

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**  
**Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais**  
**Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Minerais**

Phillipe Silva Alvarenga

**Disposição de rejeitos de mineração: Uma Revisão**

Belo Horizonte

2023

Phillipe Silva Alvarenga

## **DISPOSIÇÃO DE REJEITOS DE MINERAÇÃO: UMA REVISÃO**

Monografia apresentada no Programa de Pós-graduação em Engenharia de Recursos Minerais como requisito parcial para obtenção do título de especialista em Engenharia de Recursos Minerais.

Orientador: Prof. Dr. George Eduardo Sales Valadão

Belo Horizonte

2023



## ATA DA DEFESA DE MONOGRAFIA DO ALUNO PHILLIPE SILVA ALVARENGA

Realizou-se, no dia 26 de junho de 2023, às 15:00 horas, na plataforma MS TEAMS da Universidade Federal de Minas Gerais, a defesa da Monografia intitulada **"DISPOSIÇÃO DE REJEITOS DE MINERAÇÃO: UMA REVISÃO"**, apresentada por PHILLIPE SILVA ALVARENGA, número de registro 2021698879, graduado em ENGENHARIA METALÚRGICA, como requisito parcial para a obtenção do certificado de Especialista em ENGENHARIA DE RECURSOS MINERAIS, à seguinte Comissão Examinadora: Professor George Eduardo Sales Valadão- Orientador, Professor Luiz Claudio Monteiro Montenegro (Universidade Federal de Minas Gerais), Professor Roberto Galery (Universidade Federal de Minas Gerais).

A comissão considerou a defesa do artigo:


Aprovada

Reprovada

Nota: **90,0**

Finalizando os trabalhos, lavrei a presente ata que, lida e aprovada, vai assinada por mim e pelos membros da Comissão.

Belo Horizonte, 26 de junho de 2023.

Documento assinado digitalmente:  

**GEORGE EDUARDO SALES VALADÃO**  
 Data: 26/06/2023 12:51:44 -0300  
 Verifique em: https://validar.digicert.com

  
**Rildo Magriotis Papini**  
 Orientador do Curso de Especialização  
 em Engenharia de Recursos Minerais


Professor George Eduardo Sales Valadão (Doutor)

Documento assinado digitalmente:  

**LUIZ CLAUDIO MONTEIRO MONTENEGRO**  
 Data: 26/06/2023 07:32:32 -0300  
 Verifique em: https://validar.digicert.com

  
**Aurio Domingos**  
 Secretário do Curso de Especialização  
 em Engenharia de Recursos Minerais

Professor Luiz Claudio Monteiro Montenegro (Doutor)

Documento assinado digitalmente:  

**ROBERTO GALERY**  
 Data: 26/06/2023 14:55:23 -0300  
 Verifique em: https://validar.digicert.com

Professor Roberto Galery (Doutor)

## RESUMO

A procura por recursos minerais e bens de consumo além da redução dos teores nas jazidas tem provocado a geração exagerada de rejeitos, necessitando da expansão de estruturas de armazenamento e disposição destes resíduos. Existem muitas técnicas de disposição de rejeitos do processamento de minério, no entanto a mais utilizada é a barragem de contenção. Porém, este tipo de estrutura apresenta riscos ambientais, econômicos e sociais. Com isso, surgiu o interesse da indústria mineral, dos meios científico e tecnológico e do governo em encontrar métodos alternativos de manuseio dos rejeitos de mineração. Diante disso, este trabalho tem como objetivo principal realizar uma revisão bibliográfica acerca da disposição dos rejeitos de mineração, analisando as técnicas convencionais e alternativas aplicadas, a fim identificar o melhor método em relação à diminuição dos custos, riscos e impactos ambientais associados. A técnica de contenção de rejeitos em barragens são estruturas construídas para diluir o custo do processo de extração mineral por meio de alteamentos sucessivos e podem ser de três tipos: a montante, a jusante e de linha de centro. Apesar da barragem de contenção ser mais econômica e utilizada atualmente, existem muitos acidentes e incidentes relacionados a ela. As técnicas alternativas comparadas às de barragens convencionais são mais vantajosas em relação ao custo operacional, recuperação das áreas, reutilização de água e redução dos impactos ambientais. Porém, observou-se que a escolha do melhor método vai depender do tipo de lavra e projeto, das propriedades físicas e geoquímicas dos rejeitos e da característica geométrica da área, dos custos operacionais e da aquisição de equipamentos.

**Palavras-chave:** recursos minerais; rejeitos; técnicas alternativas.

## **ABSTRACT**

The search for mineral resources and consumer goods, in addition to ore grade reduction in the current deposits, have caused the exaggerated generation of waste, necessitating the expansion of storage structures and disposal of this waste. There are many techniques for disposing of ore processing tailings, however the most used is the containment dam. However, this type of structure presents environmental, economic and social risks. As a result, the mineral industry, scientific and technological circles and the government became interested in finding alternative methods for handling mining waste. Therefore, this work has as main objective to carry out a bibliographical review about the disposal of mining tailings, analyzing the conventional techniques and applied alternatives, in order to identify the best method in relation to the reduction of costs, risks and associated environmental impacts. The tailings containment technique in dams are structures built to dilute the cost of the mineral extraction process through successive heightening and can be of three types: upstream, downstream and centerline. Despite the containment dam being more economical and currently used, there are many accidents and incidents related to it. Alternative techniques compared to conventional dams are more advantageous in terms of operational cost, recovery of areas, reuse of water and reduction of environmental impacts. However, it was observed that the choice of the best method will depend on the type of mining and project, the physical and geochemical properties of the tailings and the geometric characteristics of the area, operating costs and equipment acquisition.

**Keywords:** mineral resources; waste; alternative techniques.

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	7
<b>2. OBJETIVO E RELEVÂNCIA</b> .....	9
<b>3. DESENVOLVIMENTO</b> .....	10
<b>3.1 Rejeitos de mineração</b> .....	10
<b>3.1.1 Características físicas dos rejeitos</b> .....	12
<b>3.1.2 Características geoquímicas</b> .....	14
<b>3.2 Barragens de rejeitos</b> .....	16
<b>3.2.1 Ruptura de barragens de rejeitos</b> .....	19
<b>3.3 Técnicas alternativas para disposição de rejeitos</b> .....	23
<b>3.3.1 Disposição de rejeitos em cavas subterrâneas</b> .....	26
<b>3.3.2 Disposição de rejeitos subaérea</b> .....	29
<b>3.3.3 Disposição de rejeitos espessados ou em pasta</b> .....	30
<b>3.3.4 Disposição de rejeitos filtrados</b> .....	34
<b>3.3.5 Disposição de rejeitos por empilhamento drenado</b> .....	37
<b>3.3.6 Disposição por empilhamento de rejeitos filtrados</b> .....	38
<b>3.3.7 Codisposição e a disposição compartilhada</b> .....	39
<b>3.4 Análise comparativa das técnicas convencionais e alternativas de disposição de rejeitos de mineração</b> .....	42
<b>4. CONCLUSÕES</b> .....	45
<b>5. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b> .....	47
<b>6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	48

## 1. INTRODUÇÃO

A procura por recursos minerais e bens de consumo é alta e crescente para atender o desenvolvimento da população mundial e melhorar a qualidade de vida. Essa maior demanda com a redução dos teores dos minérios nas jazidas vem contribuindo para a geração de crescentes volumes de rejeitos e a necessidade de expandir as estruturas de armazenamento e disposição (França e Trampus, 2018).

Os rejeitos são materiais resultantes do processamento mineral e não possuem maior valor econômico. Estes subprodutos são comumente produzidos em quantidades elevadas e podem conter produtos químicos prejudiciais ao meio ambiente. Portanto, eles devem ser armazenados de maneira ambientalmente adequada, segura e econômica (Souza, 2018).

Nesse sentido, os rejeitos podem ser descartados na forma sólida (pastas ou granel) ou líquida (polpa aquosa com sólidos ou lama). De maneira geral, estes subprodutos podem ser dispostos: em minas subterrâneas (preenchimento de aberturas), em minas a céu aberto (preenchimento de cavas exauridas), por empilhamento (drenado e a seco), em barragens de contenção (do tipo a montante, a jusante e em linha de centro). A escolha da melhor técnica depende da natureza do processo de mineração; das condições geológicas e topográficas; das propriedades mecânicas dos materiais; do impacto ambiental dos rejeitos e das condições climáticas da região (IBRAM, 2016).

A técnica convencional mais utilizada pelas mineradoras para disposição de rejeitos de mineração é a barragem ou dique de contenção. Estas barragens são estruturas geotécnicas que são construídas de solo natural ou dos próprios rejeitos. A construção destas barragens é feita por diversas formas e algumas são consideradas seguras e estáveis, podendo conter os materiais por grandes períodos até mais que a vida útil das minas (Figueiredo, 2007; Kossoff et al., 2014; Inoue, 2021).

No entanto, os riscos de acidentes frequentes e o mau gerenciamento das barragens podem resultar em enormes custos ambientais, econômicos e sociais. Com isso, surgiu o interesse da indústria mineral, dos meios científico e tecnológico e do governo sobre a segurança operacional destes diques, buscando métodos alternativos de manuseio de rejeitos com o

objetivo de reduzir o risco ambiental e reaproveitar a água utilizada no processo (França e Trampus, 2018; Souza, 2018).

Sendo assim, muitas pesquisas têm sido feitas sobre tecnologias de disposição de rejeitos desaguados, pois os maiores problemas de estabilidade em barragens estão relacionados ao confinamento da água residual. Estas técnicas além de buscar maior estabilidade garantem o reuso de água e ampliam a disponibilidade da área de tratamento (Figueiredo, 2007). Dentre estes métodos, destacam-se a filtração e o espessamento (Souza, 2018).

Uma alternativa que se destaca e vem sendo estudada em algumas mineradoras no Brasil e no mundo diz respeito ao beneficiamento destes materiais em áreas lavradas e em depósitos específicos, bem como o estéril de mina, por meio de codisposição ou disposição combinada desses materiais (rejeitos e estéril). Tal disposição pode ocorrer em ambientes confinados, como é o caso da disposição desses rejeitos em cavas exauridas, ou ainda em barragens de contenção e pilhas (Figueiredo, 2007).

Diante disso, este trabalho tem o intuito de realizar um estudo sobre a disposição dos rejeitos de mineração, a fim de desenvolver uma análise comparativa das técnicas convencionais e alternativas aplicadas e assim verificar a que melhor se caracteriza em relação ao custo-benefício e a diminuição dos riscos e dos impactos ao meio ambiente.



## **2. OBJETIVO E RELEVÂNCIA**

O objetivo principal deste trabalho é realizar uma revisão bibliográfica acerca da disposição dos rejeitos de mineração, analisando as técnicas convencionais e alternativas aplicadas, a fim identificar o melhor método em relação à diminuição dos custos, riscos e impactos ambientais associados. Os objetivos específicos são:

- Descrever as características físicas e geoquímicas dos rejeitos do processamento de minério;
- Apresentar como são aplicadas as técnicas convencionais de disposição de rejeitos de mineração;
- Apresentar as metodologias alternativas de disposição de rejeitos de mineração existentes;
- Realizar uma análise comparativa das vantagens e desvantagens das técnicas convencionais e alternativas.

A relevância deste estudo está na necessidade de divulgação das técnicas alternativas existentes de rejeitos de mineração, considerando suas vantagens e desvantagens com o intuito de minimizar os impactos ambientais que as barragens de contenção de rejeitos convencionais causam ao meio ambiente.

### 3. DESENVOLVIMENTO

#### 3.1 Rejeitos de mineração

O aproveitamento dos recursos minerais envolve, em geral, várias etapas: pesquisa mineral, lavra, e beneficiamento, que transformam os minérios extraídos da natureza em produtos que atendam o mercado consumidor. Assim o minério encontrado em sua forma original na natureza, passa por um processo de beneficiamento que envolve a aplicação de métodos físicos e/ou químicos para purificação e enriquecimento para utilização na indústria. Como resultado deste processo de mineração é gerada uma quantidade variável de rejeitos (Pinto, 2013).

Os rejeitos são subprodutos do processamento do minério que são geralmente enviados e armazenados em barragens de contenção. O processo visa normalmente fragmentar o minério, retirar os minerais sem valor econômico e melhorar a qualidade, pureza ou conteúdo do produto final. O processo de beneficiamento do minério pode ser entendido de forma geral a partir das etapas apresentadas na figura 3.1, onde mostra como inicia o processo produtivo até a geração do concentrado, dos rejeitos e o seu descarte em barragens (Viana et al. 2012; Costa, 2022).

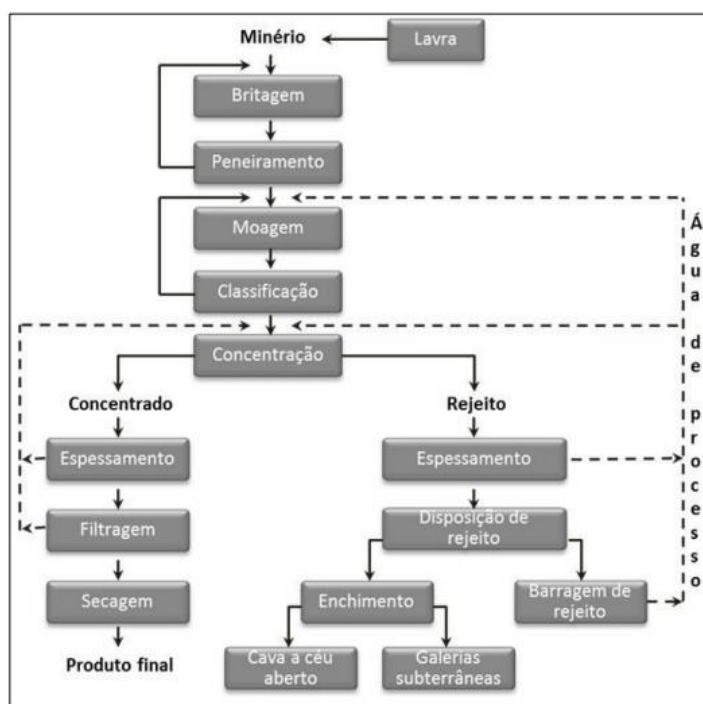


Figura 3.1 – Fluxograma de beneficiamento de minério (Luz e Lins, 2018).

Etapas comuns do beneficiamento do minério de ferro são a britagem e moagem que auxiliam na adequação da distribuição granulométrica da amostra. A separação por tamanho é usualmente realizada por meio de peneiramento (peneiras) e classificação (classificadores mecânicos e/ou hidrociclones). A etapa de concentração que remove a maior parte das impurezas presentes no minério por meio de métodos gravíticos (jigues, espiras concentradoras), magnéticos (concentradores magnéticos de alta intensidade e de alto gradiente), e físico-químicos (flotação). O desaguamento que representa a retirada da água dos produtos é realizado por meio de: filtragem (filtros contínuos à vácuo, filtros de pressão), secagem (secadores rotativos), obtendo-se assim os produtos finais. E a disposição dos rejeitos gerados durante o processo, geralmente realizada em barragens construídas a partir dos próprios rejeitos (Luz e Lins, 2018).

Geralmente o beneficiamento do minério é feito a úmido, no qual materiais sólidos granulares são misturados a grandes quantidades de água, logo quase sempre o rejeito está na fase de polpa. Por causa da quantidade excessiva de água presente nesta polpa, os rejeitos de mineração tendem a apresentar alta mobilidade ligada à pequena ou inexistente resistência ao cisalhamento. Dessa forma, há a necessidade de acondicionar ou descartar esse material de forma a proporcionar as condições necessárias para segurança, economia e atendimento às normas e leis (Alves, 2020).

A figura 3.2 apresenta uma média de rejeitos e de produtos gerados durante o processamento minérios de ferro, carvão, fosfato, cobre e ouro, considerando 1 tonelada minério (Soares, 2010).

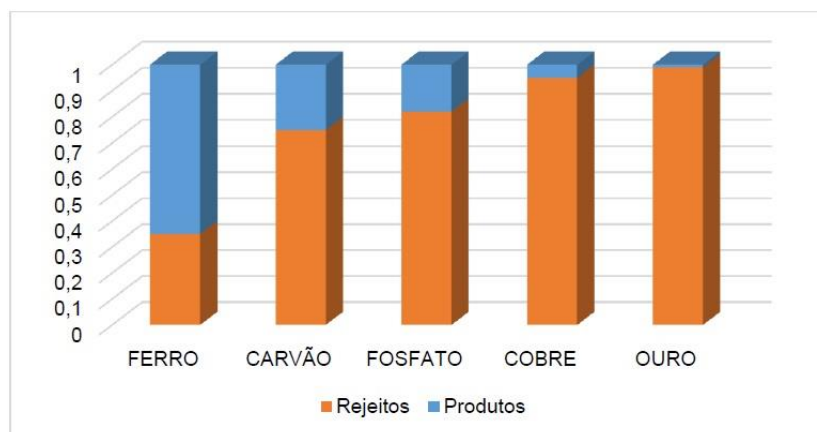


Figura 3.2 – Quantidade média de rejeitos gerados nos processos de beneficiamento de 1 tonelada de minérios (Soares, 2010 apud Santos, 2022).

Percebe-se que a quantidade gerada de rejeitos em comparação ao concentrado final é bem significativa e depende do teor do mineral de interesse na jazida, por exemplo, observa-se que o processamento de ouro é o que mais produz rejeitos em comparação aos demais visto a baixa concentração do elemento nativo nos depósitos.

Sendo assim, a quantidade de rejeitos gerados pode impactar de maneira qualitativa e quantitativa o meio ambiente e é a razão pelas quais as mineradoras estão cada vez mais preocupadas em buscar minimizar o impacto ambiental e reduzir os custos associados ao processo de controle desses subprodutos (Soares, 2010).

### 3.1.1 Características físicas dos rejeitos

As características físicas dos rejeitos podem interferir na eficiência e a viabilidade técnica dos métodos de desaguamento. Estas características variam de acordo com diversos fatores, destacando-se as propriedades do minério, sua qualidade e as operações de beneficiamento realizadas. Em termos de classificação granulométrica, o quadro da figura 3.3 apresenta as principais classes dos rejeitos (Mend, 2017 apud Alves, 2020).

Classe de rejeito	Símbolo	Descrição	Exemplos <sup>2</sup>
Rejeitos granulares ( <i>Coarse tailings</i> )	CT	Areia siltosa, não plástica	Sal, areias minerais, rejeito grosseiro de carvão mineral, material arenoso de minério de ferro
Rejeitos de rocha dura ( <i>Hard rock tailings</i> )	HRT	Silte arenoso	Cobre, sulfeto, níquel, ouro
Rejeitos de rochas alteradas ( <i>Altered rock tailings</i> )	ART	Silte arenoso, vestígio de partículas de argila	Cobre pórfiro com alteração hidrotermal, rocha oxidada
Rejeitos finos ( <i>Fine tailings</i> )	FT	Silte, com vestígio de partículas de argila	Rejeitos finos de carvão, resíduo de bauxita (lama vermelha)
Rejeitos ultrafinos ( <i>Ultra fine tailings</i> )	UFT	Argila siltosa, alta plasticidade, densidade e condutividade hidráulica muito baixas	Areia betuminosa ( <i>mature fine tailings</i> -MFT) <sup>1</sup> , finos de fosfato, alguns finos de kimberlito e de carvão

Figura 3.3 – Principais classes de rejeitos (Mend, 2017 apud Alves, 2020).

Os rejeitos de areia betuminosa são oriundos da extração de betume da areia usando água quente. A polpa de rejeito é bombeada e armazenada em uma barragem de rejeitos. A fração de rejeitos finos (*Mature Fine Tailings* - MFT) se acumula próximo ao centro da lagoa e depois de alguns anos, o teor de sólidos do MFT, que é 86% de água, cairá para cerca de 30% a 35%. Alguns tipos de minérios geram múltiplos fluxos de rejeitos que se enquadram em mais de uma categoria, por exemplo, depósitos de cobre pórfiro que podem ter fluxos de rejeitos grossos e/ou fluxos de rejeitos de rocha alterados (Alves, 2020).

A figura 3.4 mostra os gráficos de distribuição de tamanho de partícula para cada categoria de rejeitos listados no quadro da figura 3.3 para facilitar a identificação de cada categoria.

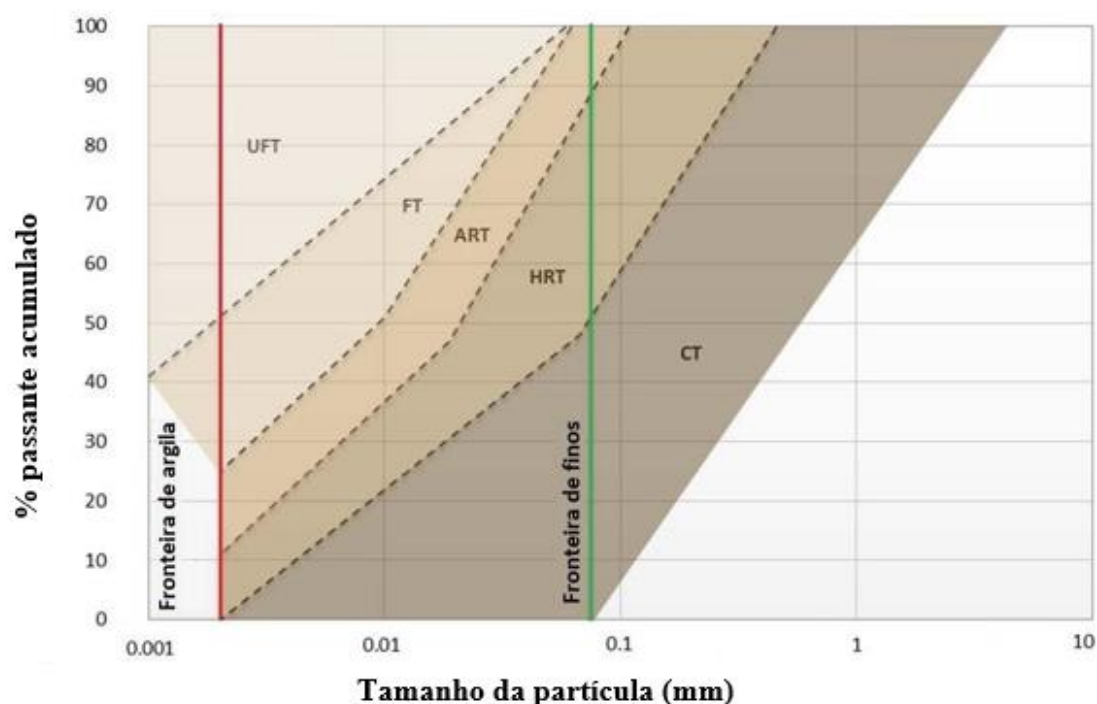


Figura 3.4 – Classificação de rejeito baseada na distribuição granulométrica (Mend, 2017 apud Alves 2020).

A distribuição granulométrica dos rejeitos sofre influência da mineralogia do minério que está sendo processado, pelo grau de cominuição necessário para liberar os minerais de interesse e pela presença de partículas finas naturais em sua composição. Quando os rejeitos apresentam granulometria inferior a 0,074 mm, são denominados de finos, e quando estão acima dessa faixa, são denominados de rejeito granulado (Portes, 2013). A

Figura 3.5 demonstra as faixas granulométricas de distintos tipos rejeitos existentes em algumas minas do quadrilátero ferrífero, como lama, rejeito de flotação e de concentração magnética.

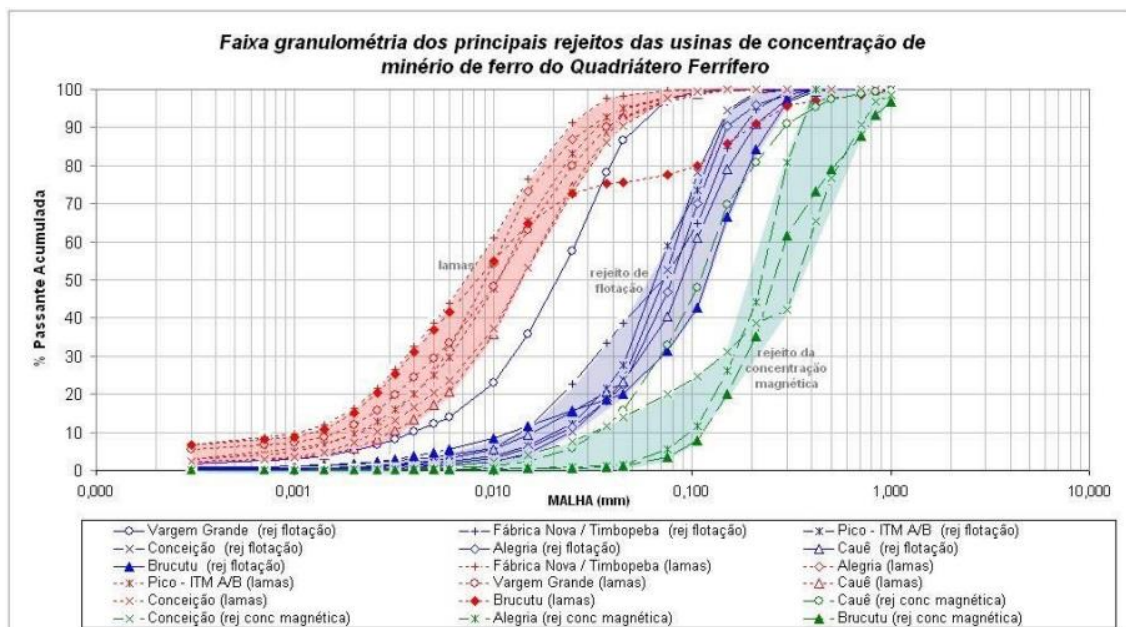


Figura 3.5 – Distribuição granulométrica de distintos tipos de rejeitos de algumas minas do Quadrilátero Ferrífero (Guimarães, 2011).

### 3.1.2 Características geoquímicas

As características geoquímicas nos rejeitos e da água existentes nos poros afetam os requisitos que são precisos para o gerenciamento e tratamento da água nos depósitos. Na classificação geoquímica de rejeitos, vários fatores devem ser considerados, a saber: o tipo e concentração de sulfetos e minerais que podem contaminar a água; a composição química do minério, o tipo de depósito, a geologia local; a rota de processamento para o tratamento mineral e reagente utilizado no processo; técnica de destinação de rejeitos, tamanho de partícula e separação mineral; alteração das propriedades biogeoquímicas e físicas dos rejeitos através de interações com a atmosfera e agentes biológicos, que pode resultar por exemplo na dissolução de algum mineral, podendo ocasionar a formação de camadas duras e drenagem de rejeitos durante a exposição ao ambiente com o passar do tempo (Mend, 2017 apud Silva, 2021).

A figura 3.6 apresenta um quadro que fornece uma ampla classificação geoquímica geral de rejeitos por meio de exemplos de minas que tem os respectivos tipos de rejeitos citados.

Tipo de rejeito		Descrição	Exemplos
Lixiviação metálica e drenagem ácida sulfúrica	Ácido	Os rejeitos já são ácidos e produzem drenagem ácida e elevada lixiviação de metais.	Copper Cliff Central Tailings, Kidd Creek Mine (cobre-zinco)
	Potencialmente Ácido	Os rejeitos contêm sulfetos, são potencialmente ácidos e prevê-se que gerem drenagem ácida e lixiviação de metais caso sejam expostos a condições meteorológicas aeróbicas. Esta classificação também se aplica aos casos em que o início da lixiviação é incerto.	Kemess South Mine (ouro-cobre); Canadian Malartic Mine (ouro); Suncor (areia betuminosa); Green's Creek Mine (polimetálica)
Lixiviação metálica sulfúrica	Quase neutro ou pH básico com alta lixiviação metálica	Os rejeitos contêm sulfetos, mas prevê-se que produzam drenagem de pH quase neutro ou básico (acontece neutralização suficiente). Espera-se a ocorrência de lixiviação metálica ou não-metálica, por reações de oxidação, em níveis acima dos limites regulatórios.	Snap Lake Mine (diamantes)
Lixiviação não sulfúrica		Os rejeitos contêm pouco ou nenhum sulfeto e existe a previsão de que produzam drenagem de pH quase neutro ou básico. Espera-se a ocorrência de lixiviação metálica ou não-metálica a partir da dissolução mineral em nível acima dos limites regulatórios.	Colonsay Mine (potássio)
Baixa reatividade		Os rejeitos não produzem ou não existe a previsão de que produzam drenagem ácida ou lixiviação de metais em nível acima dos limites regulatórios.	

Figura 3.6 – Classificação geoquímica de rejeitos (MEND, 2017 apud Alves, 2020).

Os tipos de rejeitos foram resumidos para classificar os rejeitos com base em técnicas de gerenciamento e possíveis resultados da qualidade da água. Os exemplos listados são apenas para referenciar e não representam as quantidades disponíveis de cada tipo de rejeito (Alves, 2020).

### 3.2 Barragens de rejeitos

As barragens são estruturas convencionais utilizadas para contenção de rejeitos de mineração e recuperação de água de processo. Da usina de processamento, a polpa é transportada por gravidade ou bombeada e dispersada no reservatório da barragem. As partículas mais grossas se depositam perto do ponto de lançamento, a lama fica posicionada em uma etapa intermediária e a água livre no final do reservatório (Guimarães, 2011).

Segundo Souza (2018), barragem é uma estrutura destinada a reter e armazenar os rejeitos gerados oriundas do beneficiamento de minério. De acordo com Soares (2010), a construção das estruturas pode ser feita compactando o solo, utilizando os próprios rejeitos, ou materiais estéreis da mina. O próprio material é normalmente utilizado para armazenamento devido à grande disponibilidade e baixo custo de utilização em comparação com outros materiais. No entanto, deve-se notar que seu uso é dependente de fatores como características geotécnicas, granulometria e capacidade de compactação (Duarte, 2008).

Outra questão que distingue as barragens de rejeitos de outras estruturas civis semelhantes é que elas são construídas em etapas, que acompanham a velocidade com que o material é extraído, produzindo uma elevação contínua (Cardozo et al., 2016), o que proporciona agilidade nas operações (Inoue, 2021).

A construção de barragens de rejeitos, seja qual for o método de alteamento utilizado posteriormente, inicia-se com a construção de um dique inicial impermeável, geralmente utilizando materiais emprestados com propriedades drenantes (Alves, 2020), se necessário a impermeabilização pode ser feita nesta fase. A altura deste dique é pequena, cerca de cinco metros e os alteamentos acontecem conforme a necessidade, seguindo o nível de rejeitos depositados podendo ter uma borda livre (Soares, 2010).

De acordo com o Instituto Brasileiro de Mineração – IBRAM (2016) as barragens de contenção de rejeitos são estruturas construídas ao longo do tempo para diluir o custo do processo de extração mineral por meio de alteamentos sucessivos. Existem três métodos



de disposição de rejeito em barragem de contenção: a montante, a jusante e de linha de centro (IBRAM, 2016).

O método a montante, apresentado na figura 3.7, consiste na construção e alteamento de barragens sempre a montante dos rejeitos consolidados. Este método se inicia por um dique de partida que é um aterro e um suporte para a linha de rejeitos descartados, podendo ser construído com materiais permeáveis que assegura a drenagem do fluxo da água e evita erosão. Depois desta etapa, os rejeitos são lançados por canhões a montante da linha de simetria do aterro para formar uma praia que fornecerá materiais de construção para o próximo alteamento. Este processo continua até que a elevação final prevista no projeto seja alcançada (Silva et al., 2012).



Figura 3.7 – Método de disposição a montante (IBRAM, 2016).

Oliveira Filho e Abrão (2015) relatam que o método a montante não é recomendado para o armazenamento de água quando a velocidade ou taxa de alteamento é alta ou em locais sujeitos a vibrações causadas por equipamentos, explosões ou terremotos naturais, podem desencadear eventual liquefação, tornando este fenômeno preocupante. Além disso, a estrutura de contenção é composta por prismas formados pela superposição de sucessivas praias de rejeitos ao longo do tempo.

A ANM (2023) em função das recentes tragédias com barragens de rejeitos ocorridos pelo método a montante proibiu esse método construtivo por meio da Resolução ANM n° 4/2019, substituída pela Resolução ANM n° 13/2019, além disso exigiu-se o descomissionamento e a descaracterização das estruturas já existentes construídas por tal método, com prazos estabelecidos para elaboração e conclusão dos projetos de descaracterização.

O método a jusante (figura 3.8) envolve o alteamento de barragem a jusante do dique de partida, construído inicialmente, movendo o eixo da crista a jusante. A sua construção pode ser feita com rejeitos próprios, solo emprestado ou estéril da mina. Quando a barragem é construída pelos próprios rejeitos, ele pode ser classificado em ciclones e apenas a fração grossa e compactada é usada nos alteamentos (Silva et al., 2012).

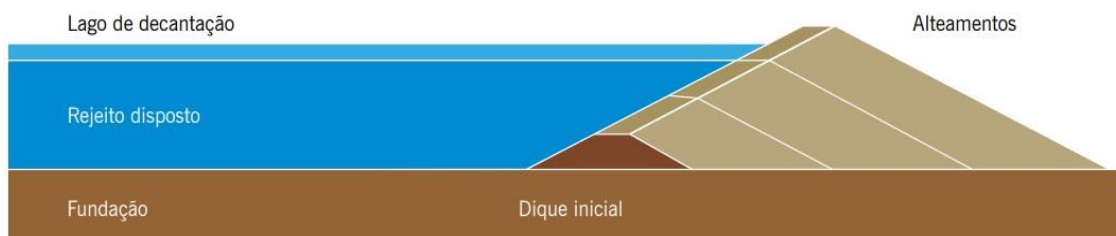


Figura 3.8 – Método a jusante (IBRAM, 2016).

A técnica a jusante precisa de uma maior quantidade de material para que seja construído. Sem um planejamento adequado, o avanço do pé da rampa a jusante pode interferir em outras estruturas da mina. O talude a jusante requer medidas de controle de erosão. Esta técnica é uma ótima opção quando o armazenamento de água é necessário. Devido à compactação do aterro, a estrutura é adaptada para altas taxas de elevação e possui forte resistência à liquefação (Alves, 2020).

O método de linha de centro é geometricamente uma solução intermediária entre os métodos a jusante e a montante, no entanto seu comportamento estrutural é próximo da técnica a jusante. Em seu processo, primeiramente é construído um dique inicial, onde o rejeito é jogado a montante dele, constituindo uma praia. Os alteamentos subsequentes são construídos colocando aterros no limite da praia e na inclinação a jusante do maciço de partida, coincidindo o eixo do aterro inicial com a elevação subsequente conforme ilustra a figura 3.9 (Silva et al., 2012).



Figura 3.9 – Método de linha de centro (IBRAM, 2016).

A barragem de linha de centro é fácil de ser construída, o eixo de alteamento é constante e o volume de transbordamento é menor do que o método a jusante. No entanto, esta técnica precisa de um sistema de drenagem eficiente e contenção a jusante; a operação é complexa, requerendo equipamento de deposição mecânica à jusante e o investimento global pode ser alto devido à complexidade operacional (Lozano, 2006).

A figura 3.10 demonstra um comparativo das três técnicas de disposição de rejeitos em barragem de contenção, apresentando: o tipo de rejeitos, a descarga, o armazenamento de água, a resistência a abalos sísmicos, alteamentos, vantagens e desvantagens de cada um destes métodos.

	Montante	Jusante	Linha de centro
Tipo de rejeito	Baixa densidade para que ocorra segregação	Qualquer tipo	Areias de lamas de baixa plasticidade
Descarga de rejeitos	Periférica	Independente	Periférica
Armazenamento de água	Não recomendável para grandes volumes	Bom	Aceitável
Resistência a abalos sísmicos	Baixa	Boa	Aceitável
Alteamentos	Ideal menos 10 m/ano	Nenhuma restrição	Pouca restrição
Vantagens	Menor custo, utilizado onde há restrição de área	Maior segurança	Flexibilidade construtiva
Desvantagens	Baixa segurança suscetibilidade a liquefação e <i>piping</i>	Grande quantidade de material requerido proteção do talude a jusante apenas na configuração final	Necessidade de eficiente sistema de drenagem

Figura 3.10 – Comparativo dos três métodos de disposição de rejeitos em barragem de contenção (Cardozo et al., 2016).

Os métodos de alteamento a montante e por linha de centro são do ponto de vista econômico mais vantajosos em relação à técnica à jusante, no entanto, apresentam maior instabilidade e historicamente são mais susceptíveis a rompimentos.

### 3.2.1 Ruptura de barragens de rejeitos

A ruptura de barragens pode causar danos ambientais de longo prazo e/ou até mesmo irreparáveis com custos altos de reparação. No Brasil, ocorrem cerca de três acidentes com barragem por ano além de outros eventos menores que podem provocar alagamentos ou suspensão de abastecimento de água. Além dos acidentes, há mais de sete incidentes

relacionados a barragens por ano, conforme mostra o gráfico da figura 3.11 (Fonseca, 2019).

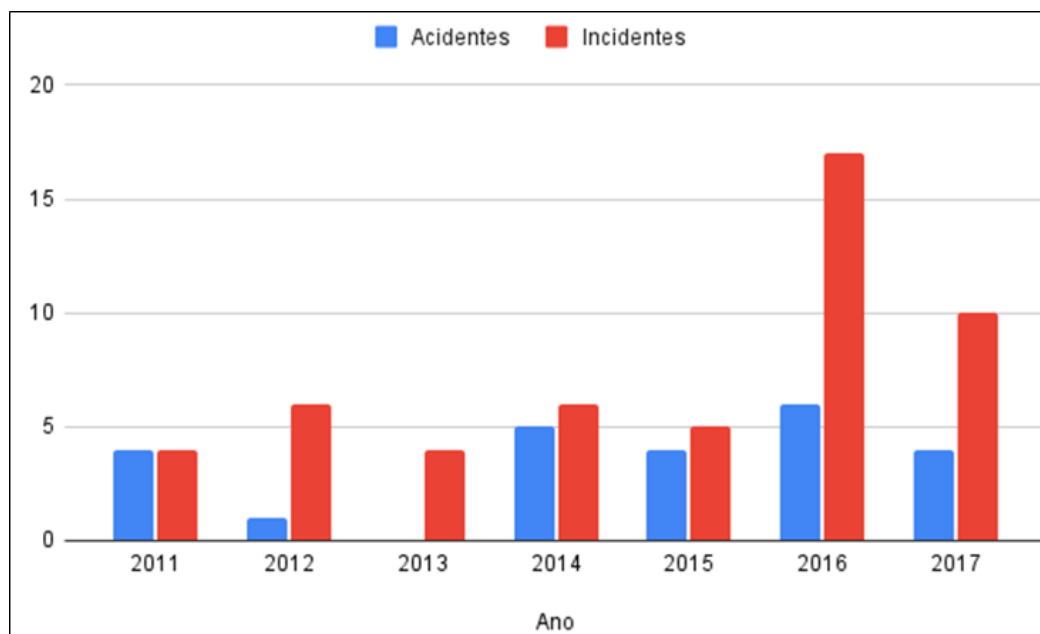


Figura 3.11 – Índice de acidente e incidentes com barragens no Brasil de 2011 a 2017 (Fonseca, 2019).

Para entender como o incidente se torna um acidente é preciso enfatizar a diferença entre os dois eventos. Nesse sentido, de acordo com Machado e Azeez (2018), o incidente é algo que acontece de maneira inesperada que não foi prevista, no entanto não provoca danos ou consequências. Já o acidente é um evento catastrófico, inesperado e desagradável com consequências maiores e muitas vezes irreversíveis. Segundo Freitas e Silva (2019) quando os acidentes são capazes de interromper ou produzir rupturas no ambiente onde ocorrem, provocando perdas e danos irreparáveis ao homem e a natureza, ultrapassando a capacidade de respostas das comunidades e ambientes diretamente envolvidos, esses acidentes constituem-se com desastres.

Diversos mecanismos de longo prazo podem provocar à ruptura em barragens de rejeitos que incluem danos acumulados como erosão interna da barragem e a ocorrência de vários eventos sísmicos, eventos geológicos como, por exemplo, deslizamentos de terra, estática de liquefação induzida por carga e mudança climática. Conforme mostra a figura 3.12, a principal causa de acidentes com barragens é desconhecida, seguidas por galgamentos, estabilidade de taludes e terremotos (Chambers e Higman, 2011).

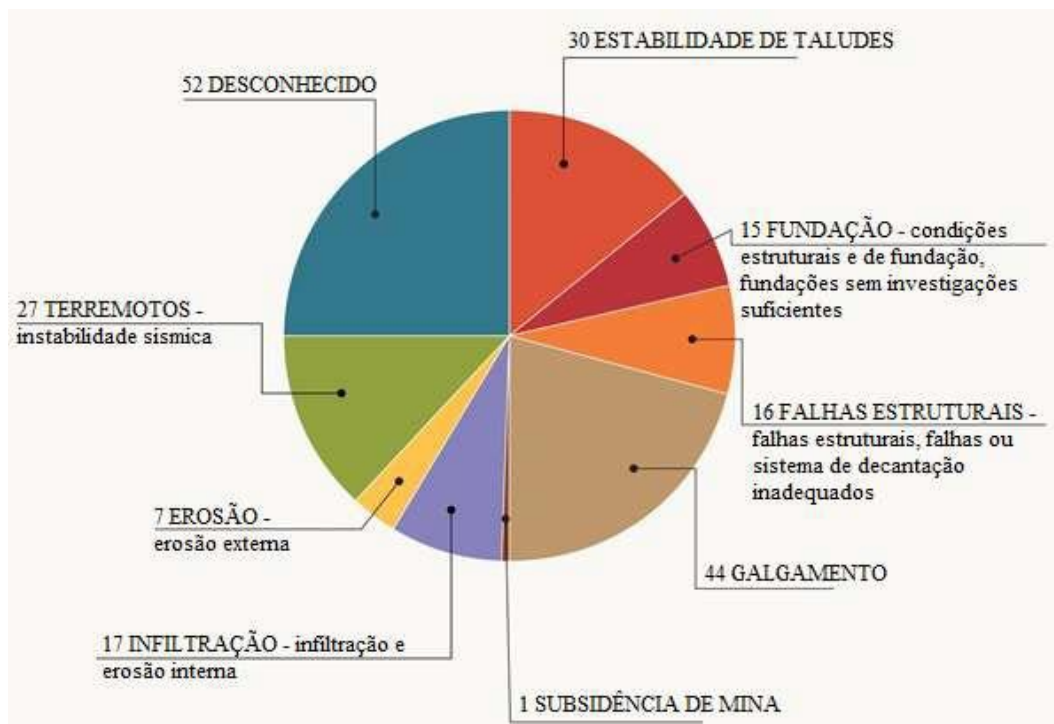


Figura 3.12 – Principais causas de ruptura em barragens de rejeito entre 1915 – 2016 (Thygesen, 2017 apud Souza 2018).

As causas de ruptura de barragem mais presentes, além das de origem desconhecida, são: galgamento, estabilidade de taludes e terremotos. Em relação ao galgamento e terremoto, o projeto precisa prever o evento hidrológico máximo ou terremoto que a estrutura vai presenciar, e muitas vezes a vida útil dessas estruturas deve ser considerada permanente. Os acidentes relacionados com a estabilidade de taludes, fundações e estruturas são frequentemente atribuídos a deficiências de projeto ou construção e podem ser tratados por melhores práticas durante o projeto e a construção, empregando maiores margens de segurança (Chambers e Higman, 2011).

A figura 3.13 apresenta os impactos ambientais que são originados pela atividade mineração no Brasil, assim como as ações preventivas e/ou corretivas para cada um destes problemas associados ao tipo de produto gerado.

Substância Mineral	Estado	Principais problemas	Ações Preventivas e/ou Corretivas
Ferro	MG	Antigas barragens de contenção, poluição de águas superficiais.	Cadastramento das principais barragens de decantação em atividade e as abandonadas; caracterização das barragens quanto à estabilidade; preparação de estudos para estabilização.
Ouro	PA	Utilização de mercúrio na concentração do ouro de forma inadequada; aumento da turbidez, principalmente na região de Tapajós.	Divulgação de técnicas menos impactantes; monitoramento de rios onde houve maior uso de mercúrio.
	MG	Rejeitos ricos em arsênio; aumento da turbidez.	Mapeamento e contenção dos rejeitos abandonados
	MT	Emissão de mercúrio na queima de amálgama.	Divulgação de técnicas menos impactantes.
Chumbo, Zinco e Prata.	SP	Rejeitos ricos em arsênio.	Mapeamento e contenção dos rejeitos abandonados.
Chumbo	BA	Rejeitos ricos em arsênio.	Mapeamento e contenção dos rejeitos abandonados.
Zinco	RJ	Barragem de contenção de rejeitos de antiga metalurgia, em péssimo estado de conservação.	Realização das obras sugeridas no estudo contratado pelo Governo do Estado do Rio de Janeiro.
Carvão	SC	Contaminação das águas superficiais e subterrâneas pela drenagem ácida proveniente de antigos depósitos de rejeitos.	Atendimento às sugestões contidas no Projeto Conceitual para Recuperação da Bacia Carbonífera Sul Catarinense.
Agregados para construção civil	RJ	Produção de areia em Itaguaí/Seropédica: contaminação do lençol freático, uso futuro da terra comprometido devido à criação desordenada de áreas alagadas.	Disciplinamento da atividade; estudos de alternativas de abastecimento.
	SP	Produção de areia no Vale do Paraíba acarretando a destruição da mata ciliar, turbidez, conflitos com uso e ocupação do solo, acidentes nas rodovias causados pelo transporte.	Disciplinamento da atividade; estudos de alternativas de abastecimento e de transporte.
	RJ e SP	Produção de brita nas Regiões Metropolitanas do Rio de Janeiro e São Paulo, acarretando: vibração, ruído, emissão de particulado, transporte, conflitos com uso e ocupação do solo.	Aplicação de técnicas menos impactantes; estudos de alternativas de abastecimento.
Calcário	MG e SP	Mineração em áreas de cavernas com impactos no patrimônio espeleológico.	Melhor disciplinamento da atividade através da revisão da Resolução Conama nº 5 de 06/08/1987 (proteção patrimônio espeleológico).
Gipsita	PE	Desmatamento da região do Araripe devido à utilização de lenha nos fornos de queima da gipsita.	Utilização de outros tipos de combustível e incentivo ao reflorestamento com espécies nativas
Cassiterita	RO e AM	Destruição de florestas e leitos de rios.	Racionalização da atividade para minimizar os impactos.

Figura 3.13 – Impactos ambientais da mineração no Brasil (Faria, 2002, apud Lozano 2006).

Portanto, apesar da barragem de contenção ser mais econômica e utilizada pelas mineradoras, ainda é um grande risco para a sociedade e meio ambiente devido aos problemas ambientais relacionados a ela.

### 3.3 Técnicas alternativas para disposição de rejeitos

Técnicas alternativas podem ser utilizadas para a disposição de rejeitos: em minas subterrâneas pode-se realizar o preenchimento de aberturas; em minas a céu aberto pode-se fazer o preenchimento de cavas exauridas; o empilhamento pode ser realizado drenado ou a seco. A disposição pode envolver rejeito e/ou estéril. Ainda, existe a possibilidade em reaproveitar o rejeito para produção de novos bens, a fim de diminuir o passivo ambiental na indústria mineral (Fonseca et al., 2019; Rocha Filho, 2021).

O reaproveitamento de rejeitos tem sido estudado nos últimos anos, como elementos pré-fabricados para construção de edificações civis ou pavimentação (Vale, 2020). No entanto, esta alternativa tem algumas limitações, pois as pré-formas produzidas com rejeitos tendem a ter desempenho inferior às de areia e brita extraída. Além disso, os volumes produzidos a cada ano impossibilitam o reaproveitamento de todos os rejeitos gerados no Brasil. Entretanto, estas alternativas podem ser viáveis em circunstâncias especiais e ajudam a reduzir a quantidade de material a ser movimentado, além de melhorar a imagem pública da empresa (Rocha Filho, 2021).

Figueiredo (2007) informa que os rejeitos podem ser caracterizados por diferentes tipos apresentados abaixo:

- Rejeito espessado (*thickened tailings*): rejeito desaguado de forma parcial e com consistência igual à de uma polpa, com alto teor de sólidos e ainda pode ser bombeável;
- Rejeito em pasta (*paste tailings*): rejeitos espessados pela mistura algum tipo de aditivo químico, geralmente um umectante;
- Rejeito filtrado úmido (*wet cake tailings*): rejeitos saturado ou quase saturado, não permitindo seu transporte via bombeamento;
- Rejeito filtrado seco (*dry cake tailings*): rejeito insaturado (geralmente entre 70% e 85% saturado), não sujeito a bombeamento.

A Figura 3.14 mostra os principais tipos de rejeitos de acordo com seu percentual de sólidos, tensão de escoamento e o tipo de depósito usado para armazenar o material (Silva, 2021).

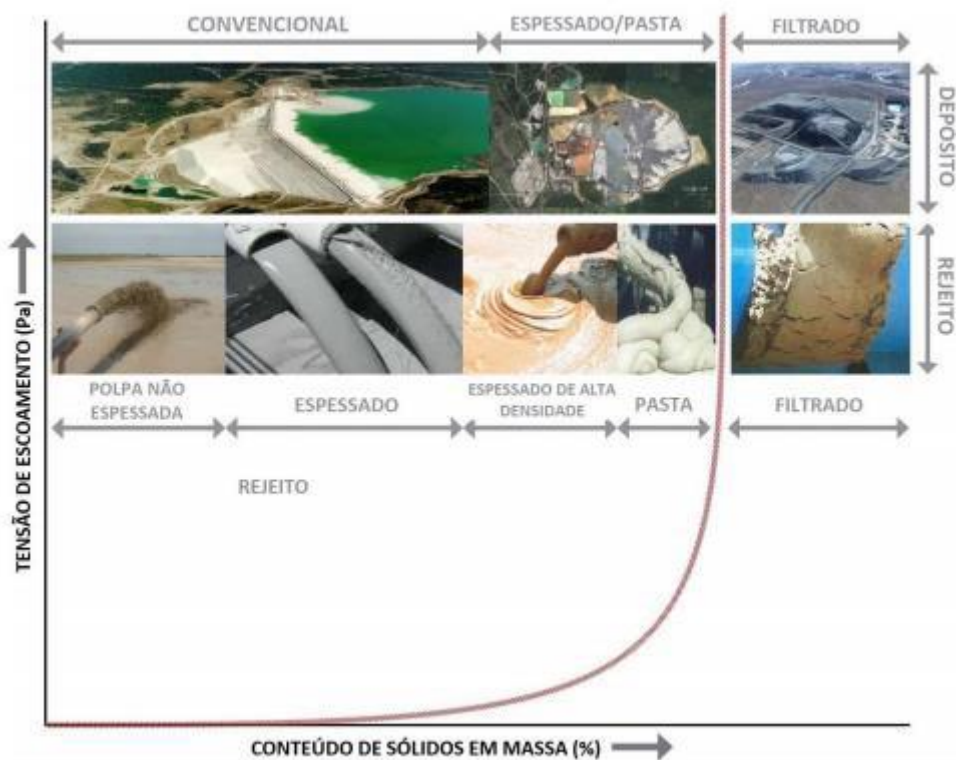


Figura 4.14 – Tipos de rejeito, tensão de escoamento e tipos de depósitos usados para disposição (Alves, 2020).

Recentemente, a maioria dos rejeitos passa por um processo de espessamento antes de ser encaminhado ao seu destino final. Este processo tem o intuito de desaguar a polpa, aumentando o teor de sólidos. Os rejeitos espessados ajudam a aumentar a capacidade de armazenamento nos reservatórios e diminuem o período de preparação e recuperação do local de disposição. Existem vários tipos de espessadores: convencional, de alta capacidade, de alta densidade e cônicos profundos, sendo cada um deles usado dependendo do nível de desidratação e da consistência do rejeito a ser alcançado (Chaves, 2013; Portes, 2013).

Em relação aos rejeitos filtrados, depois da fase de espessamento, os rejeitos são encaminhados para uma planta de filtração onde o material passa por um meio filtrante que tem a capacidade em separar a parte sólida e líquida presentes na polpa (Portes, 2013).



Escolher o melhor equipamento de separação sólido-líquido depende principalmente das características do material a ser processado e dos objetivos técnico-econômicos do negócio. A figura 3.15 mostra os tipos de rejeitos conforme a concentração de sólidos, equipamentos utilizados para espessamento ou filtragem e o meio pelo qual são transportados até o destino final (Alves, 2020).

Consistência do rejeito		Tecnologia de desaguamento		Transporte	
<b>Polpa</b> 30 a 58% de sólidos		Espessador convencional		Por gravidade a partir de calhas ou tubulação de baixa pressão. Com ou sem bombas centrífugas	
<b>Lama espessada de alta porcentagem de sólidos</b> (55 a 65%)		Espessador <i>High rate</i>		Bombas centrífugas ou de diafragma	
<b>Pasta de baixa densidade</b> 60 a 70% de sólidos		Espessadores <i>Deep bed</i> ou <i>Deep cone</i>		Bombas de pistão ou diafragma (alta pressão)	
<b>Pasta de alta densidade</b> 65 a 75% de sólidos		Espessador <i>Deep cone</i> ou filtro		Bombas de deslocamento positivo com tubulação de alta pressão	
<b>Torta filtrante</b> > 80% de sólidos		Filtro		Caminhão ou correia	

Figura 3.15 – Tipos de rejeito, equipamento utilizado para desaguamento e meio de transporte utilizado até a destinação final (Alves, 2020).

De acordo com a figura 3.15 verifica-se que para cada característica reológica do rejeito é utilizado um tipo de equipamento diferente, assim como a forma de desagüamento e transporte deste subproduto até ao local de destinação final.

A figura 3.16 apresenta dados históricos em relação à utilização das técnicas alternativas de rejeitos de mineração dos anos de 1970 até 2010.

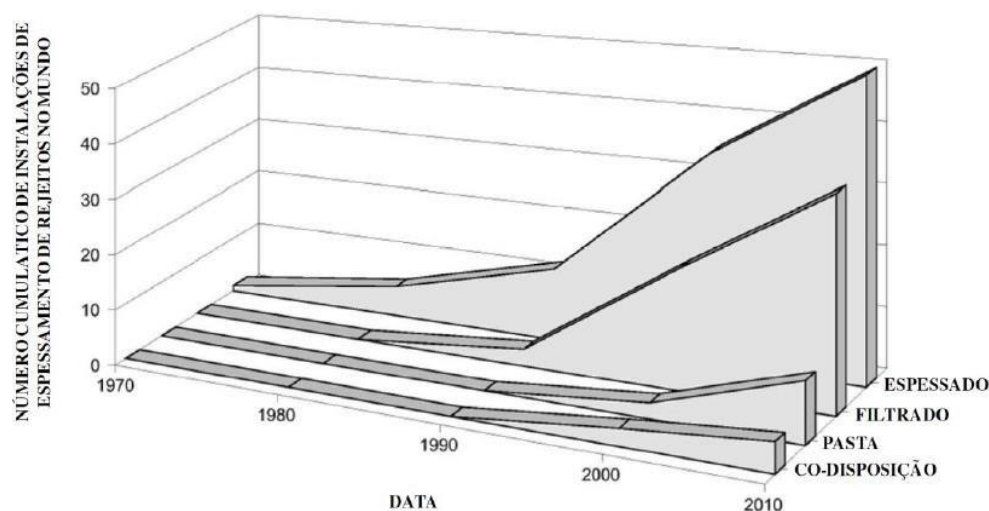


Figura 3.16 – Distribuição dos sistemas de disposição de rejeitos (Davies, 2011).

Por meio dos dados mostrados na figura 3.16, percebe-se que entre os métodos alternativos para disposição de rejeito, os de desagüamento convencional (espessamento e filtragem) predominam em comparação as técnicas em pasta e codisposição.

As próximas subseções apresentam uma descrição detalhada de cada técnica alternativa de disposição de rejeitos de mineração, descrevendo quais são suas características, o seu funcionamento, entre outras informações.

### 3.3.1 Disposição de rejeitos em cavas subterrâneas

A disposição de rejeito em cavas subterrâneas é muito utilizada em mineração subterrânea. Nessa técnica o rejeito é usado para preencher cavidades exauridas e apoiar operações em certos métodos de mineração, como cortar e preencher e retroceder. No entanto, esta solução é adequada apenas para locais onde a lavra subterrânea é realizada (Rocha Filho, 2021).

Nesse tipo de disposição os rejeitos são misturados com materiais como: areia, cimento, estéril ou outros materiais para bombear e preencher os espaços que surgem na fase da lavra a fim de prevenir e impedir o colapso das minas subterrâneas. Assim, estes rejeitos pode ser aplicados ao método de lavra subterrânea “*room and pillar*” (câmara e pilar), como uma forma de suporte nos pilares de apoio e maximização da recuperação do corpo do minério, ou na técnica de lavra “*cut and fill*” (corte e enchimento), dando base e preenchendo a lacuna gerada pela extração de minério (Engels, 2006 apud Souza, 2018).

Figueiredo (2007) afirma que na disposição em minas subterrâneas há duas tecnologias de preenchimento definidas conforme a finalidade pretendida. A primeira ocorre concomitantemente com a lavra, onde o preenchimento dá suporte para a formação de um novo piso de forma que o piso acima seja removido e lavrado, e o preenchimento pode ser obtido pela mistura de rejeitos com material estéril ou areia no formato de “*backfill*” ou “*paste fill*”. Já a segunda envolve o aumento permanente da estabilidade do maciço rochoso por meio do preenchimento de cavidades previamente lavradas. O preenchimento é feito ao mesmo tempo que a lavra ou após o término das atividades; para situações em que é necessária maior resistência são usados rejeitos e/ou estéril misturado com areia e cimento, mas nem sempre o cimento é preciso para estabilidade.

A adição de cimento à mistura evita que o lençol freático seja contaminado, pois os rejeitos sofrem alterações químicas e físicas. No caso de rejeitos de pirita, auxilia na diminuição da oxidação e formação de ácidos, minimizando que ocorra a migração de metais (Engels, 2006 apud Souza, 2018).

Conforme Engels (2006 apud Souza, 2018) há quatro tipos de preenchimentos que são usados na técnica de disposição em minas subterrâneas. O quadro 3.1 descreve as particularidades de cada uma destes tipos de preenchimento.

Quadro 3.1 – Tipos de preenchimento usado minas subterrâneas

Tipos de preenchimento	Descrição
<i>Pastefill</i>	O pastefill é um preenchimento em pasta tendo cimento como ligante, que consiste na desidratação do rejeito até alcançar > 65% dos sólidos (de acordo com o peso) e é bombeado para a cavidade subterrânea por meio de uma bomba de deslocamento positivo. A pasta tem uma aparência uniforme e quando é depositada no subsolo o vazamento de água é bem pequeno ou não existe. Não é preciso inserir uma grande quantidade de cimento para atingir a resistência necessária. No entanto, a menor fluidez torna os mecanismos de transporte mais caro.
<i>Sandfill</i>	Preenchimento utilizado quando os rejeitos são ciclados para separação de materiais ultrafinos de grosseiros. As lamas são descartadas por causa da baixa permeabilidade e são armazenadas em superfície. As areias são bombeadas hidráulica e armazenadas nas câmaras subterrâneas e misturadas com outros materiais, como, por exemplo, cimento. À medida que as areias se depositam e consolidam, o excesso de água é eliminado ou perdido por infiltração.
<i>Cemented fill</i>	O preenchimento cimentado é quando ocorre o depósito de rejeitos e estéreis em câmaras subterrâneas vazias, utilizado quando há o armazenamento de estéreis e o excesso de espaços vazios precisa ser preenchido. Rejeitos misturados com cimento podem ser despejados sobre as rochas residuais para preencher e ligar os vazios, sendo útil quando baixos volumes de cimento são necessários (implicações de custo), e é utilizado como impermeabilizante.
<i>Rockfill</i>	Preenchimento a seco são fragmentos de rochas junto com rejeitos finos. É considerado um método caro, pois precisa de uma maior quantidade ligante pra alcançar a resistência necessária. É mais apropriado para a técnica “ <i>cut and fill</i> ”. Podem ser descarregados por meio de caminhões, aberturas ou carregadeiras subterrâneas (LHD).

Fonte: adaptado de Engels, 2006 apud Souza, 2018; Gomes, 2016.

O *pastefill* (preenchimento em pasta) é mais econômico em relação à utilização de materiais, no entanto se torna caro em relação aos meios de transporte. O *sandfill* é um preenchimento em pasta, mas diferente do *pastefill*, é usado para separar lamas e frações de áreas. O *cemented fill* (preenchimento cimentado) é mais viável economicamente, pois utiliza menores quantidades de cimento. O *rockfill* (preenchimento a seco) é mais usado para lavra por corte e enchimento e é um método bem caro em comparação as demais formas de preenchimento, pois necessita de muito material ligante para alcançar a resistência necessária.

### 3.3.2 Disposição de rejeitos subaérea

Na disposição subaérea, os rejeitos são depositados em camadas finas, permitindo que o material se densifique e seque antes da inserção da próxima camada. Essa técnica resulta em um material mais denso, com menor volume e maior resistência devido ao adensamento e secagem dos rejeitos. É preciso ressaltar que neste método os rejeitos finos são processados sem nenhum tipo de modificação na planta (Portes, 2013, Alves, 2020).

A técnica de disposição subaérea possui benefícios que não estão apenas relacionados a uma maior densificação do material, mas também com o aumento significativo de sua resistência. Como a estocagem e a espera são alternadas, são necessários diferentes reservatórios ou baias em número e tamanho suficientes para que o tratamento aconteça em um deles, enquanto a drenagem e a secagem possam ocorrer no outro (Oliveira Filho e Abrão, 2015).

De acordo com Lima (2006), na técnica subaérea espera-se que a lama ao ser lançada sofra os seguintes processos físicos quando liberado: sedimentação, adensamento, ressecamento. Como exemplo, é ilustrado na figura 3.17 a forma como esses fenômenos ocorrem durante as duas fases do método.

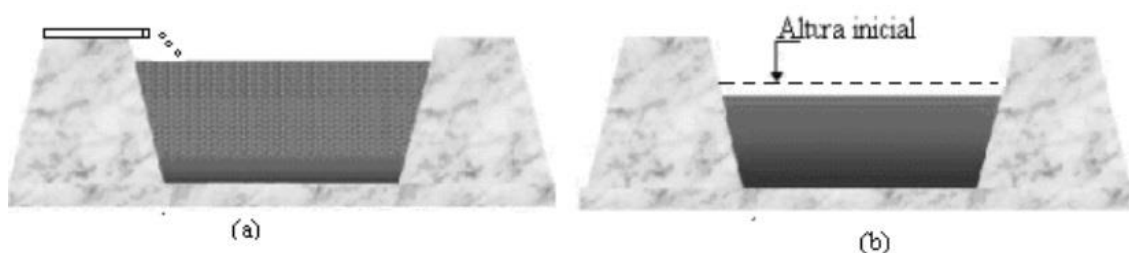


Figura 3.17 – Etapas da técnica de disposição subaérea: (a) Período de enchimento: sedimentação e adensamento, e (b) período de espera: adensamento e ressecamento (Almeida, 2004 apud Lima, 2006).

A etapa de sedimentação é bem rápida e a variação de volume inicial e final depende do teor de sólidos inicial da polpa. Durante as etapas de adensamento e ressecamento, pode acontecer a sedimentação significativa do material depositado, que é retardada ao longo do tempo. A etapa de ressecamento é dividida em duas fases diferentes: ressecamento unidimensional e tridimensional (Lima, 2006).

O método de disposição subaérea em comparação de disposição convencional tem a vantagem de proporcionar o armazenamento do dobro aproximadamente da quantidade de rejeito estocado em uma mesma área. Este benefício é bem importante, pois a técnica convencional utiliza uma área muito grande (Silva, 2021).

### 3.3.3 Disposição de rejeitos espessados ou em pasta

O espessamento é um método de separação da fase sólida da líquida dos rejeitos com o objetivo de aumentar o percentual de sólidos da polpa para posterior bombeamento assim como aumentar o volume de água recuperada. É uma operação contínua e normalmente faz uso de floculantes, que têm a função de agregar as partículas sólidas em suspensão e aumentar a velocidade de deposição. (Lara, 2011; Portes, 2013).

Portes (2013) descreve em seu estudo que a operação de um espessador convencional consiste na alimentação da polpa e sedimentação das partículas. Esta operação gera dois produtos: na parte superior do tanque, a água clarificada (*overflow*) sai através de vertedouros e na parte inferior a polpa (*underflow*) com percentual de sólidos maior do que a alimentação é direcionada para o cone de descarga com o auxílio de pás raspadoras. A figura 3.18 representa como é uma seção transversal típica de um espessador convencional.

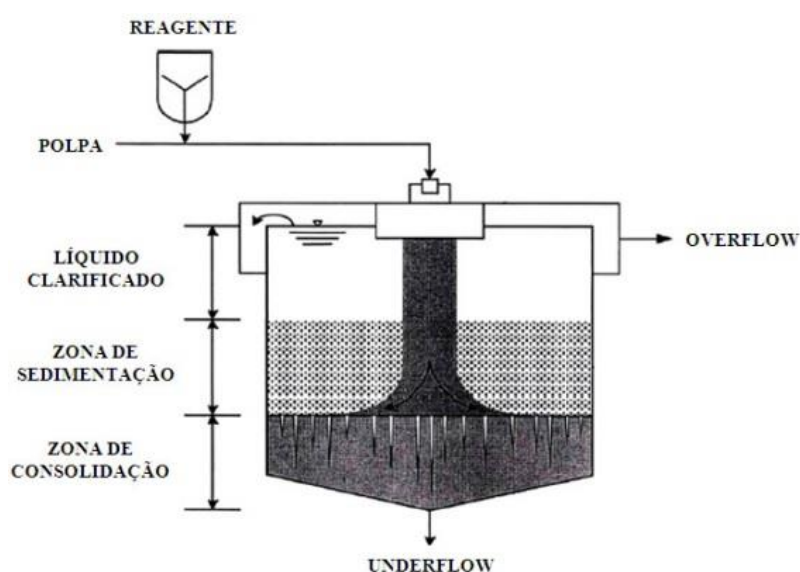


Figura 3.18 – Seção típica de um espessador (Fonte: adaptado de Azam e Imran, 2008 apud Portes, 2013).

Os equipamentos de sedimentação de grande porte passaram a ser utilizados a partir de 1905 com a invenção do espessador Dorr e desde então técnicas de dimensionamento e modelos matemáticos mais precisos estão sendo desenvolvidos permitindo maior assertividade na construção de novas metodologias e processos de modelamento de espessadores. Os modelos de Kynch, Coe e Clevenger, Talmage e Fitch, Oltmann são exemplos que demonstram essa evolução na busca e definição de equipamentos e respectivas capacidades para aplicação na indústria mineral (GUIMARÃES, 2010).

Coe e Clevenger que é o método mais antigo, mas ainda muito empregado para o dimensionamento de espessadores, postula que a razão de espessamento é função exclusivamente da velocidade da partícula na zona de sedimentação livre. Experimentalmente a partir de ensaios de proveta é realizada construção de curvas de sedimentação para polpas com diferentes percentuais de sólidos, que variam entre alimentação e a concentração desejada de *underflow* e determinadas as velocidades de sedimentação. O fluxo mássico de sólidos pode ser calculado por meio da equação 3.1:

$$Q_s = \frac{V_{so}}{\frac{1}{\varepsilon_{so}} + \frac{1}{\varepsilon_{su}}} \quad (3.1)$$

Sendo  $Q_s$  o fluxo de sólidos no sedimentador,  $V_{so}$  a velocidade inicial de sedimentação em um teste em batelada com concentração volumétrica de sólidos inicial  $\varepsilon_{so}$  e  $\varepsilon_{su}$  a concentração de *underflow* desejada. A capacidade do sistema será o menor valor encontrado para cada percentual de sólidos testado (GUIMARAES, VALADAO e COSTA, 2011).

A determinação da área total do espessador necessário para processar toda a massa alimentada prevista pelo projeto é realizada a partir do cálculo da área unitária e para isso faz-se o inverso do valor de  $Q_s$ . A razão de espessamento que pode ser dada em t/m<sup>2</sup>/h é calculada utilizando as velocidades de sedimentação com a equação:

$$\text{Razão de espessamento} = 1.33 \times \frac{\% \text{ de sólidos na alimentação} - \% \text{ de sólidos no UF}}{\text{velocidade de sedimentação} \times \text{densidade da polpa}} \quad (3.2)$$

Os valores de razão de espessamento encontrados para cada percentual de sólidos na alimentação testado devem ser tabulados e identificado o menor valor, comumente denominado de razão crítica por consistir na pior situação, deve ser o escolhido para o dimensionamento do equipamento (SANTOS, 2018).

A Figura 3.19 demonstra os principais tipos de espessadores usados na indústria de mineração e suas respectivas características.

<b>Tipos</b>	<b>Forma</b>	<b>Características</b>
Convencional 		Ação ineficiente do floculante Grande área Baixa densidade do Underflow
High Rate ou High Capacity 		Adição de floculante via feedwell (ação eficiente) Área menor que o convencional Densidade do underflow similar ao espessador convencional
High Density 		Altura maior que o High Capacity Redução da área em relação ao High Capacity Máxima densidade da polpa no underflow
Deep Cone 		Aumento da altura em relação ao High Density Maior Redução da área Produção de Pasta mineral

Figura 3.19 – Tipos de espessadores usados (Door Oliver, 2004 apud Guimaraes, 2011).

Comparando os tipos de espessadores, observam-se algumas diferenças e avanços dos demais equipamentos em relação ao convencional. Como por exemplo, melhora da eficiência da ação floculante nos espessadores de alta capacidade, diminuindo a área unitária e o aumento da altura em espessadores de pasta.

Do processo de espessamento de pasta é gerado um produto com o teor de sólidos superior que a polpa dos espessadores convencionais ou de alta capacidade denominada de pasta mineral. Esta pasta possui alta consistência e viscosidade que é capaz de fluir sem segregação, o formado dos taludes são muito abatidos (normalmente entre 2% e 6%).



Como a praia de rejeitos tem baixa inclinação, a forma do talude durante a disposição deve ser estimada com antecedência (Carvalho, 2017; Rodrigues, 2017). A figura 3.20 apresenta exemplos de como é a consistência da pasta mineral.



Figura 3.20 – Consistência da pasta mineral (Hernández et al., 2008 apud Lara, 2011).

É de grande importância analisar a textura e a consistência da pasta para ter conhecimento sobre o ângulo de disposição final, usando técnicas de testes de abatimento de calhas ou ensaios de *slump test* (Lara, 2011), pois a partir do momento que o teor de sólidos cresce, é possível ter um maior ângulo e volume de disposição, conforme mostra a figura 3.21 (Rodrigues, 2017).

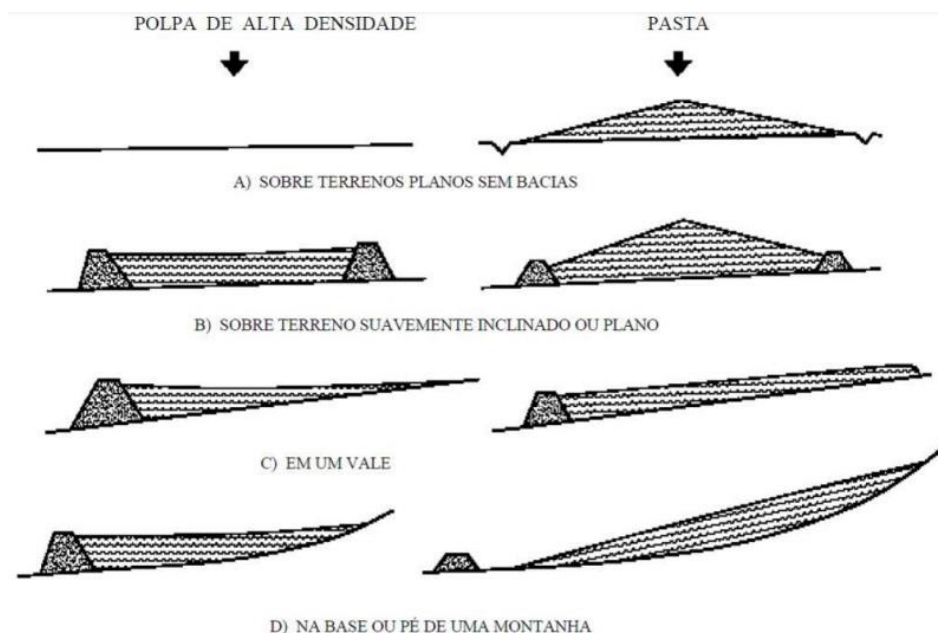


Figura 3.21 – Ângulos de disposição para polpas de alta densidade e pasta em diferentes tipos de terreno (Laudriault, 2002 apud Hernández 2005).

O *slump test* é bem fácil e simples de ser executado e envolve a simulação do processo de disposição de rejeitos em laboratório ou em campo, realizando a medição do ângulo de disposição final (Portes, 2013).

### 3.3.4 Disposição de rejeitos filtrados

A filtração é um processo de separação sólido líquido no qual as partículas sólidas ficam retidas em um meio filtrante, como o tecido, que por sua vez permite apenas a passagem do líquido (filtrado). A filtração ocorre pela aplicação de uma força externa ao sistema, que pode ser de natureza distinta, como: gravidade, vácuo, pressão ou ação centrífuga, que está sujeito ao tipo de filtro usado (Guimarães, 2011; Portes, 2013).

Uma descrição do processo de filtração, considerando esse como a passagem de um fluido por um meio poroso, pode ser dada a partir de uma equação empírica obtida experimentalmente e conhecida como “Lei de Darcy”.

$$Q = \frac{\beta}{\mu} \cdot \frac{\Delta P}{L} \quad (3.3)$$

Onde:

$Q$  é o fluxo através do leito;

$\beta$  é a permeabilidade do leito;

$\Delta P$  é a diferença de pressão através do leito;

$\mu$  é a viscosidade do líquido;

$L$  é a espessura do leito.

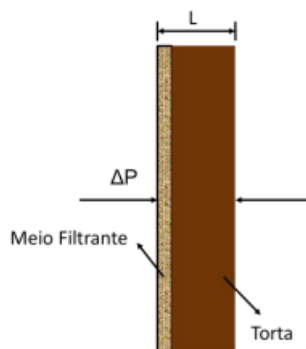


Figura 3.22: Desenho representativo de um meio filtrante e uma torta (adaptado de Silva, 2006 apud Araujo Junior 2014).

A permeabilidade de um leito de partículas (B) foi descrita por Kozeny pela seguinte relação:

$$\beta = \frac{1}{\kappa} \cdot \frac{\varepsilon^3}{S^2(1 - \varepsilon)^2} \quad (3.4)$$

Onde:

$\varepsilon$ : porosidade do leito;

$k$ : constante, função da porosidade, forma das partículas, orientação das partículas no leito e da distribuição granulométrica;

$S$ : área superficial específica.

Somando as duas equações tem-se:

$$Q = \frac{1}{\kappa \mu S^2} \cdot \frac{\varepsilon^3}{(1 - \varepsilon)^2} \cdot \frac{\Delta P}{L} \quad (3.5)$$

Segundo Chaves (2004) citado por Araujo Junior (2014) ao analisar essa equação pode se chegar às seguintes conclusões:

- ✓ Aumentando o diferencial de pressão através do leito, aumentará o escoamento de fluido através do leito;
- ✓ Diminuindo a viscosidade do líquido, o escoamento através do leito aumentará;
- ✓ Diminuindo a espessura do leito, aumentará o escoamento através do mesmo;
- ✓ Diminuindo a área superficial específica das partículas do leito, aumentará o escoamento;
- ✓ Aumentando o índice de vazios do leito haverá aumento do escoamento através do leito.

Para o desaguamento de rejeitos fica a claro uma maior dificuldade para a filtragem dos materiais classificados como *ultrafines tailings* quando comparados aos *coarse tailings*. Essa maior dificuldade tende a inviabilizar tecnicamente e economicamente a utilização de certas tecnologias para a filtragem de materiais com alto percentual de partículas ultrafinas.

O quadro 3.22 apresenta um resumo dos principais mecanismos de filtração que são usados pela indústria mineral, suas características, os modelos de filtros e os principais fornecedores.

<b>Tipos</b>	<b>Características</b>	<b>Modelos de Filtros</b>	<b>Principais Fornecedores</b>
Filtração 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
Filtração sob pressão	Uma pressão positiva é aplicada na polpa	Filtro prensa horizontal, filtro prensa vertical	Andritz, FLSmidth (Pneumapress), Larox,
Filtração centrífuga	Utiliza a força centrífuga para forçar a passagem do líquido	Centrífugas verticais e Decanters	Andritz, GEA (Westfalia), Alfa Laval
Filtração hiperbárica	Em que se combinam vácuo e pressão	Filtro de disco encapsulado ou hiperbárico	Andritz, Bokela, Gaudfrin
Filtração capilar	Utiliza a ação de capilares de meios cerâmicos porosos para efetuar o desaguamento	Ceramec	Larox

Figura 3.23 – Principais mecanismos de filtração (Guimarães, 2011).

A definição do melhor equipamento de filtração a ser usado depende da economia do processo e das propriedades do material a ser filtrado, como viscosidade, densidade e reatividade química do fluido; distribuição granulométrica, tamanho e forma das partículas sólidas; a concentração da suspensão de alimentação; a quantidade de material que deve ser manipulado; e o grau de separação do material (Luz, Sampaio, França, 2010).

A partir do método de disposição dos rejeitos filtrados pode-se usar vários tipos de filtros como: filtro horizontal de correia, filtro de disco convencional, filtro prensa horizontal. O objetivo é alcançar menores valores de umidade (entre 6% e 12% aproximadamente) para a disposição em pilhas procurando reduzir possíveis impactos ambientais (Guimarães, 2011).

De acordo com Guimarães (2011) existem algumas variáveis que afetam diretamente a taxa de filtração. Estas variáveis são subdivididas em propriedades dos sólidos, torta de filtro/filtrado, polpa e equipamentos, da torta/filtrado, da polpa e do equipamento, conforme e demonstrado na figura 3.23.

Sólido	Torta/Filtrado	Polpa	Equipamento
Área superficial específica	Espessura da torta	Taxa de alimentação	Ciclo
Distribuição granulométrica	Porosidade do leito	Porcentagem de sólidos	Nível de vácuo e/ou sopro e/ou pressão
Forma geométrica	Permeabilidade do leito	Temperatura Viscosidade	Meio filtrante
Propriedades de superfície	Viscosidade do filtrado	Ph	Geometria dos componentes
Massa específica		Adição de reagentes auxiliares	Nível de agitação

Figura 3.24 – Variáveis que interferem na taxa de filtração (Alves, 2020).

### 3.3.5 Disposição de rejeitos por empilhamento drenado

No método de empilhamento drenado, os rejeitos granulares são depositados em forma de pilhas conforme mostra a figura 3.24 por meio de técnicas de aterro hidráulico. As pilhas precisam incorporar um processo de drenagem interna e o coeficiente de permeabilidade dos rejeitos deve permitir a drenagem do material lançado de acordo com as características operacionais da região (Portes, 2013).



Figura 3.25 – Escavação de camada de rejeito disposto em empilhamento drenado (Pimenta, 2011 apud Portes, 2013).

A partir da figura acima pode ser observado que a camada de rejeitos apresenta uma boa capacidade de suporte, proporcionando que os equipamentos de terraplenagem possam transitar para alteamento da pilha (Portes, 2013).

De acordo com o IBRAM (2016, p. 22) a técnica por empilhamento drenado:

[...] em vez de utilizar uma estrutura impermeável de barramento, adota-se uma estrutura drenante, que não retém a água livre que sai dos poros dos rejeitos. O empilhamento drenado libera esta água por meio de um sistema de drenagem interna, de grande capacidade de vazão, ligada aos rejeitos do reservatório.

De acordo com Pimenta (2011 apud Portes 2013) os principais objetivos da técnica de empilhamento drenado são:

- Obtenção de uma massa insaturada e estável;
- Ter maior densidade, capacidade e vida útil;
- Menor dano potencial em caso de eventual ruptura;
- Maior facilidade com fechamento e recuperação ambiental;
- Aplicação segura de métodos a montante, com baixo risco de liquefação e ruptura.

A técnica de empilhamento drenado não poder ser usada para tratar rejeitos finos por não ter condições geotécnicas adequadas. Portanto, quando este método alternativo for utilizado, os rejeitos finos devem ser descartados separadamente (Portes, 2013).

### **3.3.6 Disposição por empilhamento de rejeitos filtrados**

O empilhamento de rejeitos filtrados é uma técnica que utiliza a filtragem para a preparação do rejeito que será empilhado seguindo os critérios geotécnicos de forma a garantir sua estabilidade (Oliveira Filho e Abrão, 2015; Silva, 2021). A figura 3.25 apresenta uma imagem do empilhamento de rejeitos filtrados construída na mina de Cerro Lindo, no Peru.



Figura 3.26 – Pilha de rejeito filtrado (*Dry stack*) em operação na Mina Cerro Lindo, Peru (Golder Associates, 2015 apud Alves 2020).

Nessa técnica, é realizado o desaguamento dos rejeitos até uma determinada porcentagem de sólidos através de um espessador, posteriormente o *underflow* é bombeado para uma etapa de filtragem, obtendo normalmente uma torta insaturada que finalmente é empilhada. Em seguida, este material é transportado até o local de disposição por correia transportadora ou caminhão, sendo que para o último, geralmente só é economicamente viável se o índice de geração de rejeitos for inferior a 10 mil toneladas por dia (Alves, 2020).

### 3.3.7 Codisposição e a disposição compartilhada

O método de codisposição é conceituado como sendo “a situação em que se misturam previamente os rejeitos ou o rejeito com o estéril para em seguida dispor”. Já a disposição compartilhada é definida como “a situação em que os rejeitos ou o rejeito e o estéril são dispostos num mesmo local, porém sem estarem previamente misturados” (Alves, 2009 apud Portes, 2011, p. 17).

As técnicas de codisposição e a disposição compartilhada podem ser escolhas ideais se tiverem um único local para a disposição dos rejeitos como cavas exauridas ou outras áreas mineradas. No caso de existência de outras áreas livres para o descarte dos rejeitos, elas são mais economicamente viáveis se forem depositadas separadamente para impedir a complexidade técnica e operacional da tecnologia de descarte em conjunto (Silva, 2014).

A codisposição e a disposição compartilhada demandam pesquisas que especifiquem as características físicas, químicas e comportamento geotécnico dos rejeitos, especialmente em relação à resistência e permeabilidade do material. Na codisposição, é preciso considerar a trabalhabilidade do material a fim de poder viabilizar os procedimentos práticos operacionais (Silva, 2021). Sendo assim, a figura 3.26 mostra a relação em peso da mistura entre estéril e rejeito e a viabilidade técnica na utilização do método de codisposição (Leduc et al., 2003 apud Silva, 2014).

Relação estéril-rejeito	Potencial de aplicação
> 8:1	Provavelmente adequado para co-disposição
4:1 a 8:1	Requer estudos mais detalhados para definição
< 4:1	Provavelmente não adequado para co-disposição

Figura 3.27 - Relação estéril/rejeito e viabilidade da técnica de codisposição (Leduc et al., 2003 apud Silva, 2014).

A codisposição dos rejeitos e estéreis é um método de mistura relativamente simples e flexível, pois pode controlar o processo de uniformidade do material. No entanto, esta técnica também requer a aplicação de equipamentos, mistura e transporte de materiais, o que aumenta muito o custo de implementação e operação da tecnologia, limitando assim sua aplicabilidade (Silva, 2014).

Em relação disposição compartilhada de rejeitos e estéreis, as tecnologias mais usadas são: as células para disposição e rejeito, disposição de rejeitos em camadas finas e a injeção de rejeitos em depósitos de estéreis. As células de rejeitos incluem a construção de um dique de estéril que recebem rejeitos, como mostra a figura 3.27. Estas células são preenchidas em etapas diferentes, de maneira que uma é formada e a outra em fase de secagem e de construção. Quando os rejeitos estiverem secos e espessados, o processo será reiniciado e a solução estéril será jogada nas células que foram sólidas. Para evitar possíveis problemas futuros, o planejamento dessa forma de disposição deve ser eficaz para impedir que as poropressões comprometam a estabilidade dos taludes da pilha, minimizando assim o risco de sua ruptura (Silva, 2021).



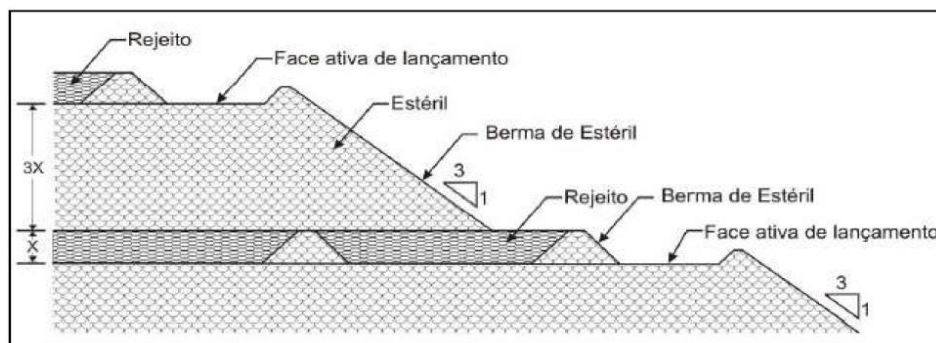


Figura 3.28 – Células de rejeitos em depósitos de estéril (Leduc et al., 2003 apud Silva, 2014).

O método de disposição alternada entre camadas de rejeito e estéril compreende no lançamento de forma alternada desses dois materiais em uma mesma área de disposição. Este processo faz com que as camadas de rejeitos sejam infiltradas nas de estéril e as poropressões se dissipem, diminuindo as forças nas camadas de rejeitos, conforme mostra na figura 3.28. É preciso realizar vistorias visuais no material no decorrer de todo processo construtivo, bem como controlar o lançamento de camadas (Silva, 2021).

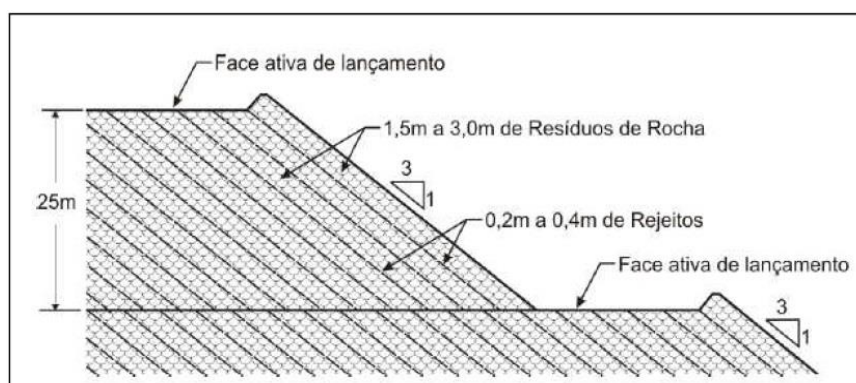


Figura 3.29 – Camadas alternadas de estéril e rejeitos (Leduc et al., 2003 apud Silva, 2014).

A injeção de rejeitos em depósitos de estéril é uma técnica de inserção de rejeito espessado em forma de uma pasta em perfuração vertical ou inclinada nas pilhas preexistentes de estéril, conforme ilustrado na figura 3.29. Este método possui desvantagens, pois precisa de equipamentos de transporte de rejeitos para levar ao local de disposição, que na maioria das vezes é realizado por bombeamento. Além disso, a manutenção contínua da instalação e operações de perfuração aumenta o custo do processo operacional (Silva, 2021).

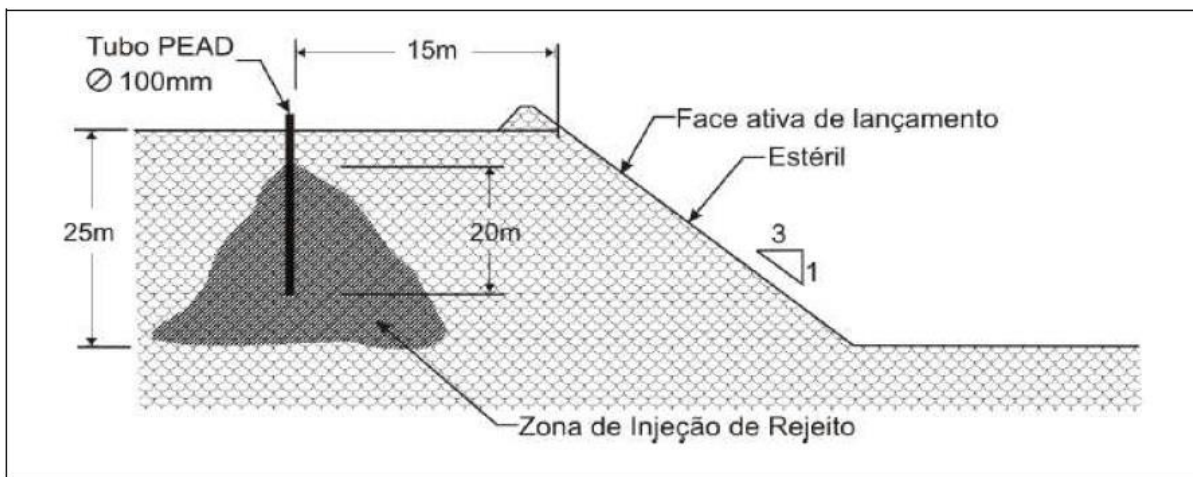


Figura 3.30 – Injeção de rejeito em furos verticais no topo do depósito de estéril (Leduc et al., 2003 apud Silva, 2014).

A codisposição e a disposição compartilhada não exigem o uso de grandes áreas para disposição, visando alcançar melhores as propriedades de resistência e liberação de água desses materiais. Outro ponto a ser observado é a presença de cavas exauridas ou áreas de minas, o que possibilitaria a utilização destes métodos (Silva, 2014).

### 3.4 Análise comparativa das técnicas convencionais e alternativas de disposição de rejeitos de mineração

Com o intuito de identificar a melhor alternativa de disposição de rejeitos de mineração em relação às barragens convencionais, o quadro 3.2 apresenta o levantamento de um comparativo das vantagens e desvantagens em relação a estes métodos com os tradicionais.

Quadro 3.2 – Principais métodos alternativos (vantagens e desvantagens)

<b>Métodos alternativos</b>	<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
Disposição convencional	Custo baixo de operação; Capacidade elevada de disposição; Facilidade de transporte do material até o local de descarte por meio de bomba centrífuga.	Cumprimento de atendimentos legais de alta complexidade; Potencial baixo de recuperação da área; Riscos de acidentes e incidentes.
Cavas subterrâneas	Fácil recuperação das áreas à medida que a mineração avança; Diminuição do impacto ambiental e visual; Minimização dos custos operacionais.	Problemas relacionados à percolação e estabilidade de líquidos; Pouco volume disponível para disposição devido ao amplo volume ocupado pela estrutura de contenção.
Subaérea	Recuperação de água alta; Maior capacidade de armazenamento de material por área, em relação a método normal; Maior densidade e estabilidade das estruturas.	Custo elevado de operação de atividade de espessamento e infraestrutura; É preciso ter mais reservatórios para que a operação continue.
Filtragem	Área menor para disposição; Impacto ambiental menor; Menor utilização de água no processo; Variedade de equipamentos.	Alto custo de aquisição de equipamento; Custo operacional alto; Máquinas para transporte e empilhamento; Relação entre a capacidade da mina e a taxa unitária de filtragem; Pode não ser viável para lamas.
Empilhamento drenado	Menor risco de liquefação; Custo baixo de operação; Condições ambientais melhores para fechamento e recuperação da área.	Adequado apenas para rejeitos com alto coeficiente de permeabilidade; O sistema de drenagem interna deve ser forte e eficiente.
Empilhamento de rejeitos filtrados	Impactos ambientais baixos; Reúso de água; A restauração da vegetação pode ser realizada simultaneamente com a operação.	Custo operacional alto; Não se aplica a rejeitos com granulometrias finas (>74 µm).
Espessamento ou pasta	Permite bombear o rejeito; Redução de água, custo e menor impacto ambiental; Recirculação de água.	Os sólidos podem mudar a consistência do material; Alto custo energético e de equipamento.
Codisposição	Recuperação de área minerada Não utiliza bombas; Aproveita equipamentos já usados; Melhoria das características geométricas.	Mistura limitada entre estéril e rejeito; Possibilidade de comprometimento das Características geotécnicas; Rejeito quimicamente ativo ou tóxico; Contaminação de lençóis freáticos.
Disposição compartilhada	Recuperação de área minerada Aproveitamento de áreas já usadas para disposição de rejeitos; Diminuição de comprometimento ambiental de áreas para disposição de rejeitos.	Precisa ser projetado e controlado com mais cuidado durante a operação do sistema; Rejeito quimicamente ativo ou tóxico.

**Fonte:** Adaptado de Fonseca et al., 2019; Stela et al., 2020; Silva, 2021.

Comparando as técnicas convencionais e alternativas é possível observar que a segunda é mais vantajosa em relação à primeira no sentido de maior recuperação de água no processo, é demandada uma menor área para disposição e principalmente pelo menor risco de impactos ambientais.

A disposição em cavas subterrâneas possui vantagens em relação ao custo operacional, recuperação das áreas e para o meio ambiente devido à redução dos impactos. No entanto, existem problemas relacionados à percolação e estabilidade de líquidos. É adequada apenas para lavra subterrânea não sendo aconselhável utilizá-la em outras situações.

Stela et al. (2020) afirmaram que apesar do custo de aquisição de equipamento ser alto, a técnica de filtragem é mais viável, pois recupera a maior parte da água utilizada no processo. As tortas resultantes têm baixa umidade, possibilitando um manuseio mais seguro e reduzindo o impacto ambiental. Além disso, a utilização desse método reduz a área de disposição com estruturas contenção, mas requer investimento em tecnologia de filtragem.

O empilhamento drenado tem muitas vantagens ambientais e operacionais, entretanto é preciso se atentar no fato que este método somente é adequado para rejeitos com alto coeficiente de permeabilidade. De acordo com Oliveira Filho e Abrão (2015) esta técnica não é recomendada para rejeitos de granulometria fina, pois não possuem condições geométricas adequadas.

Silva (2021) relata que a técnica de empilhamento de rejeitos filtrados se apresenta como uma alternativa ao método convencional, pois exige menor área de instalação devido ao volume reduzido de rejeitos, o que melhora o controle e a estabilidade do projeto. Outra vantagem é o ganho ambiental em termos de diminuição e reaproveitamento do consumo de água e os benefícios econômicos dessas propriedades. Um dos fatores mais importantes na implementação deste sistema é o teor de umidade do rejeito ao sair da planta de filtragem, o que afeta o subsequente manuseio, transporte, liberação e compactação final do material.

A codisposição e a disposição compartilhada são métodos menos viáveis se comparados com as demais técnicas por causa dos problemas que podem causar ao meio ambiente. Segundo Stela et al. (2019) estes métodos apresentam características parecidas com as barragens de rejeitos, pois em alguns casos os rejeitos precisam ser contidos em barragens que são prejudiciais para o meio ambiente.

#### 4. CONCLUSÕES

Após esse estudo revisional verificou-se que existem muitos métodos de disposição de rejeitos de mineração, cada um com suas peculiaridades. No entanto, a técnica mais utilizada até o momento ainda continua sendo as barragens de contenção de rejeitos convencionais devido ao baixo custo de implantação e por muitas mineradoras não terem recursos necessários para adotar outros métodos alternativos. No entanto, já foi evidenciado que este tipo de técnica de destinação pode acarretar impactos irreparáveis tanto para o meio ambiente quanto para a segurança da população.

A disposição de rejeitos em cavas subterrâneas é um método bem interessante, pois fornece suporte e preenchimento das aberturas geradas pela extração mineral. Este método é ideal para mineradoras que possuem uma cava e necessitam recuperar a área degradada. Porém, esta técnica possui desvantagens como a percolação e estabilidades de líquido que causam riscos de contaminação da água ao redor da cava.

Os métodos alternativos de disposição subaérea, espessamento ou pasta, empilhamento de rejeitos filtrados são ideais para as empresas mineradoras que tem o objeto de reutilizar a água. No entanto, podem ser desvantajosos e menos atraentes em relação ao alto custo operacional e de aquisição de equipamentos.

A disposição de rejeitos filtrados pode garantir maior eficiência de desaguamento, a menor utilização de água no processo, menor área para disposição, além de proporcionar um impacto ambiental menor em comparação ao método convencional. Entretanto, o maior desafio relacionado a esta técnica de disposição de rejeitos é o elevado custo de operação.

O empilhamento drenado apesar de proporcionar benefícios tanto ambientais como operacionais, é adequado somente para rejeitos com alto coeficiente de permeabilidade e seu sistema de drenagem precisa ser bem estruturado para que não ocorram falhas no processo.

A codisposição e a disposição compartilhada são técnicas que reduzem a necessidade de locais para depositar os rejeitos, pois recuperam áreas já mineradas e usadas para

disposição dos rejeitos. Porém, embora estes métodos sejam interessantes, podem contaminar o lençol freático devido à toxicidade dos materiais, precisando ser projetados e controlados se caso forem adotados para o descarte de rejeitos.

Diante disso, verificou-se que a escolha do melhor método de disposição de rejeitos de mineração vai depender do tipo de lavra e projeto, das propriedades físicas e geoquímicas dos rejeitos e da característica geométrica da área, dos custos operacionais e da aquisição de equipamentos.

## **5. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Existem muitas técnicas alternativas de destinação de rejeitos de mineração. Sendo assim, para realização de trabalhos futuros recomenda-se o desenvolvimento de pesquisas com informações importantes que possam contribuir para o aumento do conhecimento em relação a estas técnicas alternativas de disposição de rejeitos, sendo assim, sugere-se:

- Realizar um estudo de análise das condições reais em campo de forma mais aprofundada em relação a uma ou mais técnicas alternativas;
- Efetuar o levantamento de mineradoras que utilizam estas técnicas;
- Avaliar o custo-benefício de cada método convencional e alternativo de disposição de rejeito do processamento de minério.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, P. I. A. **Empilhamento de rejeito filtrado: a expansão de uma alternativa para substituição de barragens**. 2020. 116 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, Departamento de Engenharia de Minas, Ouro Preto, 2020.

ANM. **RELATÓRIO ANUAL DE SEGURANÇA DE BARRAGENS DE MINERAÇÃO 2019**. Brasília, 2020. Disponível em: <<https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/barragens/relatorios-anuais-de-seguranca-da-barragens-de-mineracao/1/relatorio-anual-gsbm-2019-v-final>> . Acesso em 27 de junho 2023.

ARAUJO JUNIOR, A. M. **Influência das variáveis de processo na filtragem cerâmica de polpas de minério de ferro**. 2014. 90f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

CARDOZO, F. A. C. et al. Métodos construtivos de barragens de rejeitos de mineração – uma revisão. **HOLOS**, [S.I.], Ano 32, Vol. 08, p. 877-85, 2016.

CHAVES, A. P. **Teoria e Prática do Tratamento de Minérios. Desaguamento, Espessamento e Filtragem**. 4.ed. São Paulo: Oficina de Textos, v. 2, 240 p. 2013.

COSTA, J. H. B. **Panorama dos estudos de aproveitamento de rejeitos de mineração do estado do Pará de 2010 a 2020**. 2022. 55f. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Engenharia de Minas) – Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas, MG, 2022.

DAVIES, M. Filtered dry stacked tailings – the fundamentals. **Proceedings Tailings and Mine Waste 2011**, Vancouver, BC, Canada, nov. 2011.

DUARTE, A.P. **Classificação das Barragens de contenção de rejeito de mineração e resíduos industriais no estado de Minas Gerais em relação ao potencial de risco**. 2008. 130 f. Monografia (Especialização) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

FRANÇA, S. C. A.; TRAMPUS, B. C. **Desaguamento de rejeitos minerais para aplicação de métodos de disposição alternativos às barragens de rejeito convencionais**. 1. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTIC, 2018.

FIGUEIREDO, M. M. **Estudo de metodologias alternativas de disposição de rejeitos para a mineração Casa de Pedra – Congonhas/MG**. 100 f. 2007. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia Geotécnica ) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2007.

FONSECA, B. **Brasil registra mais de três acidentes em barragens por ano**. A Pública, 2019. Disponível em: <<https://apublica.org/2019/01/brasil-registra-mais-de-tres-acidentes-em-barragens-por-ano/>>. Acesso em: 06 abr. 2023.



FONSECA, H. G. Á. et al. Metodologias de disposição de rejeitos de minério de ferro para substituir as barragens de rejeitos. **Proficiência**, [S.I.], n. 12, p. 54-72, 2019.

FREITAS, C.M.; Silva, M.A. Work accidents which become disasters: Mine tailing dam failures in Brazil. **Revista Brasileira de Medicina do Trabalho**, n. 17, p. 21–29.

GOMES, T. M. H. **Estudo da estabilidade de portas de enchimento – Caso de estudo da mina da Somincor**. 2016. 107 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geológica e de Minas) - Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2016.

GUIMARÃES, F. A. V. **Revisão nos métodos de dimensionamento de espessadores e comparação dos modelos industriais**. 2010. 221f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 2010

GUIMARÃES, N. C. **Filtragem de Rejeitos de Minério de Ferro Visando a sua Disposição em Pilhas**. 2011. 114 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

HERNÁNDEZ, C. A. O. **Caracterização de Pastas Mineraias**. 2005. 177 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Minas, Belo Horizonte, MG, 2005.

INOUE, Y. **Estudo revisional dos métodos de disposição de rejeitos desaguado**. 2021. 61 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Minas) – Universidade Federal de Catalão, Catalão, 2021.

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

KOSSOFF, D.; et al. Mine tailings dams: characteristics, failure, environmental impacts, and remediation. **Applied Geochemistry**, v. 51, p. 229-245, dec. 2014.

LARA, A. F. M. **Espessamento e transporte de pasta mineral**. 2011. 66 f. Monografia (Especialização em Engenharia de Recursos Mineraias) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte – Minas Gerais, 2011.

LIMA, L. M. K. **Retroanálise da formação de um depósito de rejeitos finos de mineração construído pelo método subaéreo**. 2006. 125 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2006.

LOZANO, F. A. E. **Seleção de locais para barragens de rejeitos usando o método de análise hierárquica**. 2006. 128 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas e Fundações) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

LUZ, A.; LINS, F. A. F. **Introdução ao tratamento de minérios**. In: Tratamento de minérios, 6. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTIC, 2018.

LUZ, A. B.; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A. **Tratamento de Minérios**. 5. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010.

MACHADO, L. V. T.; AZEEZ, D. G. Incidentes e acidentes em barragens. *In: Simpósio de Gestão Ambiental e Biodiversidade*, 7, 2018, [S.I.]. **Anais [...]**. [S.I.]: Sigabi, 2018. Disponível em: <[https://www.itr.ufrj.br/sigabi/wp-content/uploads/7\\_sigabi/VASCONCELLOS\\_LUCAS\\_355a358.pdf](https://www.itr.ufrj.br/sigabi/wp-content/uploads/7_sigabi/VASCONCELLOS_LUCAS_355a358.pdf)>. Acesso em: 21 abr. 2023.

OLIVEIRA FILHO, W. L.; ABRÃO, P. **Disposição de rejeitos de mineração**. *In: ZUQUETTE, L. V. (Org.). Geotécnica Ambiental*. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015.

PINTO, S. S. S. **Caracterização das propriedades físicas e mecânicas de misturas de diferentes tipos de rejeito para aplicação em pavimentos**. 2013. 80 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2013.

PORTES, A. M. C. **Avaliação da disposição de rejeitos de minério de ferro nas consistências polpa e torta**. 2013. 156 f. Dissertação (Mestrado em Geotécnica e Transportes) — Universidade Federal de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia e Transportes, Belo Horizonte, 2013.

ROCHA FILHO, A. C. **Alternativas para desaguamento e disposição dos rejeitos do Complexo Mineral de Tapira**. 2021. 69 f. Monografia (Bacharelado em Engenharia de Minas) – Universidade Federal de Ouro Preto, Escola de Minas, 2021.

RODRIGUES, A. B. **Riscos da disposição de rejeitos da mineração e técnicas alternativas de disposição**. 2017. 39 f. Monografia (Graduação em Engenharia de Minas) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017.

SANTOS, L. R. **Dimensionamento de Espessador: Validação das técnicas de COE E CLEVENGER, TALMAGE E FITCH E OLTSMANN**. 2018. 69f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Minas) - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – Unidade Araxá, Araxá, 2018.

SANTOS, R. K. **Estudo de filtragem de um rejeito de flotação visando o empilhamento a seco**. 2022. 71 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Minas) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - Unidade Araxá, Araxá, 2022.

SILVA, A. P. M. et al. **Diagnóstico dos resíduos sólidos da atividade de mineração de substâncias não energéticas**: Relatório de pesquisa. Brasília: IPEA, 2012. Disponível em: <[http://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/7702/1/RP\\_Diagn%C3%B3stico\\_2012.pdf](http://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/7702/1/RP_Diagn%C3%B3stico_2012.pdf)>. Acesso em: 02 de abr. 2023.

SILVA, L. C. **Disposição de rejeitos granulares via dry stacking: uma alternativa à disposição em barragens**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Minas) - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas – Unidade Araxá, Gerais, Araxá, 2021.

SILVA, A. M. **Caracterização do processo de degradação de uma fibra de poliamida utilizada como meio filtrante na indústria mineral**. 2006. 112f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Rede Temática em Engenharia de Materiais, Ouro Preto, 2006.

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

SOARES, L. Barragem de rejeitos. *In*: LUZ, A. B. da; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA; S. C. A. (ed.). **Tratamento de Minérios**. 5.ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. p. 831-890.

SOUZA, C. V. **Estudo das técnicas de disposição de rejeitos de mineração**. 2018. 77f. Monografia (Bacharel em Engenharia de Minas.) – Universidade Federal de Ouro Preto, Escola de Minas, Departamento de Engenharia de Minas, Ouro Preto, 2018.

STELA, L. H. et al. Métodos de disposição dos rejeitos de minério de ferro alternativos ao método de barragens: uma revisão. **Revista Brasileira de Processos Químicos**, São Paulo, v. 1, n. 1, p. 34-45, jul./dez. 2020.

VIANA, J. P. et al. **Diagnóstico dos resíduos sólidos da atividade de mineração de substâncias não energéticas**. Relatório de pesquisa. Brasília: IPEA 2012.

VALE. **Vale inaugura fábrica que transforma rejeitos da mineração em produtos para a construção civil**. [S.I.]: Vale Brasil, 2020. Disponível em: <<http://www.vale.com/brasil/PT/aboutvale/news/Paginas/vale-inaugura-fabrica-quetransforma-rejeitos-da-mineracao-em-produtos-para-a-construcao-civil.aspx>>. Acesso em: 20 abr. 2022.