



Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas
Departamento de Engenharia de Minas



Trabalho de Conclusão de Curso

**ESTUDO DE TÉCNICAS DE DISPOSIÇÃO DE REJEITOS MINERAIS COMO UMA
ALTERNATIVA AO USO DE BARRAGENS DE REJEITOS CONVENCIONAIS**

FREDERICO MIRANDA DA SILVA

Ouro Preto, MG

2023

Frederico Miranda Da Silva

**ESTUDO DE TÉCNICAS DE DISPOSIÇÃO DE REJEITOS MINERAIS COMO UMA
ALTERNATIVA AO USO DE BARRAGENS DE REJEITOS CONVENCIONAIS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado 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.

Orientadora: Rita de Cássia Pedrosa Santos

Ouro Preto, MG

2023

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

S586e Silva, Frederico Miranda da.
Estudo de técnicas de disposição de rejeitos minerais como uma alternativa ao uso de barragens de rejeitos convencionais. [manuscrito] / Frederico Miranda da Silva. - 2023.
59 f.

Orientadora: Profa. Dra. Rita de Cássia Pedrosa Santos.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia de Minas .

1. Barragens de rejeitos - Minas e mineração. 2. Impacto ambiental. 3. Água - Consumo. I. Santos, Rita de Cássia Pedrosa. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 624.136

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



FOLHA DE APROVAÇÃO

Frederico Miranda da Silva

Estudo de técnicas de disposição de rejeitos minerais como uma alternativa ao uso de barragens de rejeitos convencionais

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

Aprovada em 18 de agosto de 2023.

Membros da banca

Dr.^a Rita de Cássia Pedrosa Santos - Orientadora (Universidade Federal de Ouro Preto)

Dr.^a Tatiana Barreto dos Santos - (Universidade Federal de Ouro Preto)

Dr. Hernani Mota de Lima - (Universidade Federal de Ouro Preto)

Rita de Cássia Pedrosa Santos, orientadora do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 01/09/2023



Documento assinado eletronicamente por **Rita de Cassia Pedrosa Santos, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 01/09/2023, às 08:24, 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 **0584260** e o código CRC **B27D82E5**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelo dom da vida, por me guiar e me dar força para a realização de mais um sonho.

Aos meus pais, por todo amor, dedicação e incentivo. Por sempre acreditarem em mim.

As famílias Miranda e Silva, pilares da minha formação e caráter.

A minha orientadora, Prof^a. Rita Pedrosa, pelo suporte e orientação no pouco tempo que lhe coube.

A UFOP, Fundação Gorceix, Departamento de Engenharia de Minas e a gloriosa Escola de Minas, berço e excelência na produção de profissionais e conhecimento científico na mineração brasileira.

Aos amigos de Viçosa, Ouro Preto, IAEST – Sérvia e Dublin por me proporcionarem momentos únicos e que jamais serão esquecidos.

A República Covil dos Gênios, Margô, moradores e Ex-alunos por serem minha família em Ouro Preto.

Enfim, agradeço a todos aqueles que contribuíram de alguma forma, seja ela direta ou indiretamente na minha formação como Engenheiro de Minas e que fizeram dessa jornada um fardo mais leve e possível de se carregar, o meu muito obrigado!

*“Ainda não se levantaram as barreiras que digam
ao gênio: Daqui não passarás!”
(Ludwig van Beethoven)*

RESUMO

O aumento na demanda mundial por diferentes minérios bem como a extração de minérios de menor teor fizera com que a produção de rejeitos e estéreis se elevasse a níveis nunca visto antes. Este aumento tem exigido um consumo maior de água nos processos e a construção de barragens de contenção de rejeito cada vez maiores. Os acidentes envolvendo barragens de rejeitos ocorridos nos últimos tempos, aliados a um aumento na escassez e conscientização do uso de água, obrigaram as empresas mineradoras a buscarem soluções e novas tecnologias para a disposição de rejeitos de forma a reduzir os impactos ambientais, custos e riscos associados a essas estruturas. Este trabalho tem por objetivo apresentar através de uma revisão bibliográfica as técnicas de disposição de rejeito alternativas com uma visão holística sobre as suas vantagens e desvantagens em relação as técnicas de disposição de rejeitos em barragem convencional. Dentre as técnicas abordadas temos: A disposição de rejeito em pasta, rejeitos desaguados em pilhas, cava subterrânea (métodos “corte e enchimento”), em cava à céu aberto e a Codisposição e disposição compartilhada de rejeito e estéreis. Como fatores a serem avaliados para a escolha do método podemos citar: localização, disponibilidade de energia, água, clima, tipo de processo de produção, transporte, custo, topografia, sismicidade e outros. Os resultados apresentados mostraram que há métodos alternativos com grandes chances de sucesso, entretanto, para que seja empregado de modo eficiente deve-se levar em conta no momento da escolha as condições e características específicas de cada mina bem como do tipo de rejeito gerado por ela, além do mais, também deve-se ponderar os aspectos econômicos, ambientais e de segurança no momento da implantação do projeto.

Palavras-chave: Mineração. Rejeitos. Métodos de disposição de rejeitos.

ABSTRACT

The increase in world demand for different ores as well as the extraction of lower grade ores had caused the production of tailings and sterile to rise to levels never seen before, this increase has required a greater consumption of water in the processes and the construction of tailings containment dams increasingly larger. The accidents involving tailings dams that have occurred in recent times combined with an increase in scarcity and awareness of water use, have forced mining companies to seek solutions and new technologies for the disposal of tailings in order to reduce the environmental impacts, costs and risks associated with these structures. This work aims to present through a bibliographic review the alternative tailings disposal techniques with a holistic view on their advantages and disadvantages in relation to the techniques of tailings disposal in conventional dam. Among the techniques covered, we have: The disposal of tailings in paste, disposal of wastes discharged in piles, disposal in underground pit (methods "cut and fill"), disposal in open pit and the Codisposition and shared disposal of tailings and sterile. As factors to be evaluated for the choice of the method we can mention: location, availability of energy, water, climate, production, transportation, cost, topography, seismicity and others. The results showed that there are alternative methods with great chances of success, however, for it to be used efficiently it must be taken into account at the time of choosing the specific conditions and characteristics of each mine as well as the type of tailings generated by it, in addition, one must also consider the economic, environmental and safety aspects at the time of project implementation.

Keywords: Mining. Tailings. Tailings disposal methods.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -Principais substâncias metálicas produzidas no Brasil em 2019	16
Figura 2 - Evolução da capacidade de alimentação de grandes usinas de beneficiamento no mundo	17
Figura 3 - Comparação entre as quantidades médias de concentrado e rejeito produzidas no beneficiamento de 1 t de minério	17
Figura 4 - Barragem de Fundão após o rompimento do talude	19
Figura 5 - Barragem I Mina Córrego do Feijão, Brumadinho/MG	19
Figura 6 - Diferentes tipos de rejeitos, seus aspectos e tipos de depósito	22
Figura 7 - Evolução no tempo das atividades relativas a barragens de rejeito	23
Figura 8 - Perfil de depósito com alteamento a montante	25
Figura 9 - Perfil de depósito com alteamento a jusante.....	26
Figura 10 - Perfil de depósito com alteamento de linha de centro	28
Figura 11 - Tipos de espessadores para adensamento de polpas de minério de ferro	30
Figura 12 - Ciclo de operação dos filtros prensa com placas tipo câmara	31
Figura 13 - Caracterização de diferentes tipos de rejeitos.....	33
Figura 14 - Formação de cone sobre o rejeito depositado na Mina de Bulanhanhu.....	34
Figura 15 - Mecanismos de filtragem e os principais fornecedores	36
Figura 16 - Pilha de rejeito filtrado (Dry stack) em operação na Mina Cerro Lindo, Peru.....	37
Figura 17 - Vantagens e desvantagens da disposição subterrânea de rejeitos.....	41
Figura 18 - Exemplo do método de disposição de rejeito à céu aberto	42
Figura 19 - Disposição em cava a céu aberto	43
Figura 20 - Disposição compartilhada de estéreis e rejeitos na cava exaurida de Cauê.....	45
Figura 21 - Bacias de rejeito construídas no depósito de estéril	45
Figura 22 - Disposição de rejeito em camadas finas no topo do depósito	46
Figura 23 - Injeção de rejeito em furos verticais no topo do depósito de estéril.....	47
Figura 24 - Injeção de rejeito em furos inclinados no topo do depósito de estéril.....	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Estados físicos dos rejeitos e correspondente teor de sólidos esperado	32
Tabela 2 - Custos operacionais (em dólar por tonelada de rejeito) para diferentes técnicas de desaguamento (não estão incluídos os custos de capital e de fechamento)	40

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Vantagens e desvantagens da disposição de rejeitos espessados e/ou em pasta	35
Quadro 2 - Vantagens e desvantagens da disposição de rejeitos em pilhas secas / rejeitos filtrados.....	38
Quadro 3 - Pilhas de Rejeito projetadas ou em operação no Brasil	39

LISTA DE ABREVIACÕES E SIGLAS

ANM	Agência Nacional de Mineração
DCE	Declaração de Condição de Estabilidade
DNPM	Departamento Nacional de Pesquisa e Mineração
DPA	Dano Potencial Associado
h	hora
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
IBRAM	Instituto Brasileiro de Mineração
Kg	Quilos
m	metros
m ³	Metro cúbico
MG	Minas Gerais
Mt	Milhões de toneladas
PAEBM	Plano de Ação e Emergência para Barragens de Mineração
PIB	Produto Interno Bruto
PNSB	Política Nacional de Segurança de Barragens
PSB	Plano de Segurança de Barragem
R\$	Reais (moeda)
t	Tonelada(s)
UFOP	Universidade Federal de Ouro Preto
UFV	Universidade Federal de Viçosa
US\$	Dólares americanos (moeda)
ZAS	Zona de autossalvamento
µm	micrometro ou micrométrico

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	11
2.	OBJETIVO GERAL	12
2.1.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	12
3.	METODOLOGIA	13
4.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	14
4.1.	REJEITO NA MINERAÇÃO.....	14
4.1.1.	<i>Volume da Produção Mineral no Brasil e Estimativas de Produção de Rejeito</i>	<i>15</i>
4.1.2.	<i>Problemas, Riscos e Desafios.....</i>	<i>18</i>
4.1.3.	<i>Aspectos Legais Envolvendo a Disposição de Rejeitos.....</i>	<i>20</i>
4.1.4.	<i>Reaproveitamento de Rejeitos</i>	<i>21</i>
4.2.	TÉCNICA DE DISPOSIÇÃO DE REJEITOS.....	22
4.2.1.	<i>Escolha do Métodos de Disposição.....</i>	<i>22</i>
4.3.	DISPOSIÇÃO CONVENCIONAL	23
4.3.1.	<i>Método Montante</i>	<i>24</i>
4.3.2.	<i>Método a Jusante</i>	<i>26</i>
4.3.3.	<i>Método de Linha de Centro</i>	<i>27</i>
4.4.	MÉTODOS ALTERNATIVOS DE DISPOSIÇÃO DE REJEITO	28
4.4.1.	<i>Espessamento e Filtragem Para Produção de Rejeitos Desaguados</i>	<i>29</i>
4.4.2.	<i>Disposição de Rejeito Espessados e/ou em Pasta</i>	<i>32</i>
4.4.3.	<i>Disposição em Pilhas Controladas /Rejeitos Filtrados.....</i>	<i>36</i>
4.4.4.	<i>Disposição Subterrânea</i>	<i>40</i>
4.4.5.	<i>Disposição em Cava à Céu Aberto</i>	<i>42</i>
4.4.6.	<i>Codisposição e Disposição Compartilhada de Rejeito e Estéreis</i>	<i>44</i>
5.	DISCUSSÃO	49
6.	CONCLUSÃO	51
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	54

1. INTRODUÇÃO

O aumento da população mundial aliado a uma rápida mudança nos padrões de consumo da sociedade nas últimas décadas tem levado a uma alta expressiva na demanda por bens minerais e de consumo em todo o mundo. Este fato, exigiu do setor da mineração um salto significativo na produção dos mais diversos tipos de minérios. Todavia, a descoberta de novas jazidas minerais com volume e teores altos não acompanharam essa expansão no mesmo ritmo e a lavra de jazidas com qualidade inferior e de baixo teor metálico se tornou comum no mundo da mineração. Esse novo tipo de exploração tem gerado um volume muito grande de resíduos e causando ao setor um passivo ambiental significativo.

Os resíduos gerados na cadeia de produção mineral podem ser divididos em dois tipos: Os estéreis que são definidos como todo material de baixo teor não aproveitável como minério ou sem valor econômico que é descartado pela operação de lavra antes do envio para o beneficiamento. Este material geralmente é disposto na mina na forma de pilha ou em cavas. O outro tipo de resíduo gerado pela mineração são os rejeitos, caracterizados como sendo todo subproduto gerados através do processo de beneficiamento mineral e que não possui aproveitamento econômico.

O aumento do volume de rejeito gerado pelas atividades de mineração tem demandado a construção de estruturas de armazenamento/disposição de rejeitos cada vez maiores. Fato este que tem despertado preocupações do governo e de setores da sociedade, já que muitas destas estruturas estão localizadas próximas as áreas urbanas. Além disso, o acontecimento de acidentes graves envolvendo barragens de rejeito nos últimos anos no Brasil levaram a opinião pública e mídia a estabelecer uma pressão muito forte sobre o governo para que houvesse uma revisão das normas e condutas para construção destas estruturas, dificultado desta forma o licenciamento para novas áreas de barragens ou até mesmo para alteamento de barragens já existentes. Com isso, despertou-se no setor mineral a necessidade de se investigar novos métodos e tecnologias para a disposição de rejeitos.

À partir destes fatos, o presente trabalho tem por objetivo apresentar os principais métodos de disposição de rejeito disponíveis atualmente. Destacar as vantagens e desvantagem de cada um e também os fatores que determinam na escolha e aplicação de cada método na tentativa de minimizar os riscos relacionados à etapa de disposição de rejeitos nas atividades de mineração.

2. OBJETIVO GERAL

- Apresentar as principais técnicas alternativas de disposição de rejeitos com uma visão holística sobre as suas vantagens e desvantagens em relação as técnicas de disposição de rejeitos em barragem convencional;

2.1. Objetivos Específicos

- Apresentar aspectos gerais sobre os rejeitos produzidos na mineração.
- Abordar aspectos legais e normativas que regem a disposição de rejeito no Brasil.
- Expor os principais riscos e desafios relacionados a disposição de rejeitos.
- Identificar alternativas de uso e reaproveitamento para o rejeito gerado na mineração.
- Abordar as principais técnicas de disposição de rejeitas adotadas na mineração e estabelecer uma análise crítica e comparativa entre cada uma delas.

3. METODOLOGIA

Neste trabalho foi realizado uma revisão bibliográfica a respeito dos principais métodos de disposição de rejeito, apresentado os aspectos legais sobre a disposição desses resíduos, os riscos associados, bem como um estudo mais aprofundado e detalhado em cada uma das diferentes técnicas de disposição, abordando suas vantagens, desvantagens e aplicabilidade.

O trabalho foi dividido em seis capítulos. No Capítulo 1 foi feito uma breve introdução, que contempla a proposta de trabalho, destacando-se as considerações iniciais do estudo, as justificativas e objetivos previstos nessa monografia.

O capítulo 2 apresenta o objetivo geral do trabalho e categoriza os objetivos específicos em cinco tópicos principais, os quais são discutidos ao longo de toda a monografia.

O capítulo 3 apresenta uma visão sucinta da metodologia descrevendo o formato do trabalho bem como a estrutura de cada capítulo presente na obra.

O Capítulo 4 traz consigo uma revisão bibliográfica completa do assunto onde são abordados a produção mineral no Brasil, a geração de rejeitos, aspectos legais sobre a disposição de rejeito, os risco e desafios envolvidos, as alternativas de uso e reaproveitamento e de forma mais profunda os principais métodos de disposição de rejeitos convencional e alternativos enfatizando-se as características de cada técnica bem como as vantagens e desvantagens de cada uma.

No capítulo 5 são feitas as discussões e considerações acerca dos diferentes métodos de disposição de rejeito através de uma análise crítica de cada método de forma a comparar e pontuar cada um.

Por fim, no Capítulo 6, são apresentadas as principais conclusões provenientes das análises e avaliações realizadas durante o desenvolvimento desta monografia, incluindo-se também algumas recomendações para pesquisas futuras e/ou complementares.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1. Rejeito na Mineração

Raramente as espécies minerais são encontradas puras na natureza, e para que seja possível aproveitá-las industrialmente é necessário submetê-las à etapa de beneficiamento mineral. Segundo Valadão e Araújo (2007), o beneficiamento mineral, também chamado de processamento mineral, pode ser conceituado como o conjunto de operações básicas que são realizadas em uma matéria-prima mineral (minério bruto) com o objetivo de se obter sua adequação, ou seja, produtos comercializáveis.

Os rejeitos de mineração são materiais gerados diretamente nas usinas de tratamento de minérios que não apresentam valor econômico associado. Como a maior parte dos processos de beneficiamento de minérios são realizados por via úmida, os rejeitos em geral se apresentam em forma de polpa, isto é, uma fração aquosa contendo diferentes partículas minerais em suspensão e/ou íons dissolvidos (SÁNCHEZ, 1995). Devido ao fato de não ter valor econômico, tendem a ser armazenados da forma mais econômica possível, atendendo as regulamentações ambientais e características específicas do local. Em geral, por ser a forma mais barata de disposição os rejeitos provenientes do beneficiamento mineral são convencionalmente dispostos sob a forma de polpa em estruturas de contenção denominadas barragens.

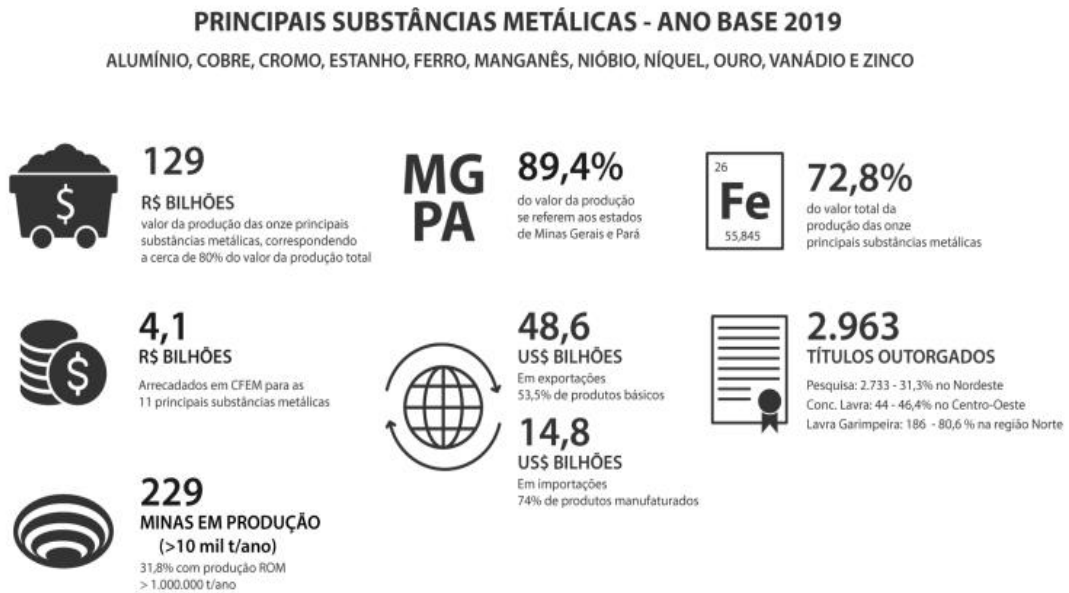
Engels (2006) relata que a utilização de tecnologias na extração de minérios de menor teor tem sido cada vez mais comum, o que implica não somente no aumento da eficiência do processo, mas também em uma maior geração de volume de rejeitos. A metodologia tradicional de disposição de rejeitos em forma de polpa requer grandes áreas para disposição e apresenta grande impacto ambiental. Além disso, a proximidade de áreas urbanas e a pressão da sociedade e dos meios de comunicação devido aos recentes e graves acidentes envolvendo barragens de rejeito tem despertado a necessidade e discussão da aplicação de novas alternativas às barragens de rejeito convencionais, levando desta forma, o meio acadêmico e privado a pesquisar e buscar novas alternativas para a disposição dos rejeitos.

4.1.1. Volume da Produção Mineral no Brasil e Estimativas de Produção de Rejeito

A importância das substâncias metálicas na indústria mineral brasileira remonta aos tempos da colônia: as incursões dos bandeirantes em busca de metais preciosos definiram novas rotas para a ocupação do interior do Brasil e culminaram com a exploração de ouro, inicialmente na região das Minas Gerais. Ao longo da nossa história, conforme aumentou a ocupação do território e o conhecimento geológico, novas descobertas de depósitos minerais metálicos foram feitas e substâncias como o manganês e o ferro passaram a ter maior relevância. Tais descobertas tiveram impacto importante na economia nacional e foram fundamentais para fomentar o processo de industrialização do Brasil (BRASIL, 2019).

A mineração é uma atividade complexa e de extrema importância para a economia de um país, ela é responsável por uma grande fonte de riqueza e desenvolvimento, gera empregos e contribui para o Produto Interno Bruto (PIB). Para o presente trabalho utilizou-se os dados do Anuário Mineral Brasileiro de 2020, ano base 2019, produzido pela Agência Nacional de Mineração (ANM). Os dados referentes ao ano de 2019 foram escolhidos para eliminar os impactos gerados pela Covid-19, pandemia que causou uma desaceleração na economia global e na demanda por bens minerais em todo mundo durante os anos 2020 a 2022. Segundo dados do anuário, em 2019, existiam títulos ativos de pesquisa e lavra cadastrados para 37 substâncias metálicas. As substâncias da classe dos metálicos responderam por cerca de 80% do valor total da produção mineral brasileira naquele ano. Dentre essas substâncias, onze destacaram por corresponderem a 99,7% do valor da produção da referida classe, foram elas: alumínio, cobre, cromo, estanho, ferro, manganês, nióbio, níquel, ouro, vanádio e zinco. Conforme demonstrado na Figura 1 os valores da produção dessas onze substâncias totalizaram 129 bilhões de reais, com destaque para a expressiva participação do ferro nesse montante, cuja produção é concentrada, principalmente, nos estados do Pará e Minas Gerais.

Figura 1 -Principais substâncias metálicas produzidas no Brasil em 2019

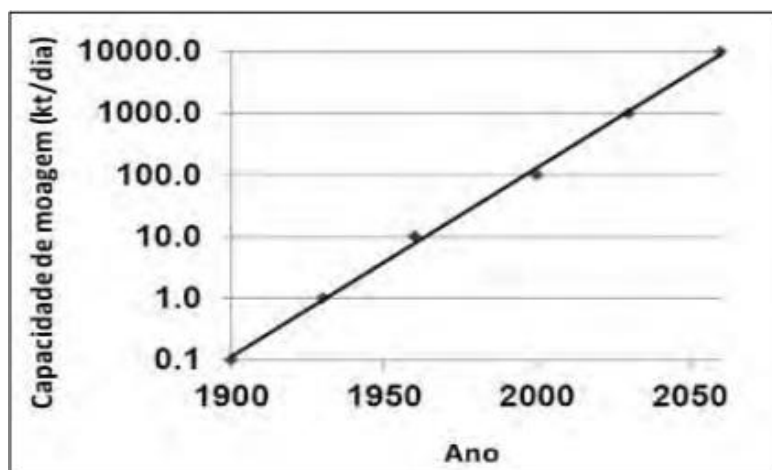


Fonte: Anuário Mineral Brasileiro, 2020

O setor mineral também tem grande importância social e econômica para o país e hoje é responsável por uma parcela importante do Produto Interno Bruto (PIB). Dados estatísticos do Anuário Mineral Brasileiro de 2020 confirmam a contribuição do setor mineral para um saldo positivo em relação ao comércio exterior neste ano. Em 2019 o saldo da balança do comércio exterior para as onze principais substâncias metálicas foi de quase US\$ 34 bilhões.

O aumento da demanda de bens de consumo e a redução do teor dos minerais de interesse exigiram das empresas de mineração um incremento na capacidade produtiva, fato que gerou como resultado um salto na produção de rejeito e consumo de água pela mineração nas últimas décadas. Um estudo realizado por Robertson (2013) apresentou a evolução da capacidade de processamento de grandes empresas de mineração ao longo dos anos (Figura 2).

Figura 2 - Evolução da capacidade de alimentação de grandes usinas de beneficiamento no mundo



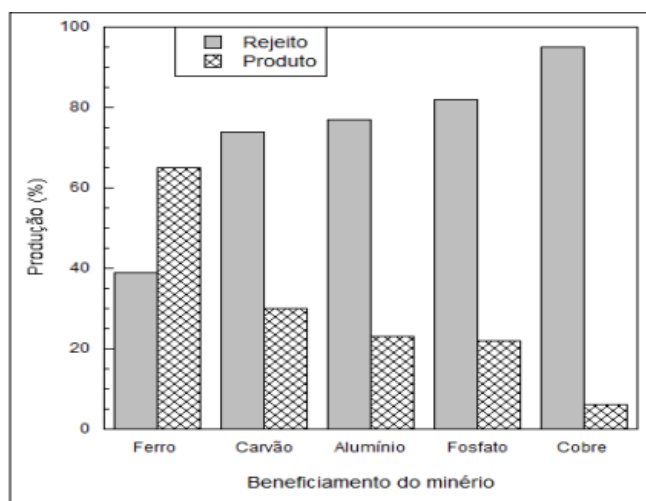
Fonte: adaptado de Robertson (2013)

Um estudo feito por Jones e Boger (2012) alega que a indústria mineral é a maior produtora mundial de resíduos, produzindo cerca de 65 bilhões de toneladas/ano, dos quais 14 bilhões são rejeitos constituídos majoritariamente por partículas finas, menores que 150 μ m.

Segundo França e Massarani (2010), para cada tonelada produzida de minério de ferro, por flotação/separação magnética, gera-se, em média, 0,6 t de rejeito. Se considerarmos que 65% do minério de ferro no Brasil são produzidos por essa rota, são geradas, anualmente, cerca de 160 Mt de rejeito de minério de ferro.

Soares e Boscov (2018) apresentam a relação mássica entre a produção de concentrado e rejeito para alguns bens minerais (Figura 3).

Figura 3 - Comparação entre as quantidades médias de concentrado e rejeito produzidas a cada 1 t de minério



Fonte: Adaptado de Soares e Boscov (2018)

A atividade de mineração demanda grandes volumes de água e é geradora de uma considerável quantidade de rejeitos. Sendo assim, é desejável que sua disposição seja ambientalmente correta e com custo reduzido focando principalmente na sustentabilidade. Por serem a parte indesejada do recurso mineral explorado e conseqüentemente sem valor econômico imediato os rejeitos são, muitas vezes, tratados com menor atenção, investimentos financeiro, de pessoal e tecnológico do que de fato é merecido (ÁVILA; BICUDO, 2014).

4.1.2. Problemas, Riscos e Desafios

Atualmente um dos maiores desafios na indústria da mineração tem sido relacionado a gestão de água e geração e disposição de rejeitos. Alguns dos problemas existentes nesse setor é que as barragens de contenção de rejeitos apresentam riscos ambientais, econômicos e sociais, incluído riscos para a população local. Ao mesmo tempo os acidentes ocorridos com as barragens nos últimos tempos despertaram a atenção e preocupação da comunidade técnico-científica e Governo para a questão da segurança dessas estruturas e sua operação.

Segundo Davies (2001), os seguintes impactos podem ser decorrentes do rompimento de uma barragem de rejeito:

- Perda de vidas;
- Danos ao meio ambiente;
- Interrupção prolongada da produção;
- Imagem negativa da empresa e de todo o segmento de mineração perante a sociedade;
- Consequências econômicas para a empresa e até mesmo para todo o segmento de mineração;
- Responsabilidade legal para os executivos da empresa.

Deficiências no armazenamento e gestão dos rejeitos de mineração são as maiores fontes de falhas e acidentes. Embora tenha ocorrido outras falhas catastróficas, as rupturas das barragens de Mt Polley no Canadá (2014) e a de Fundão no Brasil (Figura 4) em 2015, apontaram a necessidade de mudar a ideia de que os impactos da mineração são inevitáveis e compensados por maiores necessidades e benefícios públicos (BOWKER; CHAMBERS, 2017). Cada um desses acidentes liberou mais de 25 milhões de metros cúbicos de rejeito no meio ambiente que, combinados, representam material suficiente para encher 20.000 piscinas

olímpicas (UNEP, 2017). Outro desastre expressivo foi o rompimento da Barragem I da Mina do Córrego do Feijão em Brumadinho – MG (Figura 5) ocorrido em 2019, que segundo dados do IBAMA (2019) causou uma destruição de aproximadamente 270 hectares e deixou centenas de mortos e desaparecidos.

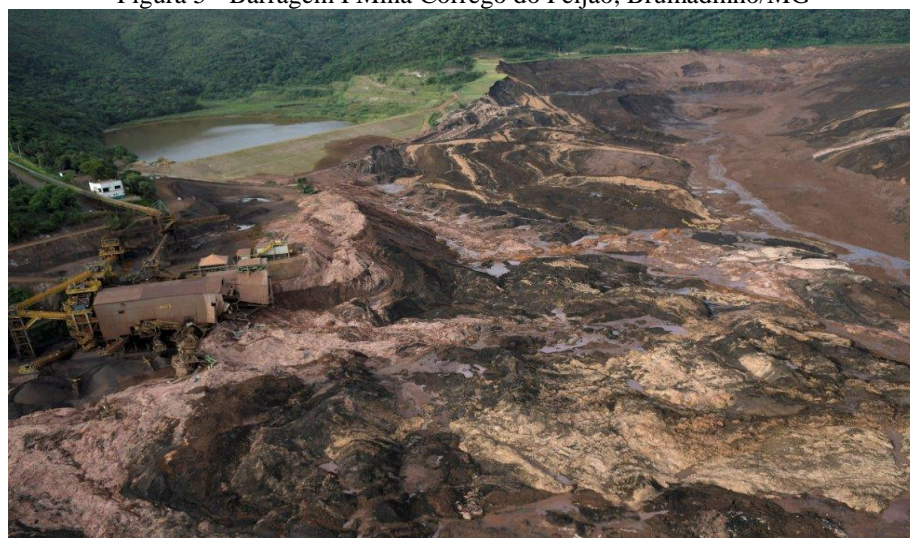
Diante desse cenário, faz-se necessária a adoção e estudos de métodos alternativos para a disposição dos rejeitos de minério. Diversas empresas de mineração já estão adotando sistemas de beneficiamento a seco e técnicas de disposição de rejeitos mais seguras, porém, este é um processo mais oneroso e que leva tempo para ser implementado por todas as companhias.

Figura 4 - Barragem de Fundão após o rompimento do talude



Fonte: Fundação Estadual do Meio Ambiente (2016).

Figura 5 - Barragem I Mina Córrego do Feijão, Brumadinho/MG



Fonte: El País (2019)

4.1.3. Aspectos Legais Envolvendo a Disposição de Rejeitos

Diante dos impactos sociais e ambientais decorrentes dos acidentes com as Barragens de Rejeitos de Fundão, em Mariana-MG (2015) e Córrego do Feijão, em Brumadinho-MG (2019), tornou necessária uma revisão completa do arcabouço legislativo referente a disposição de rejeito no Brasil. A seguir será apresentada uma breve discussão das principais mudanças ocorridas na legislação brasileira no que tange este assunto.

A lei federal nº 12334 de 2010 (BRASIL, 2010) foi um marco na normatização de barragens no Brasil, na medida em que ela cria a Política Nacional de Segurança de Barragens – PNSB. Essa lei abrange todos os tipos de barragens, desde àquelas destinadas para fim de geração de energia, como também as utilizadas para o armazenamento de água, resíduos industriais ou de rejeitos de mineração. Como complemento à lei de 2010, o então DNPM publica a portaria nº 70389 em 2017 (DNPM, 2017) depois do acidente ocorrido em Mariana trazendo novas obrigações das quais se destacam: Criação da obrigatoriedade de apresentação do Plano de Segurança de Barragem - PSB acrescido do Plano de Ação e Emergência para Barragens de Mineração – PAEBM nos caso de barragens classificadas com dano potencial associado de médio a alto, a obrigação da emissão semestral da Declaração de Condição de Estabilidade – DCE e a obrigatoriedade das inspeções de segurança regulares e especial.

Outro importante marco normativo foi a promulgação da Resolução nº 13 de 2019 (ANM, 2019) que estabeleceu a proibição definitiva das barragens de alteamento à montante determinando prazos para descaracterização das barragens já existentes, além de proibir a existência de instalações como escritórios e refeitórios na Zona de Autossalvamento – ZAS. Além disso, tornou obrigatório a automatização e o monitoramento das barragens cujo Dano Potencial Associado - DPA fosse classificado como alto.

O estado de Minas Gerais foi um pouco mais além neste sentido, promulgando naquele mesmo ano a lei estadual nº 23291 (MINAS GERAIS, 2019). Esta lei proíbe a construção de barragens à montante e obriga a descaracterização daquelas já existentes. A lei ainda condiciona o licenciamento ambiental para a construção de novas barragens, bem como do alteamento e expansão daquelas já existentes à comprovação por parte do interessado de que não há alternativas viáveis do ponto de vista técnico e econômico que não seja a disposição convencional. Deixando ainda explícito que se deve priorizar as alternativas que promovam o desaguamento de rejeitos (MINAS GERAIS, 2019).

4.1.4. Reaproveitamento de Rejeitos

Além das técnicas alternativas para dispor os rejeitos, o uso dos mesmos como matéria prima em outros processos produtivos também vem sendo estudado como forma de minimizar o passivo ambiental da indústria mineral. Uma abordagem já empregada pela indústria da mineração trata do aproveitamento dos rejeitos para outros usos econômicos. Toffolo *et al.* (2014) concluíram que a utilização do rejeito do minério de ferro em substituição do agregado natural na produção de blocos de concreto para pavimentação é uma alternativa viável. O aproveitamento agrícola é outra opção, o pó de calcário industrial passou a ser destinado como corretivo do pH de solos para atender as necessidades de produtores agrícolas. Vale também ressaltar a técnica conhecida como rochagem, em que o pó de rocha é usado diretamente no solo como insumo agrícola alternativo.

A rochagem é uma técnica de fertilização baseada na adição de pó de determinados tipos de rocha ou minerais com a capacidade de alterar positivamente a fertilidade dos solos sem afetar o equilíbrio do ambiente (PÁDUA, 2012). Este pó fornece nutrientes ao solo, como cálcio, fósforo, magnésio e, principalmente, potássio. Essas rochas também têm a função de condicionadoras do solo. Isto é, permitem que outros nutrientes e condições do solo sejam mais equilibrados e que os nutrientes sejam disponibilizados conforme a demanda da cultura.

A utilização de rejeitos granulares de minério de ferro apresenta como uma ótima oportunidade como material de construção para fins rodoviários. Pesquisa realizada pela Universidade Federal de Viçosa - UFV, intitulada “Caracterização de rejeitos de minério de ferro para uso em pavimentação” corroborou esta premissa, comprovando que os rejeitos de minério de ferro apresentam grande potencial de uso, especialmente quando melhorados com cimento. Há também pesquisas que vêm sendo realizadas na Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP juntamente com a iniciativa privada para a utilização de rejeito da extração do minério de ferro para a fabricação de insumos para a construção civil (UFOP, 2019).

O reaproveitamento de rejeitos para a produção de novos produtos vem recebendo particular atenção nos últimos anos, como uso na fabricação de pré-moldados usados na construção civil (VALE, 2020) ou na pavimentação de estradas. Todavia, essa alternativa tem algumas limitações. Os pré-moldados produzidos usando os rejeitos tendem a ter pior performance que os pré-moldados feitos a partir de areia e brita extraídas para esse fim, além do que, o volume produzido anualmente torna impossível que todos os rejeitos gerados no Brasil tenham uma reutilização. Entretanto, a alternativa pode ser viável em casos especiais e

ajuda a diminuir o montante de material a ser disposto, além de melhorar a imagem pública das empresas.

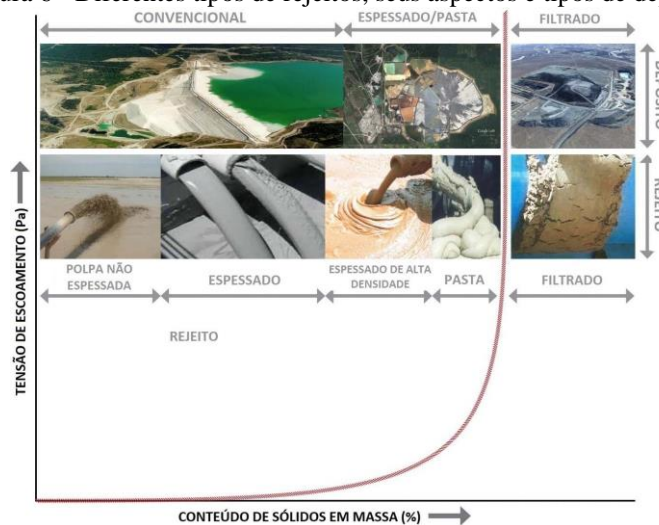
4.2. Técnica de Disposição de Rejeitos

4.2.1. Escolha do Métodos de Disposição

Segundo Araújo (2006), a escolha do método de disposição de rejeito irá depender de uma série de fatores, tais como: tipo de processo industrial, características geotécnicas, nível de produção de rejeitos, necessidade de reservar água, necessidade de controle de água percolada, sismicidade, topografia, hidrologia e custos envolvidos. Além das condições técnicas deve-se também levar em consideração a viabilidade econômica da construção e manutenção das estruturas de disposição até o fim da sua vida útil.

Dentro desse contexto, devido a necessidade e busca por técnicas mais seguras e menos agressivas ao meio ambiente e comunidade é que os métodos de disposição de rejeito a partir de técnicas de desaguamento vêm sendo aplicados em um número cada vez maior de empreendimentos ao redor do mundo. O estado e a consequente categoria do rejeito desaguado são, em geral, baseados no teor de sólidos (massa de sólidos em relação à massa total) e na tensão de escoamento. Dessa forma, diferentes tipos de rejeitos exigem diferentes tipos de depósitos para disposição. A Figura 6 traz um resumo de algumas das técnicas apresentadas neste trabalho, considerando esses fatores.

Figura 6 - Diferentes tipos de rejeitos, seus aspectos e tipos de depósitos



Fonte: Mend (2017)

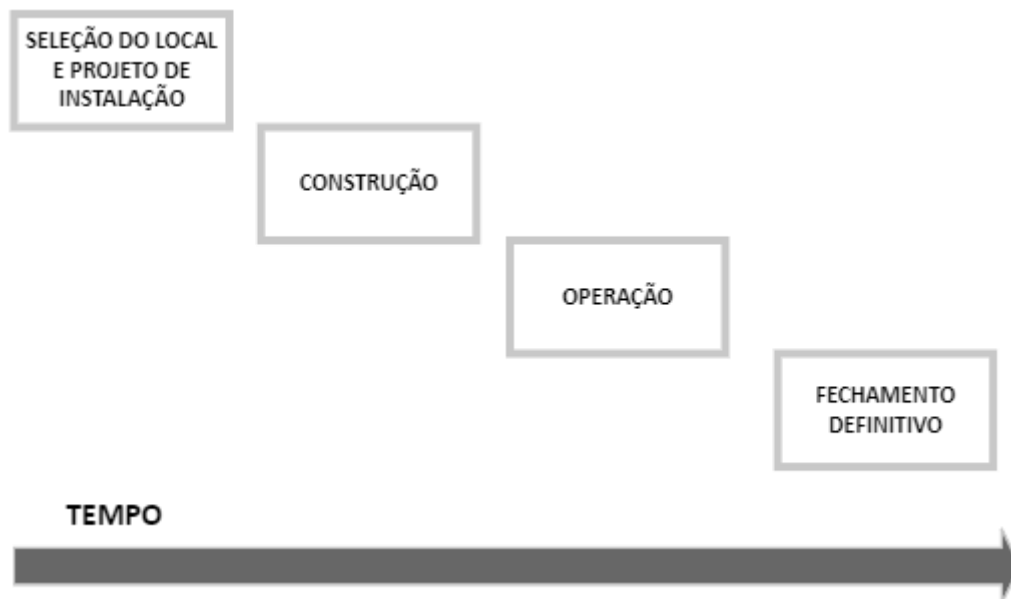
Neste trabalho iremos abordar a disposição de rejeitos em seis tipos: Disposição em barragens convencionais (método mais utilizado atualmente pelas mineradoras), disposição em pasta, disposição de rejeitos desaguados em pilhas, disposição em cava subterrânea (métodos “corte e enchimento”), disposição em cava à céu aberto e a Codisposição e disposição compartilhada de rejeito e estéreis.

4.3. Disposição Convencional

Dentre os diversos métodos empregados para se dispor o rejeito, as barragens, ainda são as construções mais utilizadas. Essas obras podem ser definidas como estruturas que tem por objetivo garantir a retenção e o armazenamento dos rejeitos provenientes dos processos de beneficiamento da indústria mineral.

Sua construção é baseada em critérios técnicos e geotécnicos de forma que ofereça a maior segurança possível a menor custo. Seu planejamento inclui conforme mostra a Figura 7 a definição do local de instalação, o projeto de instalação, a construção, a operação e o fechamento, através da análise de parâmetros geológicos, hidrológicos, topográficos, geotécnicos, ambientais, sociais, econômicos, entre outros (LOZANO, 2006).

Figura 7 - Evolução no tempo das atividades relativas a barragens de rejeito



Fonte: Adaptado de Lozano (2006)

As barragens, podem ser construídas utilizando-se diferentes tipos de materiais como solos, estéreis ou mesmo o próprio rejeito. O grande volume de rejeitos gerados, condicionados aos custos da disposição, faz com que seja atrativa a utilização destes materiais na construção das próprias barragens de contenção.

As barragens são estruturas construídas ao longo do tempo visando à diluição dos custos no processo de extração mineral, por meio de alteamentos sucessivos. Assim, um dique de partida é construído inicialmente e a partir daí a barragem passa por alteamentos sucessivos ao longo de sua vida útil, podendo ser construídas com material compactado proveniente de áreas de empréstimo, ou com o próprio rejeito, através de três métodos: i) montante, ii) jusante ou iii) linha de centro.

Os métodos de alteamento por montante e pela linha de centro têm vantagens econômicas, pois apresentam redução do custo de implantação e têm o custo de construção e operacional distribuídos no tempo (IBRAM, 2016). Entretanto, são menos estáveis quando comparada com barragens construídas pelo método jusante. Por mostrar-se de maior facilidade de execução e menor custo de implantação e operação o método à montante era preferencialmente adotadas pelas mineradoras brasileiras até o ano de 2019, porém, com os acontecimentos de dois grandes acidentes ocorrido em Mariana (2015) e Brumadinho (2019) esse tipo de construção acabou sendo proibida no Brasil.

4.3.1. Método Montante

O método de alteamento a montante é o mais popular e com menor custo inicial de construção, para áreas com baixo risco de atividades sísmicas. A etapa inicial na execução deste tipo de estrutura consiste na construção de um dique de partida, normalmente de material argiloso ou enrocamento compactado. Após realizada esta etapa, o rejeito é lançado em direção à montante da linha de simetria do dique, formando assim a praia de disposição, que se tornará a fundação e eventualmente fornecerá material de construção para o próximo alteamento. Este processo continua sucessivamente até que a cota final prevista em projeto seja atingida (ARAÚJO, 2006).

O método de montante (Figura 8) para alteamento de barragens de rejeito é considerado o mais econômico em curto prazo, pois permite obter a menor relação entre volumes de areia/lama. Embora seja o mais utilizado pela maioria das mineradoras, o método de montante apresenta um baixo controle construtivo, tornando-se crítico principalmente em

relação à segurança. O agravante neste caso está ligado ao fato de os alteamentos serem feitos sobre materiais previamente depositados e não consolidados. Assim, sob condição saturada, estes rejeitos (granulares) tendem a apresentar baixa resistência ao cisalhamento e susceptibilidade à liquefação por carregamentos dinâmicos e estáticos. Neste método construtivo ainda existe uma dificuldade na implementação de um sistema interno de drenagem eficiente para controlar o nível d'água dentro da barragem, constituindo um problema adicional com reflexos na estabilidade da estrutura (ARAÚJO, 2006).



Fonte: IBRAM (2016)

Segundo Russo (2007) as principais vantagens deste método são:

- Menor custo executivo da obra por não necessitar de material de empréstimo e por necessitar de um menor volume de material para construção do dique, já que o novo barramento é construído sobre o próprio rejeito, visto que os diques subsequentes são construídos com o próprio rejeito depositado na barragem;
- Rapidez e simplicidade na execução dos alteamentos, podendo ser feito pela própria mineradora;
- Menor custo de operação e manutenção quando comparado com os demais métodos.

Como desvantagens Russo (2007) destaca:

- Como os alteamentos subsequentes são feitos sob o próprio rejeito e geralmente em um curto período o material pode ficar pouco consolidado e susceptível à liquefação quando submetido a carregamentos cíclicos ou estáticos;
- Linha freática elevada devido à dificuldade de execução de um sistema eficiente de drenagem, o que pode ter grande influência na estabilidade do maciço além de gerar riscos para formação de canais internos por onde a água percola nas estruturas de

contenção dando início ao processo conhecido como “*piping*”;

- Limitação na altura do maciço, haja vista que sucessivos alteamentos realizados sem um rígido controle pode gerar um círculo de ruptura crítico que pode passar pelo rejeito, diminuindo de forma significativa a resistência do sistema e, por consequência, o fator de segurança da obra.

Apesar de ter sido muito comum e popular até pouco tempo atrás este método construtivo acabou sendo banido pela promulgação da Resolução nº 13 de 2019 (ANM, 2019), criada após a repercussão dos acidentes de Mariana (2015) e Brumadinho (2019). Essa norma estabeleceu a proibição definitiva das barragens de alteamento à montante e determinou prazos para descaracterização das barragens já existentes.

4.3.2. Método a Jusante

No método de jusante, assim como na construção a montante temos a etapa inicial com a execução de um dique de partida, em que os alteamentos subsequentes são realizados para jusante do barramento, desta forma, evita-se que os novos alteamentos tenham como fundação o rejeito previamente depositado e geralmente pouco consolidado. Este processo continua sucessivamente até que se atinja a cota final prevista no projeto. A Figura 9 mostra esquematicamente o processo de alteamento da barragem de rejeito por meios do método de jusante.



Fonte: IBRAM (2016)

De acordo com Klohn (1981), as vantagens envolvidas no processo de alteamento para jusante consistem no controle do lançamento e da compactação, de acordo com técnicas convencionais de construção. Nenhum alteamento ou parte da barragem é construído sobre o rejeito previamente depositado. Além disso, os sistemas de drenagem interna podem ser instalados durante a construção da barragem e prolongados durante seu alteamento,

permitindo o controle da linha de saturação na estrutura da barragem e aumentando sua estabilidade. A barragem também pode ser projetada e construída apresentando a resistência necessária ou requerida, inclusive resistir a qualquer tipo de forças sísmicas, desde que projetadas para tal, já que há a possibilidade de atendimento integral das especificações de projeto.

Klohn (1981) enumera algumas vantagens em adotar o método construtivo de jusante como alternativa para construção de barragens de rejeito:

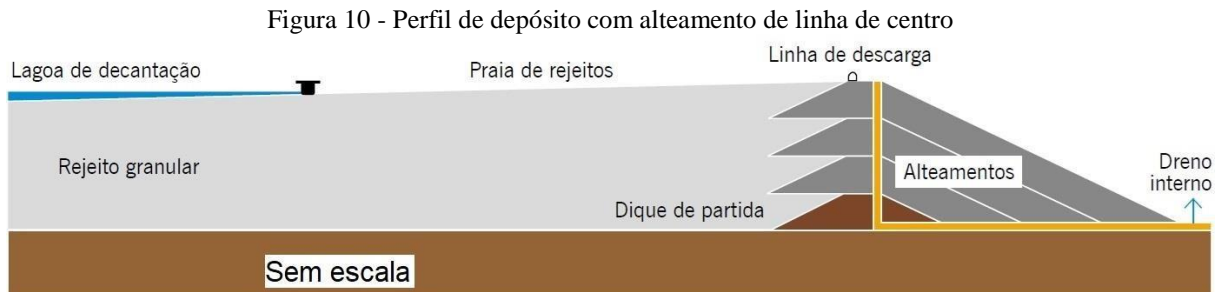
- Toda a barragem fica construída sob fundação que não é constituída de rejeito;
- O processo de lançamento de material, bem como de compactação da barragem pode ser feita por técnicas convencionais de construção, aumentando, desta forma, a segurança do barramento;
- Torna-se possível a execução de um sistema eficiente de drenagem interna que pode ser construído durante todo o processo de alteamento, permitindo um maior controle sobre a linha freática e por consequência uma melhor condição de estabilidade do maciço;
- A estrutura é mais segura e resistente a carregamentos dinâmicos como forças sísmicas;
- Não existem limitações técnicas quanto à altura máxima da barragem.

Embora o método de construção a jusante seja o mais seguro dentre os métodos convencionais, barragens feitas com alteamentos por esse método necessitam de maiores volumes de material para construção, apresentando maiores custos associados ao processo de ciclonagem ou ao empréstimo de material. Além disso, com este método, a área ocupada pelo sistema de contenção de rejeitos é muito maior, devido ao progresso da estrutura para jusante em função do acréscimo da altura (ARAÚJO, 2006).

4.3.3. Método de Linha de Centro

Barragens alteadas pelo método de linha de centro apresentam uma disposição intermediária entre os dois métodos citados anteriormente, apresentando vantagens dos mesmos, ao mesmo tempo em que tenta minimizar suas desvantagens. Os alteamentos são

realizados de forma que a crista de montante não se mova horizontalmente no sentido de montante, mas sim verticalmente conforme apresentado na Figura 10.



Fonte: IBRAM (2016)

Devido a tal fato, torna-se possível a construção de um sistema de drenagem interno que permite o controle da linha freática dentro do maciço. Além disso, o volume de material gasto para a construção da barragem por este método é intermediário, ficando entre o método de montante e jusante.

De uma maneira geral, o método de alteamento por linha de centro pode ser considerado uma solução geometricamente intermediária entre os dois métodos anteriormente descritos, agregando assim vantagens e desvantagens de ambos, porém o comportamento estrutural deste tipo de barragem se encontra mais próximo das alteadas pelo método de jusante (ALBUQUERQUE FILHO, 2004).

A execução de barragens de rejeito alteadas pelo método de linha de centro é relativamente comum em minerações brasileiras e, em geral, a técnica é muito bem-sucedida e os insucessos reportados estão geralmente relacionados a problemas com sistema extravasores enterrados.

4.4. Métodos Alternativos de Disposição de Rejeito

Os processos de espessamento e filtragem são as principais técnicas utilizadas nos métodos alternativos de disposição de rejeito. Métodos alternativos são uma excelente escolha como rota alternativa para a disposição dos rejeitos de minério pois, além de recupera grande parte da água utilizada no processo, que pode ser reutilizada no mesmo, reduz a área de disposição e custos com construção e manutenção de estruturas de contenção. Como métodos alternativos podemos citar: disposição em pasta, disposição de rejeitos desaguados em pilhas,

disposição em cava subterrânea (métodos “corte e enchimento”), disposição em cava à céu aberto e a Codisposição e disposição compartilhada de rejeito e estéreis.

4.4.1. Espessamento e Filtragem Para Produção de Rejeitos Desaguados

A redução do consumo de água nas atividades de mineração pode ter como ponto de partida o gerenciamento dos rejeitos gerados. A disposição de rejeitos em forma de espessados e pastas apresenta grandes vantagens em relação às barragens de rejeito (CHAVES, 2013):

- Menores volumes dispostos, pois o material contém menor quantidade de água;
- As pastas são dispostas em forma de cone, o que permite o escoamento da água das chuvas sobre o mesmo e apenas um pequeno percentual de infiltração.

Segundo Boger (2013), o introdutor do conceito de remover a água de rejeitos antes da sua disposição foi o professor Eli Robinsky, que colocou essa metodologia em prática no Canadá em 1973 e, desde então, essa técnica vem apresentando sucesso e sendo empregada pela indústria mundo a fora. Nesse procedimento são empregados espessadores que separam o sólido do líquido mediante sedimentação de partículas por gravidade. Espessadores são equipamentos largamente utilizados na indústria mineral para adensar polpas quer seja para posterior utilização na usina ou transporte quer seja para recuperar água para reciclo industrial, recuperar sólidos ou solução em operações de lixiviação em casos de processos hidrometalúrgicos.









Existem diversos tipos de espessadores na indústria mineral. Eles diferem entre si pela geometria e forma de alimentação. São equipamentos de alto custo de implantação, de grande volume e que geralmente estão localizados fora da usina. Apesar de o espessamento já ser uma operação utilizada na obtenção da polpa na disposição convencional e também no método de disposição subaérea, é na disposição de rejeito espessado ou em pasta que se atinge o seu maior nível de percentagem de sólidos, já que essa é uma condição essencial na característica do material para que ele não segregue na disposição.

Segundo Portes (2013), de modo a auxiliar o processo de sedimentação, os reagentes mais comuns no processo de espessamento de rejeitos são os floculantes e os coagulantes que

são utilizados para aumentar a aglomeração das partículas sólidas e produzir uma pasta mais espessa. Além dos reagentes, outra importante decisão no momento de se optar por esse método está na escolha do tipo de equipamento que se irá utilizar no processo. Os equipamentos a serem utilizados podem variar com relação à geometria e dependem basicamente das características do rejeito e do nível de adensamento desejado em seu *underflow* (ENGELS, 2006).

A Figura 11 apresenta alguns exemplos de espessadores comumente utilizados no adensamento de polpas de minério de ferro, apresentando a suas formas e principais características (GUIMARÃES, 2011).

Figura 11 - Tipos de espessadores para adensamento de polpas de minério de ferro

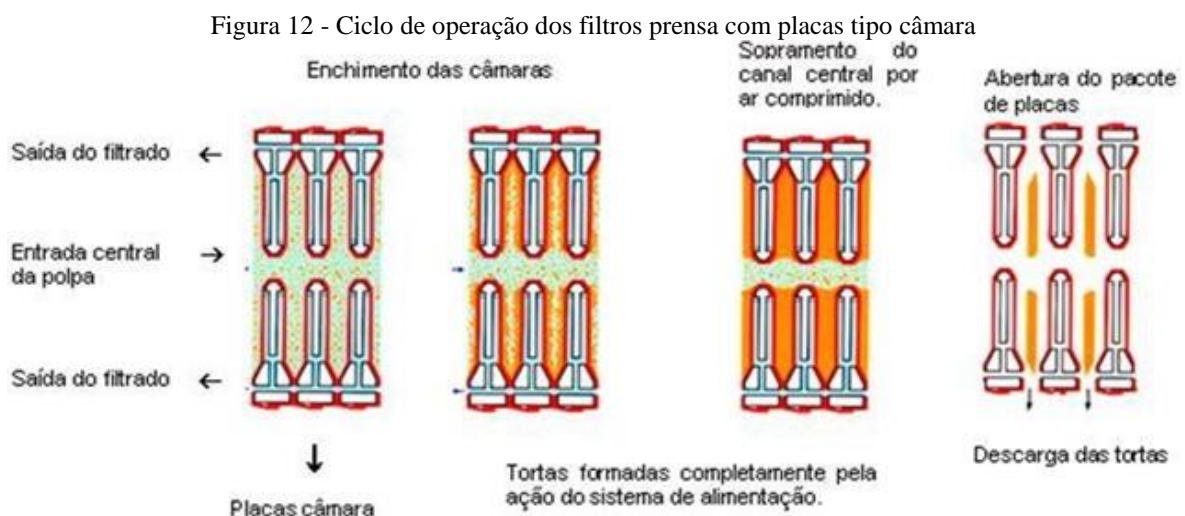
Tipos	Forma	Características
<p><i>convencional</i></p> 		<ul style="list-style-type: none"> - Ação ineficiente do floculante - Grande área - Baixa densidade no <i>underflow</i>
<p><i>High Rate ou High Capacity</i></p> 		<ul style="list-style-type: none"> - Adição de floculante via <i>feed-well</i> (ação eficiente) - Área menor que o <i>Hi Rate</i> - Densidade no <i>underflow</i> similar ao espessador convencional
<p><i>High Density</i></p> 		<ul style="list-style-type: none"> - Altura maior que o <i>High Capacity</i> - Redução da área em relação ao <i>High Capacity</i> - Máxima densidade da polpa no <i>underflow</i>.
<p><i>Deep Cone</i></p> 		<ul style="list-style-type: none"> - Aumento da altura em relação ao <i>High Density</i> - Maior redução da área - Produção de pasta mineral

Fonte: Guimarães (2011)

Outra operação que tem se tornado cada vez mais comum na indústria mineral devido a necessidade na mudança da forma de disposição de rejeitos é a filtragem. Pode-se definir a filtragem como uma “operação unitária de separação dos sólidos contidos em uma suspensão aquosa mediante a passagem da polpa através de um meio filtrante, que retém as partículas sólidas e permite a passagem do líquido” (GUIMARÃES, 2011). A filtragem pode ocorrer pela ação da gravidade, vácuo, pressão externa, força centrífuga e vácuo e pressão em conjunto (hiperbárica). Existem vários tipos de filtro e cada um deles dispõe de um desses mecanismos para realizar a operação. Alguns modelos de filtros realizam filtragem por batelada, outros de modo contínuo (mais comum na indústria mineral). Para realizar a separação sólido líquido os filtros devem realizar as seguintes tarefas: suportar o meio poroso e a torta, transportar a torta do ponto de alimentação ao ponto de descarga, permitir a passagem do filtrado e conduzi-lo ao seu ponto de descarga, manter a pressão diferencial entre os dois lados do meio filtrante. Muitos modelos usados nas indústrias química e metalúrgica dispõem da função de lavagem da torta sobre o filtro. A lavagem da torta não é comum na indústria mineral, pois o alvo são os sólidos, diferentemente das operações onde o interesse está no filtrado que pode ser, por exemplo, um licor de metais lixiviados (CHAVES, 2004).

Os equipamentos utilizados na indústria mineral realizam o processo de filtragem em ciclos constituídos, de modo geral, por três etapas conforme mostra a Figura 12:

- Formação da torta: consiste na acumulação do meio na superfície do meio filtrante;
- Secagem da torta: a água contida na torta é removida através do meio filtrante;
- Descarga: a torta desaguada é descarregada.



Fonte: Guimarães (2011)

Estas etapas constituem o ciclo de filtração. Quando ocorre lavagem da torta ela também configura parte do ciclo de filtração. Os principais equipamentos utilizados na indústria mineral são filtros de discos, filtro horizontal de correia, filtro plano ou de mesa, filtro prensa e filtro de tambor.

4.4.2. Disposição de Rejeito Espessados e/ou em Pasta

Uma mistura ‘sólido – líquido’ pode apresentar diferentes estados em função das proporções relativas das fases presentes na mistura. Dependendo da magnitude e do processo de desaguamento (retirada de água) da polpa de rejeito fino, oriunda do processo de beneficiamento do minério, os rejeitos podem apresentar diferentes estados físicos (polpa, pasta ou massa tipo torta), com comportamentos geotécnicos distintos (GOMES, 2006).

Segundo Guimarães (2011), as operações de separação sólido-líquido são comumente empregadas pelas seguintes razões:

- Reutilização e recuperação da água no processo;
- Redução da umidade do rejeito para transporte e disposição;
- Adequação do produto para posterior transporte e comercialização;
- Atingir o percentual de sólidos ideal para operações posteriores.

O estado físico dos rejeitos depende do processo de remoção da água (desaguamento) a eles aplicados durante o beneficiamento do minério. Segundo Gomes (2006) a consistência de polpa, pasta ou torta, se dá de acordo com o teor de sólidos presente. A Tabela 1 apresenta o percentual de sólidos esperado para cada estado físico dos rejeitos segundo WATSON *et al.* (2010).

Tabela 1 - Estados físicos dos rejeitos e correspondente teor de sólidos esperado

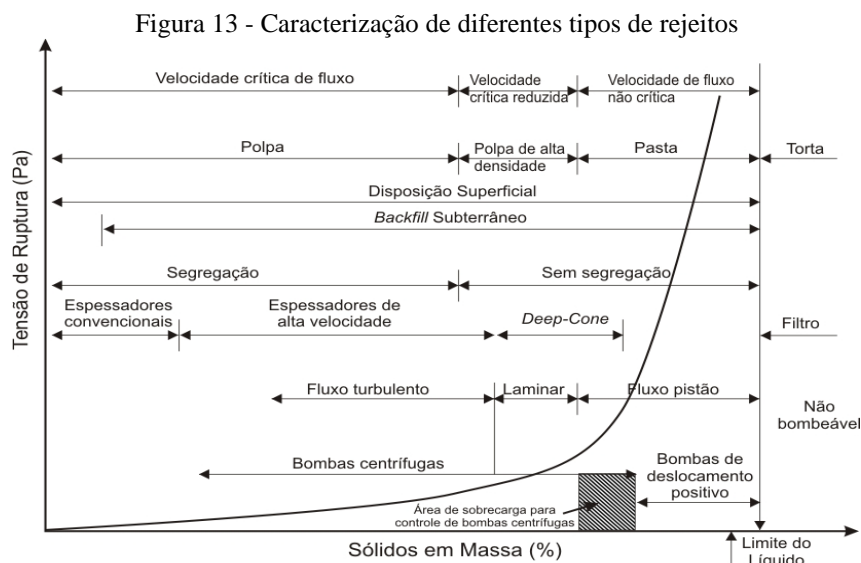
Tipo de Rejeito	Teor de sólidos (%)
Polpa	25 a 45
Espessados	50 a 70
Pasta	70 a 85
Torta	> 85

Fonte: Watson *et al* (2010)

Segundo Gomes (2004) citado por Peixoto (2012), dentro desse contexto de teor de sólidos e consistência, os rejeitos podem ser classificados da seguinte maneira:

- Rejeito em polpa (*slurry*): rejeito contendo baixo teor de sólidos e que apresente baixa ou nenhuma resistência ao transporte por gravidade ou via bombeamento;
- Rejeito espessado (*thickened tailings*): rejeito parcialmente desaguado e que apresenta consistência semelhante a polpa, sendo possível o transporte por bombeamento;
- Rejeito em pasta (*paste tailings*): rejeito espessado que apresenta consistência de pasta e que não flui naturalmente e não drena grande quantidade de água quando disposto no depósito final;
- Rejeito filtrado úmido (*wet cake tailings*): rejeito com aspecto de uma massa saturada ou quase saturada não bombeável;
- Rejeitos filtrados secos (*dry cake tailings*): rejeito com aspecto de uma massa não saturada não bombeável, contendo grau de saturação geralmente entre 70% e 85%.

Landriault (2002), correlaciona a caracterização e classificação dos diferentes tipos de misturas ‘sólido – líquido’ através de um gráfico esquemático mostrando as tensões de escoamento em função da porcentagem de sólidos da mistura (Figura 13), neste gráfico é destacado os diferentes estados de consistência de rejeitos: polpa, polpa de alta densidade, pasta e torta, bem como alguns dos equipamentos utilizados nas tarefas de desaguamento, bombeamento e filtração dessas misturas, as características de segregação das partículas sólidas e os regimes e velocidades de fluxo possíveis.



Fonte: adaptado de Landriault (2002)

A tecnologia de disposição de rejeitos espessados e/ou em pasta tem se apresentado como uma alternativa muito eficaz no que se refere à segurança das estruturas formadas por estes materiais, assim como quando o objetivo é a recuperação de água (PORTES, 2013). Apesar de no Brasil este método ainda ser pouco utilizado em países como Peru, Canadá e Austrália o emprego dessa técnica tem surtido grande sucesso e garantido um ganho ambiental durante o processo, além de uma redução de custos na desativação da barragem e na recuperação de água. Segundo Portes, quando comparados com a técnica convencional de disposição em polpa os rejeitos espessados possuem dentre outras vantagens melhores características de estabilidade e permeabilidade do rejeito, menor área ocupada e menores riscos de acidentes, dependendo ainda da qualidade da construção e da gestão dessas estruturas. Mesmo em caso de ruptura, o fluxo seria menor e mais facilmente controlado, tornando-se um problema local.

Além disso, esses métodos requerem estruturas de contenção menos robustas que na disposição convencional e conseqüentemente mais baratas, isso devido à elevação dos valores de resistência ao cisalhamento a partir do espessamento. Pode-se destacar também que a menor quantidade de água e os maiores ângulos de praia alcançados nesses métodos proporcionam maior segurança ao depósito final de rejeitos.

Segundo Gomes (2009), os rejeitos espessados podem ser depositados tanto em áreas planas quanto em terrenos irregulares. Em se tratando de vales, a pasta viscosa tende a fluir e a se adensar, conformando à topografia do terreno ou sendo barrada por um dique de contenção. Em áreas planas, a disposição do material tende a formar um depósito cônico de taludes uniformes e suaves (Figura 14).

Figura 14 - Formação de cone sobre o rejeito depositado na Mina de Bulanhanhu



Fonte: Franca (2002)

Segundo Boger (2013), a disposição do rejeito mineral na forma de pastas apresenta muitas vantagens, como:

- Reutilização da água no processo de mineração;
- Maximização da densidade dos rejeitos, facilitando seu armazenamento;
- Minimização da área necessária para estoque da lama;
- Torna o resíduo adequado para o preenchimento (*backfill*) de minas;
- Redução da necessidade de drenagem;
- Diminuição da probabilidade de contaminação das águas subterrâneas;
- Redução do risco de falhas nas barragens.

Engels (2006) apresenta no Quadro 1 um comparativo onde faz uma análise das principais vantagens e desvantagens do método de disposição de rejeitos espessados ou em pasta.

Quadro 1 - Vantagens e desvantagens da disposição de rejeitos espessados e/ou em pasta

Vantagens	Desvantagens
Não necessita de grande barragem inicial.	Maior consumo de energia.
Menores custos de reabilitação e de Fechamento.	Requer mão de obra especializada.
Baixa quantidade de água incorporada ao rejeito e baixa permeabilidade, limitando a infiltração e reduzindo o volume de percolação na pasta.	Custos operacionais e associados à infra-estrutura necessária para instalação de bombas de deslocamento e tubulações de transporte são relativamente altos.
Maior densidade e estabilidade das estruturas de disposição.	Condições topográficas podem inviabilizar o uso da tecnologia de espessamento de rejeitos quando comparados ao método de disposição convencional.
Menor susceptibilidade à liquefação e rupturas catastróficas.	Alguns espessadores de pasta não atingem a concentração esperada de sólidos, gerando problemas operacionais.
Menor potencial de contaminação das águas subterrâneas.	A reologia do rejeito deve permitir a aplicação da técnica de espessamento.
Maior recuperação dos reagentes utilizados no processo de tratamento.	A taxa de produção deve ser pertinente com a tecnologia de espessamento adotada.

Fonte: Engels (2006)

O principal desafio dessa metodologia está na produção, manuseio e transporte dessa pasta com elevada concentração de sólidos utilizando o mínimo de custo e o máximo de eficiência possível, e em realizar uma descarga desse material de forma a permitir um bom espalhamento sobre a superfície de disposição a fim de possibilitar eficiente consolidação. Assim sendo, o sucesso dessa técnica está na operação de desaguamento e na exploração e compreensão da reologia desses rejeitos.

4.4.3. Disposição em Pilhas Controladas /Rejeitos Filtrados

Segundo Portes (2013), a filtragem de rejeitos é um processo que consiste na separação de sólidos e líquidos por meio da passagem da polpa em um meio filtrante, que é capaz de reter partículas sólidas e permitir a passagem do líquido. Para que a filtragem aconteça necessita-se que uma força incidente atue sobre as partículas, esta força pode ser alcançada através da gravidade, vácuo, pressão ou centrifugação (GUIMARÃES, 2011). A Figura 15 apresenta os tipos de filtragem, suas características principais, os modelos de filtro e fornecedores para cada tipo.

Figura 45 - Mecanismos de filtragem e os principais fornecedores

Tipos	Características	Modelos de Filtros	Principais Fornecedores
Filtragem a vácuo	Criada uma pressão negativa debaixo do meio filtrante	Filtro de tambor, de disco convencional, filtro horizontal de mesa e filtro horizontal de correia	Andritz, FLSmidth, Larox, Delkor, Gaudfrin
Filtragem sob pressão	Uma pressão positiva é aplicada na polpa	Filtro prensa horizontal, filtro prensa vertical	Andritz, FLSmidth (Pneumapress), Larox,
Filtragem centrifuga	Utiliza a força centrifuga para forçar a passagem do líquido	Centrifugas verticais e Decanters	Andritz, GEA (Westfalia), Alfa Laval
Filtragem hiperbárica	Em que se combinam vácuo e pressão	Filtro de disco encapsulado ou hiperbárico	Andritz , Bokela, Gaudfrin
Filtragem capilar	Utiliza a ação de capilares de meios cerâmicos porosos para efetuar o desaguamento	Ceramec	Larox

Fonte: Guimarães (2011)

A Figura 16 traz uma foto da pilha de rejeito filtrado sendo construída na Mina Cerro Lindo, no Peru.

Figura 16 - Pilha de rejeito filtrado (*Dry stack*) em operação na Mina Cerro Lindo, Peru



Fonte: adaptado de Golder Associates (2015)

Os rejeitos podem ser filtrados a seco (*dry cake*) ou a úmido (*wet cake*). O rejeito filtrado a seco apresenta de 70 a 85% de grau de saturação. O rejeito filtrado a úmido apresenta grau de saturação próxima de 100% (DAVIES, 2011).

Uma das vantagens que a filtragem de rejeitos proporciona é o aumento da recuperação de água de processo da usina, que reduz o consumo de água nova utilizada na planta, sendo uma grande vantagem em regiões na qual a escassez de água é um fator limitante ao desenvolvimento da atividade mineral. Além da dificuldade da escassez de água e licenciamento de barragens, existe, também, uma dificuldade adicional nos novos projetos de aquisição de outorga para direito de uso de recurso hídrico.

A disposição dos rejeitos em pilhas pode ser uma alternativa viável, principalmente quando se pensa na redução da área necessária para disposição de rejeito que reduz os custos e minimizam os impactos ambientais. Por mais que seja um método que possui altos custos operacionais, deve-se atentar a possibilidade de amortização destes custos na fase de encerramento do empreendimento (PORTES, 2013). Davies (2011) apresenta uma lista de situações nas quais o método de disposição de rejeito filtrado é indicado, destacando-se: regiões de clima árido, onde a conservação e economia de água são essenciais; locais que apresentam alta atividade sísmica, onde o método convencional é contraindicado; regiões de

clima muito frio, onde o manejo de água se torna muito complicado no inverno; e locais com topografia que inviabilize a construção de barragens. No Quadro 2 são apresentados as vantagens e desvantagens deste método.

Quadro 2 - Vantagens e desvantagens da disposição de rejeitos em pilhas secas / rejeitos filtrados

Vantagens	Desvantagens
Possibilidade de recuperação e reutilização da água.	Maiores custos operacionais e de investimento (é importante ressaltar que os custos relacionados à filtragem de rejeitos diminuiu nos últimos 5 anos).
Reduz os riscos de falha e ruptura associados a métodos convencionais, como barragens de rejeito.	A geração de poeira é um problema comum em climas áridos e pode ocorrer de forma relativamente rápida após o descarte de rejeitos devido ao baixo teor de umidade do material.
O empilhamento a seco é adequado para áreas de alta atividade sísmica, pois a construção de estruturas de contenção são evitadas.	Não existe opção para armazenar água dentro de uma instalação de pilha seca. Uma instalação de rejeitos convencional, projetada para armazenar água, pode fornecer uma operação para armazenamento de água de chuva para manter as operações durante os meses secos do ano.
Adequado quando materiais de construção disponíveis para construção de estruturas de contenção são limitados.	É necessária gestão de contorno da área para evitar a acumulação de água e proporcionar fácil remoção da água superficial (devido a precipitação) para evitar a formação de lagoas e erosão da pilha através dos canais de escoamento.
A reabilitação progressiva é possível, reduzindo o custo de fechamento por determinado tempo.	Sistemas de desvio são necessários para evitar a inundação da instalação de empilhamento a seco.
A contaminação da água subterrânea por infiltração é reduzida ou anulada	É geralmente mais adequado para operações de baixo rendimento devido aos custos de equipamentos e gerenciamento operacional de uma grande planta de filtragem.
Os rejeitos filtrados permitem uma melhor recuperação de metais dissolvidos e produtos químicos utilizados no processo (por exemplo, ouro e cianeto).	Flutuações sazonais são uma consideração importante no projeto de uma instalação de pilha seca, pois um ambiente de alta pluviosidade pode criar problemas de gerenciamento diário de equipamentos de transporte e compactação.

Fonte: Engels (2006)

No Brasil, sua aplicação é recente, mas este método já é largamente usado no mundo, em países como Chile, Austrália, Estados Unidos e Canadá (SILVA, 2016).

A Mineração Casa de Pedra, mineração de ferro mais antiga em operação no Brasil (início em 1913), é um empreendimento pertencente à Companhia Siderúrgica Nacional – CSN, localizado no município de Congonhas, a cerca de 70 Km de Belo Horizonte, no estado de Minas Gerais. A mineração Casa de Pedra contém em seu complexo uma das maiores barragens de rejeito localizadas em área urbana do mundo, com capacidade para 50 milhões de metros cúbicos. A proximidade entre barragem e área urbana é visível e tem como consequência uma evidente preocupação, com relação à segurança, por parte de moradores do município e representações governamentais. Buscando mitigar esse problema, em agosto de

2018 teve início a operação de filtragem de rejeito para disposição em pilhas do rejeito, de maneira a permitir a continuidade e expansão da produção de minério sem que seja necessária a utilização de barragens para conter o rejeito (ALVES, 2020).

Alves (2020) também catalogou as principais pilhas de rejeito em operação no Brasil, conforme mostrado no Quadro 3.

Quadro 3 - Pilhas de Rejeito projetadas ou em operação no Brasil

Empreendimento	Local	Tipo de Minério	Empresa
Mina de Cuiabá	Sabará-MG	Ouro	AngloGold
Mina Corrêgo do Sítio	Santa Barbara-MG	Ouro	AngloGold
Planta de Queiroz	Nova Lima-MG	Ouro	AngloGold
Mina de Mirafá	Mirafá-MG	Bauxita (beneficiamento)	CBA
Minas de Roça Grande	Caeté-MG	Ouro	Jaguar
Mina de Itabirito	Itabirito-MG	Ferro	Herculano
Planta de Ouro Preto	Ouro Preto-MG	Bauxita/alumina	Hindalco
Complexo de Germano	Mariana-MG	Ferro	Samarco
Minas Casa de Pedra	Congonhas-MG	Ferro	CSN
Projeto Aripuanã	Aripuanã-MT	Zinco, Cobre e Chumbo	Nexa
Unidade Vazante	Vazante-MG	Cobre e Zinco	Nexa
Mina Pau Branco	Brumadinho-MG	Ferro	Vallourec

Fonte: adaptado de Alves (2020)

Gomes et al. (2016) apontam que o investimento necessário para a implantação de uma planta de filtragem pode ser inferior ao investimento necessário para a disposição convencional de rejeitos. Os autores verificaram que o custo para realização do alteamento da barragem de rejeitos da Mina Pau Branco (da ordem de US\$ 35 milhões) era sete vezes o total de investimento necessário para a instalação da planta de filtragem de rejeitos que, desde 2015, opera na referida mina.

Segundo Crystal et al. (2018), o controle de OPEX no manejo de rejeito filtrado exige que ocorra uma interface próxima e uma grande integração entre proprietários, projetistas, operadores e fornecedores de equipamentos nas etapas de planejamento e execução e que devido aos avanços tecnológicos nos equipamentos de filtragem nos últimos anos, houve uma notável diminuição da diferença entre o OPEX do método convencional e o OPEX do método de disposição de rejeito filtrado

Seguindo a discussão a respeito do capital requerido para realização do método de disposição de rejeitos filtrados, MEND (2017) traz a Tabela 2, comparando os custos operacionais estimados para a aplicação das técnicas mais comuns de disposição de rejeitos.

Tabela 2 – Custos operacionais (em dólar por tonelada de rejeito) para diferentes técnicas de desaguamento (não estão incluídos os custos de capital e de fechamento) (MEND, 2017)

Tecnologia de desaguamento	Custo típico de processamento e de transporte (US\$/t)	Custo típico de gestão das estruturas de contenção e da água (US\$/t)	Total (US\$/t)	Margem de custo (US\$/t)
Convencional (não desaguado)	0,20	1,00	1,20	0,50 a 2,50
Espessado	0,30	1,00	1,20	0,50 a 2,50
Espessado de alta densidade	0,50	0,90	1,50	0,75 a 2,50
Pasta	1,50	0,50	2,00	2,00 a 8,00
Filtrado	5,00	0,20	5,20	4,00 a 12,00

4.4.4. Disposição Subterrânea

A disposição de rejeito em cavas subterrâneas já é uma prática largamente usada na mineração subterrânea. Destinado a rejeitos de cunho permeável, alta rigidez e pouca compressibilidade, esta técnica é indicada para minérios cujo o potencial risco ao meio ambiente é baixo, visto que, materiais contaminantes podem afetar águas e solos.

Nesta técnica o rejeito é utilizado para preenchimento de cavidades exauridas e serve também de preenchimento e suporte para as operações mineiras em alguns métodos de lavra como *cutt and fill* (corte e enchimento) e *bench stoping*. Nesta aplicação a polpa é chamada de *backfill* e por vezes pode receber algum tipo de aditivo para conferir a capacidade de suporte.

Figueiredo (2007) afirma que a disposição de rejeito em abertura subterrânea, seja na forma de polpa, pasta ou até mesmo material consolidado, geralmente é feita concomitantemente com o método de lavra chamado de corte e enchimento, onde o material preenche os realces gerados pela exploração do minério. Nesse caso, são praticadas duas técnicas de preenchimento de minas subterrâneas, escolhidas em função da demanda da operação. A primeira corresponde à necessidade de preenchimento para formar um novo piso, a ser utilizado para desmontar a fatia de minério imediatamente acima da área lavrada. Neste caso, o preenchimento ocorre obrigatoriamente junto com a lavra do minério e pode ser feito com a utilização dos rejeitos misturados com estéril e areias (*backfill* ou *paste fill*). A segunda técnica se aplica quando o preenchimento da câmara ou realce é necessário para garantir a manutenção permanente da estabilidade do maciço rochoso. Neste caso o preenchimento pode se dar durante o processo de lavra ou durante o fechamento da mina, podendo ser realizado com argamassa constituída de rejeito (*paste fill*) e/ou estéril, areia e cimento, para se obter melhores propriedades geotécnicas para a mistura.

Para Engels (2006), uma vantagem do método é o fato de que os rejeitos são armazenados no subsolo, o que é considerado mais ecologicamente correto, já que não são necessárias grandes áreas para o armazenamento de rejeitos na superfície. Além disso, tem-se a redução de problemas associados à geração de poeira, impactos visuais, contaminação de águas superficiais e riscos de inundação provindos de falhas associadas às instalações de armazenamento de rejeitos. A seguir, na figura 17, uma breve comparação entre as vantagens e desvantagens deste método.

Figura 17 - Vantagens e desvantagens da disposição subterrânea de rejeitos

Vantagens	Desvantagens
Fornecer suporte para a mina.	Altos custos.
Pilares ricos podem ser extraídos.	Mão de obra extra e gerenciamento de equipamentos.
Reduz o risco de desmoronamento de rochas, já que as forças não estão focadas nos pilares e suportes.	Os rejeitos precisam ser altamente desidratados, geralmente deve-se obter a consistência de pasta (alto OPEX para produção e transporte de rejeitos de alta densidade).
Melhora o circuito de ventilação na mina.	Significativo tempo de espera necessário em estratégias de extração e desenvolvimento da mina.
Impede ruptura de teto derivados do desmonte.	Escoamento de efluentes de rejeitos em águas subterrâneas, portanto, possível contaminação.
Ajudam a minimizar a contaminação de águas subterrâneas.	Riscos de liquefação dos rejeitos se os níveis de saturação forem altos e se vibrações sísmicas estiverem presentes.
As taxas de oxidação para rejeitos piritosos podem ser reduzidas.	Bombas especiais para descarga de rejeitos de alta densidade são geralmente necessárias (alguns fabricantes têm altos tempos de espera).
Na maioria dos casos, permite obter um aumento na recuperação da água dos rejeitos quando comparado ao descarte convencional.	Pode-se ocorrer a diluição de poluentes metálicos, oxidação do enxofre e produção de ácidos, devido a preenchimentos de má qualidade ou gerenciamento de extração.

Fonte: Engels (2006)

Texeiras (2018) cita que a Carbonífera Catarinense, localizada no município de Lauro Muller/SC, emprega o método de Câmaras e Pilares com a detonação por explosivos de forma a fragmentar o carvão na Mina Bonito I. Após o beneficiamento do carvão, parte do rejeito é utilizado como *rockfill* e transportado para o preenchimento das galerias, onde é disposto a uma distância entre 20 cm e 30 cm do teto das galerias a fim de contribuir com o confinamento dos pilares. A exemplo deste método, tem-se a Mina Buick localizada próximo

a cidade de Boss, Missouri, nos Estados Unidos. Responsável pela extração de chumbo, cobre e zinco, esta mina utiliza o método de lavra por câmaras e pilares com enchimento (*backfill*) de dolomita de pedreira (Tesarik et al., 2003,)

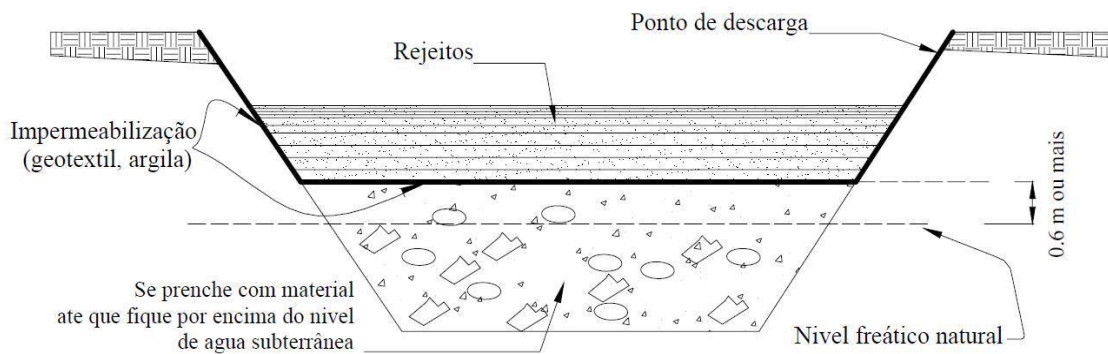
Outro exemplo é Mina Santa Isabel, em Itabirito, Minas Gerais, que extraía ouro de veios de quartzo utilizando o método *cut and fill*. Para o enchimento dos espaços vazios, utilizava-se enchimento hidráulico (*backfill*) proveniente dos rejeitos gerados na planta de beneficiamento, em alternância com o enchimento do tipo *rockfill*, com fragmentos de espessuras entre 0,80 m a 1,00 metro (Silva, 2017).

4.4.5. Disposição em Cava à Céu Aberto

Segundo Portes (2013), a disposição em cava a céu aberto também conhecida como “disposição em pit”, consiste em se dispor rejeito em minas exauridas ou naquela sem que ainda haja extração de minério. Trata-se na prática do lançamento da polpa de rejeitos nas cavas a céu aberto, com a finalidade de reduzir a disposição na barragem de rejeito existente e eliminar a implantação de nova barragem ou aumentar a vida útil da barragem existente. Esta prática traz vantagens ambientais para a barragem existente tais como: maior capacidade do reservatório da barragem; não provoca saturação do dique; menores riscos a jusante e melhores possibilidades de revegetação no fechamento da barragem.

As figuras 18 e 19 ilustram exemplos do método de disposição de rejeito à céu aberto.

Figura 18 - Exemplo do método de disposição de rejeito à céu aberto



Fonte: Ritcey (1989)

De acordo com Portes (2013), as vantagens e desvantagens deste método são:

Vantagens:

- A facilidade de recuperação das áreas lavradas concomitante ao avanço da lavra;
- Redução de impactos ambientais e visuais;
- Redução de riscos;
- Minimização de custos operacionais.

Desvantagens:

- Logística de extração de minério devido à construção de estruturas de contenção de rejeitos dentro da cava;
- Pouco volume disponível para disposição de rejeitos dado o grande volume ocupado pela estrutura de contenção (elevado desnível da cava);
- Problemas de percolação e estabilidade.

Figura 19 - Disposição em cava a céu aberto



Fonte: Lozano (2006)

Este método é muito atrativo, uma vez que a abertura da cava pode ser preenchida de forma muito mais econômica do que em outros métodos de disposição de rejeitos em superfície. Além disso, os rejeitos não necessitam de paredes de retenção, eliminando os riscos associados à instabilidade (EPA, 1994).

Na região conhecida como Quadrilátero Ferrífero na cidade de Mariana-MG está localizado a unidade de lavra e beneficiamento do minério de ferro do complexo de Germano, pertencente a Samarco Mineração S.A com uma área de mais de 7000km². Segundo Alves (2020), o projeto de retomada das operações de exploração e beneficiamento de minério de ferro no Complexo Germano ocorrido depois do acidente em 2015 prevê que 80% do rejeito total (parte arenosa) será filtrado e empilhado enquanto que o restante do rejeito total (composto por lama) será depositado na cava de Alegria Sul, já exaurida.

4.4.6. Codisposição e Disposição Compartilhada de Rejeito e Estéreis

Com a crescente dificuldade para liberação ambiental de novas áreas para disposição dos resíduos da mineração, a técnica de disposição dos resíduos em um mesmo local tornou-se uma alternativa bastante viável. A técnica é definida como codisposição, quando se misturam os rejeitos ou rejeito e estéril para posterior disposição. Quando estéreis e rejeitos não são misturados, mas somente dispostos em um mesmo local, a técnica recebe o nome de disposição compartilhada (SILVA, 2014). Esta disposição conjugada de rejeitos e estéreis (Figura 20) num mesmo espaço físico pode ser feito de forma distinta para os resíduos (disposição compartilhada) ou envolver uma mistura destes resíduos, previamente ou efetivada no próprio ambiente da disposição (codisposição) (PEIXOTO, 2012).

Figura 20 - Disposição compartilhada de estéreis e rejeitos na cava exaurida de Cauê



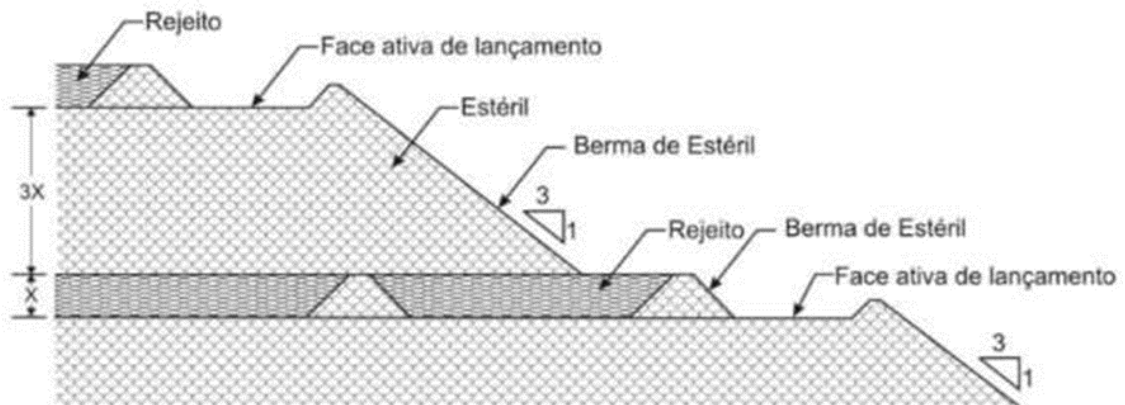
Fonte: Galbiatti (2006)

Segundo Silva (2014), as técnicas geralmente aplicadas para disposição compartilhada compreendem células para disposição de rejeito, disposição de rejeito em finas camadas e injeção dos rejeitos nos depósitos dos estéreis.

Células de rejeitos em depósito de estéril

Compreende a construção de diques de estéril atuando como células independentes receptoras de rejeitos (Figura 21). Essas células são, então, preenchidas em diferentes fases, de tal modo que enquanto uma está sendo formada, a outra estará em processo de secagem e uma terceira em processo de construção. Após o adensamento e ressecamento do rejeito, o estéril é lançado sobre a célula consolidada, reiniciando-se, assim, o processo (SILVA, 2014).

Figura 21 - Bacias de rejeito construídas no depósito de estéril

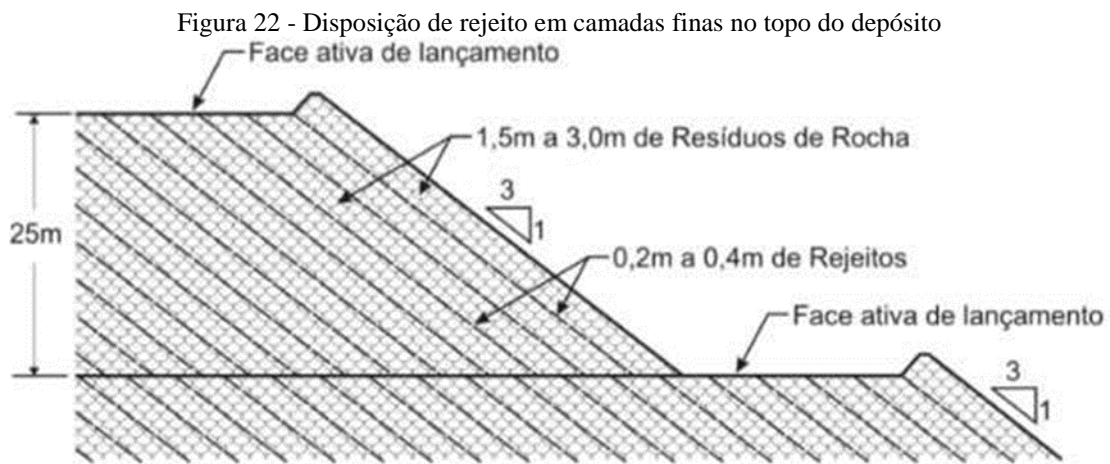


Fonte: modificado de Leduc e Smith (2003)

As vantagens deste método são os baixos custos operacionais se comparado aos outros métodos de codisposição, entretanto, deve-se atentar a construção de diques e formação de lagoas de forma a impedir a poropressões e o comprometimento da estabilidade dos taludes.

Disposição de rejeitos e estéreis em camadas finas independentes

É uma alternativa que envolve a disposição alternada entre camadas de estéril e rejeito, com o propósito de promover a infiltração do rejeito nas camadas de estéreis, permitindo-se, desta forma, a dissipação dos excessos de poropressões induzidas nos rejeitos (Figura 22) (SILVA, 2014).



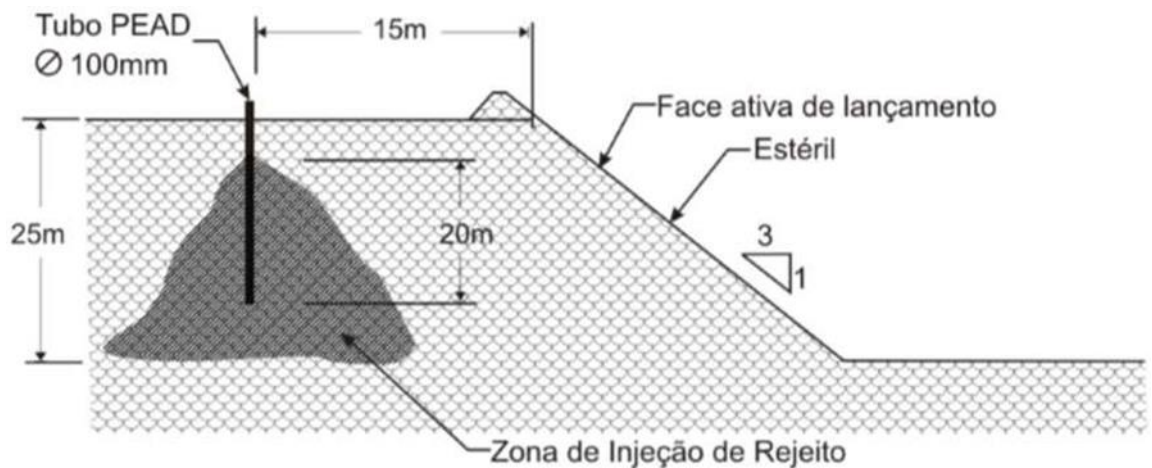
Fonte: modificado de Leduc e Smith (2003)

Este método tem a desvantagem de requerer equipamentos para mistura dos rejeitos e estéreis e para acerto das camadas e face dos taludes, mas por outro lado, apresenta flexibilidade e controle da mistura do material.

Injeção dos rejeitos nos depósitos dos estéreis

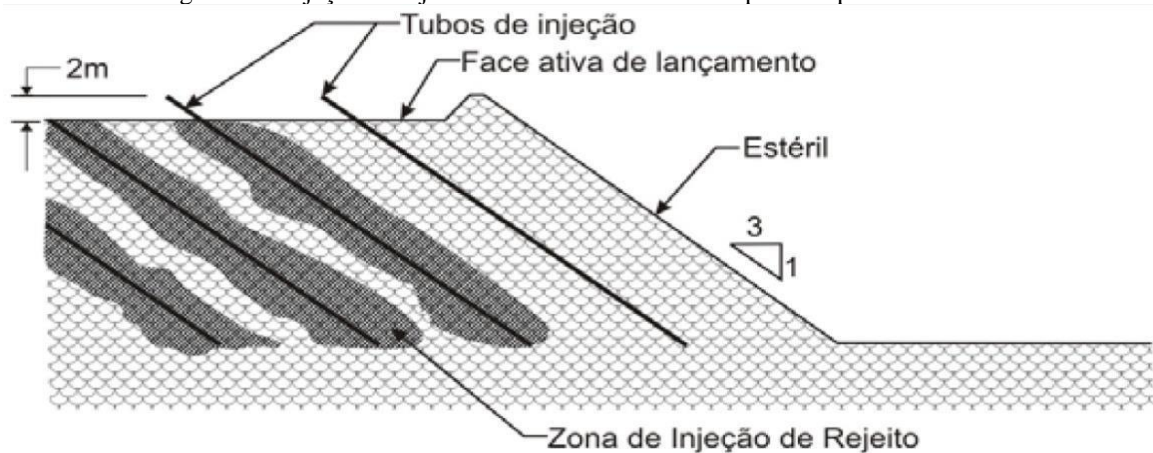
Implica a injeção de rejeitos no depósito de estéril por meio de perfurações, verticais ou inclinadas, formando uma malha de furos na superfície das pilhas (Figuras 23 e 24). Para que esta operação seja possível é necessário que o rejeito seja disposto espessado ou na forma de pasta e que se disponha de equipamentos para perfuração e injeção (SILVA, 2014).

Figura 23 - Injeção de rejeito em furos verticais no topo do depósito de estéril



Fonte: modificado de Leduc e Smith (2003)

Figura 24 - Injeção de rejeito em furos inclinados no topo do depósito de estéril



Fonte: modificado de Leduc e Smith (2003)

Tem como desvantagem a necessidade de bombas de alta pressão para que os rejeitos penetrem adequadamente no depósito. Uma vantagem é que não necessita de equipamentos móveis para manuseio do material.

A principal vantagem do método de codisposição é a possibilidade de melhoria nas condições de resistência e drenabilidade do rejeito, redução do potencial de drenagem ácida do estéril (quando associados a sulfetos) e diminuição do risco de ruptura de depósitos, já que o método geralmente não requer construção de instalações de contenção (FIGUEIREDO, 2007).

A principal desvantagem do método é o controle da estratégia de disposição, de forma a otimizar a mistura de resíduos grossos e finos, visto que a estabilidade do depósito pode vir

a ser comprometida caso as proporções de rejeitos adicionados ao depósito de estéril não sejam as ideais (DPI, 2003).

Já Alevan *et al* (2016) concluíram, em seu trabalho, que os métodos de disposição compartilhada e codisposição são muito atrativos, pois ocupam uma área menor. Porém, ressaltaram que se deve verificar os estados de estabilidade dessas estruturas de depósito, uma vez que a presença de variados materiais pode levar à ruptura.

Como exemplo deste método podemos citar a Mina Pau Branco que pertence à empresa Vallourec e está localizada na Serra da Moeda, Município de Brumadinho, no limite com o município de Nova Lima, próxima à Lagoa dos Ingleses. A extração de minério de ferro nesta mina ocorre desde o início da década de 1980. A Mina Pau Branco começou a realizar a disposição de rejeitos filtrados em 2015 e é considerada a primeira mina a utilizar esse método em rejeitos de minério de ferro. O material filtrado é carregado e então transportado para uma antiga pilha de estéril, na qual é realizada disposição tanto de rejeito quanto de estéril, por meio do método conhecido como codisposição (ALVES, 2020).

5. DISCUSSÃO

Com base na revisão bibliográfica considerada neste trabalho, observa-se que a principal forma de disposição do rejeito ainda é através das barragens de contenção. Os custos são considerados relativamente mais baixos em barramentos convencionais quando comparados com os métodos alternativos de disposição de rejeitos, especialmente devido à possibilidade de utilização do próprio rejeito em sua construção e alteamentos. O principal fator de risco relacionado à estabilidade das barragens de contenção de rejeitos refere-se, basicamente, ao confinamento da água residual do processo de beneficiamento, que a depender de determinadas condições e características pode tornar as estruturas instáveis e passíveis de ruptura.

No método convencional de disposição de rejeito as barragens de contenção podem ser construídas pelas técnicas de montante, jusante ou linha de centro. Dentre os métodos de disposição de rejeito convencional a técnica de montante é a que possui o menor custo para construção inicial, entretanto é também a que apresenta o maior risco do ponto de vista de segurança. Já o método à jusante é considerado o mais seguro, porém, é o mais caro também, visto que dentre os métodos é o que utiliza a maior proporção de material na sua construção. O método de linha de centro apresenta uma disposição intermediária entre os dois métodos citados anteriormente, apresentando vantagens dos mesmos, ao mesmo tempo em que tenta minimizar suas desvantagens. Mesmo com o desenvolvimento tecnológico e aumento de investimento em dispositivos para controle de estabilidade e segurança nas barragens de rejeito acidentes vêm ocorrendo no Brasil e no mundo nos últimos anos, por estes fatos, tem-se buscado cada vez mais por alternativas aos métodos de disposição de rejeitos convencionais.

Os métodos de disposição de rejeitos espessados, em pasta ou filtrados apresentam-se como boa alternativa, estes métodos aumentam a recuperação de água de processo, diminuem a área requerida para disposição de material e possuem estruturas mais seguras e com menor risco de acidente. A disposição de rejeitos filtrados economiza quantidades significativas de água, mas a disposição de rejeitos espessados e em pasta nem tanto quando comparado ao método de disposição convencional, fazendo com que a disposição de rejeitos filtrados seja muito mais atraente neste aspecto. A disposição de rejeitos filtrados pode proporcionar uma maior densidade e eficiência no armazenamento de rejeitos, portanto, o método tem potencial, em especial quando se requer maior disponibilidade de espaço. Os custos operacionais de

rejeitos filtrados são maiores, e o custo do transporte de rejeitos sólidos são mais altos do que para o transporte de polpa, o que em alguns casos pode ser compensado pela oportunidade de reutilização da água e espaço.

Dentre as situações nas quais os métodos alternativos de disposição de rejeito filtrado são indicados, destacam-se: regiões de clima árido, onde a conservação e economia de água são essenciais; locais que apresentam alta atividade sísmica, onde o método convencional é contraindicado devido ao risco de rompimento das estruturas; regiões de clima muito frio, onde o manejo de água se torna muito complicado no inverno; e locais com topografia que inviabilize a construção de barragens. Os principais desafios da filtragem estão relacionados à eficiência e aos custos necessários para se atingir a umidade requerida para a disposição final. Já para o método de rejeito espessado ou em pasta os principais desafios estão na produção, manuseio e transporte desse material com elevada concentração de sólidos utilizando o mínimo de custo e o máximo de eficiência possível. Também há dificuldade em realizar uma descarga do material de forma a permitir um bom espalhamento sobre a superfície de disposição e possibilitar eficiente consolidação.

Uma alternativa barata, porém, ainda em caráter incipiente no Brasil e no mundo é a disposição de rejeitos em áreas já mineradas (cavas exauridas) e em depósitos específicos juntamente com o estéril da mina através da codisposição ou disposição combinada destes materiais. Embora seja uma técnica considerada promissora, ainda é pouco difundida, portanto existe uma carência de experiências práticas e estudos sobre o método.

A disposição de rejeitos como preenchimento de minas subterrâneas ou em céu aberto também são métodos bastante atrativos, por fornecer suporte e preenchimento dos vazios gerados pela extração do minério. Entretanto, necessitam da disponibilidade das cavas para aplicação, e em alguns casos podem oferecer risco de contaminação da água.

Por último, mas não menos importante devemos considerar alternativas para o reaproveitamento econômico do rejeito como matéria-prima em outros processos produtivos como: Utilização do rejeito como agregado natural na produção de blocos de concreto para pavimentação; aplicação e o uso na fabricação de cerâmicas vermelhas, como corretivo do pH e condicionamento de solos ou na aplicação da rochagem para atender as necessidades de nutrientes na produção agrícola.

6. CONCLUSÃO

A necessidade de lavrar minérios com teores cada vez mais baixos eleva a quantidade de rejeito produzido, conseqüentemente, demanda barragens de rejeitos com dimensões cada vez maiores. Diante dos impactos sociais e ambientais ocasionados pelos acidentes ocorridos nas barragens de rejeito de Fundão, em Mariana-MG (2015) e Córrego do Feijão, em Brumadinho-MG (2019), houve uma reformulação marcante nas leis e normativas que tratavam deste assunto no país. Como principais mudanças ocorridas podemos citar: A portaria do DNPM nº 70389 de 2017 que complementou a lei federal nº 12334 de 2010, criando a obrigatoriedade de apresentação do Plano de Segurança de Barragem - PSB acrescido do Plano de Ação e Emergência para Barragens de Mineração – PAEBM nos caso de barragens classificadas com dano potencial associado de médio a alto, a obrigação da emissão semestral da Declaração de Condição de Estabilidade – DCE e a obrigatoriedade das inspeções de segurança regulares e especial. Outro ponto chave foi a promulgação da resolução nº 13 de 2019 do DNPM que estabeleceu a proibição definitiva das barragens de alteamento à montante e determinou prazos para descaracterização das barragens já existentes.

Este trabalho buscou apresentar e comparar as principais técnicas para disposição de rejeito empregadas atualmente na mineração com o intuito de promover uma visão holística sobre o tema através de uma pesquisa bibliográfica completa. Foram abordadas para isso as principais técnicas convencionais e alternativas de disposição de rejeitos, bem como, suas particularidades, riscos, benefícios e desafios.

Como cada mina possui aspectos únicos em termos de localização, relevo, topografia, características mineralógicas, disponibilidade de material para construção de barragens, abastecimento de água, processo de beneficiamento, obrigações ambientais e legislativas, custos de energia, dentre outros, é difícil prever qual método de disposição de rejeitos deve ser empregado sem que antes se realize um estudo minucioso das características da mina e principalmente do seu rejeito. Sendo assim, cada caso deve ser avaliado individualmente para adoção e escolha do melhor método levando em conta sempre os aspectos econômico, ambiental e de segurança.

As barragens de aterro hidráulico empregadas na disposição convencional ainda são as mais utilizadas atualmente e quando construídas pelos métodos de jusante ou linha de centro podem apresentar desempenho satisfatório desde que bem controladas e bem avaliadas

tecnicamente, entretanto, ainda sim existe a dificuldade em se prever o comportamento do material depositado, o que pode vir a afetar a estabilidade da estrutura e gerar dúvidas sobre a aplicação destes métodos.

A aplicação dos métodos alternativos de disposição de rejeitos espessados, em pasta e filtrados são ideais na busca pela reutilização de água, maior disponibilidade de espaço e maior estabilidade destes rejeitos. Também são indicadas em determinadas condições, tais como, regiões de clima árido, de baixas temperaturas e com frequente presença de atividade sísmica. Uma questão importante destes projetos é o fator custos. Os custos de implementação e operação para aplicação destes métodos de disposição geralmente são mais altos em relação ao método convencional o que os tornam menos atrativos em um primeiro momento. Todavia, ao se levar em conta o fato de que esses custos podem ser compensados e diluídos pela redução de gastos em outras áreas, como a não necessidade de construção de uma grande barragem de rejeitos, reutilização da água no processo e menores gastos com o fechamento de mina fazem com que essa técnica possa ser preterida.

A disposição de rejeito em cavas exauridas à céu aberto, preenchimento de espaços vazios em minas subterrânea (*backfill*) e pelo método de codisposição ou disposição compartilhada também se apresentam como alternativas muito atraentes. Entretanto, depende da disponibilidade de espaço e aplicabilidade técnica e devem ser estudadas caso a caso considerando as suas vantagens e desafios no momento da escolha.

Mesmo que os métodos alternativos de disposição de rejeitos ainda não sejam viáveis economicamente para boa parcela das minas em operação estas opções não devem ser descartadas frente aos atuais desafios e dificuldades enfrentadas na mineração quando o assunto é disposição de rejeitos. Além do mais, o desenvolvimento de novas tecnologias pode promover a redução de custos e corrobora para que estas técnicas se tornem mais competitivas e difundidas futuramente.

Por último e não menos importante devemos considerar as alternativas para o reaproveitamento econômico do rejeito como matéria-prima em outros processos produtivos. A busca por tecnologias que permitam a sua aplicação em outros processos produtivos, quer seja de forma direta como, por exemplo, na aplicação do pó de calcário industrial como corretivo do PH do solo na agricultura ou pela aplicação do pó de rocha na técnica conhecida como rochagem, quer seja na sua forma indireta pela criação de novos produtos como a fabricação de pré-moldados usados na construção civil ou bloquetes para a pavimentação de

vias. Essas alternativas geram tanto ganho econômico como social e elimina de forma sustentável o passivo ambiental.

Como proposta para aprofundar ou dar continuidade a alguns aspectos não abordados ou citados de forma superficial no presente texto, recomenda-se trabalhos futuros com foco no estudo detalhado dos custos envolvidos na implementação e manutenção dos diferentes métodos alternativos de disposição de rejeito. Estudos que possam comparar a eficiência, as taxas de produção e custos a partir de cada método de disposição de rejeito auxiliando na análise técnico/econômica e de tomada de decisão para a escolha do melhor método. E como recomendação final indica-se pesquisas voltados ao desenvolvimento de novas tecnologias que sejam capazes de reduzir custos e otimizar os métodos alternativos de disposição de rejeito.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALBUQUERQUE FILHO, L. H. (2004). **Análise do comportamento de barragens de rejeitos de minério de ferro através de ensaios de piezocone**. 2004. 24 F. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2004.
- ALEVAN, G. M.; PIRES, A. C. G.; RIBEIRO, L. F. M. **Análise das possibilidades de depósito de estéreis e rejeitos de mineração**: as vantagens da codisposição e da disposição compartilhada. 10º Simpósio Nacional de Qualidade Ambiental – Regulamentação Ambiental, Desenvolvimento e Inovação, Porto Alegre. 2016.
- ALVES, P. I. A. **Empilhamento e Rejeito Filtrado**: a expansão de uma alternativa para substituição de barragens. 2020. 114 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2020.
- ANM - AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. **Anuário Mineral Brasileiro**: principais substâncias metálicas. Coordenação Técnica: Marina Dalla Costa. Brasília: ANM, 2020.
- ANM - AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. **Resolução nº 13**. Estabelece medidas regulatórias objetivando assegurar a estabilidade de barragens de mineração, notadamente aquelas construídas ou alteadas pelo método denominado "a montante". Brasília: ANM, 2019.
- ARAÚJO, C. B. **Contribuição ao estudo do comportamento de barragens de rejeito de mineração de ferro**. 2006. 133 f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2006.
- ÁVILA, J.P. de; BICUDO, R.I. Boas práticas na gestão de projetos de barragens de rejeitos. In: **Seminário sobre a gestão da segurança de barragens em mineração**, Org. DNPM/IBRAM/SINDIEXTRA/ FEAM/CREA-MG, 2014.
- BOGER, D. V. Rheology of Slurries and Environmental Impacts in the Mining Industry. **The Annual Review of Chemical and Biomolecular Engineering**, v. 4, p. 239-257, 2013.
- BOWKER, Lindsay Newland; CHAMBERS, David M. **In the dark shadow of the supercycle tailings, failure risk & public liability reach all-time highs**. MDPI, 2017.
- BRASIL. **Lei nº 12.334**. Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens, Brasília, 20 set 2010.
- BRASIL. Agência Nacional de Mineração. **Anuário Mineral Brasileiro: Principais Substâncias Metálicas**, Brasília: ANM, 2019. 34 p.: il.
- CHAVES, A. P. **Teoria e Prática do Tratamento de Minérios**. São Paulo: Signus Editora, 2. ed. 2004.
- CHAVES, A. P. **Teoria e Prática do Tratamento de Minérios**: desaguamento, espessamento e filtragem, São Paulo: Signus, 2013, 240 p.

CRYSTAL, C.; CHORE, C.; EZAMA, I. **Filter-pressed dry stacking: design consideration based on practical experience**. In: Proceedings Tailings and Mine Waste. Keystone, Colorado, EUA, 2018. Anais. Disponível em:. Acesso 2023.

DAVIES, M. P. **Filtered Dry Stacked Tailings: The Fundamentals**. 2011. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/325976393_Filtered_Dry_Stacked_Tailings-The_Fundamentals. Acesso em: 15 mar. 2023.

DAVIES, M. P. **Impounded Mine Tailings: What are the failures telling us**. CIM Distinguished Lecturer Series, p. 53-59, Jul/2001.

DPI - DEPARTMENT OF PRIMARY INDUSTRIES. **Management of Tailings Storage Facilities: Environmental Guidelines**. Victoria: Minerals & Petroleum Division, 2003.

DNPM. **Portaria nº 70.389**. Cria o CNBM, o SIGBM e estabelece a periodicidade de execução ou atualização, a qualificação dos responsáveis técnicos, o conteúdo mínimo e o nível de detalhamento do PSB, das ISR e ISE, RPSB e PAEBM, 17 maio 2017.

EL PAÍS. **O desastre de Brumadinho em imagens**, 2019. Disponível em: < https://brasil.elpais.com/brasil/2019/01/25/album/1548444443_434346.html#foto_gal_1>. Acesso em: 01Jul. 2023.

ENGELS, J. **An expert management system for surface tailings storage**. Tese de Doutorado. University of Leeds, Reino Unido, 2006.

EPA - ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Technical Report: Design and Evaluation of Tailings Dams**. Washington: Office of Solid Waste, 1994.

FEAM - FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE. **Inventário de barragem do Estado de Minas Gerais**. Belo Horizonte: FEAM, 2016. 54p. Disponível em: http://www.feam.br/images/stories/2016/RESIDUOS_MINERA%C3%87%C3%83O/Invent%C3%A1rio_de_Barragens_2015_Final_V01.pdf. Acesso em: 20 jul. 2022.

FIGUEIREDO, M. M. **Estudo de metodologias alternativas de disposição de rejeitos para a mineração Casa de Pedra – Congonhas/MG**. 2007. 118 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2007.

FRANÇA, Silvia Cristina Alves; MASSARANI, Giulio. Separação sólido-líquido. In: LUZ, Adão Benvindo da; FRANÇA, Silvia Cristina Alves; BRAGA, Paulo Fernando Almeida. **Tratamento de Minérios**. 5. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010, 960 p.

GALBIATTI, H. F. **Ruptura oblíqua condicionada por falha transcorrente na cava a céu aberto da Mina do Cauê, Itabira, MG**. 2006. 99f. Dissertação (Mestrado em Geotécnica) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2006.

GOLDER ASSOCIATES LTD. **Tailings Storage Facility Life of Mine Feasibility Design**. Mount Polley Mine. Vancouver, BC, Canadá, 2015.

GOMES, Márcio Fernando Mansur. **Metodologia de análise hierárquica aplicada para escolha do sistema de disposição de subprodutos da mineração com ênfase nos rejeitos de minério de ferro**. 2009. 213 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica) — Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2009.

GOMES, R. C. **Notas de Aula**. Disposição de Rejeitos de Mineração - Caracterização Tecnológica de Rejeitos. 2006.

GOMES, R. B.; DE TOMI, G.; ASSIS, P. S. **Iron ore tailings dry stacking in Pau Branco mine**, Brazil. Journal of Materials Research and Technology, Vol. 5. 2016. p. 339-344. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2016.03.008>>. Acesso em 2023.

GUIMARÃES, N. C. **Filtragem de rejeitos de minério de ferro visando a sua disposição em pilhas**. 2011. 129 f. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

IBAMA - INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS. **Rompimento de barragem da Vale em Brumadinho (MG) destruiu 269,84 hectares**. 2019. Disponível em: <https://www.ibama.gov.br/noticias/730-2019/1881-rompimento-de-barragem-da-vale-em-brumadinho-mg-destruiu-269-84-hectares>. Acesso em: 29 abr. 2023.

IBRAM - INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. **Gestão e Manejo de Rejeitos da Mineração**; organizador. Instituto Brasileiro de Mineração. 1.ed. Brasília: IBRAM, 2016. 128p.

JONES, H; BOGER, D. V. Sustainability and waste management in the resource industries. **Ind. Eng. Chem. Res.**, v. 51, p. 10057–10065, 2012.

KLOHN, E. J. **The development of current tailings dam design and construction methods**. Design and Construction of Tailings Dams, Colorado School of Mines, Colorado, USA, p. 2-75, 1981.

LANDRIAULT, D. **The Surface Disposal of Industrial Waste: Slurry Placement v/s High Density Slurry Placement v/s Placement as a Paste**. In: HIGH DENSITY & PASTE 2002 SEMINAR, Santiago/Chile. 2002.

LEDUC, M, P.; SMITH, P. E. **Tailings Co-Disposal: Innovations for Cost Savings and Liability Reduction**. Austrália, 2003.

LOZANO, Fernando Arturo Erazo. **Seleção de Locais para barragens de rejeitos usando o método de análise hierárquica**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia) — Universidade do Estado de São Paulo, São Paulo, 2006.

MINAS GERAIS. **Lei nº 23291**. Institui a Política Estadual de Segurança de Barragens, Belo Horizonte, 25 fev 2019.

MEND – MINE ENVIRONMENT NEUTRAL DRAINAGE PROJECT. MEND Report 2.50.1 **Study of Tailings Management Technologies**. Klohn Crippen Berger. The Mining Association of Canada (MAC), Canadá, 2017.

OSORIO, C. A. H. **Caracterização de pastas minerais**. 2005. 177. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais, 2005.

PÁDUA, Eduane José de. **Rochagem como adubação complementar para culturas oleaginosas**. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Lavras, 2012. UFLA, 2012. 91 p. : il.

PEIXOTO, C. L. P. **Proposta de nova metodologia de desaguamento de rejeitos em polpa**. 2012. 93f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2012.

PORTES, Andréa Míriam Costa. **Avaliação da disposição de rejeitos de minério de ferro nas consistências polpa e torta**. 2013. Dissertação (Mestrado em Geotecnia e Transportes) — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

RITCEY, G. M. **Problems and solutions in the mining industry**. Tailings Management: Elsevier Science Publishers, 1989.

ROBERTSON, A.M. **Mine water solutions in extreme environments: challenges, technology and solutions**. 2013. Disponível em: <http://www.infomine.com/library/publications/docs/Robertson2013.pdf>. Acesso em: 30 abr. 2023.

RUSSO, F. M. (2007). **Comportamento de Barragens de Rejeito Construídas por Aterro Hidráulico: Caracterização Laboratorial e Simulação Numérica do Processo Construtivo**. Tese de Doutorado, Publicação G.TD-044/07, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF.

SÁNCHEZ, L.E. (1995). **Manejo de Resíduos sólido em Minería**. II Curso Internacional de Aspectos Geológicos de Protección Ambiental, UNESCO, vol.1, pp.239-250.

SILVA, J. M. **Lavra por Corte e Enchimento**. DEMIN/EM/UFOP. Notas de Aula Lavra Subterrânea. 2017.

SILVA, R. K. **Codisposição e disposição compartilhada de rejeitos e estéreis em cava exaurida**. 2014. 158f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica) - Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2014.

SILVA, S. A. D. **Crítérios de projetos de sistemas de disposição em pilhas de resíduos de alumina desaguados por filtro prensa**. 2016. 172 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2016.

SOARES, L., BOSCOV, M. E. Barragens de rejeito. In: LUZ, Adão Benvido da; FRANÇA, Silvia Cristina Alves; BRAGA, Paulo Fernando Almeida. **Tratamento de Minérios**. 6. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2018, 960 p.

TEIXEIRA, D. C. **Benefícios com a utilização de rejeitos em enchimento de minas subterrâneas: uma visão geotécnica e sustentável**. 2018. 45f. Monografia (Engenharia de Minas) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2018.

TESARIK D. R.; SEYMOUR J. B.; YANSKE T. R. **Long-term stability of a backfilled room and-pillar test section at the Buick Mine**. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences. Missouri, USA. 2009.

TOFFOLO, R. V. M. *et al.* **Viabilidade técnica de elementos de concreto para pavimentação produzidos com rejeito de barragem de minério de ferro**. 2014. 56º Congresso Brasileiro de Concreto, Natal - Rio Grande do Norte – Brasil.

UFOP. **Pesquisa sobre uso dos rejeitos da mineração indica diferentes maneiras de aproveitamento**. UFOP, 2019. Disponível em: <https://www.ufop.br/noticias/pesquisa-e-inovacao/pesquisa-sobre-uso-dos-rejeitos-da-mineracao-indica-diferentes-maneiras>. Acessado em 17 junho. 2023.

UNEP - UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. **Mine Tailings Storage: Safety Is No Accident**. A UNEP Rapid Response Assessment. United Nations Environment Programme and GRID-Arendal, Nairobi and Arendal. 2017.

VALADÃO, G. E. S.; ARAÚJO, A. C. **Introdução ao Tratamento de Minérios**. 1 ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2007. 234 p.

VALE. **Vale inaugura fábrica que transforma rejeitos da mineração em produtos para a construção civil**. Vale Brasil, 2020. Disponível em: <https://vale.com/w/vale-inaugura-f%C3%A1brica-que-transforma-rejeitos-da-minera%C3%A7%C3%A3o-em-produtos-para-a-constru%C3%A7%C3%A3o-civil>. Acesso em: 15 fev. 2023.

WATSON, A. H. *et al.* **A comparison of alternative tailings disposal methods - the promises and realities**. Australian Centre for Geomechanics, Perth, 2010, 16 p.