



Ministério da Educação
Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas
Departamento de Engenharia de Minas



SUSTENTABILIDADE NA DISPOSIÇÃO DE REJEITOS DA INDÚSTRIA MINERAL

THULIO DE ASSIS SANTOS E SANTIAGO

Ouro Preto MG
2022

THULIO DE ASSIS SANTOS E SANTIAGO

SUSTENTABILIDADE NA DISPOSIÇÃO DE REJEITOS DA INDÚSTRIA MINERAL

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau em Bacharel em Engenharia de Minas.

Orientador: Prof. Dr. Hernani Mota de Lima

Ouro Preto - MG
23 de junho de 2022

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

S235s Santiago, Thulio de Assis Santos e.
Sustentabilidade na disposição de rejeitos da indústria mineral.
[manuscrito] / Thulio de Assis Santos e Santiago. - 2022.
31 f.

Orientador: Prof. Dr. Hernani Mota de Lima.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto.
Escola de Minas. Graduação em Engenharia de Minas .

1. Engenharia de minas. 2. Barragens de rejeitos. 3. Sustentabilidade
- Minas e mineração. 4. Economia circular. I. Lima, Hernani Mota de. II.
Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 622.341:502.14

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



FOLHA DE APROVAÇÃO

Thulio de Assis Santos e Santiago

Sustentabilidade na disposição de rejeitos da indústria mineral

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 23 de junho de 2022

Membros da banca

Dr. - Hernani Mota de Lima - Orientador(a) (UFOP)
Dr - José Fernando Miranda - (UFOP)
Engenheiro - Lucas Cordeiro Diniz - (Vale)

Hernani Mota de Lima, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 01/07/2022



Documento assinado eletronicamente por **Hernani Mota de Lima, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 08/08/2022, às 20:43, 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 **0376407** e o código CRC **0A943A14**.

Dedico este trabalho a todas às pessoas que contribuíram com a minha formação.

Agradecimentos

Nesse capítulo final da minha graduação, encerro com gratidão aos aprendizados adquiridos, juntamente de todo o crescimento pessoal, profissional e acadêmico.

Agradeço primeiramente aos meus pais Francisco e Leiva e o meu irmão Victor, por todo suporte, amor e cuidado ao longo de toda essa trajetória. A minha fiel companheira Aline, pelo incondicional incentivo, apoio, cuidado e torcida ao longo desses anos. Aos meus familiares e amigos, em especial ao Filipe por todo auxílio, apoio e diretrizes.

Agradeço, em especial ao meu orientador, professor Hernani Mota por toda confiança, ensinamentos e orientação ao longo dessa caminhada.

Agradeço, ainda, à CEM Geologia e Planejamento, em especial ao Lucas Cordeiro, por toda compreensão e apoio nos momentos que mais precisei.

Por fim, agradeço à Gloriosa Escola de Minas, por toda essa jornada de imenso amadurecimento e aprendizado.

Resumo

O processo da produção de minério (e.g., ferro, ouro, etc.) gera descartes compostos por materiais que não possuem valor econômico oportuno. Por não serem reaproveitados, estes volumes são normalmente acumulados de forma inerte em superfície nas barragens de rejeitos. Este método de acondicionamento é prático e financeiramente viável, gerando porém impactos ambientais devido a mudanças essenciais de regiões naturais e, em casos extremos, como causadores de desastres ecológicos e sociais. Neste contexto, este trabalho apresenta metodologias que buscam a diminuição da quantidade de volume descartado e o reaproveitamento econômico do montante restante. Tal estratégia diminui a quantidade de material acumulado e conseqüentemente seu potencial de impacto ambiental negativo. O texto inicia contextualizando o processo industrial mineral e como os métodos correntes acarretam em acúmulo de rejeitos. Sobre os métodos comumente utilizados, descrevem-se as formas construtivas de estruturas de contenção à montante, à jusante e com linha de centro. São apresentados casos onde o rompimento de barragens causaram profundas perdas ambientais e sociais. As possíveis metodologias que buscam reduzir a geração de rejeitos são apresentadas, além de realimentar o descarte mineral na economia como insumo para outro empreendimento. Ao fim, apresenta-se uma visão sustentável e a redução do impacto ambiental viabilizado pela reinserção do material à cadeia produtiva econômica.

Palavras-chave: Barragem de rejeito, Sustentabilidade, Eficiência da Técnica, Economia Circular na mineração .

Abstract

The ore production process (e.g., iron, gold, etc.) generates waste composed of materials that do not have momentary economic value. As they are not reused, mining companies commonly accumulate such volumes inertly on the surface, in the common tailings dams. This method of packaging is practical and financially viable; in turn, it generates environmental impacts due to essential changes in natural regions and, in extreme cases, as a cause of ecological and social disasters. In this context, this work presents methodologies that seek to reduce the amount of discarded volume, and the economic reuse of the remaining amount. Such a strategy reduces the amount of accumulated material and, consequently, its impacts potential. The text first contextualise the mineral industrial process and how current methods lead to the accumulation of waste. About the commonly used methods, we introduce the constructive forms of containment structures: upstream, downstream and with center-line. Events where the rupture of dams caused deep environmental and social losses are presented. Then, we show possible methodologies that reduce the generation of waste, in addition to feeding-back the mineral rubbish back into the economy as an input for another venture. In the end, we argue about the sustainable vision and the reduction of the environmental impact made possible by the reinsertion of the material to the production chain.

Keywords: Tailing dam, Sustainability, Technique efficiency, Reusal.

Lista de figuras

Figura 1 – Fases da mineração.	3
Figura 2 – Ciclo de vida de uma mina.	3
Figura 3 – Quantidade de rejeitos gerado pela indústria mineral por tipo de minério. . .	4
Figura 4 – Fluxograma básico do processamento mineral em indústria de mineração. .	7
Figura 5 – Produção bruta, beneficiada e comercializada -Principais substâncias Metálicas.	8
Figura 6 – Quantidade média de resíduos gerados em processo de beneficiamento por tipo de mineral.	8
Figura 7 – Exemplo genérico de estrutura de contenção de rejeitos.	9
Figura 8 – Método construtivo de barragem à montante.	10
Figura 9 – Método construtivo de barragem à justante.	11
Figura 10 – Método construtivo de barragem com linha de centro.	11
Figura 11 – Comparação entre economias linear e circular.	15

Lista de abreviaturas e siglas

ANM	Agência Nacional de Mineração
CETEM	Centro de Tecnologia Mineral
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
DEMIN	Departamento de Engenharia de Minas
EIA	Estudo de Impacto Ambiental
IBRAM	Instituto Brasileiro de Mineração
NUGEO	Núcleo de Geotecnia
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
REDEMAT	Rede Temática de Materiais
RIMA	Relatório de Impacto Ambiental
UFOP	Universidade Federal de Ouro Preto

Sumário

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Contextualização	2
1.2	Objetivo	5
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
2.1	Estruturas de contenção	6
2.2	Método de Construção de Barragem de Rejeitos	10
2.3	Acontecimentos recentes envolvendo rompimento de barragem de rejeitos	12
2.4	Metodologias sustentáveis aplicadas ao rejeito de mineração	12
3	A UTILIZAÇÃO DE REJEITOS COMO MATÉRIA PRIMA PARA INFRAESTRUTURA	14
3.1	Uma visão sustentável	14
3.2	Impactos ambientais da disposição de rejeitos	16
4	CONCLUSÃO	18
4.1	Trabalhos futuros	18
	Referências	19

1 Introdução

É de conhecimento que a mineração se refere às atividades e processos relativos à indústria, cujo objetivo é a extração de substâncias minerais mediante depósitos da mesma. Segundo [LUZ; SAMPAIO; FRANÇA \(2010\)](#), o minério é considerado o mineral ou a associação de minerais que podem ser aproveitados economicamente. Já o mineral é definido como um sólido natural, inorgânico, homogêneo, de composição química estabelecida, com estrutura cristalina ([BRANCO, 2016](#)).

Para os autores [HARTMAN; MUTMANSKY \(2002\)](#), a forma mais simples da mineração surgiu há mais de 450 mil anos, podendo destacar a utilização da pedra, que por apresentar resistência suficiente foi empregada nas suas mais diversas formas como ferramenta de uso diário da humanidade.

Nessa esteira, minerais como sílex, ágata e quartzo foram utilizados na idade da Pedra para a manufatura de armas primitivas, como flechas e instrumentos de corte. Já para os homens da Pré-História, as pinturas rupestres foram realizadas a partir das substâncias minerais pirolusita e hematita, que deram origem aos pigmentos preto e vermelho, respectivamente.

Desde a mina até a sua distribuição final, o bem mineral passa por extensos processos mutuamente interligados e contínuos na cadeia produtiva, podendo ser destacadas as etapas de desmonte, processamento, transformação, transporte, estocagem e a distribuição final do minério beneficiado.

Seguindo essa linha, os rejeitos são resultantes dos processos de beneficiamento das substâncias minerais de interesse, enquanto os estéreis são gerados durante o processo de lavra (extração), sendo constituído de rochas que não apresentam interesse econômico, onde a maior parte é disposta em pilhas e barragens de mineração ([SILVA; VIANA; CAVALCANTE, 2012](#)).

É notório que as técnicas de tratamento dos minérios evoluíram no decorrer do tempo e no atual contexto, a indústria extrativa mineral, como qualquer outro empreendimento, tem como um de seus principais objetivos a esfera econômica que visa, no geral, a maximização de seu lucro.

Fato é que as empresas mineradoras, por muito tempo, mantiveram como prioridade as atividades geradoras de lucro, sendo elas as atividades de tratamento e o beneficiamento mineral. Enquanto isso, os resíduos gerados – por serem tratados como produtos sem valor econômico – permaneceram em segundo plano, assim como os métodos de disposição dos mesmos ([GAMA; NAVARRO, 2005](#)).

Coadunando ao entendimento de [SILVA; NEVES \(2012\)](#), os resíduos uma vez dispostos na superfície podem provocar aumento de concentração de sedimentos, deposição de metais

pesados, contaminação por drenagem ácida, podendo assim, desencadear impactos ambientais associados aos processos de degradação de ecossistemas e de sistemas aquíferos.

Devido ao baixo custo na manutenção de rejeitos em superfície, sua reutilização no desenvolvimento de novos materiais não é amplamente difundida. Dessa maneira, como forma de minimizar os possíveis impactos ambientais gerados pela disposição de rejeitos em superfície, junto à crescente demanda por métodos de remediação de barragens de rejeito, este estudo propõe apresentar formas seguras e sustentáveis associadas aos métodos de disposição dos resíduos sólidos advindos da mineração.

1.1 Contextualização

Dentro de um projeto mineral, existem às fases de vida da Mina, podendo se destacar alguns eventos dentro do projeto como o estudo de viabilidade, implantação, produção e a desativação do empreendimento.

Para a fase de estudo de viabilidade, podem-se destacar as atividades de estudos associados à pesquisa mineral, impactos socioambientais, viabilidade prévia, rotas de processamento, infraestruturas necessárias, escoamento e o sequenciamento da lavra. Após a análise de viabilidade é iniciada a etapa de implantação, podendo destacar as atividades ligadas a construção de infraestrutura, obtenção de licenças, negociação com terceiros, aquisição de terras, dentre outras. Após a fase de implantação, é dado início a fase de produção em si, destacando toda a gestão do projeto, possíveis expansões mediante autorização legal expedida pelos órgãos competentes e a gestão dos ativos. A etapa de desativação do empreendimento pode ser ocasionada temporariamente ou desativada definitivamente, onde algumas das principais razões podem ser a exaustão do corpo mineralizado, razões sociais ou econômicas, razões técnicas, inovações tecnológicas, modismos, ou por seu aproveitamento econômico não ser mais considerado de interesse público, devendo então a desativação ser contemplada com a remediação, desativação das estruturas e na implementação de medidas que confirmam estabilidade e segurança da área remanescente.

Para LIMA (2002), o fechamento de mina é definido pelo encerramento das operações envolvendo a mina e/ou usinas de beneficiamento, mediante a finalização dos processos de descomissionamento e reabilitação, monitoramento e manutenção. O fechamento final é alcançado mediante a análise dos resultados obtidos do monitoramento contínuo, conferindo o estabelecimento de um modelo de desempenho aceitável no local da mina e na região do seu entorno, provando que o processo de fechamento do sítio mineiro foi efetuado corretamente. Segundo KNOL; SWINDELLS (1999), o fechamento de mina é um processo que se desenvolve ao longo de toda a vida da mina e que tipicamente encerra com o abandono de uso do sítio, seguido de descomissionamento e reabilitação. A Figura 1 apresenta o fluxo de fechamento de mina.



Figura 1 – Fases da mineração (adaptado de BICCA, 2021).

Assim, pode-se definir a vida útil da mina marcada pelo seu início no estudo de viabilidade e arrematada com o fechamento, desmobilização das estruturas da mina e a recuperação ambiental da área como pode ser observado na Figura 2.



Figura 2 – Ciclo de vida de uma mina (adaptado de IBRAM 2018,).

Os processos de beneficiamento do minério bruto, como a britagem, moagem, classificação granulométrica, secagem entre outros, tem por objetivos trabalhar a matéria-prima mineral, melhorando suas propriedades físicas, assim como seu grau de pureza, para então obter os concentrados desejados, acarretando na produção de grandes volumes de rejeitos, onde normalmente é necessário uma modificação natural do local, construindo estruturas de contenção de grande

porte como barragens e pilhas de rejeito tendo por ideal, suportar todo o volume de resíduo gerado.

Entre os anos de 1996 e 2005, apenas no Brasil, houve um salto na produção de rejeito de 1,4 vezes, saindo de 202 milhões de toneladas para 290 milhões de toneladas de rejeito (SILVA; VIANA; CAVALCANTE, 2012). Sendo o minério de ferro o principal contribuinte para a geração de rejeito, correspondendo a 35,08% do total de rejeitos gerados pela atividade, seguido do ouro com 13,82%, titânio com 12,55% e o fosfato com 11,33%, a distribuição média de cada substância mineral e sua geração de rejeitos da atividade mineral entre os anos 1996-2005 no Brasil está representado na Figura 3. Além disso, estima-se a que a quantidade anual de rejeito irá praticamente dobrar, onde no ano de 2030 é esperado o montante de 684 milhões de toneladas de rejeitos provenientes da atividade de mineração (Figura 3).

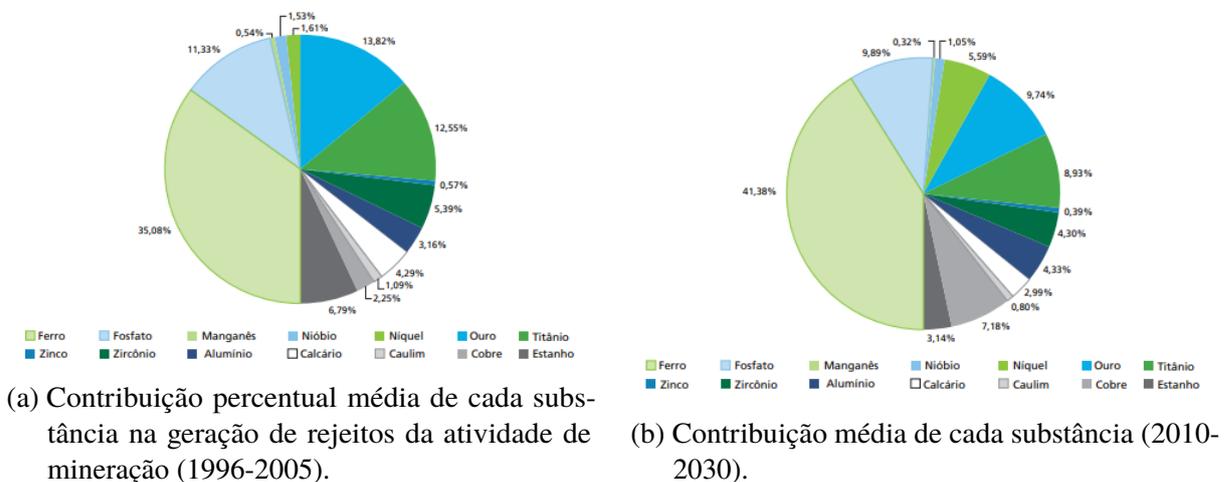


Figura 3 – Quantidade de rejeitos gerado pela indústria mineral por tipo de minério SILVA; VIANA; CAVALCANTE (2012).

Para mais, consoante MELLO; PIASENTIN (2011), por muito tempo os resíduos sólidos gerados nas atividades de mineração foram descartados de forma inadequada no meio ambiente, sendo dispostos em terrenos vizinhos ou até mesmo nos cursos d’água, sem que ocorra nenhum estudo relacionado aos impactos negativos proporcionados por tal prática. Somente após a instalação de distritos minerários ocorrida ao longo do século XX, trouxe com sigilo, empresas de maior porte, impactando diretamente no aumento da população e com o mesmo, veio à tona a problemática ambiental atrelada aos conflitos pelo uso da terra e da água. A partir daí, foi iniciado os primeiros debates relacionados a elaboração de legislações sobre o gerenciamento de resíduos da mineração

Nessa conjuntura, a criação de rejeitos advindos das atividades de mineração e a metodologia pelo qual são dispostos possuem elevada pertinência no domínio social e ambiental, e assim, devem ser tratados com igual relevância, uma vez que podem acarretar a riscos intrínsecos caso não adequados, planejados e/ou operados. Cumpre ressaltar que o Plano Nacional de Mineração 2030 diz que a esfera mineral deve instituir uma diretriz nítida no que tange a reciclagem de

metais e outros minérios, tendo em vista o estabelecimento da Lei nº 12.305/10, que em seu texto estabelece a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Tal legislação “responsabiliza todos os elos das cadeias produtivas de grandes, médias e pequenas empresas sobre o processo de coleta, destino, reciclagem e restituição dos descartes sólidos, incluídos aí os eletroeletrônicos” (SCLiar, 2010, p.62). Ademais, verifica-se a intensificação da logística reversa, assim como, a ampliação das atividades de reciclagem e em consequência da sustentabilidade no país quando a lei é regulamentada.

1.2 Objetivo

O propósito geral contempla analisar de modo crítico-reflexivo o método atual de disposição de rejeitos, sejam eles nas barragens e/ou pilhas. Nesse sentido, procura-se averiguar às possíveis ações que promovam alternativas sustentáveis para se reutilizar os resíduos de mineração, remediando assim a sua disposição em métodos convencionalmente adotados, conduzindo à efetivas melhorias que possam atingir direta ou indiretamente comunidades afetadas pela atividade minerária no país.

2 Revisão Bibliográfica

Em aspectos gerais, os rejeitos variam de acordo com sua procedência, sendo definido como todo material resultante de processos físicos e químicos envolvendo a separação dos metais de interesse. Além disso, sua definição está relacionada diretamente com a situação do mercado e com as tecnologias utilizadas para o processamento do mineral. Desta forma, o rejeito anteriormente descartado por não possuir teor do mineral minério suficiente pode ser visto no futuro como um material de aproveitamento econômico.

As principais composições para os rejeitos de mineração são materiais particulados finos derivados da rocha hospedeira anteriormente explorada, onde não foram aproveitados após os processos de beneficiamento, podendo então, ser separados pelo tamanho dos grãos das partículas, sendo divididos em granulometria fina ou grossa, pela quantidade de água presente na mistura além de outras substâncias adicionadas no processo.

Conforme observado por [ARAUJO; VIANA; PERES \(2009\)](#), a principal diferença entre os rejeitos espessados (previamente adensado ou em pasta mineral) para o rejeito em polpa, está na remoção da água. Caracterizando assim, em comportamentos totalmente distintos. A redução da água está relacionada diretamente na diminuição do volume, reduzindo assim, a área necessária para estoque, conseqüentemente diminuindo a infiltração e contaminação de águas subterrâneas, além de minimizar os riscos de falha nas estruturas mobilizadoras do rejeito.

Já na barragem, após a sedimentação do material sólido a água pode ser concentrada na parte superficial da estrutura, desta forma podendo ser direcionada para a usina de processamento, reduzindo então a quantidade de poluentes dispostos na barragem ([WILLS; FINCH, 2016](#)). O transporte da polpa geralmente ocorre por meio de tubulações e bombas. Consoante a [SOARES \(2010\)](#), a definição da metodologia empregada para o transporte, deve levar em consideração o deslocamento e a distância percorrida do material entre a usina de beneficiamento e seu destino de deposição final.

2.1 Estruturas de contenção

Inicialmente, as barragens eram dimensionadas às margens de um rio, com o intuito de armazenamento e retenção dos líquidos para posterior uso mediante possíveis temporadas de escassez. Desta forma, apresentando fundamental importância para o desenvolvimento das civilizações, que ao longo de sua trajetória empregou às estruturas de armazenamento e contenção para o abastecimento urbano, abastecimento industrial, geração de energia, controle de irrigação, turismo, recreação, rejeitos industriais, dentre outros ([FILHO, 2013](#)).

As primeiras estruturas de armazenamento de resíduos da mineração datam da década

de 30, onde foram projetadas transversalmente aos cursos d'água onde foram edificadas com o próprio uso e deposição do rejeito gerado. Até então, as estruturas não possuíam capacidade suficiente para resistir a fortes chuvas. Apenas na década de 40, com a crescente acessibilidade a equipamentos de alta capacidade de movimentação de terras, foi permitido o uso de técnicas de compactação, garantindo assim melhoria no grau de segurança das barragens (MELLO; PIASENTIN, 2011).

Devido a redução da qualidade das jazidas, associado à crescente demanda por recursos minerais, se faz necessário concentrar minérios de menores teores, acarretando na geração de quantidades cada vez maiores de massa sem viabilidade econômica e materiais não recuperados, que são direcionados para a construção das barragens de armazenamento e contenção de rejeitos (SOARES, 2010). A Figura 4 apresenta o fluxograma associado à rota de processamento e beneficiamento do minério, iniciando na lavra até a disposição do produto final e do rejeito.

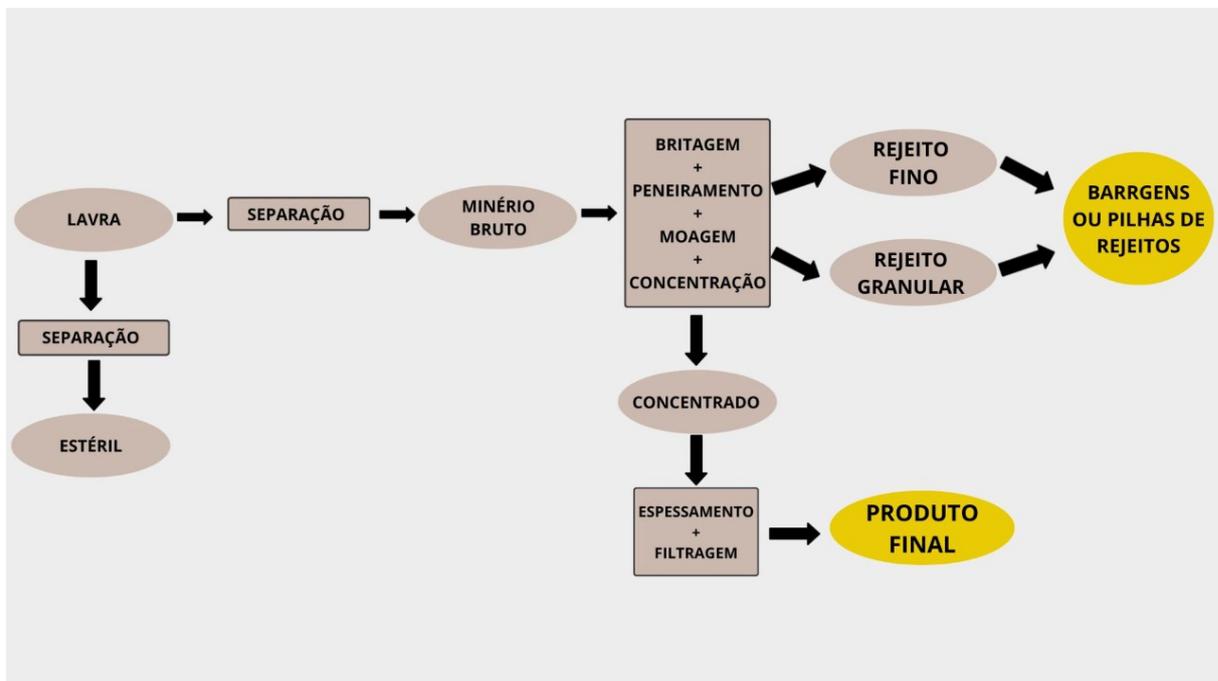


Figura 4 – Fluxograma básico do processamento mineral em indústria de mineração (modificado de CARVALHO, 2018).

O crescente avanço econômico, atrelado a demanda mundial por bens minerais e tecnologia, preserva em caráter viável o aproveitamento dos minérios de difícil aproveitamento ou aqueles de baixo teor, onde esse cenário conduz um expressivo aumento na quantidade de resíduos gerados.

A Figura 5 apresenta os principais estados produtores de minério de ferro no país para o ano de 2020, onde o estado de Minas Gerais foi o maior produtor de minério de ferro bruto, explotando um total de 322 milhões de toneladas de minério sem qualquer tipo de beneficiamento.

Substância Mineral Ferro	Produção Bruta		Produção Beneficiada		Produção Comercializada		Arrecadação
	Quantidade ROM (t)	Contido (t)	Quantidade (t)	Contido (t)	Quantidade Bruta (t)	Quantidade Beneficiada (t)	
Pará	193.646.519	125.921.834	192.263.146	124.863.940	319.539	191.729.055	R\$ 75.438.757.218,00
Minas Gerais	322.672.284	160.095.272	191.022.092	118.880.993	7.152.931	190.082.229	R\$ 66.439.664.782,00
Mato Grosso do Sul	6.439.369	3.759.234	4.076.323	2.619.152	192.242	3.924.343	R\$ 945.965.366,00
Espírito Santo	-	-	93.237	62.326	-	210.948	R\$ 55.365.379,00
Bahia	440.183	258.293	276.825	165.449	-	223.614	R\$ 53.756.321,00
Amapá	-	-	-	-	-	143.885	R\$ 28.062.937,00
Ceará	55.834	35.121	-	-	55.834	-	R\$ 17.684.605,00
São Paulo	-	-	263.645	198.736	-	268.467	R\$ 5.877.664,00
Rio Grande do Norte	-	-	-	-	-	33.370	R\$ 1.812.098,00
Maranhão	50.920	25.460	-	-	50.920	-	R\$ 356.438,00
Total	523.305.109	290.095.214	387.995.268	246.790.596	7.771.466	386.615.911	R\$ 142.987.302.808,00

Figura 5 – Produção bruta, beneficiada e comercializada -Principais substâncias Metálicas (modificado BICCA, 2021).

A Figura 6 apresenta a quantidade média de resíduos e produtos gerados nos processos de beneficiamento.

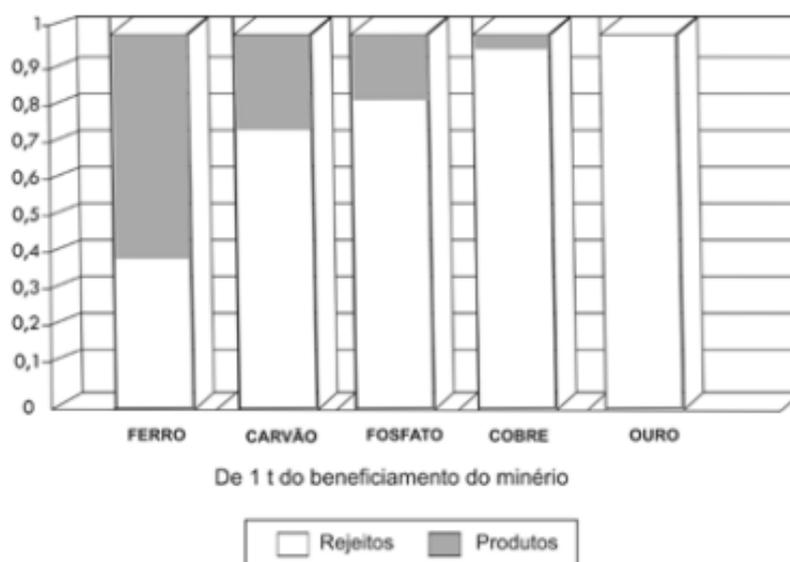


Figura 6 – Quantidade média de resíduos gerados em processo de beneficiamento por tipo de mineral (LUZ; SAMPAIO; FRANÇA, 2010).

Conforme observado na figura, para a mineração de ferro, aproximadamente 40% da massa é correspondente ao rejeito gerado após o beneficiado. Desta forma, correlacionado o volume de minério de ferro bruto produzido e a quantidade média de resíduos gerados na etapa de beneficiamento, para o ano de 2020, foi produzida aproximadamente 200 milhões de toneladas de resíduo apenas na mineração de ferro do país. Todavia, como foi dito anteriormente, o tipo de minério oriundo da lavra interfere diretamente nas rotas de tratamento adotadas, impactando sucessivamente nas propriedades físico-químicas, nas características mineralógicas e geotécnicas mediante a disposição final do rejeito gerado.

MARTIN et al. (2002) destacam que para utilizar o rejeito como construção da barragem de contenção, torna-se necessário avaliar as características do rejeito, salientando a granulometria do material, tornando essencial a separação da fração grossa e fina do mesmo, uma vez que o comportamento geomecânico é diferente entre ambos. Tendo em vista que a construção da barragem com a deposição do rejeito em meio aquoso conduz a se portar como um aterro hidráulico, tem-se como ponto negativo a segregação hidráulica que afeta diretamente na distribuição granulométrica e do fluxo ao longo da margem, impactando diretamente na formação de pontos favoráveis a perda repentina da resistência do material, induzida por uma redução das tensões efetivas do solo, elevando a pressão de poros, podendo então ocasionar na ruptura da estrutura (PEREIRA, 2005; SANTOS; CURI; SILVA, 2010).

Além do tamanho dos grãos, da mineralogia e vulnerabilidade a liquefação, devem ser considerados também a: massa específica dos grãos; massa específica in situ que está relacionado com as características de deformação e consolidação; composição química e mineralógica dos fluidos e sólidos constituintes da polpa; resistência ao cisalhamento drenado e não-drenado; permeabilidade; concentração e velocidade de transporte da polpa (DORMAN et al., 1996). A Figura 7 apresenta o esquema de um perfil de uma barragem de contenção de rejeitos e dos seus respectivos elementos.

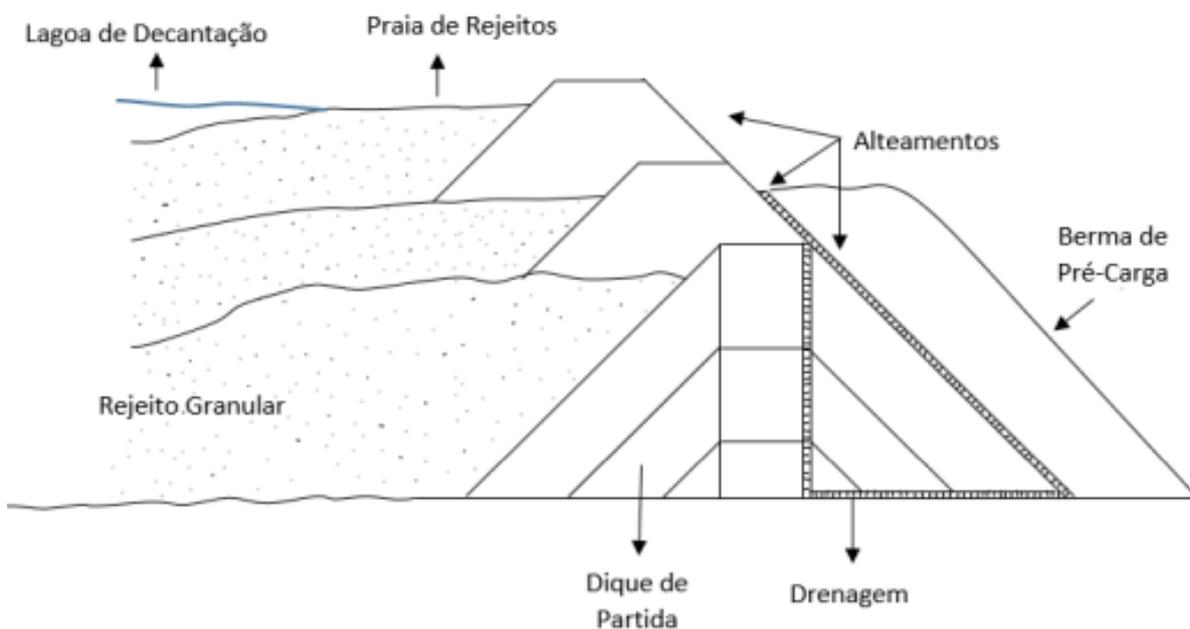


Figura 7 – Exemplo genérico de estrutura de contenção de rejeitos (CARVALHO, 2018).

Segundo AZEVEDO et al. (2012), a construção de uma barragem é realizada primeiramente pelo dique de partida, devendo ser dimensionado com uma altura correta, sendo usualmente empregado solo em conjunto de material de enrocamento, onde na sequência são realizados alteamentos conforme o decorrer da lavra. A forma mais usual de realizar o alteamento é acrescentando novas camadas de materiais compactados acima da crista e sobre o talude.

2.2 Método de Construção de Barragem de Rejeitos

Esta seção apresenta três técnicas distintas de construção de barragens, sendo elas: Montante, Jusante e Linha de Centro

O método de alteamento a Montante, é a forma mais antiga de alteamento, onde os rejeitos são aproveitados como parte da estrutura de contenção. O barramento é iniciado mediante uma estrutura construída em área plana ou de pouca declividade, também conhecido por dique de partida, ou por alguma estrutura piloto de contenção, devendo ser construídas com materiais impermeáveis para controlar o fluxo de água, assim como possíveis erosões.

Em concordância com CAVALCANTE (2000), a estrutura do barramento deve ser iniciada a partir do dique de partida e o rejeito é lançado a montante do arredor da crista, formando uma praia que será utilizada como fonte de material para levantar o próximo alteamento. A praia formada deve possuir resistência o suficiente para suportar um novo dique.

Quando o rejeito alcança o nível mais alto do reservatório, um novo dique é executado a montante do dique anterior, sobrepondo os rejeitos e deslocando o eixo da crista sempre a montante. Esse processo se repete sucessivamente até a elevação final prevista do projeto.

A Figura 8 representam esquematicamente o modelo de barragem alteada pelo método a Montante.

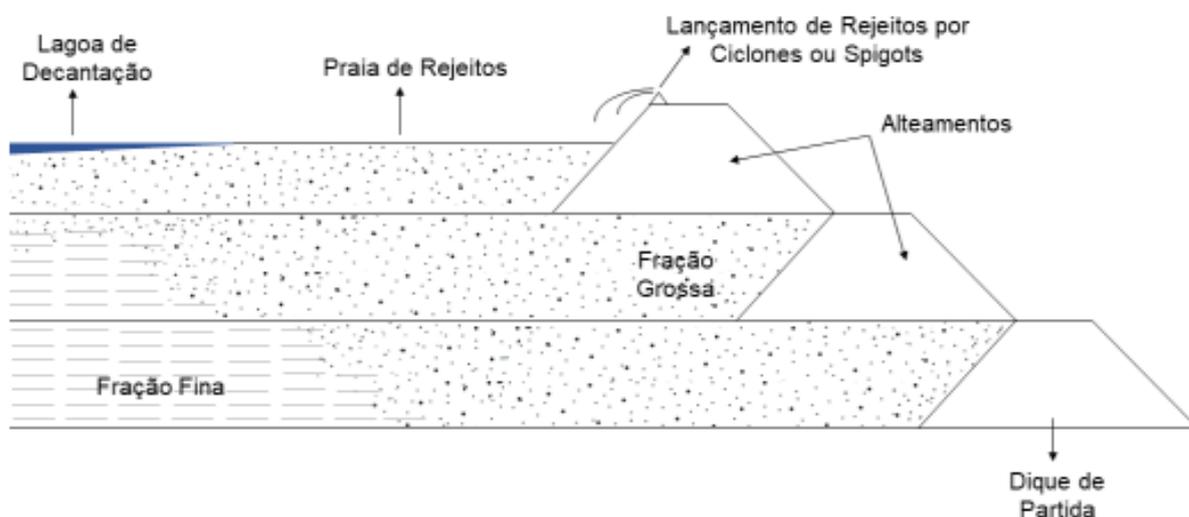


Figura 8 – Método construtivo de barragem à montante (CARVALHO, 2018).

Conforme o entendimento de LOZANO (2006), o método a Jusante, necessita de um grande volume de material para os alteamentos, sendo o mesmo realizado de forma a deslocar o eixo da barragem a jusante até que se atinja a cota desejada no projeto.

Além disso, o talude interno da barragem (talude de montante) deve ser impermeabilizado ou substituído por um tapete drenante, deslocando a linha freática do talude a jusante. Pela possibilidade de construir sistema contínuo de drenagem interna, pode-se controlar o nível de

água interna, reduzindo assim os riscos de ruptura por liquefação. Desta forma, apresenta ser uma forma mais segura de barramento que o método de alteamento a montante.

A Figura 9 apresenta o esquema de uma barragem alteada pelo método de jusante.

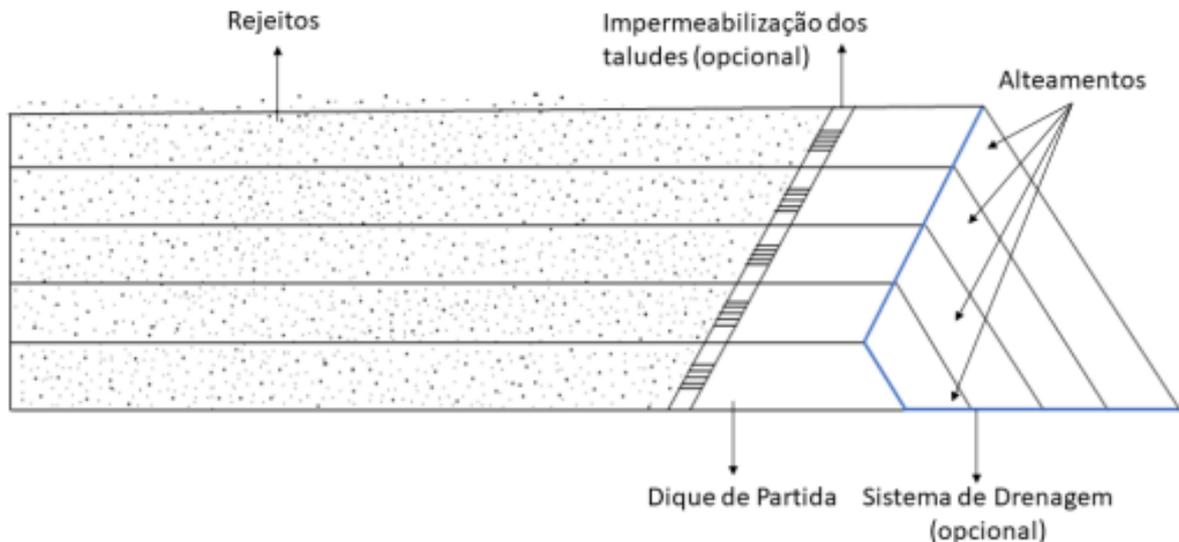


Figura 9 – Método construtivo de barragem à jusante (CARVALHO, 2018).

Para o método de linha de centro, consoante CAVALCANTE (2000) sua construção é realizada por meio de um dique de partida onde o rejeito é despejado regularmente a montante do mesmo. O alteamento é construído despejando o aterro sobre o limite da margem recém formada e o talude de jusante do maciço, sendo realizada a construção do eixo entre o dique a montante e os alteamentos a jusante. Este método é representado geometricamente como uma solução intermediária entre os dois métodos anteriores.

A Figura 10 representa esquematicamente uma barragem de rejeitos alteada conforme o método de linha de centro.

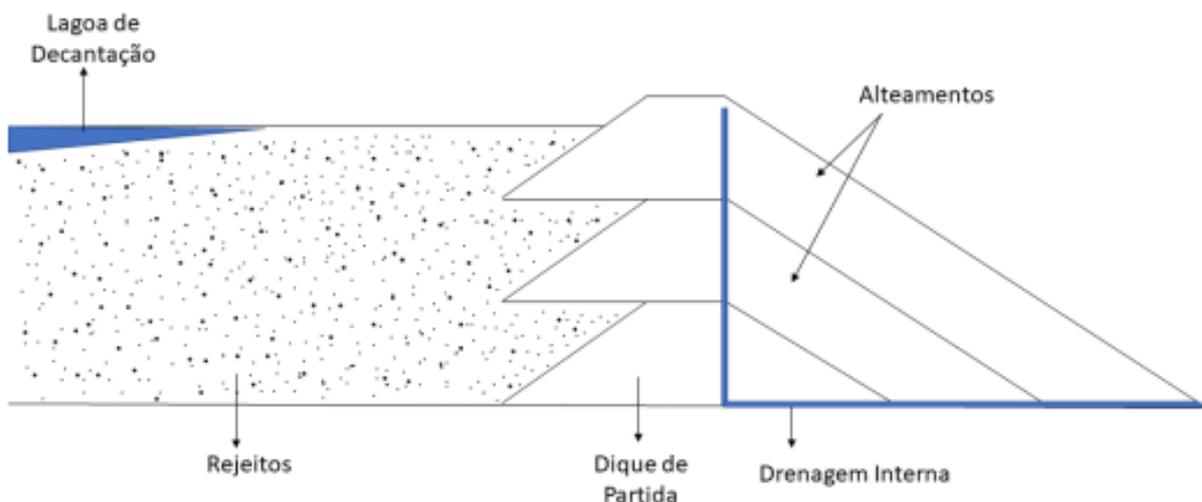


Figura 10 – Método construtivo de barragem com linha de centro (CARVALHO, 2018).

Além disso, o tempo de vida útil de uma barragem é de anos a décadas, desta forma, muitas estruturas podem não apresentar uma caracterização e/ou histórico bem definidos, tendo em vista que, diversas empresas podem ter participação na elaboração e edificação de uma barragem.

Em aspectos gerais, a forma de alteamento influencia diretamente no controle das estruturas físicas da barragem, e qualquer falha ao longo do processo, pode ocasionar no comprometimento da segurança, implicando em acidentes futuros.

2.3 Acontecimentos recentes envolvendo rompimento de barragem de rejeitos

Acidentes envolvendo problemas com barragens são frequentes e dois grandes incidentes envolvendo barragens de rejeitos no estado de Minas Gerais, marcaram a história da mineração. Em novembro de 2015, o município de Mariana-MG, vivenciou um dos maiores episódios referentes ao rompimento de barragem de rejeitos. A barragem de Fundão se rompeu, lançando cerca de 50.000.000 m³ de lama, atingindo as margens do Rio Doce, um dos rios de grande importância do estado de Minas Gerais (OLIVEIRA et al., 2015).

Após o incidente ocorrido em Mariana, o Ministério Público Federal publicou um Inquérito Civil Público número 1.22.020.000246/2015-34, exigindo a reutilização mínima de 70% do rejeito das barragens provenientes da mineração de ferro, com o intuito de prevenir possíveis episódios similares.

Aproximadamente quatro anos depois, em janeiro de 2019, o município de Brumadinho-MG vivenciou um segundo episódio. A barragem da Mina do Córrego do Feijão provocou um significativo impacto social e ambiental, lançando aproximadamente 11.000.000 m³ de lama que atingiu o rio Paraopeba além de levar a óbito aproximadamente 250 pessoas (ROTTA et al., 2020).

Após esse incidente, o clamor da sociedade fez com que a Assembleia Legislativa se mobilizasse para aprovação de um projeto de lei sobre a segurança de barragens de contenção de rejeitos de mineração. Proibindo licenças concomitantes, e fazendo necessário a apresentação de um plano de ação em caso de emergência, aumentando o rigor na fiscalização em todas as etapas e determinando condições para a instalação de novas barragens (REDAÇÃO, 2020).

2.4 Metodologias sustentáveis aplicadas ao rejeito de mineração

Durante o Expo & Congresso Brasileiro de Mineração (EXPOSIBRAM) de 2019, o Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM) publicou uma Carta Compromisso do Setor Perante

a Sociedade tratando a respeito de mudanças e de evoluções contínuas com o que diz respeito a “mineração do futuro” e a indústria da mineração. A Carta apontou a gestão de resíduos e a reutilização do mesmo como o principal desafio do setor mineral, isso devido à exímia representatividade de material gerado durante suas operações. Encorajando o setor ao reaproveitamento visando a melhor destinação de resíduos, aplicando ideias e tecnologias inovadoras nos processos, fomentando novos negócios, com foco na economia circular, proporcionando a transformação de resíduos em novos produtos. Assim como, desenvolvendo estudos de melhores práticas aplicadas à gestão de resíduos e obtenção de novos produtos.

Desta forma, serão apresentadas algumas metodologias de reinserção de resíduos provenientes da mineração, remediando a disposição dos mesmos e assim, evitando a criação de possíveis passivos ambientais.

Diante do grande consumo de recursos naturais empregados pelo setor da construção civil, além da busca por soluções sustentáveis, FONTES (2013) propôs utilizar o rejeito proveniente da mineração de ferro como principal constituinte na produção de argamassa de revestimento e assentamento de alvenarias. Através de ensaios laboratoriais, a pesquisadora conferiu as propriedades físicas, químicas, mineralógicas e microestruturais de suas matrizes. Podendo constatar que, as argamassas produzidas mediante os agregados reciclados possuem a mesma trabalhabilidade que as produzidas com agregados naturais. Graças à elevada massa específica do rejeito, às matrizes apresentam maiores densidades de massa para o estado fresco e endurecido. Além disso, o comportamento mecânico das argamassas confeccionadas a partir do rejeito de minério de ferro são mais resistentes que as argamassas convencionalmente empregadas no setor da construção civil. Destacando assim, a viabilidade na utilização do rejeito de minério de ferro como matéria-prima ambientalmente adequada com o intuito de reduzir os impactos provocados pela disposição do rejeito da atividade minerária.

Segundo exposto por SILVA (2014), a simples substituição de pedriscos por rejeito de minério de ferro concentrado grosso na produção de *pavers*, resulta em ganhos na resistência mecânica, além do aumento da porosidade do mesmo. A adição do rejeito de minério de ferro para confeccionar cerâmicas proporciona redução na absorção de água e na massa específica aparente, conferindo assim uma redução significativa do peso das peças e na elevação da resistência à flexão em comparação as cerâmicas convencionais (sem adição de resíduos).

Buscando a obtenção por novos materiais aplicados à infraestrutura rodoviária, os resíduos oriundos da mineração de ferro podem também ser empregados nas tecnologias de pavimentação. Os resultados obtidos através de misturas asfálticas apontam uma elevação na densidade real, garantindo uma maior resistência à tração em comparação a misturas convencionalmente utilizadas. Além disso, os rejeitos de minério de ferro podem ser empregados em camadas de base e sub-base dos pavimentos (SILVA, 2017).

3 A utilização de rejeitos como matéria prima para infraestrutura

3.1 Uma visão sustentável

Quando se emerge o contexto fático da mineração é impossível negar a carga simbólica e histórico-cultural que tal atividade detém no estado de Minas Gerais. A começar pelo próprio reporte e circunstâncias ao nome dado ao estado que vincula-se diretamente por comportar áreas de extração de diversos minerais.

Em recorte, sabe-se que Minas Gerais está inserida em um continente que adveio da elevada exploração dos bens naturais pelos países centrais e capitalistas. Em um contexto no qual a mineração extrativista é tida como uma das principais e fundamentais atividades produtivas desse capitalismo que por ora, é globalizado.

Minas Gerais, em particular, no quadrilátero ferrífero, tem o minério de ferro como um dos exportadores dominantes em constância no continente latino-americano. A superexploração da força de trabalho no âmbito extrativista que engloba a mineração conserva-se de modo cíclico e é evidente, porém, por mais pertinente que seja o tema, esse não é o objetivo central do presente ensaio, portanto não será discorrido.

Acerca das raízes extrativistas da América Latina e a sua questão econômico-social, Seoane (2013, p. 240) afirma que “[...]La justificación del modelo extractivo exportador se sustenta habitualmente – tanto en los discursos corporativos como del funcionariado político y los comunicadores sociales – en el aporte aparentemente insustituible que dichas actividades realizan al crecimiento económico, al empleo y el desarrollo local y nacional [...]”.

Nessa esteira, um dos enfoques se encontra na resistência dos indivíduos direta ou indiretamente atingidos pelas construções de barragens e as suas consequências, assim como, os grupos coletivos que confrontam esse padrão de mineração e as suas mais diversas ramificações.

Tendo em vista que a região subsiste a recentes violações que tiveram como resultado o rompimento de barragens de rejeitos com consequentes mortes e desaparecimentos, a situação torna-se ainda mais crítica. Onde as circunstâncias advindas da repercussão mundial entre os desastres, vêm para ratificar tal vinculação que submete-se a esse modo de desenvolvimento.

Igualmente pertinente, a questão ambiental se faz intrínseca a essa reflexão crítica, visto que, é perceptível que a economia brasileira tem como estrutura a mineração, se fazendo necessária para o desenvolvimento e avanço socioeconômico do Estado. Contudo, também é de conhecimento que a mesma ocasiona inúmeros impactos, não só ao meio físico, como é o caso da água, do solo e do próprio ar, mas similarmente é geradora de uma considerável quantidade de resíduos.

Devido aos episódios de rompimentos já citados anteriormente, tanto a temática, quanto a logística dos resíduos de mineração passaram a ser considerados e julgados como essenciais não só para meios de fiscalização, mas também para apresentar a situação do exercício de mineração na região, bem como, no quesito ambiental.

Seguindo essa linha de raciocínio, um dos grandes desafios enfrentados pela mineração é a deposição de rejeitos, tendo em vista o grande volume de material gerado através do processo de beneficiamento do minério, sendo comumente empregados em forma de barragens de contenção de rejeitos que ocupam grandes espaços de deposição. Todavia, segundo a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), a disposição final de resíduos no meio ambiente deveria ser empregada como último recurso, devendo ser priorizada primeiramente a não geração de resíduos, seguido pela redução, reutilização, reciclagem e tratamento.

Desta forma, tais aspectos levam a tona o grande desafio da indústria de se reinventar e tratar estes rejeitos de forma adequada. Uma via interessante para a amenização dessas problemáticas está presente na economia circular, que traz consigo a possibilidade de intensificar a utilização dos recursos e, conseqüentemente, contrapor a superada economia linear que tem o descarte final em seu processo.

A economia circular parte do pressuposto de romper com a noção de resíduo, através do desenvolvimento de melhorias de propostas e esquematizações de materiais que podem ser renovados. Considera-se o emprego lógico dos recursos de modo a manusear o uso desses materiais em cascata, ou seja, os materiais serão conservados pelo tempo que lhes forem viável na economia, ampliando a sua funcionalidade. Nesse sentido, mesmo quando se chega ao esgotamento da reutilização do material, este pode ser, por exemplo, remanufaturado e, como última via, reciclados, vejamos a Figura 11:

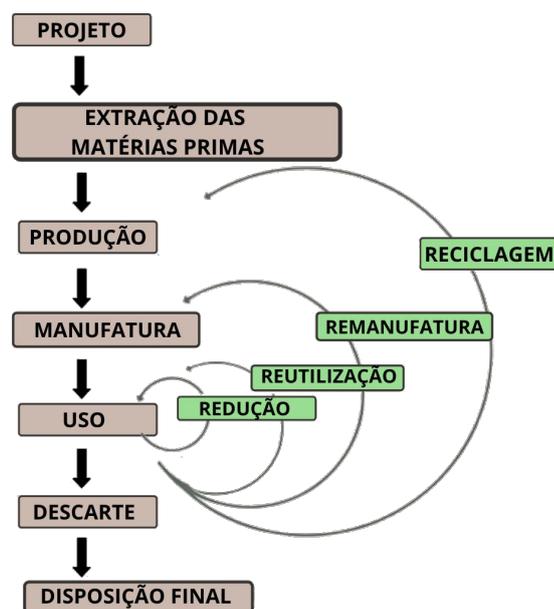


Figura 11 – Comparação entre economias linear e circular.

Trazendo esse conceito para o âmbito da mineração, por mais que a economia circular venha adquirindo estímulo e comprometendo-se a superar a incompatibilidade atual entre econômico e ambiental, ela ainda se faz pouco conhecida pela sociedade.

Contudo, sendo a mineração o pilar da cadeia técnica, matérias primas são geradas para os mais diversificados processos produtivos, conseqüentemente as empresas já notam as possibilidades que a economia circular proporciona e vem desempenhando ações que possibilitam um triplo aproveitamento, sendo essas as propensões econômicas empresariais, assim como benefícios socioambientais. Desse modo, a sistematização circular transforma-se em um pré-requisito para a preservação e manutenção da sustentabilidade no planeta.

Outro fator que impulsiona a economia circular na mineração se dá frente às constantes cobranças e crescentes preocupações ambientais e sociais, que fazem as organizações incorporarem em seus modelos de negócios ações voltadas à sustentabilidade. Essa tem sido uma forma de renovar seu negócio, atendendo a legislações específicas e ao mesmo tempo, contribuindo para o desenvolvimento sustentável. (RAJALA R.; WESTERLUND, 2016)

À vista disso, o sistema, tem influência e impacta diretamente o meio social ao refletir que quando se operar esse tipo de economia leva-se em consideração não somente como a matéria é utilizada, mas também como deve ser manuseada e por quem, podendo dispor de diversos usufrutuários no decorrer do espaço-tempo.

3.2 Impactos ambientais da disposição de rejeitos

A disposição dos rejeitos realizados de forma não planejada na superfície topográfica, acarreta na criação de possíveis impactos ambientais negativos, em especial, depósitos de resíduos provenientes de minerais sulfetados ou que apresentam elevados teores de metais, estão passíveis a ocasionar contaminação do meio inserido ocorridos pela existência de arsênio e metais pesados, acarretando assim em problemas de drenagem ácida e na solubilização de metais, contaminando o solo e a água presente no subsolo.

Segundo resolução do CONAMA (CONAMA, 1986), o impacto ambiental é qualquer alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas mediante alguma atividade humana que afete direta ou indiretamente o meio ambiente, cabendo a elaboração de um estudo de impacto ambiental e do seu respectivo relatório de impacto ambiental (RIMA), a serem submetidos à aprovação do órgão competente para licenciamento de qualquer atividade minerária proposta para uma determinada área.

Destaca-se ainda, que um encadeamento de impactos considerados em primeiro plano como irrelevantes, possuem a capacidade de ocasionar uma considerável deterioração de cunho ambiental quando conexos e centralizados ou quando persistem ao longo do tempo. O somatório de pequenos impactos, quando interligados por um mesmo espaço, podem acarretar em uma

severa degradação ambiental.

De acordo com a definição acima, para analisar os impactos cumulativos deve-se considerar os impactos que ocorreram no passado, no presente e os que se podem prever. Desse modo, considerando que o Estudo de Impacto Ambiental (EIA) é realizado no momento em que o empreendimento está em fase de projeto para eventual implantação, é possível concluir que aspectos futuros e passados não são englobados, e sim a situação da área no momento de elaboração do estudo.

Os impactos cumulativos são resultados de movimentos de materiais que decorrem de dois processos: concentração e dispersão. Vários processos levam à concentração de materiais, sendo que os mais importantes são os próprios movimentos do meio físico, como a estratificação atmosférica e correntes de água.

A disposição dos rejeitos realizados de forma não planejada na superfície topográfica, acarreta na criação de possíveis impactos ambientais negativos, em especial, depósitos de resíduos provenientes de minerais sulfetados ou que apresentam elevados teores de metais, estão passíveis a ocasionar contaminação do meio inserido ocorridos pela existência de arsênio e metais pesados, acarretando assim em problemas de drenagem ácida e na solubilização de metais, contaminando o solo e da água presente no subsolo.

4 Conclusão

Este trabalho apresentou os benefícios da reutilização de rejeitos na amortização dos impactos gerados pela indústria minerária. O texto contextualizou o processo de produção mineral e como sua técnica, considerando os métodos correntes, acarreta no acúmulo de rejeitos inertes. Foram apresentadas as formas construtivas de estruturas de contenção à montante, à jusante e com linha de centro. Apresentaram-se casos onde o rompimento de barragens causaram profundas perdas ambientais, econômicas e sociais. As possíveis metodologias que buscam realimentar o descarte mineral na economia como insumo para outro empreendimento foram evidenciadas. Finalmente, uma visão sustentável e a redução do impacto ambiental viabilizado pela reinserção do material à cadeia de produção.

Mediante a relevância da mineração para a economia brasileira e do aumento significativo da geração de rejeitos advindos desta atividade, a busca por novas tecnologias de reutilização dos resíduos é imprescindível para o desenvolvimento do setor.

O debate sobre estas alternativas é fundamental, uma vez que as empresas dispõem, em grande maioria, seus rejeitos de maneira inerte, o que possibilita desastres ambientais.

Processos produtivos de maior eficiência, associado ao maior aproveitamento e recuperação de material útil sobre o rejeito, implicam diretamente na diminuição do volume de material descartado, reduzindo imediatamente a ocupação de áreas de disposição final.

Além disso, os rejeitos provenientes das atividades de mineração apresentam potencial significativo para o emprego e confecção de materiais para construção civil, contribuindo diretamente para o crescimento e desenvolvimento sustentável associado à infraestrutura, além de apresentar vantagens no que diz respeito aos possíveis impactos ambientais negativos ocasionados pela disposição inadequada dos resíduos de mineração.

4.1 Trabalhos futuros

Dado o estudo realizado e as conclusões expostas, sugere-se o fomento por novos materiais utilizando o rejeito de mineração, como pilares e vigas de sustentação. Além disso, o escalonamento da reutilização do uso de rejeitos como novos materiais na produção em escala industrial (e.g., construção civil, pavimentação).

Referências

- ARAUJO, A. d.; VIANA, P.; PERES, A. *Pesquisa e desenvolvimento em flotação*. [S.l.]: Signus Editora São Paulo, 2009. 429–445 p. 6
- AZEVEDO, Ú. R. d. et al. Geoparque quadrilátero ferrífero (mg): proposta. In: . [S.l.]: CPRM, 2012. 9
- BICCA, V. H. F. *Anuário Mineral Brasileiro*. [S.l.]: Agência Nacional de Mineração, 2021. 3, 8
- BRANCO, P. d. M. *Mineral, Rocha ou Pedra?* 2016. Acessado em 16 de junho de 2022. Disponível em: <<http://www.cprm.gov.br/publique/SGB-Divulga/Canal-Escola/Mineral%2C-Rocha-ou-Pedra%3F-1047.html#:~:text=Mineral%20é%20um%20sólido%20natural,ocorre%20em%20uma%20extens~ao%20considerável>>. 1
- CARVALHO, G. d. *Incidências de impactos decorrentes de acidentes com barragens de rejeito*. [S.l.]: Universidade Federal de Ouro Preto Ouro Preto, 2018. Dissertação de mestrado do Núcleo de Geotecnia (NUGEO). 7, 9, 10, 11
- CAVALCANTE, A. *Efeito do gradiente de permeabilidade na estabilidade de barragens de rejeito alteadas pelo método de montante*. Tese (Doutorado) — Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental . . . , 2000. 10, 11
- CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. *Resolução N°001*. Rio de Janeiro, 1986. 16
- DORMAN, S. et al. The influence of tailings product, site specific conditions, and environmental objectives on the design, development, operation and closure of tailings impoundments. In: *International Symposium on Seismic and Environmental Aspects of Dams Design: Earth, Concrete and Tailings Dams, ICOLD Chile, Santiago, Chile*. [S.l.: s.n.], 1996. v. 1, p. 189–205. 9
- FILHO, E. E. S. *As barragens na bacia do Rio Paraguai e a possível influência sobre a descarga fluvial e o transporte de sedimentos*. [S.l.]: Universidade Federal de Maringá, 2013. 6
- FONTES, W. C. Utilização do rejeito de barragem de minério de ferro como agregado reciclado para argamassas de revestimento e assentamento. 2013. 13
- GAMA, C. D. da; NAVARRO, V. *Engenharia ambiental subterrânea e aplicações*. [S.l.]: CYTED-CETEM, 2005. 1
- HARTMAN, H. L.; MUTMANSKY, J. M. *Introductory mining engineering*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2002. 1
- INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. [S.l.]. 3
- KNOL, R.; SWINDELLS, C. Mine closure planning in australia. *Australian Journal of Mining*, v. 14, 1999. 2
- LIMA, H. M. D. *Liability assessment: a tool for mine closure planning*. Tese (Doutorado) — University of Wales, Aberystwyth, 2002. 2
- LOZANO, F. A. E. *Seleção de locais para barragens de rejeitos usando o método de análise hierárquica*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2006. 10

- LUZ, A. B. d.; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A. *Tratamento de minérios*. [S.l.]: CETEM/MCT, 2010. 1, 8
- MARTIN, T. et al. Stewardship of tailings facilities. Citeseer, 2002. 9
- MELLO, F. M.; PIASENTIN, C. d. A história das barragens no brasil, séculos xix, xx e xxi: cinquenta anos do comitê brasileiro de barragens. *Rio de Janeiro: CBDB*, 2011. 4, 7
- OLIVEIRA, C. et al. Laudo técnico preliminar-impactos ambientais decorrentes do desastre envolvendo o rompimento da barragem de fundão. *Mariana, Minas Gerais*, 2015. 12
- PEREIRA, E. L. Estudo do potencial de liquefação de rejeitos de minério de ferro sob carregamento estático. 2005. 9
- RAJALA R.; WESTERLUND, M. . T. L. Environmental sustainability in industrial manufacturing: reexamining the greening of interface's business model. *Journal of Cleaner Production*, 2016. 16
- REDAÇÃO. *Brasil tem nova lei de segurança de barragens*. 2020. Acessado em 16 de junho de 2022. Disponível em: <<https://www12.senado.leg.br/noticias/materias/2020/10/01/brasil-tem-nova-lei-de-seguranca-de-barragens>>. 12
- ROTTA, L. H. S. et al. The 2019 brumadinho tailings dam collapse: Possible cause and impacts of the worst human and environmental disaster in brazil. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, Elsevier, v. 90, p. 102119, 2020. 12
- SANTOS, D. d.; CURTI, A.; SILVA, J. d. Técnicas para a disposição de rejeitos de minério de ferro. In: *VI Congresso Brasileiro de Mina a Céu Aberto (CBMina), Belo Horizonte*. [S.l.: s.n.], 2010. 9
- SCLIAR, C. *Plano nacional de mineração 2030 – Geologia, mineração e transformação mineral*. 2010. 5
- SILVA, A. P. M. d.; VIANA, J. P.; CAVALCANTE, A. L. B. *Diagnóstico dos Resíduos Sólidos da Atividade de Mineração de Substâncias Não Energéticas – Relatório de Pesquisa*. 2012. Acessado em 16 de junho de 2022. Disponível em: <https://www.ipea.gov.br/portal/images/stories/PDFs/relatoriopesquisa/120814_relatorio_atividade_mineracao.pdf>. 1, 4
- SILVA, F. d. *Aproveitamento e reciclagem de resíduos da concentração de minério de ferro na produção de Pavers e cerâmica*. [S.l.]: Universidade Federal de Ouro Preto, 2014. Dissertação de Mestrado da Rede Temática em Engenharia de Materiais (REDEMAT). 13
- SILVA, M. Costa e; NEVES, P. F. *Utilização de rejeitados de mina como elementos estruturais e sustentabilidade nas explorações subterrâneas*. 2012. 1
- SILVA, R. G. O. d. *Caracterização de concreto asfáltico elaborado com rejeitos de minério de ferro do quadrilátero ferrífero*. [S.l.]: Universidade Federal de Ouro Preto, 2017. Tese de doutorado do Núcleo de Geotecnia (NUGEO). 13
- SOARES, L. Barragem de rejeitos. In: . [S.l.]: CETEM/MCT, 2010. 6, 7
- WILLS, B. A.; FINCH, J. A. *Tailings Disposal*. [S.l.]: Elsevier, 2016. 6