece os preceitos ambientais (TEIXEIRA, 2018). O que define a utilização de cada um são as propriedades da rocha e do rejeito gerado pelo beneficiamento e o método de lavra realizado. Por exemplo, um rejeito que possui propriedades que não formam uma boa liga com o cimento não é indicado para ser utilizado no *pastefill* e *cementedfill*. Assim como não é indicado o tipo *hydraulicfill* para métodos de lavra do tipo realce, onde o vazio gerado é volumoso e profundo, ocasionando a aplicação de altas tensões nos muros/barricadas de contenções que necessitam ser robustos, além de exigir um excelente sistema de drenagem de água do material (HASAN, 2013).

Observa-se na Figura 15 o muro de contenção/barricada com drenagem em teste na Mina Raleigh.



Figura 15: Muro de contenção/barricada com drenagem em teste na Mina Raleigh.

Fonte: (HASAN, 2013).

Pastefill é semelhante ao depósito de rejeito em forma de pasta na superfície. Normalmente os rejeitos são desidratados até atingir uma taxa de 65% de sólidos (por peso) ou mais, misturados a outros elementos até formar uma liga com propriedades ideais de resistência e bombeados para o subsolo, através de encanamento por bombas de deslocamento positivo. A pasta tem uma aparência homogênea e quando é depositada no subsolo, há pouco ou nenhum sangramento da água contida.

Hydraulicfill é utilizado quando os rejeitos possuem minerais a base de sílica e são submetidos a ciclonização para produzir lamas e frações de areia separadamente. As lamas são descartadas devido à sua baixa permeabilidade e geralmente são armazenadas em uma instalação de armazenamento de superfície. As areias geralmente são filtradas e bombeadas hidráulicamente para os vazios subterrâneos e podem ser misturadas com aglutinantes, se necessário. À medida que as areias assentam e consolidam, o excesso de água é drenado ou perdido por infiltração.

Cementedfill consiste no depósito de ligas de rejeitos misturados a estéril em vazios subterrâneos. É comumente utilizado em minas subterrâneas onde o local de armazenamento de estéril na superfície é escasso e o material é depositado nos

espaços vazios dentro da mina. Rejeitos misturados a elementos ligantes são descarregados sobre o estéril para preencher e ligar os vazios presentes entre as rochas de diferentes granulometrias. Este método é muito útil pois são necessários baixos volumes de pasta para agregar e formar a liga do material preenchido, reduzindo drasticamente o custo do processo e otimizando a redução do passivo ambiental.

Rockfill é o preenchimento do vazio através de material estéril, resíduos de rocha, areias superficiais, cascalhos ou rejeitos secos a partir de uma granulometria ideal. O material é despejado por elevação por caminhões basculantes de transporte de carga ou caminhões LHD. Este método é mais adequado para o método de mineração de corte e preenchimento.

As vantagens e benefícios encontrados no *backfill* são redirecionamento da disposição dos rejeitos armazenados no subsolo, evitando assim poluição e passivos ecológicos na superfície. Evasão de problemas associados à geração de poeira, impacto visual e contaminação de cursos de água superficiais. Melhor suporte para os pilares compostos do mineral de interesse, possibilitando a extração posteriormente. Melhor sustentação da mina e do solo, evitando subsidência. O preenchimento reduz o risco de ocorrência de quedas de rochas e chocos, pois os vazios são preenchidos e conseqüentemente as tensões são redistribuídas. Maior recuperação de água dos rejeitos. Melhora o condicionamento da mina a partir da diminuição dos vazios facilitando a infraestrutura de ventilação realizar a purificação do ar (TAILINGS, 2022).

Por outro lado, os desafios e obstáculos encontradas são a obstrução/entupimento da linha de tubulação, rompimento da tubulação devido a altas pressões de bombeamento, falha nos muros de contenção (barricada), custos elevados, especialmente se forem usados materiais ligantes e quando os rejeitos necessitam ser altamente desidratados. Atrasos no planejamento e execução da extração e desenvolvimento da mina. Riscos de liquefação do material utilizado para preenchimento, principalmente se os níveis de saturação forem altos e um gatilho (vibração sísmica) estiver presente. Ocorrência de infiltração e percolação de materiais poluentes e instáveis nas águas subterrâneas, possível contaminação do subsolo e aquíferos. Necessidade de mão de obra extra para o gerenciamento do

projeto (construção de uma planta independente). Possível diluição de minério caso o preenchimento ocorra de baixa precisão e qualidade (TAILINGS, 2022).

Outro recurso muito utilizado em minerações do mundo todo é a reutilização da rocha estéril para outros fins, quando ela é quimicamente neutra ao meio ambiente. Na gestão dos materiais estéreis em uma mina, o reuso é o método mais viável, barato e indicado ao invés da simples disposição em pilhas. O reaproveitamento dessas rochas em obras de engenharia, como por exemplo, obras de infraestrutura rodoviária, drenagem e contenções é uma excelente alternativa para a minimizar os impactos associados à sua disposição e alteração do meio ambiente. As obras de pavimentação, contenção e drenagem estão relacionadas a um grande consumo de materiais, conseqüentemente alto custo financeiro. Além disso, impactos ambientais significativos estão ligados a extração de agregados naturais utilizados para a execução de atividades dessa natureza (ANTT, 2018). O uso dos materiais estéreis em projetos minerários apresenta uma nova boa alternativa para o redirecionamento dos e uso dos materiais passivos, promovendo o desenvolvimento sustentável, reduzindo a demanda de agregados naturais, e, conseqüentemente, reduzindo custos.

Observa-se na Figura 16 uma alternativa para o redirecionamento do destino final de rochas estéril da mineração, neste caso reutilizada para auxiliar a drenagem de águas de chuva sem que ocorra erosão do solo.



Figura 16: Rocha estéril utilizada na drenagem de águas de chuva.

Fonte: (CRISTAL, 2021).

Na Figura 17 observa-se a reutilização de material estéril na contenção de taludes em uma barragem de rejeito, favorecendo sua estabilidade e reduzindo erosões.



Figura 17: Uso de rocha estéril como muro de contenção do talude de barragem de rejeito.

Fonte: (CRISTAL, 2021).

Observa-se na Figura 18 a reutilização de material estéril proveniente do desenvolvimento da mina subterrânea da NEXA em seu completo em Aripuanã-MT para a correção de pista no emboque da mina.



Figura 18: Rocha estéril utilizada como pavimento nas vias de acesso a mina da Nexa na cidade de Aripuanã – MT.

Fonte: (AUTOR, 2023).

Na Figura 19 observa-se grande quantidade de material estéril redirecionada para aterramento, pavimentação e correção da drenagem de água do canteiro da empresa Andrade Gutierrez no completo de mineração NEXA em Aripuanã-MT.



Figura 19: Pavimentação realizada com rocha estéril no Canteiro da Andrade Gutierrez na mina da Nexa no complexo Aripuanã - MT.

Fonte: (AUTOR, 2023).

2.6.3 Revitalização e Reutilização da Água

Outro fluxo de resíduos precisa ser adicionado à categoria de resíduos mineralizados é a água, que naturalmente entra em contato com resíduos sólidos e torna-se carregada de minerais, muitas vezes considerados como contaminantes do meio ambiente. Ao sair da local de extração, essa água, geralmente ácida, é conhecida como drenagem ácida de mina.

A contaminação de águas superficiais e aquíferos em minas a céu aberto e subterrâneas é sem dúvida uma das principais preocupações do setor ambiental em projetos minerários. Quando se fala em poluição de água, o principal meio de contaminação geralmente é através de drenagem ácida devido aos metais pesados presentes na composição mineral das rochas extraídas. Por este motivo, várias técnicas têm sido propostas para prevenir a formação de drenagem ácida de mina, focando tanto em minas em operação quanto em minas abandonadas. O principal objetivo destas técnicas é limitar a exposição de águas á áreas com material contaminador em potencial (Kefeni *et al.*, 2017; Park *et al.*, 2019).

Existem vários quadros de classificação para drenagem de águas ácidas, no entanto, uma classificação mais simples é baseada apenas no pH, onde a drenagem da mina é classificada como ácida (<6), circumneutra (6 a 9) ou básica (>9). Os principais mecanismos de revitalização da água e remoção de metais pesados normalmente incluem: i) precipitação, ii) adsorção, iii) filtração e iv) bio/fitorremediação (Madzivire *et al.*, 2010). Este trabalho, através das literaturas estudadas, abordou alguns destes mecanismos e resumiu abaixo apresentando casos onde essas técnicas são utilizadas na prática.

A precipitação baseia-se na utilização de materiais alcalinos, para aumentar o pH da água contaminada (neutralização), e/ou agentes oxidantes (precipitação oxidativa), para converter metais em estado insolúvel (por exemplo, hidróxidos metálicos), conduzindo assim à precipitação de metais/minerais, com os oxidantes e produtos químicos alcalinos e posterior remoção (BLAIS *et al.*, 2008).

A adsorção refere-se a um fenômeno de superfície do ramo da físico-química e se destaca pelo qual os contaminantes são transportados em soluções aquosas para superfícies sólidas preparadas onde são adsorvidos. A adsorção de águas

contaminadas é um processo de interface sólido-água governado pela migração de contaminantes presentes em uma solução para a superfície do material sólido (adsorvente). Normalmente, uma superfície carregada positivamente ou negativamente é usada para remover substâncias carregadas negativamente ou positivamente, respectivamente, de soluções aquosas contaminadas (Lewis, 2010).

A filtração consiste na separação de espécies químicas, sólidas e outros contaminantes (como por exemplo, contaminantes microbianos) de soluções aquosas através de um meio filtrante, normalmente uma membrana. O filtrado (fluido) passa pela membrana, enquanto os contaminantes são coletados/contidos pela membrana. Os parâmetros relevantes neste processo são pressão, tamanho de partícula, gradientes de concentração e fluxo de solução aquosa para remoção de contaminantes (Shahrin *et al.*, 2019).

A biorremediação consiste no uso de plantas (fito remediação) e organismos biológicos (remediação microbiana), normalmente microrganismos como bactérias e fungos, para a remoção de contaminantes da água e do solo ou para mineralizar completamente os poluentes da água e do solo em constituintes relativamente não tóxicos. Nesta técnica, os contaminantes são removidos por absorção/fito extração, fito excreção/fito volatilização, fito estabilização, degradação bacteriana e fúngica, aeróbica e anaeróbica (Tripathi *et al.*, 2020). Este mecanismo é comumente utilizado na revitalização de água poluídas e solos, provando ser eficaz no estudo desenvolvido por Bwapwa *et al.* (2017) no tratamento de águas residuais, incluindo drenagem ácida de mina. Os autores avaliaram a fito remediação na drenagem ácida (ou seja, absorção de metais pesados) usando cepas de algas e destacou a viabilidade de recuperar metais adsorvidos devido à capacidade destas algas de hiper acumularem (semi) metais. Kiiskila *et al.* (2020) também relataram ótima resposta metabólica do capim vetiver (*Chrysopogon zizanioides*) após o contato com a águas ácidas e sua boa eficiência, com base em um estudo multi-escalar de longo prazo, no tratamento de drenagem ácida da mina Tab-Simco no sul de Illinois, EUA.

Nos fóruns e discussões de órgão ambientais com núcleos de atividades extrativas, antes de se pensar em tratar águas contaminadas, primeiro se pensa em evitar a contaminação. Uma técnica que está de acordo com esta ideia e que vai de encontro a economia circular e sustentabilidade é o preenchimento de vazios onde

há a presença de rochas contaminantes em potencial. Tanto na mineração a Céu aberto, quanto na subterrânea, para evitar a drenagem ácida através do contato com rochas, vazios e galerias subterrâneas podem ser preenchidos com as próprias rochas extraídas do solo ou preferencialmente com materiais alcalinos. A esse respeito, Villain *et al.* (2013) estudaram os efeitos do aterro e vedação de estéril na mina a céu aberto de Kimheden, norte da Suécia e destacaram que esta técnica é eficaz e viável para preservar a qualidade da água.

Uma outra técnica utilizada, porém, essa é destinada a tratar águas já contaminadas, é o uso de substâncias que visam impedir a atividade biológica das comunidades bacterianas que estão presentes nos rejeitos e estéril e que catalisam a formação de drenagem ácida. O objetivo principal é eliminar as bactérias que oxidantes, evitando desse modo a produção de sulfato e dificultando a formação de ácidos. Um estudo de caso na China, por exemplo, realizou a aplicação dos bactericidas Triclosan, Kathon (isotiazolinonas) e sulfato de sódio em carvão contaminado e inibiu efetivamente a oxidação de Fe^{2+} , evitando assim o acúmulo de acidez e aumentando o potencial de oxido-redução (Hu *et al.*, 2020). No entanto, a principal desvantagem deste método é a possível toxicidade das substâncias aplicadas para os organismos vivos, além das condições ambientais e do tempo limitarem sua efetividade, sendo necessário avaliações antes e após aplicação, monitorização do Ph e reposição de substâncias caso necessário (Park *et al.*, 2019).

Historicamente, o tratamento de águas contaminadas era feito por sistemas ativos ou passivos. No entanto, nos dias de hoje, observam sistemas híbridos e integrados, onde o tratamento ativo e/ou passivo é combinado de forma gradual ou sequencial (Park *et al.*, 2019). Esta combinação de sistemas de tratamento é feita visando proporcionar uma alta eficiência nos resultados. Por outro lado, o tratamento integrado refere-se ao tratamento sequencial ou gradual de drenagens ácidas, normalmente apenas por técnicas ativas e visando a remoção e recuperação de metais/minerais em diferentes etapas de tratamento, enquanto a recuperação de água também pode ser buscada. Portanto, no contexto da economia circular, sistemas integrados podem ser usados para introduzir paradigmas de reutilização, reciclagem e recuperação de recursos no tratamento de águas residuais (Kefeni *et*

al., 2017; Nleya *et al.*, 2016). Abaixo, foram introduzidos cada sistema, destacando alguns pontos fortes e fracos de cada um.

Os sistemas de tratamento ativos geralmente empregam grandes entradas de energia, produtos químicos e outros materiais para conduzir o processo de tratamento. Por esse motivo, esse método também é conhecido como tratamento químico, pois produtos químicos tipicamente alcalinos, como Ca(OH)_2 , CaO , NH_3 , Mg(OH)_2 , NaOH , MgO e Na_2CO_3 são usados para aumentar o pH e precipitar os metais que estão contidos na água. Por exemplo, Kefeni *et al.* (2018) exploraram o uso de minerais à base de Fe para o tratamento de drenagens ácidas e o estudo foi considerado promissor para metais e atenuação de sulfato, por meio de adsorção e outros mecanismos. No entanto, a utilização desses materiais alcalinos requer recursos, energia e infraestrutura, retornando alto custo de implantação, operação e manutenção. Porém, seu retorno ambiental é considerado maior em comparação com o tratamento passivo (SKOUSEN *et al.*, 2019).

O tratamento passivo normalmente é usado em minas abandonadas e áreas onde o efluente requer menos tratamento. Estes sistemas de tratamento têm sido tradicionalmente usados em *wetlands*, removendo contaminantes e neutralizando o pH por meio da biorremediação (KIISKILA *et al.*, 2020). Diferentes mecanismos estão em jogo na biorremediação, uma vez que organismos vivos podem ser usados para mineralizar ou tornar os contaminantes menos nocivos (remediação microbiana) e/ou plantas para absorver e bio acumular contaminantes em seus tecidos (fito extração) ou excretá-los para a atmosfera (fito volatilização).

No tratamento integrado, ou seja, combinação de sistemas passivos e ativos de tratamento de água de drenagem ácida o principal objetivo é a recuperação de metais e minerais, além da revitalização da água. Como as técnicas ativas são usadas majoritariamente nesta classe de sistema, o tratamento integrado pode ser considerado um ramo do tratamento ativo (SINGH *et al.*, 2020). Especificamente, os sistemas ativos podem compreender vários subprocessos dentro de um sistema de tratamento geral. Normalmente a precipitação, adsorção e filtração estão presentes no fluxograma deste tipo de sistema. Os metais/minerais recuperados comumente são beneficiados a produtos e usados para aumentar a receita, além de reduzir os impactos ambientais do processo de extração mineral (MASINDI *et al.*, 2022).

Observa-se na Figura 20 um exemplo de fluxograma de tratamento integrado de águas oriundas de drenagem ácida.

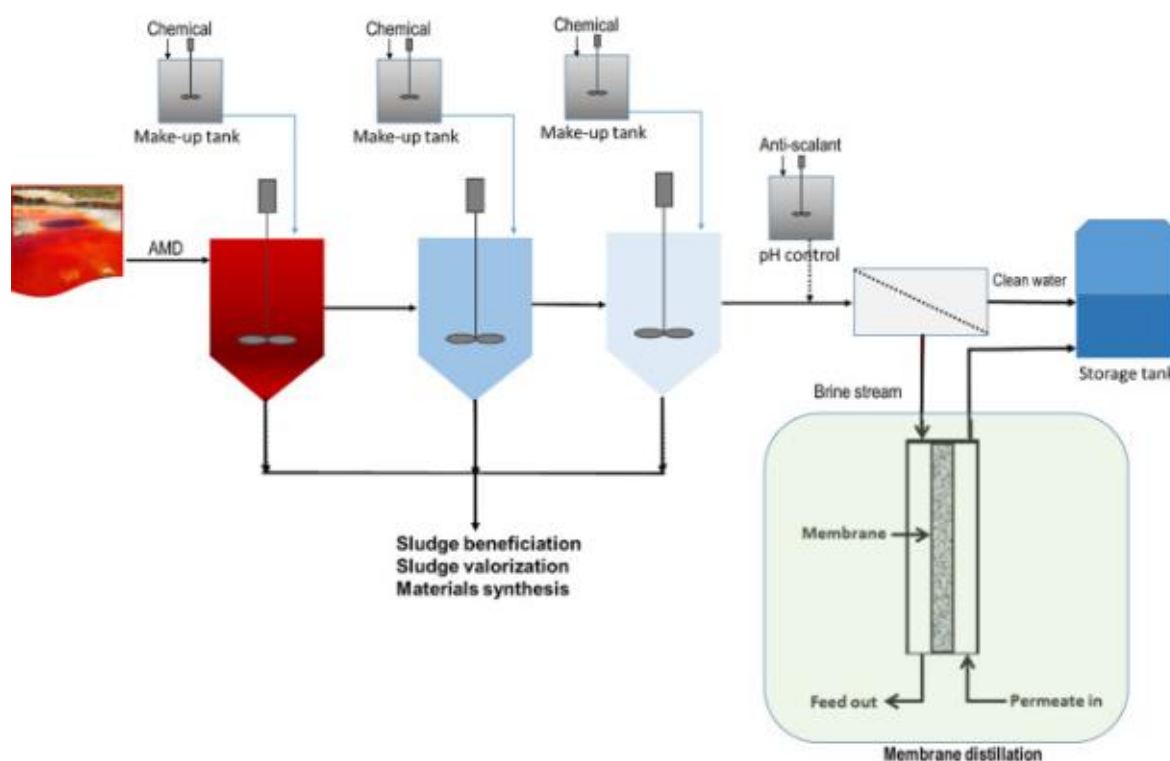


Figura 20: Exemplo de um fluxograma de sistema de tratamento de águas provenientes de drenagem ácida.

Fonte: (MASINDI *et al.* 2022).

Um exemplo de método híbrido de tratamento de água provinda de drenagem ácida que vem sendo muito utilizado em minerações no mundo todo são as *Wetlands*. As *wetlands* podem ser: i) aeróbias, ou seja, lagoas rasas (<30 cm) que desaceleram drasticamente a drenagem ácida catalisando a oxidação de metais, hidrólise e sedimentação de partículas, ou ii) anaeróbias, que são lagoas relativamente profundas (>30 cm) submetidas à condições anaeróbicas, ou seja, sem a presença de oxigênio, criadas propositalmente devido à alta demanda bioquímica de oxigênio dos compostos poluentes, promovendo assim a redução bacteriana dos sulfatos a sulfetos, que formam precipitados de metais insolúveis (por exemplo, FeS_2) e produzem alcalinidade que causa a precipitação de metais como hidróxidos (SKOUSEN *et al.*, 2019).

As *wetlands* aeróbicas compreendem sistemas florais que são preenchidos principalmente com solo ou cascalho de calcário. O calcário pode ser pulverizado

periodicamente, aumentando assim a área de superfície reativa e, portanto, a eficiência do tratamento. Por meio desses sistemas, a oxidação de metais e a precipitação de drenagem ácida (por exemplo, Fe e Mn) são realizadas naturalmente (RAMBABU *et al.*, 2020). Não apenas isso, mas as plantas em *wetlands* aeróbicas também absorvem nutrientes, que usam para seu crescimento (SHEORAN, 2006; SKOUSEN *et al.*, 2019). As *wetlands* aeróbicas são geralmente fáceis de operar e requerem pouca ou nenhuma entrada de energia e/ou materiais/produtos químicos após a construção.

Na Figura 21 observa-se a ilustração de um exemplo do fluxograma de uma *wetland* em perfil e suas etapas de revitalização da água.

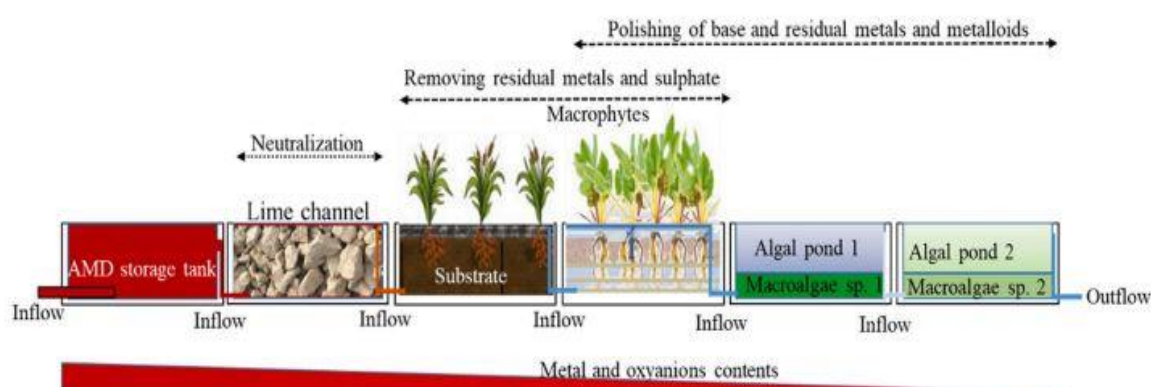


Figura 21: Estrutura em perfil de uma *wetland*.

Fonte: (MASINDI *et al.* 2022).

As *wetlands* anaeróbicas também neutralizam a acidez e reduzem os metais pesados presentes na água, porém, neste caso, na ausência de oxigênio. Especificamente, as reações anaeróbicas consomem H^+ , resultando assim na redução da acidez. As *wetlands* anaeróbicas são compostas majoritariamente de matéria orgânica, como o humo, e geralmente sustentadas por cascalho de calcário (SKOUSEN *et al.*, 2019). A água percola através da matéria orgânica até o leito de calcário, encontrando desse modo condições anaeróbicas. Este processo provoca a precipitação dos metais como sulfetos. Além disso, a decomposição da matéria orgânica, que é realizada por diversos microrganismos já contidos nela, também consome o oxigênio dissolvido na água levando à produção de alcalinidade e sulfeto de hidrogênio (H_2S) (RAMBABU *et al.*, 2020; SKOUSEN *et al.*, 2017).

Observa-se na Figura 22 *wetland* construída no complexo de mineração NEXA em Aripuanã-MT para tratar água bombeada das galerias e rampas da mina subterrânea.



Figura 22: Wetland construída para tratar a água proveniente do bombeamento da mina subterrânea da empresa NEXA situada no complexo da cidade de Aripuanã-MT.

Fonte: (AUTOR, 2023).

O tratamento híbrido através de *wetlands* consiste na integração de processos ativos com passivos para o tratamento da drenagem ácida. Normalmente, em sistemas híbridos, a neutralização com meio alcalino (processo ativo) é combinada com *wetlands* aeróbicas ou anaeróbicas (processo passivo) (MOODLEY *et al.*, 2018; NAIDU *et al.*, 2019). Portanto, nos processos híbridos a eficiência do tratamento na maioria dos casos é otimizada e efluentes de qualidade relativamente alta pode ser obtidos. No entanto, os principais desafios dos sistemas híbridos incluem requisitos de espaço, sensibilidade a certas espécies químicas e manutenção frequente, embora sejam mais eficazes apenas sob certas condições de fluxo e acidez (MASINDI E TEKERE, 2020). Deve-se notar que, embora esse processo pareça promissor, ele ainda necessita de mais pesquisas para avaliar o desempenho e impactos para aplicações em larga escala (RAMBABU *et al.*, 2020; SIMATE E NDLOVU, 2014).

Na Figura 23 está ilustrado um exemplo de *wetland* utilizada em tratamentos híbridos de drenagens de águas ácidas, onde um tanque de preparação da água

através de inserção de ativos é utilizado antes da água ser escoada para a *wetland* para passar pelo processo de tratamento passivo.

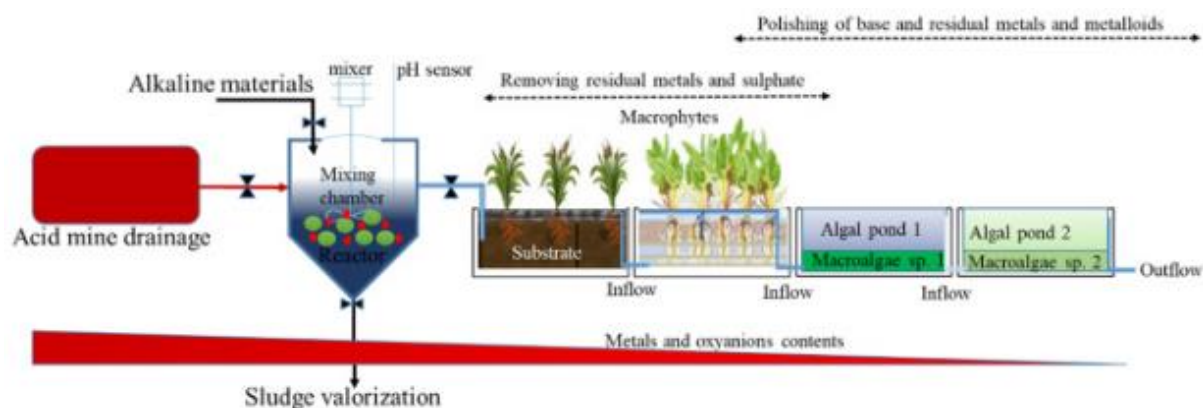


Figura 23: Exemplo de esquema em perfil de *wetland* em sistema híbrido de tratamento.

Fonte: (MASINDI *et al.* 2022).

Em geral, os sistemas ativos são considerados mais robustos e eficientes do que os passivos no tratamento de águas provenientes da drenagem ácida. No entanto, para alcançar altas eficiências de tratamento, eles exigem infraestrutura de largas escalas (como por exemplo, tanques, tubulações, bombas), serviços especializados de manutenção e acompanhamento, juntamente com insumos químicos e energéticos regulares (NAIDU *et al.*, 2019). Já os sistemas passivos também requerem infraestrutura, porém muito mais simples e econômicas do que em sistemas ativos, quando calculada por volume água tratada. Como resultado, os sistemas ativos são considerados menos ecologicamente corretos do que os passivos (SKOUSEN *et al.*, 2017). No entanto, mais pesquisas são necessárias para essa conclusão, já que os sistemas ativos alcançam maior eficiência de tratamento do que os sistemas passivos, o que retorna menos impactos para os ecossistemas receptores.

Por outro lado, os sistemas passivos não requerem insumos frequentes de manutenção e acompanhamento, energia e produtos químicos e, portanto, são considerados mais adequados para locais remotos e minas abandonadas (NAIDU *et al.*, 2019). Além disso, a sua manutenção é relativamente simples, ao mesmo tempo que não impõem grosseiramente a qualidade estética da área onde estão instaladas, uma vez que podem ter um aspecto natural e servir de suporte às plantas e à fauna local. Eles também são mais baratos do que os sistemas ativos da mesma capacidade

de tratamento (SKOUSEN *et al.*, 2019). No entanto, os sistemas passivos também estão associados a muitas desvantagens, uma vez que: i) eles podem não tratar o efluente de drenagem ácida com um alto padrão de qualidade, devido à sua natureza passiva, enquanto sua eficiência também pode ser afetada por fatores externos, como clima (por exemplo, baixa as temperaturas podem afetar o funcionamento de *wetlands*, assim como períodos de chuva) (SKOUSEN *et al.*, 2017); ii) não podem ser empregados em conceitos de economia circular, pois a recuperação de metais/minerais é complexa e difícil para tais sistemas; e iii) produção de lodo altamente mineralizado, de difícil tratamento e que praticamente inviabiliza o uso ou beneficiamento do lodo (MASINDI e TEKERE, 2020).

Desse modo, para superar as limitações dos sistemas ativos e passivos, sistemas de tratamento híbridos e integrados foram recentemente estudados e propostos. A combinação de sistemas aponta para um tratamento eficaz e sustentável da drenagem ácida, embora a recuperação de metais/minerais e revitalização da água também seja difícil de alcançar. No geral, os sistemas híbridos e integrados são versáteis e podem fornecer alta eficiência de remoção de contaminantes. Além de introduzir paradigmas de reutilização, reciclagem e recuperação de recursos no tratamento da drenagem ácida.

2.6.4 Recuperação e Reutilização de Áreas Mineradas

A mineração, tanto a céu aberto, quanto subterrânea, é uma atividade que impacta grandes áreas de mata nativa. O plano de fechamento de mina tem como objetivo minimizar estes impactos e retomar toda ou parcial a fauna e flora local pré-mineração. Escolha de técnicas eficientes de restauração é de suma importância, pois desempenha um papel essencial no retorno das funções ecológicas que antes estavam presentes, mesmo não reconstruindo o antigo ecossistema, mas trazendo condições para que a natureza se recomponha no local. Porém, não é uma tarefa fácil, pois o processo de restauração está sob a influência de variáveis do solo, topográficas e de vizinhança (paisagem), além de outros agentes diretos e indiretos. Nesta perspectiva, estudos fitossociológicos, ou seja, estudos relacionados ao reconhecimento e definição de comunidades de plantas regionais são necessários para gerar informações e podem ser usados para comparar diferentes cenários e

situações, identificando agentes que causam impactos negativos no processo de restauração e auxiliando a definição de medidas de controle de seus danos (FENGLER *et al.*, 2017).

A busca da estabilidade física e química das áreas impactadas pela mineração são os principais objetivos do plano de recuperação de áreas, ou seja, deve haver inexistência de processos erosivos intensos ou de movimentos de massa como escorregamentos de solo ou rocha e de se assegurar a qualidade das águas superficiais e subterrâneas – por exemplo, sem que haja formação de drenagem ácida. Porém, quando se trata de economia circular, trazer de volta a biodiversidade da região, se preocupando em realocar espécies da flora local e criar condições para que os animais utilizem aquelas áreas sem interferência externa são condições imprescindíveis da metodologia da circularidade.

Durante a operação da mina e da planta muitas ações de recuperação de cava começam a ser executadas com o objetivo de reduzir os custos em uma fase final de projeto e garantir a recuperação planejada e o adequado fechamento da mina. O planejamento do fechamento de mina e recuperação/revitalização de áreas degradadas existem a fim de garantir que o ambiente não esteja sujeito a deterioração física e química, o uso futuro da área será benéfico e sustentável a longo prazo retornando compromisso com a saúde e a segurança pública (SÁNCHEZ, 2010).

Uma lei federal estadunidense que rege as normas técnicas de mineração a céu aberto – *Surface Mining Control and Reclamation Act* – criada no ano de 1977, estabelece uma série de circunstâncias a serem observadas para a reabilitação de áreas degradadas em minas. Por exemplo, é obrigatório o enchimento de estéreis ou outras rochas estáveis em áreas onde a lavra foi finalizada e o corpo de minério exaurido, assim como a suavização do terreno, reposição da camada de solo fértil superficial e implantação de sistema de drenagem. A partir do cumprimento parcial dessas normas, a empresa tem a devolução de subsídios, que é feita também por etapas, até que todo o plano de recuperação seja atingido. Após a implantação do sistema de drenagem, preenchimento da cava e reafeiçoamento topográfico e reposição do solo ocorre a devolução de até 60% do valor total. A segunda parcela está condicionada ao funcionamento dos sistemas de drenagem e erosão do solo,

além do plantio inicial de espécies de plantas locais. Por último, a partir do cumprimento de todas exigências legais, o restante do subsídio pré estabelecido é pago (ZALUSKI, CARMEN E GREEN, 1991).

Além dos processos de recuperação da biodiversidade de áreas degradadas na mineração a fim de se revitalizar a fauna e flora da região e manter o local em comunhão com a natureza, empresas e grandes empresários se arriscam em investir no turismo e em empreendimentos milionários em áreas que antes foram mineradas. Esse meio de reutilização de áreas onde ocorreram extração de minério também estão em concordância com os preceitos defendidos pela economia circular e podem fazer parte de um plano de fechamento de mina.

A título de exemplo, o Projeto Éden foi criado em 1994 em uma antiga exploração de caulim e hoje leva o título de maior estufa do mundo, com grande biodiversidade e composto de diversas espécies de plantas. O encerramento das atividades mineiras redirecionou o local - que tinha como área 50 hectares a 60 metros de profundidade, sendo necessário grandes obras de terraplanagem e estruturação do terreno para receber tal projeto - para o ecoturismo. De acordo com Muller (2011), o solo era infértil para o plantio e foram necessárias 85.000 toneladas de solo fértil para que o projeto fosse concluído.

Observa-se na Figura 24 o projeto Jardim do Éden desenvolvido por Tim Smith e projetado pelo arquiteto Nicholas Grimshaw.



Figura 24: Projeto Jardim do Éden, em Cornwall na Inglaterra.

Fonte: (WIKIARQUITECTURA, 2020)

Outro excelente exemplo é o Estádio Municipal de Braga, construído em local privilegiado dentro da cidade de Braga, em Portugal. Na área era localizada a cava de uma antiga pedreira de granito com atividades encerradas e foi construído devido a sua localização e excelente logística com o restante da cidade, além da topografia adequada para este tipo de construção. Conhecido como “A Pedreira”, o estádio que teve projeto arquitetado por Eduardo Souto de Moura recebeu diversos prêmios, dentre eles, o FAD de Arquitetura 2005 e o Prêmio Secil de Arquitetura 2004 (MULLER, 2011).

Observa-se na Figura 25 o estádio municipal de Braga, mais conhecido como “A Pedreira”.



Figura 25: Estádio Municipal de Braga, “A pedreira”, localizado na cidade de Braga em Portugal.
Fonte: (WEBRAGA, 2023).

Na cidade de Dalhalla na Suécia, a cava da pedreira de calcário, desativada em 1991, deu lugar para uma das óperas mais famosas e bonitas do mundo, a Ópera de Dalhalla. A partir da topografia da cava deixada pela mineração, com 400 m de comprimento por 175 m de largura e 60 m de profundidade, proporcionou uma perfeita

acústica do local. Além de revitalizar e reutilizar uma área degradada, o empreendimento revigorou a indústria turística local, atraindo mais de 100.000 visitantes por ano (RAGGI *et al.*, 2017).

Apresenta-se na Figura 26 imagens da Ópera de Dalhalla, localizado na Suécia.

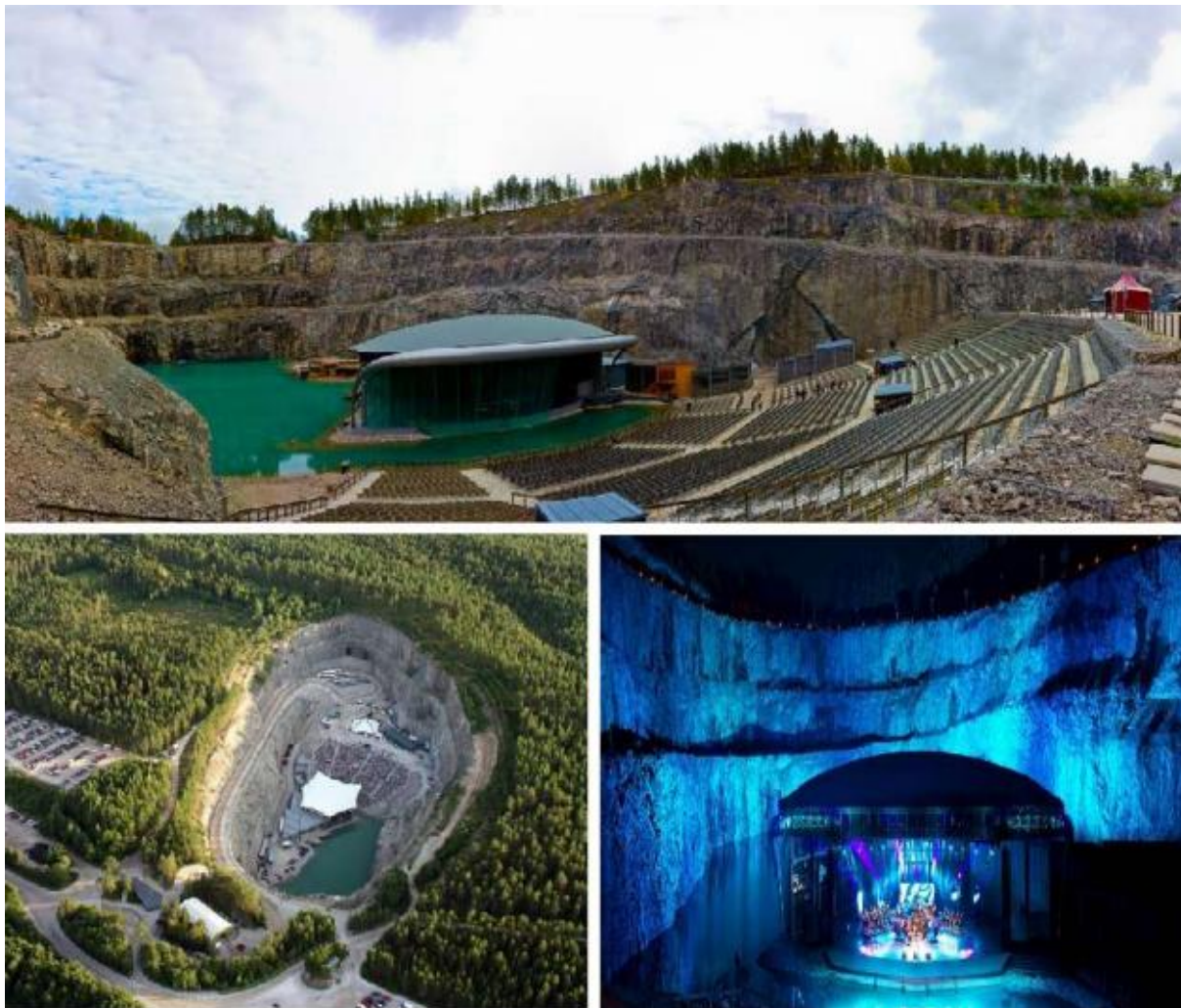


Figura 26: Ópera de Dalhalla, na suécia.

Fonte: (DALHALLA, 2023)

3 ANÁLISE SWOT DE UM PLANO DE FECHAMENTO DE MINA QUE OBEDECE AOS PRECEITOS DA ECONOMIA CIRCULAR

A análise SWOT (do inglês *Strength*, força; *Weakness*, fraqueza; *Opportunity*, oportunidade; e *Threat*, ameaça) permite, segundo Chiavenato e Sapiro (2003), cruzar oportunidades e ameaças externas com os pontos fortes e fracos ao negócio. Após a construção da matriz SWOT, faz-se a análise estratégica para gestão do projeto e verificação da posição do programa no ambiente de interesse. Pela combinação de fatores do ambiente interno – forças e fraquezas – e do ambiente externo – oportunidades e ameaças – é possível analisar o cenário em que o projeto se posiciona e também modelar ações que visam maximizar as oportunidades e diminuir as ameaças.

A análise SWOT é relevante em processos de planejamento estratégico flexível por se tratar de um método que permite que se ressaltem os pontos fortes e minimizem-se os pontos fracos internos. Ao mesmo passo que prevê ameaças externas e permite que se aproveitem as oportunidades do mercado, que podem se apresentar como mudanças repentinas dos atores externos e do mercado que necessitam de ações rápidas da empresa responsável pelo projeto em questão (VANTI *et al.*, 2007).

Se tratando sustentabilidade ligado aos processos de extração e de encerramento de atividades mineiras, de acordo com Tayebi-Khorami *et al.* (2019), existem 5 áreas chave que estão alinhadas com os aspectos mais importantes em um plano de fechamento de mina para que aconteça de fato melhorias nas soluções ambientais e nas propostas da economia circular. Elas dizem a respeito aos aspectos sociais, geoambientais, especificações geometalúrgicas, direcionamento econômico e implicações legais. A interação dinâmica entre estas áreas e a concretização de propostas trazidas por elas podem mudar o *mind-set* para a conscientização do tratamento dos resíduos gerados pela mineração. A imagem abaixo ilustra a pergunta chave para se gerar valor econômico dentro dos processos de economia circular minimizando os impactos ambientais, sociais e de passivos ambientais trazidos pelos resíduos deixados pela mineração. A resposta para a pergunta deve englobar as cinco propostas trazidas pelo autor e a partir dela obtêm-se as soluções para os impactos gerados nas atividades mineiras, aproximando a economia circular e o

desenvolvimento sustentável dos núcleos das maiores empresas de mineração do mundo. Observa-se na Figura 27 a pergunta chave e as 5 áreas que se deve atentar para o desenvolvimento do plano de fechamento de mina dentro dos preceitos da economia circular.

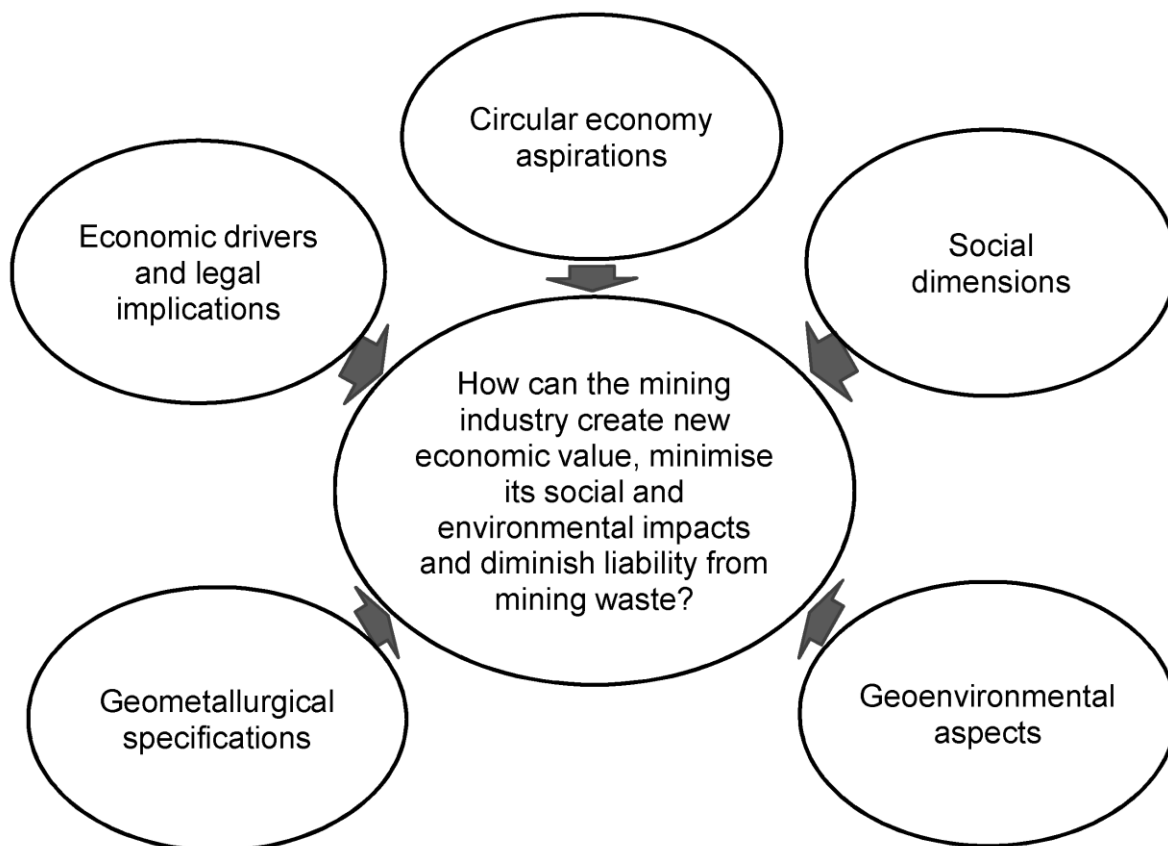


Figura 27: Perguntas chave para o desenvolvimento do plano de fechamento de mina dentro dos preceitos da economia circular.

Fonte: (TAYEBI-KHORAMI *et al.*, 2019).

Se tratando dos aspectos sociais, nem sempre as empresas identificam toda matriz do custo do conflito com as comunidades locais. O conflito entre uma empresa extrativa e a comunidade é muitas vezes desencadeado pelos impactos ambientais das operações da empresa, portanto, atua como um meio pelo qual os riscos ambientais e sociais são traduzidos em custos reais de negócios. Sendo assim, as companhias costumam analisar em qual das áreas compensa gastar mais energia, tempo e capital para se corrigir os problemas, equilibrando-se de um lado da balança os custos necessários para se produzir assumindo o risco de não pensar no meio ambiente ou de praticar ações sustentáveis que retornam para a comunidade local desenvolvimento em comunhão com sustentabilidade, além de oportunidades de

emprego (DAVIS *et al.*, 2014). Na indústria de mineração, o conceito de “licença social para operar” é visto e aplicado como uma forma de reduzir a oposição da comunidade à indústria, a partir de oportunidades para colaboração entre empresa e comunidade e fomentação de ações que satisfaças o desejo da comunidade por desenvolvimento e o desejo da empresa por um negócio rentável e sustentável.

A análise *SWOT* realizada neste trabalho avaliou as propostas que a economia circular traz para os projetos de fechamento de mina, levantando os pontos fortes e pontos fracos das mesmas, dentro das 5 áreas apresentadas Figura 27: i) especificações geometalúrgicas; ii) fatores econômicos e especificações legais; iii) aspirações da economia circular; iv) dimensões sociais e v) aspectos geoambientais. Foram apontadas as qualidades e falhas presentes nos projetos já existentes, assim como as oportunidades de melhoria, visando pontuar o que pode aumentar o potencial de inserção dessas propostas no ramo da mineração, como também as fraquezas que podem comprometer as oportunidades de melhoria na transição para os modelos de economia circular.

Observa-se na Tabela 3 os resultados obtidos a partir da análise *SWOT* realizada, tendo por base a literatura estudada e apresentada de forma geral no capítulo 2 deste trabalho, especificamente mais voltada aos exemplos demonstrados no subcapítulo 2.6 deste trabalho.

Tabela 3: Análise SWOT das propostas da economia circular contidas nos projetos de mineração e fechamento de mina estudadas e apresentadas por este trabalho, avaliando os aspectos ambientais, econômicos e sociais.

<p>Pontos Fortes</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Preservação e aprimoração do capital natural, promovendo a restauração e regeneração dos recursos naturais a partir da redução dos impactos socioambientais negativos advindos do fechamento de mina; ✓ Impulsionar o índice de desenvolvimento humano e socioeconômico da comunidade local; ✓ Maximização do rendimento de matérias primas, levando à redução dos desperdícios e à circularidade dos recursos; ✓ Admiração da sociedade e do mercado consumidor por compactuar de valores sustentáveis; ✓ Estímulo da efetividade do sistema, gerando impactos positivos para todas as partes interessadas. 	<p>Pontos Fracos</p> <ul style="list-style-type: none"> × Pouco conhecimento prático acerca de projetos sustentáveis e de mão de obra qualificada; × Altos investimentos financeiros; × Riscos de má execução de projetos; × Pouca comunicação e contribuição de ideias entre empresas.
<p>Oportunidades</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Existência de metas e planos de ações sustentáveis definidos por governos e organizações respeitadas mundialmente; ✓ Aquisição de incentivos fiscais e de desenvolvimento sustentável; ✓ Se destacar entre empresas do ramo por protagonizar a circularidade, visto a escassez dessas práticas no mercado; ✓ Impulsionar empresas sustentáveis em locais remotos. 	<p>Fraquezas</p> <ul style="list-style-type: none"> × Presença de materiais geradores de drenagem ácida; × Grande presença de reagentes ativos ao meio ambiente provenientes da planta de beneficiamento; × Complicações em diagnósticos ambientais; × Poucos incentivos fiscais governamentais; × Baixa valorização de produtos recicláveis/reutilizáveis; × Investimentos adicionais; × Alto custo de mão de obra especializada; × Concorrência de mercado e de preço desestimula o compartilhamento de técnicas e ideias; × Grande distância entre os depósitos minerais e regiões desenvolvidas. × Requisitos legais futuros rigorosos.

Para que uma empresa se sustente, é necessário que ela cumpra com seus encargos financeiros primeiramente. A lucratividade e o crescimento do negócio advêm da maior eficiência de produção, redução dos custos operacionais, mitigação dos riscos e novas oportunidades de receita (WHALEN, WHALEN, 2020; ACHILLAS, BOCHTIS, 2020). Além de tudo, modelos circulares de produção podem mitigar substancialmente os riscos de abastecimento de matéria-prima crítica, trazendo segurança para as organizações, as quais passam a depender menos de entradas externas de recursos (ESPINOZA *et al.*, 2020; ACHILLAS, BOCHTIS, 2020).

Uma mineradora que tem compromisso com o meio ambiente e programas sustentáveis desde o início da pesquisa mineral até o encerramento de suas atividades, sem dúvida agrega inúmeros valores ao seu negócio. Além de contribuir com o meio em que opera. Neste contexto, modelos de negócios circulares possibilitam maneiras economicamente viáveis de reutilizar continuamente produtos e materiais, contribuindo com a eficiência dos recursos, fomentando um desenvolvimento econômico mais sustentável e ficando à frente de muitos concorrentes (GALVÃO *et al.*, 2020; BOCKEN *et al.*, 2016).

Desse modo, a adoção de práticas de gestão ambiental pode fornecer uma vantagem competitiva às empresas ambientalmente corretas, abrindo novos mercados, novos consumidores, oportunidade de financiamento, além, é claro, de vantagens de exportação e admiração pública.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A mineração tem potencial para ajudar o mundo a alcançar todos os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS's) da Agenda 2030 e pode desempenhar um papel de liderança na implementação de ações nesse sentido. Assim, observa que pelo estudo de casos apresentado e a partir dos resultados encontrados na análise *SWOT*, a implementação da economia circular nos projetos de fechamento de mina na e mineração em geral pode refletir redução de custos operacionais, quando o projeto é bem planejado e executado. O aumento da efetividade do sistema produtivo, seguido pelo desenvolvimento inovador através de tecnologias sustentáveis, geram impactos positivos, ampliando os ganhos do empreendimento, bem como a redução da quantidade de resíduos gerador pelos processos.

Pode-se afirmar que a reutilização de resíduos e rejeitos na indústria de mineração está em crescente, porém, para que a transição da economia linear para a economia circular aconteça de forma integral, é necessário o preenchimento de algumas lacunas que ainda existem, como capacitação de mão de obra especializada, fomentação de incentivos fiscais, desenvolvimento de técnicas mais baratas de reutilização de resíduos, assim como aumentar a valorização de materiais reciclados.

Para que o preenchimento dessas lacunas aconteça, investimentos em inovação contínua e capacitação pessoal são requisitos fundamentais. O desenvolvimento nessas áreas orienta a mineração a elevar sua produtividade e desenvolvimento de novos processos/produtos, promovendo a competitividade entre as empresas, além de impulsionar a redução do impacto ambiental da mineração por meio de novas técnicas de produção e disposição de resíduos.

Ações desse modelo cativam as organizações ambientais e sociedade, estimulando a criação de novos incentivos fiscais e subsídios governamentais que proporcionarão bases de investimento e recursos para o desenvolvimento de práticas que viabilizarão gradualmente a circularidade cada vez mais presente nos processos de mineração.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CARVALHO, M. D. **Fechamento de mina: aspectos legais, sociais e econômicos**. Marcos Dantas Carvalho; orientador, Diego Raniere Nunes Lima - 2011.

CEC-Circular Economy Club. **Circular Economy knowledge club**. Disponível em: <https://www.circulareconomyclub.com/circular-economy-knowledge-hub/>>. Acesso em 18 ag. 2017.

CRISTAL. **Aproveitamento de rejeitos na mineração**. Disponível em: <<https://cristaljr.com/rejeitos-da-mineração>>. Acesso em: 16 de março de 2023.

CSIRO – Commonwealth Scientific and Industrial Research. **More from less: getting the most from Australian ores**. In Resourceful, issue 7, 2015, 21 p

DALHALLA. **ABOUT DALHALLA**, 2023. Disponível em: <<https://www.dalhalla.se/en/om-dalhalla/>>. Acesso em: 24 de março de 2023.

DAMASCENO, G.C. **Especialização em Mineração e Meio Ambiente: Geologia, Mineração e Meio Ambiente**. Cruz das Alma/BA, UFRB, 2017.

Davis, R.; Franks, D.M. **Costs of company-community conflict in the extractive sector**. Corp. Soc. Responsib. Initiat. Rep. 2014, 66, 1–56.

DERMIKAN C. P.; SMITH N. M.; DUZGUN S. 2022. **A Quantitative Sustainability Assessment for Mine Closure and Repurposing Alternatives in Colorado, USA**. Mining Engineering Department, Colorado School of Mines, Golden, USA.

ÉLEÓNORE L., GLEN C., ARTEM G. 2017. **The Role of the Mining Industry**.

EMF. **A new dynamic: Effective business in a circular economy**. Ellen MacArthur Foundation Publishing, 2013.

FEAM. Fundação Estadual do Meio Ambiente. Belo Horizonte: 2013. **Banco de Boas Práticas Ambientais**. Disponível em: <<http://www.feam.br/component/content/article/1159-bancos-de-praticas-ambienatis-na-industria>>. Acesso em: 12 de fev. 2023.

FLORES, J.C.C., LIMA, H.M. **Fechamento de Mina: Aspectos Técnicos, Jurídicos e Socioambientais**. Ouro Preto: UFOP, 2012

FRANKS, D.M.; Boger, D.V.; Côte, C.M.; Mulligan, D.R. **Sustainable development principles for the disposal of mining and mineral processing wastes**. Resour. Policy 2011, 36, 114–122.

GALVÃO, Graziela Darla Araujo; NADAE, Jeniffer de; CLEMENTE, Diego Honorato; CHINEN, Guilherme; CARVALHO, Marly Monteiro de. **Circular Economy: overview of barriers**. Procedia Cirp, v. 73, p. 79-85, 2020. Elsevier BV.

GEISSDOERFER, Martin, Paulo Savaget, Nancy M.P. Bocken, and Erik Jan Hultink. 2017. **“The Circular Economy – A New Sustainability Paradigm?”** *Journal of Cleaner Production*. 143: 757–768. doi: 10.1016/j.jclepro.2016.12.048.

GEOESTAVEL. **Projetos de fechamento de mina**, 2023. Disponível em: <<https://geoestavel.com.br/servico/projetos-de-fechamento-de-mina/>>. Acesso em: 27 de fevereiro de 2023.

GITELMAN, L. *et al.* **Rational behavior of an enterprise in the energy market in a circular economy.** Resources, [s. l.], v. 8, n. 2, 2019.

GOLEV, A., SCHMEDA-LOPEZ, D., SMART, S., CORDER, G., MCFARLAND, E. **Where next on e-waste in Australia?** In Waste management, vol. 58, 2016, p. 348-358.

HASAN, A, Suazo, G & Fourie, AB 2013. **Full scale experiments on the effectiveness of a drainage system for cemented paste backfill.**

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO (IBRAM). **Informações sobre a economia mineral brasileira 2020 - Ano base 2019.** 1.ed. Brasília: IBRAM, 2020. 80p. (ISBN: 978-65- 990386-3-1).

JACKS, D.S. **From Boom to Bust: A Typology of Real Commodity Prices in the Long Run.** National Bureau of Economic Research: Cambridge, MA, USA, 2013.

JESUS, A. de *et al.* **Eco-innovation pathways to a circular economy: envisioning priorities through a Delphi approach.** Journal of Cleaner Production, [s. l.], v. 228, p. 1494–1513, Aug. 2019.

KALMYKOVA, Y. **Circular economy – from review of theories and practices to development of implementation tools.** Resour. Conserv. Recycl. 135, 190–201, 2018.

KEFENI K.K., Mamba B.B. 2020. **Evaluation of charcoal ash nanoparticles pollutant removal capacity from acid mine drainage rich in iron and sulfate.** J. Hazard. Mater., 333 (2017), pp. 308-318.

KEFENI K.K., Mamba B.B., Msagati T.A.M. 2017. **Magnetite and cobalt ferrite nanoparticles used as seeds for acid mine drainage treatment.** J. Clean. Prod., 151 (2017), pp. 475-493.

KIISKILA J.D., D. Sarkar, S. Panja, S.V. Sahi, R. Datta. 2020. **Remediation of acid mine drainage-impacted water by vetiver grass (Chrysopogon zizanioides): a multiscale long-term study.** Ecol. Eng., 129 (2019), pp. 97-108.

KORHONEN, J., *et al.* **Circular economy: the concept and its limitations.** Ecological Economics, V. 143, N. 1, p. 37-46, 2018.

LÈBRE, Éléonore, CORDER, Glen, GOLEV, Artem. **The role of the mining industry in a Circular Economy.** Journal of Industrial Ecology, vol. 0. Yale University, 2017. Disponível em: < www.wileyonlinelibrary.com/journal/jie >. Acesso em 09 fev. 2023.

LEWIS, B. **Atlas: mapeando os objetivos de desenvolvimento sustentável na mineração.** 1 ed. Genebra: Editado por Davidson, G. *et al.*, ago. 2017. 106 p. Disponível em: <www.br.undp.org/content/dam/brazil/docs/publicacoes/atlas-mineracao-ods.pdf>. Acesso em: 16 fev. 2022.

MADZIVIRE G., W.M. Gitari, V.R.K. Vadapalli, T.V. Ojumu, L.F. Petrik. 2011. **Fate of sulphate removed during the treatment of circumneutral mine water and acid mine drainage with coal fly ash: Modelling and experimental approach.** Miner. Eng., 23 (2010), pp. 252-257.

MASINDI V., S. Foteinis, P. Renforth d, J. Ndiritu a, J.P. Maree, M. Tekere, E. Chatzisyneon. 2022. **Challenges and avenues for acid mine drainage treatment, beneficiation, and valorisation in circular economy: A review.** Ecological

Engineering. Journal homepage. Disponível em: <www.elsevier.com/locate/ecoleng>. Acesso em: 23 de março de 2023.

MOODLEY I., C.M. Sheridan, U. Kappelmeyer, A. Akcil. 2018. **Environmentally sustainable acid mine drainage remediation: Research developments with a focus on waste/by-products**. Miner. Eng., 126 (2018), pp. 207-220.

NAIDU G., S. Ryu, R. Thiruvengkatachari, Y. Choi, S. Jeong, S. Vigneswaran. 2019. **A critical review on remediation, reuse, and resource recovery from acid mine drainage**. Environ. Pollut., 247 (2019), pp. 1110-1124.

NERI, A.C. 2013. **Tratamento de incertezas no planejamento de fechamento de mina. Tese de doutoramento**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

NEVES, A. C., *et al.* **Neglect of ecosystems services by mining, and the worst environmental disaster in Brazil**. Ecology & Conservation, p. 24–27, jun. 2016.

NLEYA Y., G.S. Simate, S. Ndlovu. 2016. **Sustainability assessment of the recovery and utilisation of acid from acid mine drainage**. J. Clean. Prod., 113 (2016), pp. 17-27.

OLIVEIRA Júnior, José Baptista de. **Desativação de mina: conceitos, planejamento e custos**. José Baptista de Oliveira Júnior. Salvador: EDUFBA, 2006. Disponível em: <<https://ibram.org.br/wp-content/uploads/2021/02/00004091.pdf>>. Acesso em: 28 jan. 2023.

PACTWA K. *et al.* **Second Life of Post-Mining Infrastructure in Light of the Circular Economy and Sustainable Development - Recent Advances and Perspectives**. Energies, 14, 7551, 2021.

PARK I., C.B. Tabelin, S. Jeon, X. Li, K. Seno, M. Ito, *et al.* 2019. **A review of recent strategies for acid mine drainage prevention and mine tailings recycling**. Chemosphere, 219 (2019), pp. 588-606.

PAULIUK, S. **Critical appraisal of the circular economy standard BS 8001:2017 and a dashboard of quantitative system indicators for its implementation in organizations**. Resour. Conserv. Recycl. 129, 81–92, 2018.

JEWELL R, AB Fourie, J Caldwell & J Pimenta (eds). **Paste 2013: Proceedings of the 16th International Seminar on Paste and Thickened Tailings**. Australian Centre for Geomechanics, Perth.

RAMBABU K., F. Banat, Q.M. Pham, S.-H. Ho, N.-Q. Ren, P.L. 2020. **Biological remediation of acid mine drainage: review of past trends and current outlook**. Environ. Sci. Ecotechnol. (2020), p. 1024.

REUTER, M.A.; van SCHAİK, A.; HEISKANEN, K.; MESKERS, C.; Hagelüken, C. **Metal Recycling: Opportunities, Limits, Infrastructure**. UNEP: New York, NY, USA, 2013.

RIBEIRO-DUTHIE, A. C. *et al.* **Sustainable development opportunities within corporate social responsibility practices from LSM to ASM in the gold mining industry**. Mineral Economics, vol. 30, Issue 2, May 2017, p. 141-152.

RIBEIRO-DUTHIE, A. C., LINS, F. A. **A Economia Circular e sua relação com a Mineração**. Brasil Mineral, Set, 2017 (prelo).

SÁNCHEZ, L. E. **Avaliação de impacto ambiental**: Conceitos e métodos. 2 ed. Atualizada e ampliada. São Paulo: Oficina de textos, 2013. Disponível em: <<http://ofitexto.arquivos.s3.amazonaws.com/Avaliacao-de-impacto-ambiental-2ed-DEG.pdf>>. Acesso em: 29 de janeiro de 2023.

SÁNCHEZ, L.E. **Planejamento e gestão do processo de recuperação de áreas degradadas**. In: Filippini-Alba, J.M. (org.), *Recuperação de Áreas Mineradas: a Visão dos Especialistas Brasileiros*. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2ª. ed., p. 103-121, 2010. [ISBN 978-85-7383-496-3].

SEHNEM, S. et.al. **Circular economy: benefits, impacts and overlapping**. *Supply Chain Management: An International Journal*, V. 24, N. 6, p. 784–804, 2019.

SEVERO, C. B. 2019. **Aproveitamento de rejeito de minério de ferro para fabricação de tijolos cerâmicos**. Centro Federal De Educação Tecnológica De Minas Gerais - CEFET - Campus Araxá.

SINDICATO DAS INDUSTRIAS MINERAIS DO ESTADO DO PARÁ – SIMINERAL. **HISTÓRIA DA MINERAÇÃO**. Disponível em: <https://simineral.org.br/mineracao/historia> . Visto em 03/04/2022.

SKOUSEN J.G., P.F. Ziemkiewicz, L.M. McDonald. 2019. **Acid mine drainage formation, control and treatment: approaches and strategies**. *The Extract. Industr. Soc.*, 6 (2019), pp. 241-249.

STAHEL, Walter. **Economy without waste: what are the challenges and opportunities of moving towards a circular economy?** *Sustainable Goals*, March, 2017.

TAILLING. **Backfill of Tailings to Underground Workings**. *Tailings.info*, 2022. Disponível em: <<https://www.tailings.info/storage/backfill.htm>>. Acesso em: 13 de março de 2023.

TAN, E. C. D. **Sustainable biomass conversion process assessment,” in Process Intensification and Integration for Sustainable Design**. Ed. D. C. Y. Foo and M. M. El-Halwagi (Weinheim: John Wiley and Sons, Ltd), 301–18, 2021.

TAYEBI-KHORAMI M.; Edraki M.; Corder G.; Golev. A. 2019. **Re-Thinking Mining Waste through an Integrative Approach Led by Circular Economy Aspirations**. *Minerals* 2019, 9, 286. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/min9050286>>. Acesso em: 14/02/2023.

TEIXEIRA D. C. 2018. **Benefícios com a utilização de rejeitos em enchimento de minas subterrâneas: uma visão geotécnica e sustentável**. Prof. Dr. José Margarida da Silva. Monografia. Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia de Minas.

TRIPATHI S., V.K. Singh, P. Srivastava, R. Singh, R.S. Devi, A. Kumar, *et al.* 2020. **Chapter 4 - phytoremediation of organic pollutants: current status and future directions**. P. Singh, A. Kumar, A. Borthakur (Eds.), *Abatement of Environmental Pollutants*, Elsevier (2020), pp. 81-105.

UNITED NATIONS. **Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development**. Disponível em: <<https://sdgs.un.org/2030agenda>>. Acesso em: 16 fev. 2022.

UPCYCLE. **Upcycle: o que é, para que serve e exemplos, 2022.** Disponível em: <<https://www.ecycle.com.br/upcycle/>>. Acesso em: 12 de fevereiro de 2023.

VILLAIN L., L. Alakangas, B. Öhlander. 2013. **The effects of backfilling and sealing the waste rock on water quality at the Kimheden open-pit mine, northern Sweden.** J. Geochem. Explor., 134 (2013), pp. 99-110.

WEST, J.; SCHANDL, H.; HEYENGA, S.; Chen, S. **Resource Efficiency: Economics and Outlook for China.** United Nations Environment Programme (UNEP): Bangkok, Thailand, 2013.

WIKIARQUITECTURA. **Projeto Eden, 2023.** Disponível em: <<https://pt.wikiarquitectura.com/constru%C3%A7%C3%A3o/projeto-eden/>>. Acesso em: 04 de março de 2023.