



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO  
ESCOLA DE MINAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS**



CAROLINA VIVIAN DE SOUZA

**ESTUDO DAS TÉCNICAS DE DISPOSIÇÃO DE REJEITOS DE MINERAÇÃO**

**OURO PRETO – MG  
2018**

CAROLINA VIVIAN DE SOUZA

## **ESTUDO DAS TÉCNICAS DE DISPOSIÇÃO DE REJEITOS DE MINERAÇÃO**

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

Orientador: Prof. Dr. Hernani Mota de Lima

OURO PRETO - MG

2018

S729e Souza, Carolina Vivian de.  
Estudo das técnicas de disposição de rejeitos de mineração [manuscrito] /  
Carolina Vivian de Souza. - 2018.

77f.: il.: color; grafs; tabs.

Orientador: Prof. Dr. Hernani Mota de Lima.

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

1. Minas e recursos minerais. 2. Rejeitos. 3. Beneficiamento de minério. 4.  
Geotecnia. I. Lima, Hernani Mota de. II. Universidade Federal de Ouro Preto.  
III. Título.

CDU: 622.7



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO DESPORTO  
Universidade Federal de Ouro Preto  
Escola de Minas - Departamento de Engenharia de Minas

## ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO


Aos 13 dias do mês de julho de 2018, às 08h30min, no auditório do Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Minas - DEMIN EM, foi realizada a defesa do Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia de Minas requisito da disciplina MIN-491 – Trabalho de Conclusão de Curso II, intitulado **“RISCOS ASSOCIADOS À DISPOSIÇÃO DE REJEITOS EM BARRAGENS DE CONTENÇÃO E MÉTODOS ALTERNATIVOS DE DISPOSIÇÃO”**, pela aluna **Carolina Vivian de Souza**, sendo a comissão avaliadora formada por **Prof. Dr. Hernani Mota de Lima (Orientador)**, **Prof. M.Sc. José Fernando Miranda e Engº de Minas Pedro Henrique Neuppmann**.

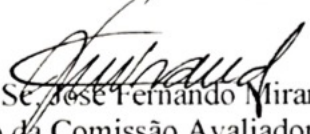
Após arguição sobre o trabalho, a comissão avaliadora deliberou por unanimidade pela *aprovação*..... da candidata, com a nota *8,0*... concedendo-lhe o prazo de 15 dias para incorporar no texto final da monografia as alterações determinadas/sugeridas pela banca.

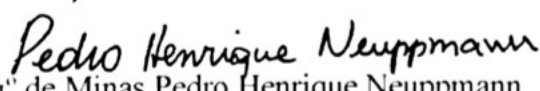
A aluna fará jus aos créditos e conceito de aprovação na disciplina MIN-491 – Trabalho de Conclusão de Curso II após a entrega dos exemplares definitivos (Cd e cópia impressa) da versão final da monografia defendida, conforme modelo do CEMIN-2009, no Colegiado do Curso de Engenharia de Minas – CEMIN.

Para fins de registro, foi lavrada a presente ata que, depois de lida e aprovada é assinada pelos membros da comissão avaliadora e pelo discente.

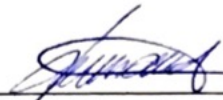
Ouro Preto, 13 de julho de 2018.

  
Prof. Dr. Hernani Mota de Lima  
Presidente da Comissão Avaliadora e Orientador

  
Prof. M.Sc. José Fernando Miranda  
Membro da Comissão Avaliadora

  
Engº de Minas Pedro Henrique Neuppmann  
Membro da Comissão Avaliadora

  
Carolina Vivian de Souza

  
Prof. Ms. C. José Fernando Miranda  
Professor responsável pela Disciplina Min 491 – Trabalho de Conclusão de Curso

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus por me guiar e me dar força para a realização deste sonho.

Aos meus pais, por me incentivarem a buscar sempre o melhor em minha vida, e por acreditarem que eu chegaria aqui.

A minha irmã Lívia, por sempre acreditar em mim e me impulsionar. Por todo o amadurecimento conjunto e por me mostrar o quão grande pode ser o amor entre irmãs.

A minha avó Graça, por todo amor e por acreditar em mim em todos os momentos. Minha eterna gratidão a você.

A meu tio Sidney, pelo carinho, incentivo e apoio incondicional.

Aos amigos de São João del Rei, Ouro Preto e do CSF - Austrália por me proporcionarem momentos únicos e que jamais serão esquecidos.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Hernani Mota de Lima, pelo suporte e orientação no pouco tempo que lhe coube.

A UFOP, a UWA, a Fundação Gorceix, aos professores e a gloriosa Escola de Minas, por proporcionarem a realização desse sonho e por todo conhecimento transmitido a mim.

A todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado.

Por fim, agradeço infinitamente a República Drosófila, por todos os bons momentos, por me acolherem e por se tornarem minha família.

*“O seu trabalho vai ocupar grande parte da sua vida, e a única maneira de ser realmente satisfeito é fazer aquilo que você acreditar ser um ótimo trabalho. A única maneira de realizar um ótimo trabalho é amar aquilo que você faz.”*

**Steve Jobs**

## RESUMO

O aumento da necessidade de extração de minérios de menor teor e maior profundidade tem resultado em uma maior produção de rejeitos, estéreis e maior necessidade de água, afetando o desenvolvimento da mina em diversos locais. Assim sendo, as empresas mineradoras vem buscando novas alternativas para a disposição de rejeitos, de forma a reduzir os impactos ambientais, riscos e custos associados principalmente à recuperação de água. No presente trabalho foram apresentados os riscos e aspectos associados à disposição de rejeitos em barragens convencionais e as metodologias alternativas de disposição de rejeitos, compreendendo: a disposição de rejeitos na forma de aterro hidráulico, a disposição de rejeitos espessados (desaguados) e/ou em pasta, a disposição de rejeitos filtrados em pilhas controladas, a co-disposição e disposição compartilhada de rejeitos e estéreis em superfície, a disposição de rejeitos em cavas exauridas, a disposição e rejeitos em cavidades subterrâneas previamente lavradas como forma de preenchimento, e a disposição de rejeitos em ambientes subaquáticos. Alguns fatores limitantes associados às diferentes metodologias incluem: o fornecimento de energia, o clima, a produção, o custo, a topografia, a sismicidade, a água, a facilidade de operação, entre outros. Dessa forma, mesmo com o avanço dos métodos de recuperação de água, a metodologia de disposição de rejeitos a ser empregada deve levar em conta principalmente as condições e requisitos específicos de cada mina.

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

## ABSTRACT

The increase in the need for extraction of deeper and lower grades of ore has resulted in a higher production of tailings, sterile rocks and has increase the need of water, affecting the development of the mine in several places. Therefore, mining companies are seeking for new tailings disposal alternatives, in order to reduce the environmental impacts, risks and costs associated with water recovery. This paper presented the risks and aspects associated with conventional tailings dams and some of the alternative tailings disposal methodologies, including: the disposal of tailings using the hydraulic landfill technique, the disposal of thickened (dewatered) and / or paste tailings, the disposal of filtered tailings in dry stacks, co-disposal and shared disposal of tailings and sterile rocks, the disposal of tailings in exhausted surface mines, the disposal of tailings in previous underground worked out voids as fill material, and the disposal of tailings offshore. Some limiting factors associated with different methodologies include energy supply, climate, production rates, costs, topography, seismicity, water, operational predictability, among others. Thus, even with the advancement of water recovery methods, the tailings disposal methodology to be applied should take into account, in particular, the specific conditions and requirements of each mine.

**Key words:** Mining. Tailings. Tailings disposal methods.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Descarga de rejeitos pontual na mina de Glebe, Inglaterra.....	18
Figura 2 - Descarga de rejeitos por múltiplos pontos na mina de ouro de Jundee, Austrália.....	19
Figura 3 - Métodos de descarga de rejeitos a) por múltiplos pontos e b) descarga pontual.....	20
Figura 4 - Zonas de diferentes permeabilidades causadas por segregação hidráulica.....	21
Figura 5 - Evolução no tempo das atividades relativas a barragens de rejeito .....	23
Figura 6 - Método de montante.....	25
Figura 7 - Desvantagens do método de montante: a) linha freática elevada; b) superfície provável de ruptura passa pelos rejeitos; c) risco de ruptura por “piping”.....	27
Figura 8 - Método de jusante .....	28
Figura 9 - Método de linha de centro .....	30
Figura 10 - Comparação de volumes para os tipos de barragem: (a) Método de montante; (b) Método de jusante; e (c) Método da linha de centro.....	32
Figura 11 - Caixas de armazenamento de água na barragem da mina de cobre Kennecott, localizada nos EUA .....	33
Figura 12 - Represamento em anel: (a) simples e (b) múltiplos .....	35
Figura 13 - Represamento a meia encosta: (a) simples e (b) múltiplos .....	35
Figura 14 - Represamento em bacia: (a) simples e (b) múltiplos .....	36
Figura 15 - Represamento em vale: (a) simples e (b) múltiplos .....	36
Figura 16 - Falhas em barragens de rejeito entre 1960-2010.....	39
Figura 17 - Principais causas de ruptura em barragens de rejeito entre 1915 – 2016.....	41
Figura 18 - Balanço hídrico de uma barragem de rejeitos convencional .....	43
Figura 19 - Série de hidrociclones localizados na crista de uma barragem .....	46
Figura 20 - Exemplos típicos de rejeitos espessados.....	49
Figura 21 - Ângulos de disposição para polpas de alta densidade e para pasta, para diferentes tipos de terreno.....	51
Figura 22 - Tipos de espessadores para adensamento de polpas de minério de ferro.....	52
Figura 23 - Empilhamento a seco de rejeitos usando caminhões como transporte .....	54
Figura 24 - Empilhamento a seco de rejeitos utilizando correias transportadoras na mina La Coipa, no Chile.....	55
Figura 25 - Tendências no uso de rejeitos desaguados na mineração.....	56
Figura 26 - Bacias de rejeito construídas no depósito de estéril .....	60
Figura 27 - Mistura de rejeito com estéril no topo do depósito .....	60
Figura 28 - Injeção de rejeito em furos verticais no topo do depósito de estéril.....	61
Figura 29 - Injeção de rejeito em furos inclinados no topo do depósito de estéril.....	62
Figura 30 - Disposição de rejeito em camadas finas no topo do depósito.....	63

Figura 31 - Disposição em cava a céu aberto .....	64
Figura 32 - Deposição em cavas: (a) Extração do minério total; (b) Deposição feita ao mesmo tempo que a extração do minério.....	64

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Transformações físicas experimentadas por rejeitos durante o ciclo de operabilidade de uma barragem.....	22
Quadro 1 - Comparação entre as características dos métodos de alteamentos de barragens de rejeito .....	31
Tabela 2 - Fatores que influenciam a escolha do local para barragens de rejeito .....	34
Quadro 2 - Critérios para seleção e preparação do local para implantação de uma barragem de rejeitos .....	37
Tabela 3 - Fases e tarefas do processo de seleção do local de implantação de barragens de rejeito .....	38
Tabela 4 - Estados físicos dos rejeitos e correspondente teor de sólidos esperado.....	48
Tabela 6 - Comparativo entre as formas de disposição de rejeitos .....	53
Tabela 5 - Custos relativos aos diferentes sistemas de disposição de rejeitos.....	53
Quadro 3 - Vantagens e desvantagens da disposição de rejeitos espessados e/ou em pasta .....	53
Quadro 4 - Mecanismos de filtragem e os principais fornecedores .....	56
Quadro 5 - Vantagens e desvantagens da disposição de rejeitos em pilhas secas / rejeitos filtrados.....	58
Quadro 6 - Vantagens e desvantagens da disposição subterrânea de rejeitos .....	67
Quadro 7 - Tipos de preenchimento utilizado em minas subterrâneas.....	68
Tabela 6 - Comparativo entre as formas de disposição de rejeitos .....	73

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

DAM	Drenagem ácida de mina
HDPE	Tubulações de polietileno de alta densidade
LHD	Carregadeiras subterrâneas (Load Haul Dump)
OPEX	Custos operacionais da empresa
ROM	Minério proveniente da mina (Run of Mine)
TSF	Instalação de armazenamento de rejeitos (Tailings Storage Facility)

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>12</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b> .....	<b>14</b>
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>15</b>
3.1	REJEITOS DE MINERAÇÃO.....	15
3.1.1.	Produção de rejeitos .....	16
3.1.2.	Características dos rejeitos .....	17
3.1.3.	Técnicas de descarga de rejeitos.....	18
3.1.3.1.	Descarga pontual e por múltiplos pontos .....	20
3.1.4.	Comportamento dos rejeitos.....	21
3.2	BARRAGEM DE REJEITOS .....	22
3.2.1.	Método de alteamento a montante .....	24
3.2.2.	Método de alteamento a jusante .....	28
3.2.3.	Método de alteamento por linha de centro.....	29
3.2.4.	Transporte e descarga de rejeitos .....	32
3.2.5.	Local de implementação de barragens de rejeito .....	34
3.2.6.	Riscos associados e gestão da água.....	39
3.3	MÉTODOS ALTERNATIVOS DE DISPOSIÇÃO DE REJEITOS .....	45
3.3.1.	Disposição de rejeitos na forma de aterro hidráulico.....	45
3.3.2.	Disposição de rejeitos espessados e/ou em pasta .....	47
3.3.3.	Disposição em pilhas controladas / rejeitos filtrados.....	54
3.3.4.	Disposição compartilhada / co-disposição .....	59
3.3.5.	Disposição em "pit" .....	63
3.3.6.	Outros métodos de disposição.....	65
3.3.6.1.	Disposição subterrânea.....	65
3.3.6.2.	Disposição de rejeitos em ambientes aquáticos.....	68
<b>4</b>	<b>ANÁLISE DOS MÉTODOS</b> .....	<b>70</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>702</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>74</b>
	<b>GLOSSÁRIO</b> .....	<b>77</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Entre os resíduos gerados pela extração mineral, destacam-se os estéreis e rejeitos. Estéreis são comumente depositados na forma de pilhas. Rejeitos são subprodutos sem maior valor econômico, gerados através do beneficiamento mineral. Geralmente são produzidos em grandes quantidades e podem conter substâncias químicas nocivas ao meio ambiente. Assim sendo, devem ser armazenados de forma ambientalmente segura e econômica.

Apesar dos avanços tecnológicos no beneficiamento mineral, empresas do setor mineral ainda enfrentam o desafio de melhorar o gerenciamento dos rejeitos. Além disto, a necessidade de se extrair minérios de menor teor e maior profundidade resultou em uma maior geração de rejeitos e estéreis e em uma maior necessidade de água, se tornando estas as maiores restrições ao desenvolvimento da mina em diversos locais (WATSON *et al.* 2010).

Rejeitos podem ser descartados sob a forma sólida (pasta ou granel), ou líquida (polpa de água com sólidos ou lama) podendo ser dispostos em superfície (cavas exauridas, pilhas de estéril e/ou barragens de rejeito), em cavidades subterrâneas ou ambientes subaquáticos, de acordo com as características do material e do processo de beneficiamento utilizado (FIGUEIREDO, 2007). O mau gerenciamento de risco em barragens pode causar grandes prejuízos ambientais, econômicos e sociais. Desta forma, surgiu-se o interesse da indústria mineral em procurar métodos alternativos para a disposição de rejeitos, visando redução de riscos ambientais e reutilização da água.

A disposição subaquática não é tão amplamente aplicada quanto os outros métodos de disposição, devido ao grande potencial de risco de contaminação. Enquanto a disposição em superfície é a mais aplicada atualmente, observando-se uma preferência por barragens de contenção, visto que a disposição subterrânea requer a necessidade de preenchimento de cavidades de minas subterrâneas (FIGUEIREDO, 2007).

As barragens podem ser construídas em única etapa ou através de alteamentos ao longo do tempo, proporcionando maior flexibilidade e adaptação da barragem às necessidades da mina. Quando o rejeito possui granulometria mais grossa sua deposição pode ser feita através da técnica de aterro hidráulico. Os alteamentos podem ser feitos através do Método de Jusante, Método de Montante e Método de Linha de Centro, sendo o Método de Montante considerado mais econômico e de maior facilidade de execução, porém o que apresenta maior dificuldade de controle de riscos e da superfície freática (FIGUEIREDO, 2007).

Técnicas de disposição de rejeitos desaguados vêm sendo muito estudadas, visto que o maior problema de estabilidade em barragens está relacionado ao confinamento de água residual. Além da busca por maior estabilidade, tais técnicas proporcionam maior reaproveitamento de água e aumenta a disponibilidade de área para disposição (FIGUEIREDO, 2007). Dentre estas técnicas destacam-se a disposição de rejeitos filtrados, espessados e/ou em pasta.

Outra metodologia alternativa importante é a co-disposição ou disposição combinada de rejeitos e estéreis em regiões já mineradas, como no caso de cavas exauridas, ou depósitos específicos (barragens de contenção, pilhas, etc.) (FIGUEIREDO, 2007).

Desta forma, é importante a realização de uma análise detalhada das condições do rejeito e suas características tecnológicas, considerando a grande variabilidade operacional da planta de beneficiamento e fatores econômicos, de forma a avaliar a aplicabilidade de cada método de disposição. Diante disto, este trabalho visa apresentar alguns dos métodos de disposição de rejeitos, destacando-se as vantagens, desvantagem e fatores que determinam a aplicação de cada método, na tentativa de minimizar os riscos relacionados à etapa de disposição de rejeitos nas atividades de mineração.

## 2 OBJETIVOS

Os objetivos do presente trabalho são:

- Apresentar aspectos gerais sobre os rejeitos;
- Apresentar, através de uma revisão bibliográfica, as considerações para aplicação, características, vantagens e desvantagens, critérios de aplicabilidade e principais riscos associados às barragens de contenção e metodologias alternativas de disposição de rejeitos;
- Apresentar uma análise geral dos métodos, visando minimizar riscos, impactos ambientais e os custos associados à disposição de rejeitos.



### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 REJEITOS DE MINERAÇÃO

O beneficiamento de minérios é o tratamento industrial aplicado para preparação do minério através de métodos físicos e/ou químicos, sem alteração da constituição química dos minerais presentes, de modo a se purificar, enriquecer e atingir a granulometria ideal do minério para que o mesmo tenha valor econômico (ARAUJO, 2006). O beneficiamento mineral divide o material bruto em concentrado e rejeito. O rejeito é constituído de minerais que são descartados pelo processo de beneficiamento, por não atingirem teor e granulometria adequados para eventual valor econômico. Suas propriedades variam de acordo com as características do processo de beneficiamento aplicado e dos minerais presentes, e estas características influenciam diretamente em seu método de disposição (LIMA, 2006).

O processo de extração e beneficiamento nunca é completamente eficiente, nem é possível recuperar todos os reagentes e produtos químicos reutilizáveis. Alguns metais, minerais, reagentes, água, produtos químicos e orgânicos que não são reutilizáveis ou não possuem valor econômico, são descartados, comumente em forma de lama, em uma área de armazenamento final comumente conhecida como *Tailings Storage Facility* (TSF) (ENGELS, 2006). O rejeito é um material que não possui maior valor econômico, mas devido as suas características físicas e químicas deve ser devidamente armazenado por questões ambientais.

Rejeitos são normalmente armazenados na superfície em barragens de contenção, cavas exauridas de minas a céu aberto, ou na forma de pilhas, mas também podem ser armazenados no subsolo, como forma de preenchimento de espaços existentes após extração do minério em minas subterrâneas, como sustentação e composição topográfica, além de ser uma alternativa para o armazenamento de rejeitos (ENGELS, 2006).

Como os rejeitos são produtos sem valor econômico, consequentemente, tendem a ser armazenados da forma mais econômica possível, atendendo as regulamentações ambientais e características específicas do local. O avanço da tecnologia tem permitido a extração de minérios de menor teor, o que implica não apenas no aumento da eficiência do processo, mas também em uma maior geração de rejeitos, tornando as regulamentações ambientais mais rigorosas no que diz respeito às práticas de armazenamento de rejeitos (ENGELS, 2006).

Ao considerar o projeto de uma barragem de rejeitos, existem vários parâmetros que afetam a escolha do local ideal e os métodos de armazenamento e descarga de rejeitos a serem aplicados. O ambiente e as condições do solo são os parâmetros mais importantes e

influenciam na maneira como uma barragem é projetada, construída, operada e fechada. Por essa razão, uma série de métodos alternativos de armazenamento e descarga de rejeitos deve ser considerada antes de se projetar uma barragem, o que pode ser alcançado através de estudos para avaliar fatores de risco, ambientais, sociais, econômicos e operacionais com um nível mais alto de confiança (RITCEY, 1989).

O processo de beneficiamento de minérios e posterior descarte em instalações de armazenamento expõem os minerais ao intemperismo acelerado e pode conseqüentemente aumentar a taxa de mobilização destes elementos. A adição de reagentes no processo de beneficiamento pode também alterar as características químicas e as propriedades físicas do rejeito (ENGELS, 2006). Um exemplo disto ocorre no beneficiamento de minérios sulfetados, onde os minerais sulfetados oxidam mais facilmente, devido à exposição dos rejeitos ao ar e à água, ocasionando em uma geração de ácido que entra em contato com o ambiente através de escoamentos ou infiltrações. Na mineração este evento é conhecido como Drenagem Ácida de Mina (DAM). Técnicas alternativas de armazenamento podem ser aplicadas para controlar a oxidação de sulfetos e mobilização de metais (RITCEY, 2005).

### **3.1.1 Produção de rejeitos**

A disposição de rejeitos é considerada a principal fonte geradora de impacto ambiental em muitas operações de mineração (VICK, 1990). Ao longo do último século, os volumes de rejeitos gerados cresceram drasticamente à medida que a demanda por minerais e metais aumentou e os minérios com teores mais baixos estão sendo extraídos economicamente devido aos avanços na tecnologia (ENGELS, 2006).

Um teste mineralógico pode ajudar a identificar os métodos de extração mais vantajosos a serem aplicados para um determinado corpo mineral, e pode também determinar se existem outros minerais de interesse econômico, o tipo e as quantidades de reagentes necessários para separar o concentrado da ganga e o melhor método de armazenamento para o rejeito (RITCEY, 1989). Entretanto, estes testes-piloto podem não representar exatamente os rejeitos que serão produzidos em grande escala. Isso significa que o projeto final de qualquer instalação de armazenamento de rejeitos é sempre provisório e deve ser confirmado uma vez que a produção de rejeitos esteja em andamento (ENGELS, 2006).

Ao projetar a planta de beneficiamento, os tipos e quantidades de reagentes usados devem ser considerados para diminuir os impactos ambientais e custos associados à

disposição dos rejeitos, visto que reagentes dosados em pequenas quantidades podem ser consumidos, retidos no processo ou descartados com os rejeitos (RITCEY, 1989).

### **3.1.2 Características dos rejeitos**

As características dos rejeitos podem variar muito e dependem da mineralogia do minério, juntamente com os processos físicos e químicos usados em sua extração e beneficiamento. As características dos rejeitos devem ser determinadas para estabelecer o comportamento dos rejeitos, uma vez depositados em seu local de armazenamento final, e também para estudo dos impactos ambientais de curto e longo prazo. Uma vez que as possíveis características dos rejeitos sejam determinadas através de testes e planta piloto, os requisitos necessários para o projeto podem ser identificados de forma a mitigar o impacto ambiental e para determinar o desempenho operacional ideal (ENGELS, 2006).

A liberação da água do rejeito e o volume disponível para retorno para a planta de beneficiamento é um parâmetro importante no projeto e influencia no balanço hídrico do mesmo (custos de água de reposição). Essa liberação é dependente das propriedades físicas dos rejeitos depositados e pode ser estimada através de testes laboratoriais com diferentes concentrações de sólidos. Este parâmetro pode influenciar no tipo de armazenamento de rejeitos utilizado e para minimizar as perdas por infiltração e evaporação (ENGELS, 2006).

De acordo com EC (2004), as seguintes características dos rejeitos precisam ser estabelecidas de forma a ajudar a determinar os requisitos do projeto de armazenamento de rejeitos:

- Composição química e capacidade de oxidar e mobilizar metais;
- Composição física e estabilidade (carga estática e sísmica);
- Comportamento sob pressão e taxas de consolidação;
- Estabilidade da erosão (vento e água);
- Tempo de assentamento, secagem e densificação após deposição;
- Comportamento e formação de crosta no topo dos rejeitos.

É essencial que, ao investigar as propriedades dos rejeitos, as características físicas e os parâmetros do material (por exemplo, ângulos de inclinação, segregação do tamanho das partículas, recuperação da água) que podem ocorrer como resultado de técnicas de deposição variadas, sejam identificados (ENGELS, 2006).

Uma vez que os parâmetros específicos do local em potencial (por exemplo, ambientais, sociais, geotécnicos e custos), as características dos rejeitos e seu comportamento após a deposição sejam determinados, o processo de decisão para o método ideal de armazenamento pode ser iniciado (ENGELS, 2006).

### 3.1.3 Técnicas de descarga de rejeitos

Os rejeitos podem ser descarregados usando técnicas subaquáticas, subterrâneas ou a céu aberto (DPI, 2003). A escolha de qual método utilizar, bem como as características do próprio rejeito, pode afetar diretamente na forma como o rejeito se deposita.

A descarga de rejeitos em forma de polpa (método mais utilizado) é geralmente feita através de um ou mais pontos de descarga (spigots, também conhecidos como canhões de lançamento) localizados ao longo da instalação, como mostram as Figuras 1 e 2. A descarga de rejeito espessado é geralmente realizada através de dutos (risers) ou fontes pontuais localizadas no centro da instalação e que crescem de acordo com sua vida útil (ENGELS, 2006). Já o empilhamento de rejeitos a seco é comumente feito por empilhadeiras ou caminhões (DAVIES & RICE, 2001).



Figura 1 – Descarga de rejeitos pontual na mina de Glebe, Inglaterra (ENGELS, 2006).



Figura 2 – Descarga de rejeitos por múltiplos pontos na mina de ouro de Jundee, Austrália (ENGELS, 2006).

Os rejeitos em forma de polpa podem ser transportados através de canais ou tubulações, com ou sem sistemas de bombeamento (ENGELS, 2006). O dimensionamento do sistema de tubulação leva em consideração a velocidade mínima de fluxo necessária para evitar a obstrução e sedimentação de partículas sólidas ao longo da tubulação, que é feita de polietileno de alta densidade (HDPE). Esta velocidade comumente varia entre 1,5 a 3 m/s (RAFAEL, 2012).

O comportamento geral do rejeito após deposição é fluir para que ocorra a segregação natural. O grau de segregação atingido vai depender do tamanho das partículas e da densidade da polpa (VICK, 1990).

Praia é a porção do reservatório localizada na porção mais próxima da barragem, e recebe esse nome devido às suas propriedades que possibilitam o afastamento da lâmina d'água em relação ao barramento (ENGELS, 2006).

Em polpas de baixa densidade, partículas grossas geralmente se depositam perto do ponto de descarga enquanto partículas finas são carregadas para mais longe. O fluxo de deposição influencia muito na segregação destas polpas, os pontos de descarga criam um fluxo unificado através da praia (VICK, 1990). Para deposição em superfície isto resulta em uma praia inclinada, com maior inclinação na proximidade do ponto de descarga. De acordo com Vick (1990), o grau de inclinação da praia esperado varia entre 0,5 e 2,0% nas primeiras centenas de metros, e quanto maior a densidade da polpa, maior a inclinação.

A disposição de rejeitos através de vários pontos de descarga (*spigotting*) é comumente aplicada em barragens de rejeito, pois estes ajudam a controlar a geometria e

localização da lagoa, além de ajudarem a controlar a espessura da camada de rejeitos. Comumente é aplicado um sistema cíclico de descarga e secagem visando o aumento da densidade e otimizando o volume de armazenamento disponível (ENGELS, 2006).

De acordo com Engels (2006), a descarga subaquática de rejeitos pode ser adequada a rejeitos que contêm sulfetos sujeitos a sofrerem oxidação, mobilização de metais ou que produzem ácido. Isto porque ao colocar o rejeito embaixo d'água, ele não entra mais em contato com o oxigênio, evitando assim a oxidação e minimizando os problemas associado à DAM. Porém, a disposição de rejeitos subaquática não é muito utilizada, pois as consequências ambientais desta prática ainda não são completamente compreendidas, e podem gerar impactos negativos e irreversíveis a ecossistemas aquáticos (ENGELS, 2006).

### 3.1.3.1 Descarga pontual e por múltiplos pontos

A Figura 3 ilustra os métodos de descarga pontual e por múltiplos pontos. A descarga de rejeitos por múltiplos pontos permite a rotação da descarga em vários pontos da instalação, de forma a permitir que rejeitos recém-depositados possam se consolidar enquanto novos rejeitos sejam depositados em outras zonas da instalação (GIPSON, 1998).

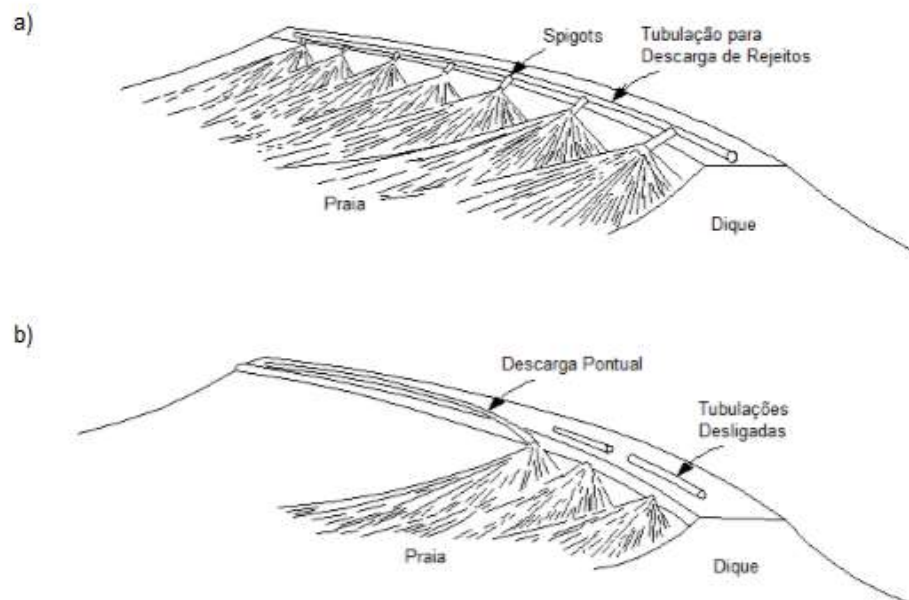


Figura 3 - Métodos de descarga de rejeitos a) por múltiplos pontos e b) descarga pontual (RAFAEL, 2012).

A descarga pontual pode fazer com que os rejeitos se depositem em camadas bastante espessas, fazendo com que estes permaneçam saturados por anos, caso não sejam devidamente drenados antes que novas camadas sejam depositadas (NORMAN, 1998).

### 3.1.4 Comportamento dos rejeitos

A forma e granulometria das partículas do rejeito variam conforme o processo de tratamento aplicado. As diferentes mineralogias dos rejeitos também afetam seu comportamento, influenciando as taxas de sedimentação, compressibilidade, permeabilidade e outros fatores (FAHEY, NEWSON & FUJIYASU, 2002).

Os rejeitos derivados do beneficiamento do minério de ferro, por exemplo, se caracterizam por frequentemente apresentarem baixa permeabilidade e compressibilidade, pertencendo ao grupo de areias finas e médias e sua sedimentação e adensamento acontecem em tempos relativamente curtos. Já rejeitos com granulometria de silte apresentam maior plasticidade e dificuldade de sedimentação e adensamento, como acontece com os rejeitos gerados no beneficiamento de ouro e alumínio (GUMIERI, BUENO & MINETTE, 1998).

A segregação hidráulica tem efeito direto no comportamento de partículas de rejeito de diferentes granulometrias e também nas condições de fluxo ao longo da praia (ARAÚJO, 2006). Rejeitos granulares tendem a se depositar nas proximidades dos pontos de descarga criando uma zona de alta permeabilidade (zona 1), enquanto rejeitos finos se depositam em zonas mais distantes dos pontos de descarga (zona 3), cria-se também uma zona intermediária entre estas (zona 2), como mostra a Figura 4 (RAFAEL, 2012).

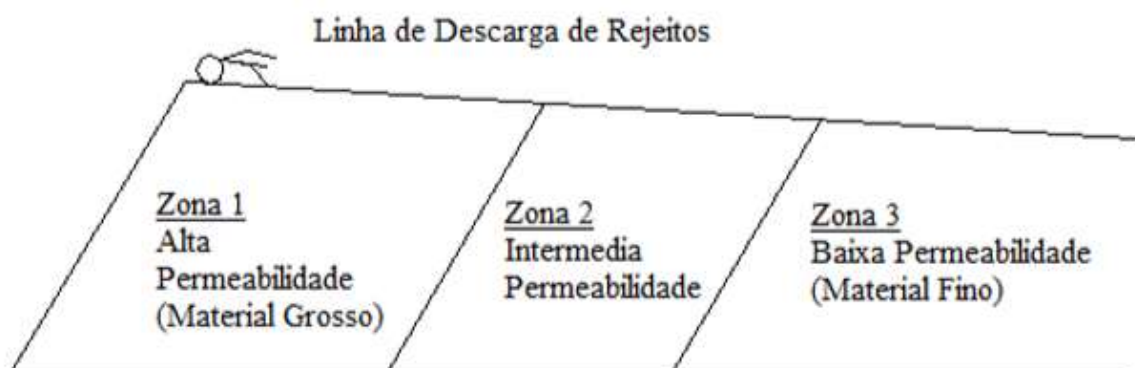


Figura 4 - Zonas de diferentes permeabilidades causadas por segregação hidráulica (RAFAEL, 2012).

A Tabela 1 apresenta as transformações físicas (sedimentação, adensamento, compressão, filtração, dessecação e desaturação) que alguns tipos de rejeitos apresentam durante seu ciclo de operações quando armazenados em uma barragem de rejeitos.

Tabela 1 – Transformações físicas experimentadas por rejeitos durante o ciclo de operabilidade de uma barragem (RAFAEL, 2012, modificado).

Estado	Fenômeno	Rejeitos		
		Finos	Médios	Granulares
Durante o tempo de construção	Sedimentação	Influi no processo	Influi no processo	Pouca influência no processo
	Adensamento	Predominante no processo	Influi no processo	Pouca influência no processo
	Compressão Imediata	Pouca influência no processo	Influi no processo	Predominante no processo
	Filtração	Não aplicável	Não aplicável	Influi no processo
Após terminados os trabalhos de disposição de rejeitos	Adensamento	Predominante no processo	Influi no processo	Não aplicável
	Filtração	Pouca influência no processo	Influi no processo	Predominante no processo
Comportamento ao longo do tempo	Dessecação	Predominante no processo	Influi no processo	Não aplicável
	Desaturação	Pouca influência no processo	Influi no processo	Predominante no processo

Pode-se então observar a grande influência do adensamento de rejeitos finos e médios durante a construção de barragens e após terminados os trabalhos de disposição de rejeitos. Enquanto que ao longo do tempo, observa-se que a dessecação exerce maior influencia sobre rejeitos finos e médios, enquanto rejeitos granulares experimentam predominantemente o fenômeno de desaturação.

### 3.2 BARRAGEM DE REJEITOS

As barragens de rejeito ainda são mais utilizadas que outros métodos de disposição de rejeitos, e podem ser definidas como estruturas construídas com o objetivo de reter e armazenar os rejeitos provenientes dos processos de beneficiamento mineral. Cada barragem tem características diferentes dependendo do tipo de rejeito, suas características



granulométricas e do modo de disposição. Sua estrutura é construída com base em critérios técnicos e geotécnicos de forma que ofereça segurança para obra. Podem ser construídas utilizando-se solos, estéreis e o próprio rejeito. Seu planejamento inclui a definição do local de instalação, o projeto de instalação, a construção, a operação e o fechamento (Figura 5), através da análise de parâmetros geológicos, hidrológicos, topográficos, geotécnicos, ambientais, sociais, entre outros (LOZANO, 2006).

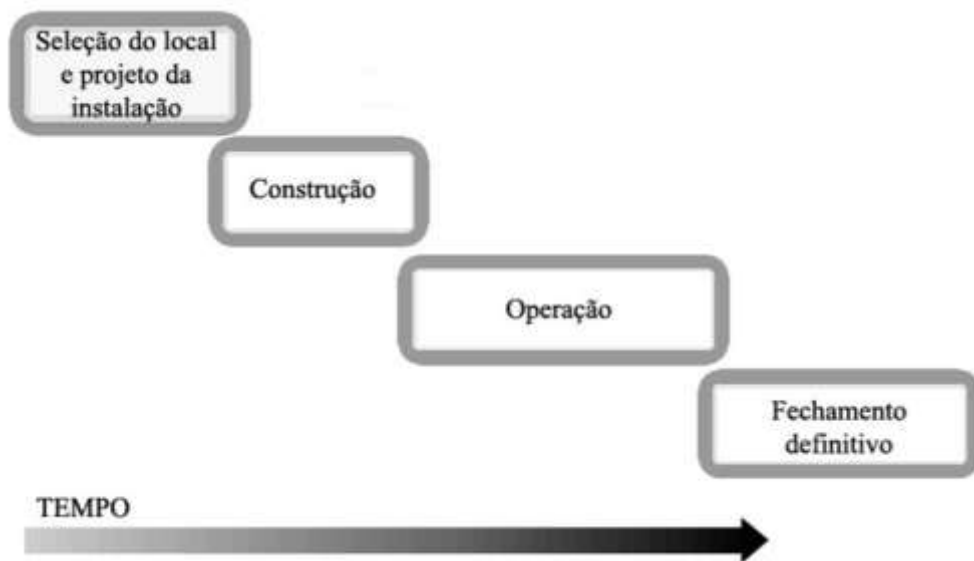


Figura 5 - Evolução no tempo das atividades relativas a barragens de rejeito (LOZANO, 2006).

Segundo Vick (1990) a estrutura de contenção é construída para armazenar tanto os rejeitos quanto a água da mina, com objetivo de recuperação desta água para reutilização. Com a necessidade de se armazenar mais rejeitos e água, os alteamentos são construídos. Estes alteamentos podem ser classificados em três classes: a jusante, a montante e por linha de centro, de acordo com a direção em que são construídos em relação ao dique inicial. Entretanto, o Método de Montante é considerado o mais econômico e de maior facilidade executiva, porém apresenta maiores riscos que os outros métodos.

Atualmente, os alteamentos são construídos mecanicamente para que se possa obter o nível de compactação necessário, para aumentar a segurança e reduzir o risco de instabilidade da instalação (VICK, 1990). A construção em alteamentos sucessivos, além de minimizar os custos envolvidos, proporciona ao minerador maior flexibilidade de operação, possibilitando a adaptação da estrutura às necessidades da mina (FIGUEIREDO, 2007).

Entretanto, alguns fatores são decisivos na escolha do método de construção destas estruturas, como o percentual de material granular contido no rejeito, a densidade relativa dos grãos, análises do potencial de liquefação e grau de consolidação do rejeito, e características de permeabilidade e solubilização do rejeito. Além disso, que a estrutura seja construída de modo a impedir a infiltração dos efluentes prejudiciais à qualidade das águas como, por exemplo, soluções que contém cianetos, metais pesados ou que possuem pH muito ácido (ENGELS, 2006).

### **3.2.1 Método de alteamento a 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. Uma das razões para isto é principalmente a pequena quantidade de material necessária para sua construção inicial e alteamentos subsequentes, que normalmente consiste na fração mais grossa dos rejeitos (ENGELS, 2006). Além disto, esta técnica comumente tem maior velocidade de alteamento e maior facilidade de operação, podendo ser construída em terrenos íngremes cujo limitante é a área de deposição (LOZANO, 2006).

Como mostra a Figura 6, inicialmente é construído um dique de partida (drenagem livre), e a polpa é descarregada ao longo da crista do dique, que se torna a base para futuros alteamentos, onde são construídos diques por todo perímetro da bacia (VICK, 1990). A descarga pode ser feita através de ciclones ou *spigots*. A segregação natural do material acontece dependendo das propriedades do rejeito, a fração grossa se deposita próximo aos pontos de descarga enquanto os finos se depositam em zonas mais internas da instalação (o mesmo não costuma acontecer para rejeitos espessados), proporcionando melhor uniformidade na formação da praia. Comumente, a fração grossa que se deposita próxima ao ponto de descarga é usada como material para construção dos alteamentos, e atualmente, a compactação é feita por equipamentos de terraplanagem, para aumentar a segurança da construção (ENGELS, 2006).

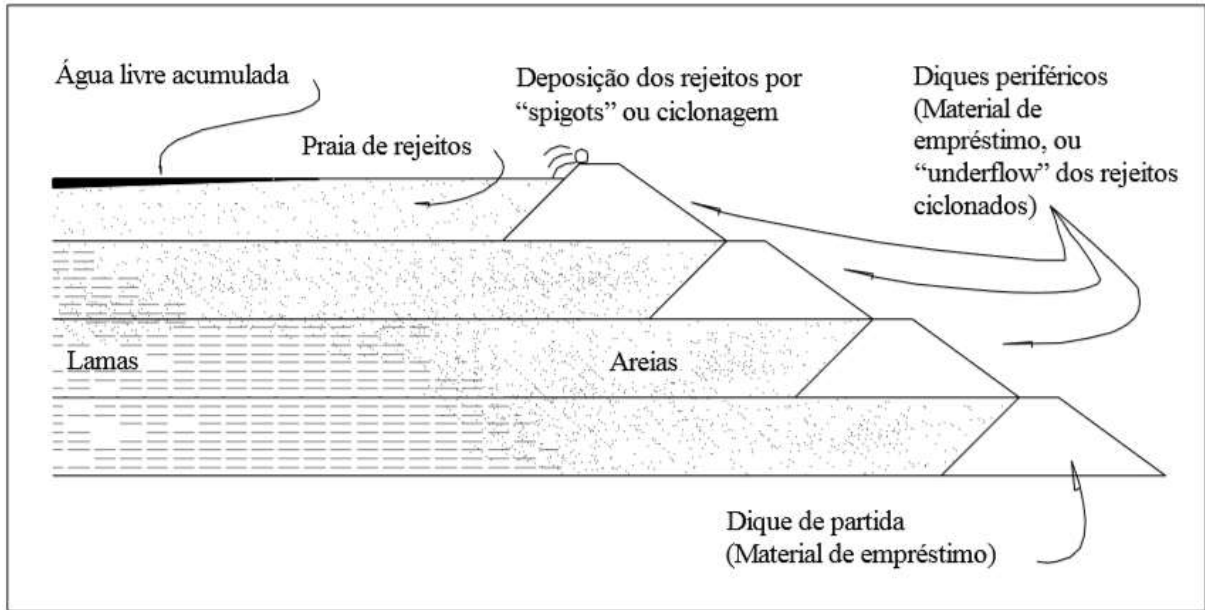


Figura 6 - Método de montante (VICK, 1981, modificado).

Este método é considerado o método com maior possibilidade de ruptura atualmente, causando grandes impactos ambientais (ICOLD & UNEP, 2001). De acordo com Engels (2006), a principal problemática do método é a grande susceptibilidade à liquefação, decorrentes de atividades sísmicas naturais ou derivadas do movimento de equipamentos, quando os alteamentos são construídos de rejeitos, em especial areias saturadas fofas não compactadas e/ou não classificadas, gerando alta saturação e, subsequentemente, criando fluxos induzidos por liquefação dos rejeitos.

Esta fração grossa de rejeito depositada na praia de rejeitos é importante, pois auxilia na drenagem e previne a saturação da barragem, fazendo que uma crosta mais forte e permeável se desenvolva, reduzindo a altura da superfície freática conforme o progresso do alteamento. Quanto mais próxima a lagoa estiver desta crosta, maior a superfície freática e maior o risco de ruptura (ENGELS, 2006).

É recomendado que os alteamentos contêm entre 40 a 50% de areia, caso utilizem rejeito em sua construção, e que a polpa descarregada possua grande quantidade de sólidos, o que pode ser obtido através de ciclonagem da polpa, para que aconteça a segregação granulométrica adequadamente (VICK, 1990).

Alteamentos a montante são recomendados em áreas cujo clima é predominantemente árido, pois quantidades mínimas de água requerem armazenamento. Este tipo de clima ajuda na manutenção de praias mais amplas e evita grandes alterações no nível da água, o que pode

acarretar na mudança da geometria da lagoa de rejeitos, alterações na borda e na superfície freática da barragem. Este tipo de alteamento também não é adequado para áreas com grandes atividades sísmicas, pois aumenta o risco de liquefação (ENGELS, 2006). Em alguns países, como o Chile, por exemplo, alteamentos a montante não são permitidos por esse motivo.

Outras desvantagens do método são mostradas na Figura 7 e podem incluir: baixa segurança; possibilidade de ocorrência de “piping”, devido à linha freática estar muito próxima do talude da jusante e a não compactação dos rejeitos, ou quando ocorre concentração de fluxo entre dois diques compactados; e a dificuldade de implantação de um sistema interno de drenagem eficiente para controlar o nível de água dentro da barragem (SILVEIRA & READES, 1973). As taxas de alteamento também devem ser controladas de forma a prevenir o aumento de poropressões que podem vir a reduzir a resistência ao cisalhamento do material (ENGELS, 2006).

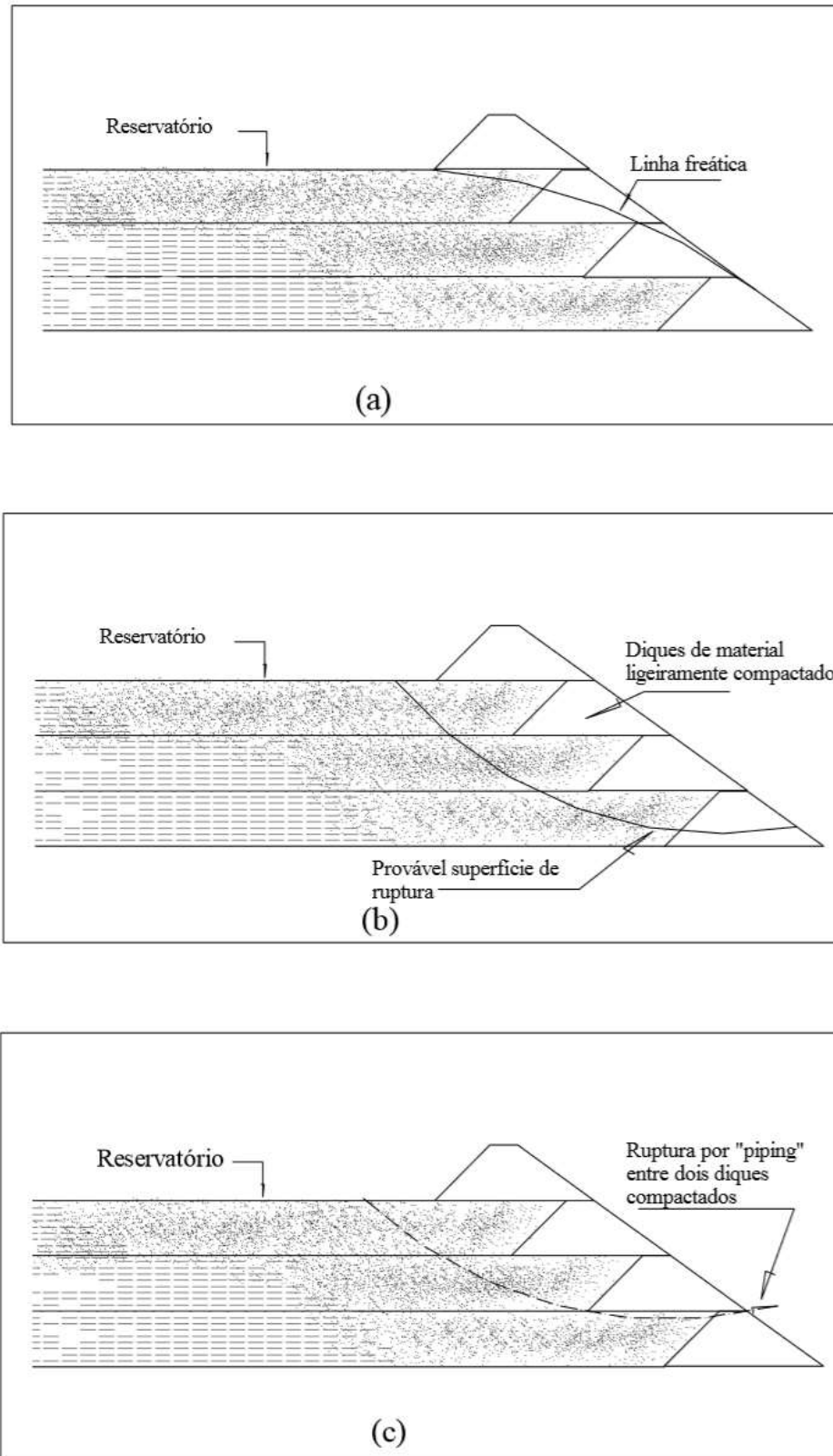


Figura 7 - Desvantagens do método de montante: a) linha freática elevada; b) superfície provável de ruptura passa pelos rejeitos; c) risco de ruptura por "piping" (SILVEIRA & READES, 1973).

### 3.2.2 Método de alteamento a jusante

O método de alteamento de jusante foi desenvolvido para reduzir os riscos associados ao método de alteamento de montante, especialmente quando associado a riscos decorrentes de atividades sísmicas (ICOLD & UNEP, 2001). A instalação de núcleos impermeáveis e zonas de drenagem também pode permitir que a fundação contenha um volume substancial de água diretamente contra o talude de montante, sem comprometer sua estabilidade (ENGELS, 2006). Além disso, os rejeitos são ciclizados e apenas a fração grossa e compactada é utilizada nos alteamentos. Pode-se também utilizar material de empréstimo ou estéril resultante da lavra (LOZANO, 2006).

Na Figura 8 é apresentado o método de alteamento a jusante. A construção deste método começa com um dique inicial impermeável, que contém drenagem interna, composta por filtro inclinado e tapete drenante, diferente do método de montante que possui dique inicial permeável. Os rejeitos são descarregados atrás do dique, e à medida que o alteamento acontece, nova parede é construída e apoiada no topo do talude a jusante da seção anterior. O talude de montante é impermeabilizado nos alteamentos, e à medida que os alteamentos vão ocorrendo, a linha central do topo da barragem é deslocada (VICK, 1990).

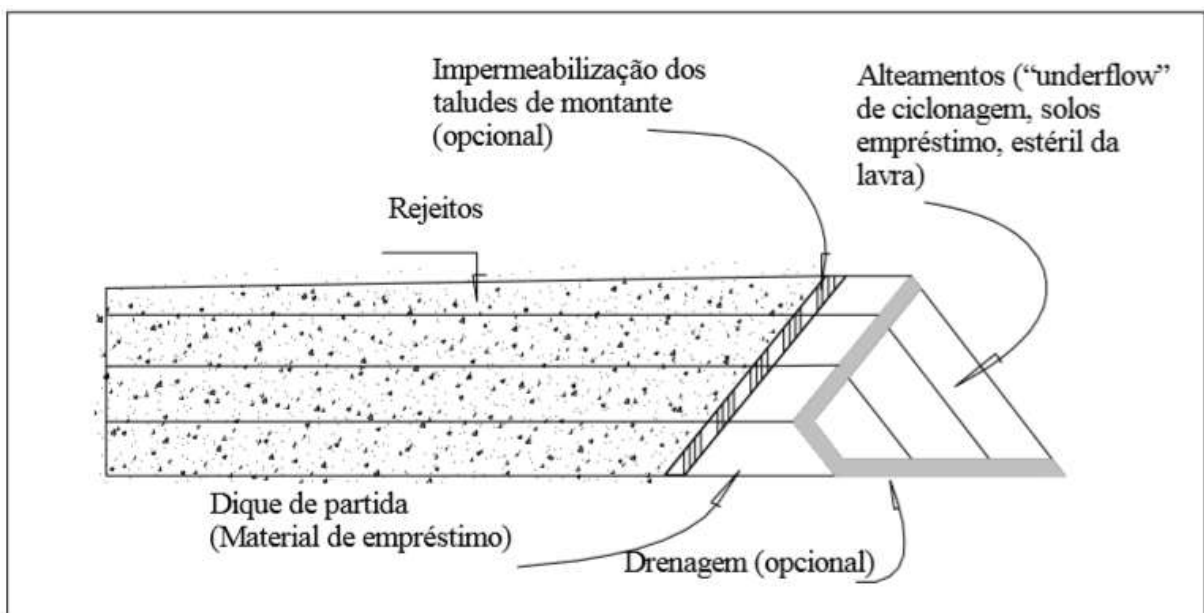


Figura 8 - Método de jusante (VICK, 1981, modificado).

Uma vantagem é que as seções alteadas podem ser projetadas para ter porosidade variável para solucionar algum problema com a superfície freática da barragem. O que pode ser útil quando a planta de beneficiamento faz alterações para aumentar a eficiência e como resultado altera as características do rejeito. Isto pode acarretar em maior quantidade de água sendo bombeada pra barragem ou alterar as características de drenagem dos rejeitos recém-depositados (ENGELS, 2006).

A principal vantagem do método é que o projeto pode ter alturas variáveis, visto que cada alteamento é estruturalmente independente dos rejeitos. Outras vantagens deste método incluem: é um método cuja operação é relativamente simples; pode ser aplicado em ambientes com vibrações e/ou alta sismicidade, visto que, se compactados os rejeitos do “underflow”, a susceptibilidade de liquefação é reduzida; viabiliza a compactação de todo o corpo da barragem; possui maior segurança devido aos alteamentos controlados; as probabilidades de “piping” e de rupturas horizontais são inferiores; e o estéril proveniente da lavra pode ser utilizado nos alteamentos (LOZANO, 2006).

A principal desvantagem é o custo de alteamento, pois a quantidade de material necessário aumenta exponencialmente a cada alteamento, e como consequência aumenta também a necessidade de grande área ao redor da barragem (VICK, 1990). Embora o método não tenha restrições quanto à altura, sua altura final fica restrita a área disponível a sua volta.

Outra desvantagem é que exige sistemas de drenagem eficientes, havendo probabilidade de sedimentação dos finos (VICK, 1990). Além disso, é possível que os rejeitos a jusante não sejam compactados devidamente em zonas ou épocas de alta pluviosidade, e não possibilita a proteção com cobertura vegetal do talude de jusante, bem como não permite a drenagem superficial durante a fase construtiva, devido à superposição dos rejeitos (LOZANO, 2006).

### **3.2.3 Método de alteamento por linha de centro**

O método de alteamento por linha de centro é uma combinação entre o método de montante e o método de jusante. É mais estável que o método de montante e requer menos material que o método de jusante. Como no método de montante, os rejeitos geralmente são descarregados por *spigots* da crista do dique inicial na praia de rejeitos atrás da parede da barragem. Quando o alteamento é necessário, o material (que pode ser material de empréstimo, estéril ou *underflow* dos ciclones) é lançado na praia anterior e no talude de jusante do maciço

de partida. Conforme o alteamento prossegue verticalmente, a linha de centro não se move com relação às direções a montante e a jusante da barragem, por isto o termo linha de centro, como mostra a Figura 9 (LOZANO, 2006).

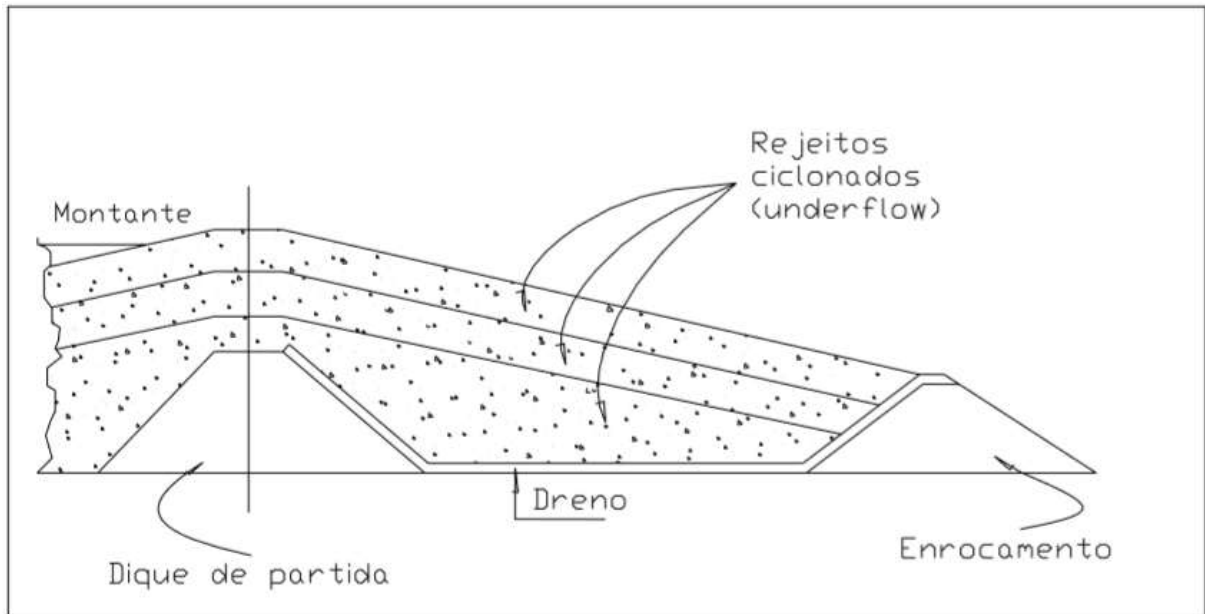


Figura 9 - Método de linha de centro (LOZANO, 2006).

O método inclui zonas de drenagem interna semelhante as do método a jusante. Portanto, a água pode se aproximar mais da crista da barragem do que no método de montante, sem a preocupação de aumentar a superfície freática ou o risco de rupturas. Entretanto, este método não deve ser aplicado como uma grande instalação para retenção de água devido ao fato de que os alteamentos são parcialmente construídos em rejeitos consolidados. Um bom sistema de decantação precisa ser instalado para evitar a submersão de água na praia ao redor da crista da barragem (ENGELS, 2006).

As principais vantagens do método são: facilidade de construção; eixo de alteamentos permanece fixo; e menor volume de *underflow* necessário quando comparado ao método da jusante. Já as desvantagens incluem: requer eficiente sistema de drenagem e sistema de contenção a jusante, difícil operação, e pode requerer altos investimentos globais (LOZANO, 2006).

O Quadro 1 apresenta um comparativo entre os três métodos de alteamento.



Quadro 1 - Comparação entre as características dos métodos de alteamentos de barragens de rejeito (VICK, 1990, modificado).

	<b>Montante</b>	<b>Jusante</b>	<b>Linha de centro</b>
<b>Tipo de rejeito recomendado</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Mais de 40% de areia</li> <li>•Baixa densidade de polpa para promover segregação</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Qualquer tipo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Areias ou lamas de baixa plasticidade</li> </ul>
<b>Requerimentos de descarga dos rejeitos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Descarga periférica, e bom controle de água livre acumulada</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•De acordo com o projeto</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Descarga periférica, conservando o eixo da barragem</li> </ul>
<b>Armazenamento d'água</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Não recomendado para grandes volumes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Boa</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Não recomendado para armazenamento permanente</li> </ul>
<b>Resistência sísmica</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Fraca em áreas de alta sismicidade</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Boa</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Aceitável</li> </ul>
<b>Restrições de alteamento</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Recomendável menos de 5 a 10 m/ano, perigoso mais alto que 15 m/ano</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Nenhuma</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Pouca</li> </ul>
<b>Requisitos de alteamento</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Solo natural</li> <li>•Rejeitos ou estéril</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Rejeitos ou estéril</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Rejeitos ou estéril</li> </ul>
<b>Custo relativo do corpo do aterro</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Baixo <math>V_m</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Alto (<math>3 V_m</math>)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Moderado (<math>2 V_m</math>)</li> </ul>

\* $V_m$  = volume da barragem alteada pelo método de montante

Observa-se que método de alteamento a jusante apresenta melhores características estruturais e de estabilidade quando comparado aos outros métodos, mas o grande volume de material necessário para alteamento influencia diretamente nos custos do projeto. A Figura 10 apresenta a relação de volume de material necessário para alteamento nos métodos da jusante e por linha de centro quando comparados ao método da montante.

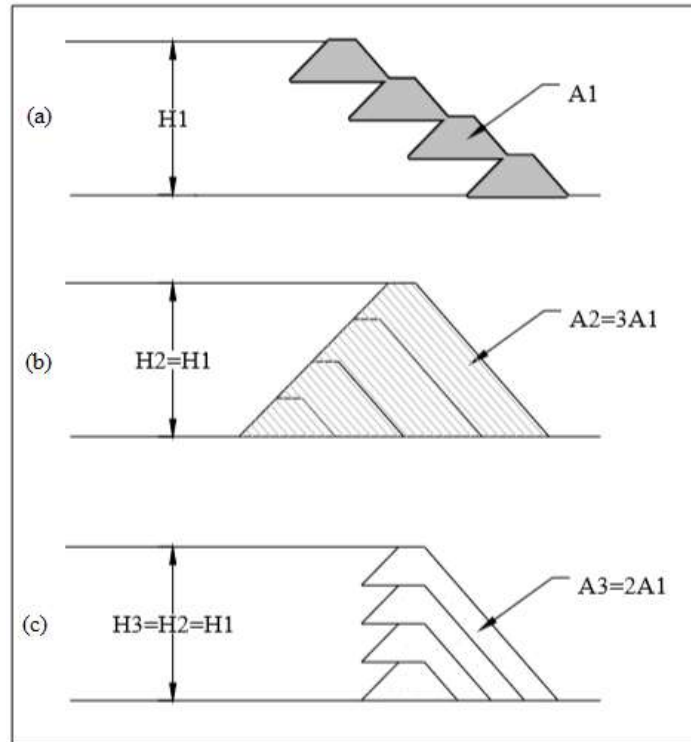


Figura 10 - Comparação de volumes para os tipos de barragem: (a) Método de montante; (b) Método de jusante; e (c) Método da linha de centro (VICK, 1990, modificado).

É muito importante a análise de uma série de fatores para a escolha do melhor método a ser aplicado, como por exemplo: a topografia, hidrologia e hidrogeologia, custos envolvidos, tipo de processo industrial, características geotécnicas, necessidade de reserva de água, necessidade de controle de água percolada e sismicidade (ARAUJO, 2006).

### 3.2.4 Transporte e descarga de rejeitos

Segundo Chammas (1989) apud Rafael (2012), as três etapas de comportamento que o rejeito em forma de polpa experimenta, são as seguintes:

- Comportamento de lâmina líquida, com flocculação das partículas menores;
- Quando em processo de sedimentação, apresentam comportamento semilíquido e semi-viscoso;
- Na etapa de adensamento, comportam-se, no ponto de vista geotécnico, como um solo (características de baixa resistência ao cisalhamento). Ressaltando-se que o rejeito não é propriamente um solo.

Os rejeitos em forma de polpa são comumente bombeados ou transportados por gravidade através de canais ou tubulações que ligam a planta de beneficiamento a seu local de armazenamento final (ICOLD & UNEP, 2001). A elevação relativa entre a planta de beneficiamento e o local de descarte exerce grande influência no método de transporte utilizado, na recuperação de água e nos custos de construção e operação. Idealmente, o local de descarte proposto deve se encontrar em declive com relação à usina para aproveitar o fluxo de gravidade dos rejeitos, reduzindo custos relacionados ao bombeamento. Se a inclinação e/ou distância são grandes, pode ocorrer aumento do fluxo de rejeitos, aumentando-se também o desgaste da tubulação (polpas são geralmente abrasivas e de alta viscosidade), exigindo altos custos de manutenção (EPA, 1994). Custos de bombeamento de água também aumentam, podendo ser necessárias caixas de armazenamento de água. A Figura 11 apresenta uma caixa de armazenamento de água utilizada para dissipar o consumo de energia relacionado à disposição dos rejeitos em uma barragem nos Estados Unidos (VICK, 1990).



Figura 11 - Caixas de armazenamento de água na barragem da mina de cobre Kennecott, localizada nos EUA (ENGELS, 2006).

Segundo Vick (1990), a barragem de rejeitos deve estar instalada a uma distância de quatro a cinco quilômetros da usina de beneficiamento, exceto em casos especiais que exijam o descarte de grandes volumes de rejeitos ou quando fatores do local impedirem a construção de uma instalação próxima.

O dimensionamento do sistema de tubulação (comumente HDPE) deve levar em conta a velocidade mínima de fluxo necessária (que geralmente varia entre 1.5 a 3.0 m/s), de forma a evitar a sedimentação das partículas sólidas presentes no rejeito, que podem vir a obstruir a tubulação (RAFAEL, 2012).

### 3.2.5 Local de implementação de barragens de rejeito

A seleção do local de implantação de uma barragem de rejeitos é o aspecto mais importante do projeto (ENGELS, 2006). Segundo Vick (1990), os principais fatores que influenciam na escolha do local de instalação de uma barragem de rejeitos, e seus respectivos efeitos são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Fatores que influenciam na escolha do local para barragens de rejeito (VICK, 1990, modificado).

<b>Parâmetro</b>	<b>Efeitos</b>
Local e elevação relativa da usina de beneficiamento	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Comprimento da tubulação de condução dos rejeitos e retorno de água.</li> <li>• Custos de operação dos mecanismos de bombeamento.</li> </ul>
Topografia	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Arranjo da barragem.</li> <li>• Especificações de deposição e preenchimento da barragem.</li> <li>• Facilidade de mudança na disposição.</li> </ul>
Hidrologia e área de captação	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tempo de acumulação de água suficiente para permitir a sedimentação.</li> <li>• Especificações de manejo de inundações.</li> </ul>
Geologia	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Viabilidade de materiais de empréstimo, tipos e quantidades.</li> <li>• Perdas por percolação, permeabilidades.</li> <li>• Estabilidade das fundações.</li> <li>• Falhas, sismicidade, estruturas de contenção de taludes de corte.</li> </ul>
Águas subterrâneas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vazão e direção de percolação.</li> <li>• Potencial de contaminação.</li> <li>• Teor de umidade de materiais de empréstimo.</li> </ul>
Clima	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Taxa anual de precipitação e evaporação.</li> </ul>

Além disso, as condições topográficas do local devem se adequar a planta de represamento da barragem de rejeitos, que podem ser:

- Represamento tipo anel:

Este tipo de arranjo possui geometria regular e é comumente aplicado em terrenos planos, ou sem grandes variações topográficas. Além disto, requer maior quantidade de aterro e, por apresentar todos os lados fechados, tem percolação reduzida e acumula-se apenas a água presente na polpa (VICK, 1990). A Figura 12 apresenta esquematicamente este tipo de represamento, que pode ser simples ou segmentado (múltiplos arranjos).

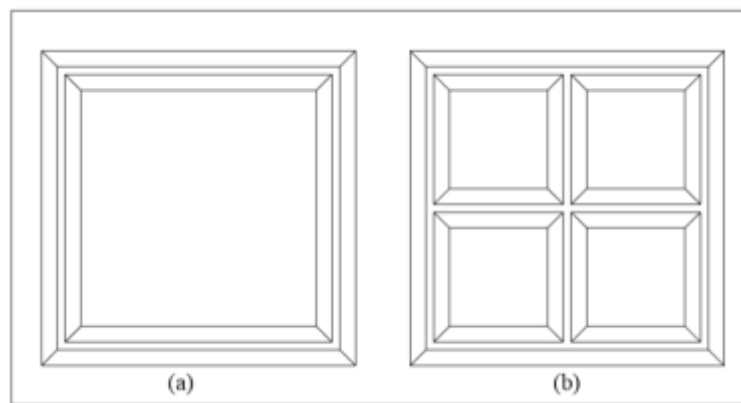


Figura 12 - Represamento em anel: (a) simples e (b) múltiplos (VICK, 1990).

- Represamento a meia encosta:

Este tipo de represamento também requer grande quantidade de materiais de aterro, e é comumente utilizado quando não há drenagem natural na zona de deposição dos rejeitos e quando os taludes da encosta possuem inclinação menor que 10% (VICK, 1990). A Figura 13 apresenta esquematicamente este tipo de represamento.

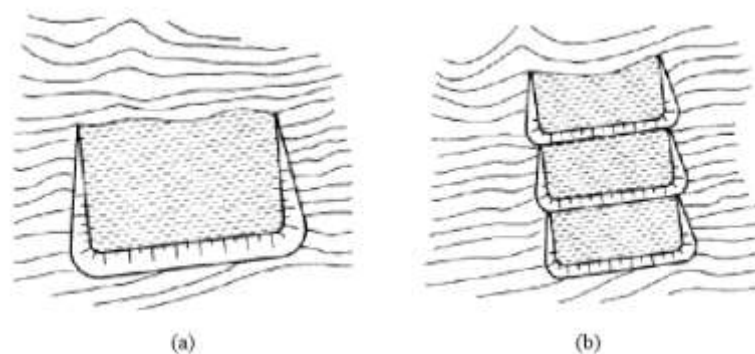


Figura 13 - Represamento a meia encosta: (a) simples e (b) múltiplos (VICK, 1990).

- Represamento em bacia:

Neste tipo de represamento os rejeitos são retidos por uma barragem perpendicular ao fluxo da bacia, e posicionada em uma depressão topográfica de forma simples ou segmentada, como mostra a Figura 14. Este tipo de represamento requer boa drenagem para controle da água, especialmente se os alteamentos da barragem forem construídos utilizando o método da montante (VICK, 1990).

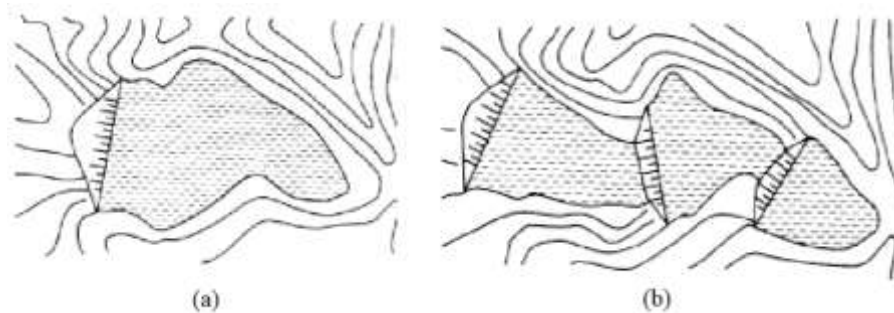


Figura 14 - Represamento em bacia: (a) simples e (b) múltiplos (VICK, 1990).

- Represamento em vale:

Este tipo de represamento pode ser considerado como a junção do represamento em bacia e a meia encosta. Pode ser construído de forma simples ou em múltiplas etapas, como apresentado na Figura 15, e é aplicado quando o vale é muito largo e possui em suas margens áreas apropriadas para a construção de barragens, de forma que não interfira na drenagem natural (VICK, 1990).

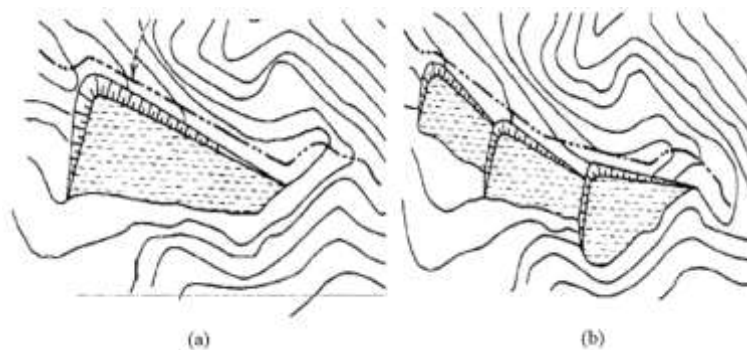


Figura 15 - Represamento em vale: (a) simples e (b) múltiplos (VICK, 1990).

Segundo Ritcey (1989), a escolha do local de implantação de uma barragem de rejeitos inclui vários aspectos, como: a capacidade de armazenamento, disponibilidade do local, hidrologia, custos, facilidade de operação, condições geológicas e geotécnicas, entre outros. O

Quadro 2 apresenta alguns critérios que para Ritcey (1989) são relevantes para a seleção e preparação do local de implantação de uma barragem.

Quadro 2 - Critérios para seleção e preparação do local para implantação de uma barragem de rejeitos (RITCEY, 1989, modificado).

CRITÉRIO	OBSERVAÇÕES		
SELEÇÃO DO LOCAL (dependendo da geração de potencial ácido dos rejeitos)	<p>-Depois do fechamento da barragem, o fluxo de água sobre os rejeitos deve ser mínimo.</p> <p>-Fundações de baixa permeabilidade, para reduzir percolação e poluição das águas subterrâneas.</p> <p>-Se possível, presença ou proximidade de minerais calcários, com alto teor de carbonatos nas águas subterrâneas, para haver precipitação de metais pesados das águas percoladas dos rejeitos.</p> <p>-Evitar a possibilidade de geração de ácidos em rejeitos sólidos com pirita.</p> <p>-Cuidado no projeto e construção de filtros (materiais), evitando a possibilidade de obstrução resultante da precipitação, por hidrólise, de substâncias contaminantes.</p> <p>-Efeitos negativos por alterações na permeabilidade, resistência e compressibilidade de algumas argilas pela percolação de águas com elementos quimicamente ativos.</p>		
PREPARAÇÃO DO LOCAL	<table border="0" style="width: 100%;"> <tr> <td style="vertical-align: top; width: 50%;"> <p>1. Rejeitos</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Características físicas e químicas</li> <li>• Possíveis variações com o tempo</li> <li>• Viabilidade de transporte</li> <li>• Programa de volumes de disposição</li> <li>• Necessidades e/ou vantagens da mistura de diferentes rejeitos.</li> </ul> <p>2. Geologia e extração de minério</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Historia geológica e atividades atuais               <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Características topográficas</li> <li>▪ Potencial de riscos naturais</li> <li>▪ Informações para localizar e projetar estruturas de porte maior</li> </ul> </li> <li>• Fundações               <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Custos de escavação e perdas</li> <li>▪ Tipo e profundidade das camadas</li> <li>▪ Resistência ao intemperismo</li> <li>▪ Resistência ao ataque ácido</li> <li>▪ Custos de escavação</li> <li>▪ Mergulho e direção das camadas afetam o fluxo de águas subterrâneas.</li> </ul> </li> </ul> <p>3. Características e viabilidade do solo</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Tipo de solo               <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Residual</li> <li>▪ Glacial</li> <li>▪ Coluvial</li> <li>▪ Aluvionar</li> </ul> </li> <li>• Quantidades e locação               <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Cobertura natural adequada</li> <li>▪ Viabilidade como material final de cobertura</li> <li>▪ Material adequado para drenagem</li> <li>▪ Boas reservas e disponibilidade</li> <li>▪ Boa estabilidade</li> </ul> </li> <li>• Ação do intemperismo.               <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Modificações nas características do solo com o tempo e exposição</li> </ul> </li> <li>• Mineralogia               <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Troca de cátions e capacidade de renovação por lixiviação</li> </ul> </li> </ul> </td> <td style="vertical-align: top; width: 50%;"> <p>4. Águas superficiais</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Correntes, fluxos               <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Custos iniciais altos para controle de escoamento superficial e correntes de águas</li> <li>▪ Considerar os efeitos do fluxo da água no local e nas estruturas</li> <li>▪ Desenvolver uma base de dados para controle de águas antes da deposição dos rejeitos</li> </ul> </li> <li>• Escoamento superficial               <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Quando possível, desviar as águas superficiais para longe da zona de deposição, com valas periféricas e tubulações de drenagem</li> <li>▪ Infiltração da água de chuva na área de deposição</li> <li>▪ Considerar o uso de material de cobertura impermeável</li> <li>▪ Manter uma declividade final dos rejeitos para rápido escoamento superficial.</li> <li>▪ Valas impermeáveis e resistentes à erosão para desvio das águas para fora da área</li> </ul> </li> </ul> <p>5. Águas subterrâneas</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Poluição por percolação</li> <li>▪ As medidas para remediar ou eliminar a percolação de águas lixiviadas nas águas subterrâneas são praticamente impossíveis ou muito caras.</li> <li>▪ Minimizar a contaminação de águas subterrâneas por vedação do terreno original, vedar a superfície dos rejeitos, e coletar as águas antes que entrem no sistema de águas subterrâneas.</li> </ul> </td> </tr> </table>	<p>1. Rejeitos</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Características físicas e químicas</li> <li>• Possíveis variações com o tempo</li> <li>• Viabilidade de transporte</li> <li>• Programa de volumes de disposição</li> <li>• Necessidades e/ou vantagens da mistura de diferentes rejeitos.</li> </ul> <p>2. Geologia e extração de minério</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Historia geológica e atividades atuais               <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Características topográficas</li> <li>▪ Potencial de riscos naturais</li> <li>▪ Informações para localizar e projetar estruturas de porte maior</li> </ul> </li> <li>• Fundações               <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Custos de escavação e perdas</li> <li>▪ Tipo e profundidade das camadas</li> <li>▪ Resistência ao intemperismo</li> <li>▪ Resistência ao ataque ácido</li> <li>▪ Custos de escavação</li> <li>▪ Mergulho e direção das camadas afetam o fluxo de águas subterrâneas.</li> </ul> </li> </ul> <p>3. Características e viabilidade do solo</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Tipo de solo               <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Residual</li> <li>▪ Glacial</li> <li>▪ Coluvial</li> <li>▪ Aluvionar</li> </ul> </li> <li>• Quantidades e locação               <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Cobertura natural adequada</li> <li>▪ Viabilidade como material final de cobertura</li> <li>▪ Material adequado para drenagem</li> <li>▪ Boas reservas e disponibilidade</li> <li>▪ Boa estabilidade</li> </ul> </li> <li>• Ação do intemperismo.               <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Modificações nas características do solo com o tempo e exposição</li> </ul> </li> <li>• Mineralogia               <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Troca de cátions e capacidade de renovação por lixiviação</li> </ul> </li> </ul>	<p>4. Águas superficiais</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Correntes, fluxos               <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Custos iniciais altos para controle de escoamento superficial e correntes de águas</li> <li>▪ Considerar os efeitos do fluxo da água no local e nas estruturas</li> <li>▪ Desenvolver uma base de dados para controle de águas antes da deposição dos rejeitos</li> </ul> </li> <li>• Escoamento superficial               <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Quando possível, desviar as águas superficiais para longe da zona de deposição, com valas periféricas e tubulações de drenagem</li> <li>▪ Infiltração da água de chuva na área de deposição</li> <li>▪ Considerar o uso de material de cobertura impermeável</li> <li>▪ Manter uma declividade final dos rejeitos para rápido escoamento superficial.</li> <li>▪ Valas impermeáveis e resistentes à erosão para desvio das águas para fora da área</li> </ul> </li> </ul> <p>5. Águas subterrâneas</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Poluição por percolação</li> <li>▪ As medidas para remediar ou eliminar a percolação de águas lixiviadas nas águas subterrâneas são praticamente impossíveis ou muito caras.</li> <li>▪ Minimizar a contaminação de águas subterrâneas por vedação do terreno original, vedar a superfície dos rejeitos, e coletar as águas antes que entrem no sistema de águas subterrâneas.</li> </ul>
<p>1. Rejeitos</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Características físicas e químicas</li> <li>• Possíveis variações com o tempo</li> <li>• Viabilidade de transporte</li> <li>• Programa de volumes de disposição</li> <li>• Necessidades e/ou vantagens da mistura de diferentes rejeitos.</li> </ul> <p>2. Geologia e extração de minério</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Historia geológica e atividades atuais               <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Características topográficas</li> <li>▪ Potencial de riscos naturais</li> <li>▪ Informações para localizar e projetar estruturas de porte maior</li> </ul> </li> <li>• Fundações               <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Custos de escavação e perdas</li> <li>▪ Tipo e profundidade das camadas</li> <li>▪ Resistência ao intemperismo</li> <li>▪ Resistência ao ataque ácido</li> <li>▪ Custos de escavação</li> <li>▪ Mergulho e direção das camadas afetam o fluxo de águas subterrâneas.</li> </ul> </li> </ul> <p>3. Características e viabilidade do solo</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Tipo de solo               <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Residual</li> <li>▪ Glacial</li> <li>▪ Coluvial</li> <li>▪ Aluvionar</li> </ul> </li> <li>• Quantidades e locação               <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Cobertura natural adequada</li> <li>▪ Viabilidade como material final de cobertura</li> <li>▪ Material adequado para drenagem</li> <li>▪ Boas reservas e disponibilidade</li> <li>▪ Boa estabilidade</li> </ul> </li> <li>• Ação do intemperismo.               <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Modificações nas características do solo com o tempo e exposição</li> </ul> </li> <li>• Mineralogia               <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Troca de cátions e capacidade de renovação por lixiviação</li> </ul> </li> </ul>	<p>4. Águas superficiais</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Correntes, fluxos               <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Custos iniciais altos para controle de escoamento superficial e correntes de águas</li> <li>▪ Considerar os efeitos do fluxo da água no local e nas estruturas</li> <li>▪ Desenvolver uma base de dados para controle de águas antes da deposição dos rejeitos</li> </ul> </li> <li>• Escoamento superficial               <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Quando possível, desviar as águas superficiais para longe da zona de deposição, com valas periféricas e tubulações de drenagem</li> <li>▪ Infiltração da água de chuva na área de deposição</li> <li>▪ Considerar o uso de material de cobertura impermeável</li> <li>▪ Manter uma declividade final dos rejeitos para rápido escoamento superficial.</li> <li>▪ Valas impermeáveis e resistentes à erosão para desvio das águas para fora da área</li> </ul> </li> </ul> <p>5. Águas subterrâneas</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Poluição por percolação</li> <li>▪ As medidas para remediar ou eliminar a percolação de águas lixiviadas nas águas subterrâneas são praticamente impossíveis ou muito caras.</li> <li>▪ Minimizar a contaminação de águas subterrâneas por vedação do terreno original, vedar a superfície dos rejeitos, e coletar as águas antes que entrem no sistema de águas subterrâneas.</li> </ul>		

Já Robertson (1982) seleciona diversas tarefas necessárias para a seleção do melhor local, dividindo-as em duas fases: Fase de avaliação preliminar e fase de avaliação e investigação detalhada, como mostra a Tabela 3.

Tabela 3 - Fases e tarefas do processo de seleção do local de implantação de barragens de rejeito (ROBERTSON, 1982, modificado).

<b>Tarefas</b>	<b>Fases</b>
1 Investigação regional	Fase 1: Avaliação Preliminar
2 Identificação de locais	
3 Análise de características desfavoráveis	
4 Investigação dos locais restantes	
5 Avaliação qualitativa e classificação	
6 Avaliação semi-quantitativa e classificação	
7 Análise de custos	
8 Seleção de alternativas para a fase de investigação detalhada	
9 Investigação detalhada dos locais selecionados	Fase 2: Avaliação e investigação detalhada
10 Projeto conceitual dos locais	
11 Avaliação dos custos e riscos de poluição de cada um dos locais	
12 Classificação dos locais e seleção do principal local	
13 Preparação do relatório e documentação para o processo de revisão	

Durante a fase de avaliação preliminar, as informações necessárias para a realização das tarefas incluem: Geologia; Posição da mina, facilidades e das infraestruturas; Tempo esperado de lavra; Produção esperada de rejeitos; Produção e natureza dos estéreis ou outros tipos de rejeitos; Presença de outras minas na área; Regulamentações ambientais; Hidrologia; Hidrogeologia; Geoquímica; Clima; Demografia; Arqueologia; Ecologia; Potenciais zonas mineralizadas na região, entre outros (ROBERTSON, 1982).

Já na fase de avaliação e investigação são tratados os elementos e características individuais relacionados aos componentes estudados na fase de avaliação (ROBERTSON, 1982).



### 3.2.6 Riscos associados e gestão da água

As barragens de rejeito são possivelmente as maiores estruturas feitas pelo homem, e sua segurança é essencial para garantir a proteção e preservação do meio ambiente, das pessoas e da propriedade. Estes fatores, os registros de segurança destas estruturas e o número de falhas apresentados levou a um aumento na conscientização sobre a necessidade de melhores provisões de segurança no projeto e operação de barragens de rejeitos (ICOLD, 2001).

Segundo Chambers & Higman (2011), a taxa de falhas em barragens de rejeito é de uma falha a cada 8 meses, ou seja, três falhas a cada dois anos. Esta taxa é altamente desproporcional, considerando-se que alguns acidentes em barragens de rejeito ainda não são reportados e que uma estimativa conservadora para que estas estruturas mantenham sua integridade é de mais de 10 mil anos de vida. A Figura 16 apresenta o número de falhas em barragens de rejeito registradas durante os anos 1960 e 2010. Uma explicação pode ser que ainda estamos experimentando os efeitos de antigas tecnologias e práticas, mesmo com o crescente esforço na investigação de acidentes em barragens de rejeitos e alteração nas práticas de construção e operação.

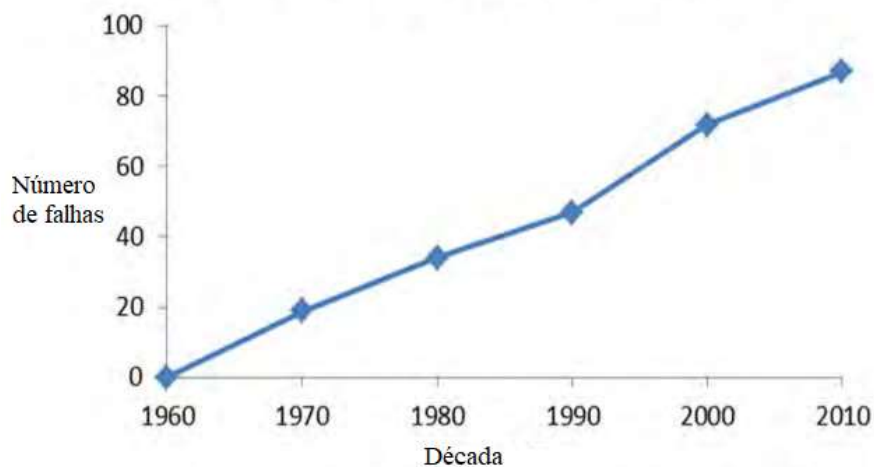


Figura 16 - Falhas em barragens de rejeito entre 1960-2010 (CHAMBERS & HIGMAN, 2011, modificado).

Rupturas provocadas por liquefação, erosão, infiltração e galgamento (*overtopping*) são alguns dos principais exemplos de falhas induzidas pela presença de água em barragens de rejeito (ICOLD & UNEP, 2001). Segundo Fourie (2003) a presença de grande quantidade

de água é o principal fator de risco de instabilidade em barragens de rejeito, podendo ser reduzido com boa drenagem e aumentando a densidade da polpa.

A liquefação consiste em transformar solos ou partículas em estado sólido para o estado liquefeito (estado de fluidez). No caso de rejeitos ocorre quando os rejeitos sólidos que sustentam os diques se liquefazem. A liquefação pode ser estática e dinâmica, sendo a dinâmica provocada por eventos sísmicos enquanto a estática ocorre quando as partículas sólidas perdem o contato entre si, devido ao aumento na poropressão, em condições não drenadas, reduzindo à zero tensão efetiva e fazendo com que as partículas se comportem como líquido viscoso. Os solos suscetíveis à ocorrência deste fenômeno são os que apresentam tendência de contração de volume sob esforços de cisalhamento, como por exemplo, areias fofas (RAFAEL, 2012).

As rupturas decorrentes de falhas estruturais, em barragens de terra, podem ocorrer devido a infiltrações existentes na barragem produzindo arraste dos materiais e erosão ou devido a problemas na compactação do maciço da barragem, gerando um caminho para o fluxo de água, que arrasta partículas de solo, progressivamente, resultando no fenômeno conhecido como “piping” (ANA, 2012).

No caso de rupturas por galgamento, em barragens de terra, o nível de água no reservatório aumenta além da cota da crista da barragem, arrastando os materiais, comumente devido a chuvas intensas. Em barragens de concreto, as sobrecargas a que a barragem pode ser submetida podem conduzi-la à ruptura (ANA, 2012).

Alguns dos mecanismos de longo prazo que podem levar a ruptura de uma barragem de rejeitos incluem danos acumulados (por exemplo, erosão interna da barragem e ocorrência de múltiplos eventos sísmicos), incidentes geológicos (por exemplo, deslizamentos de terra), liquefação induzida por carga estática e mudanças climáticas (CHAMBERS & HIGMAN, 2011).

Como apresentado na Figura 17, a principal causa de acidentes em barragens de rejeito ainda é desconhecida, seguida por galgamentos, estabilidade dos taludes e terremotos. No caso de galgamentos e terremotos, o projeto requer uma previsão do maior evento hidrológico ou terremoto que a estrutura presenciará, sendo que, muitas vezes a vida útil destas estruturas deve ser considerada perpétua (CHAMBERS & HIGMAN, 2011).

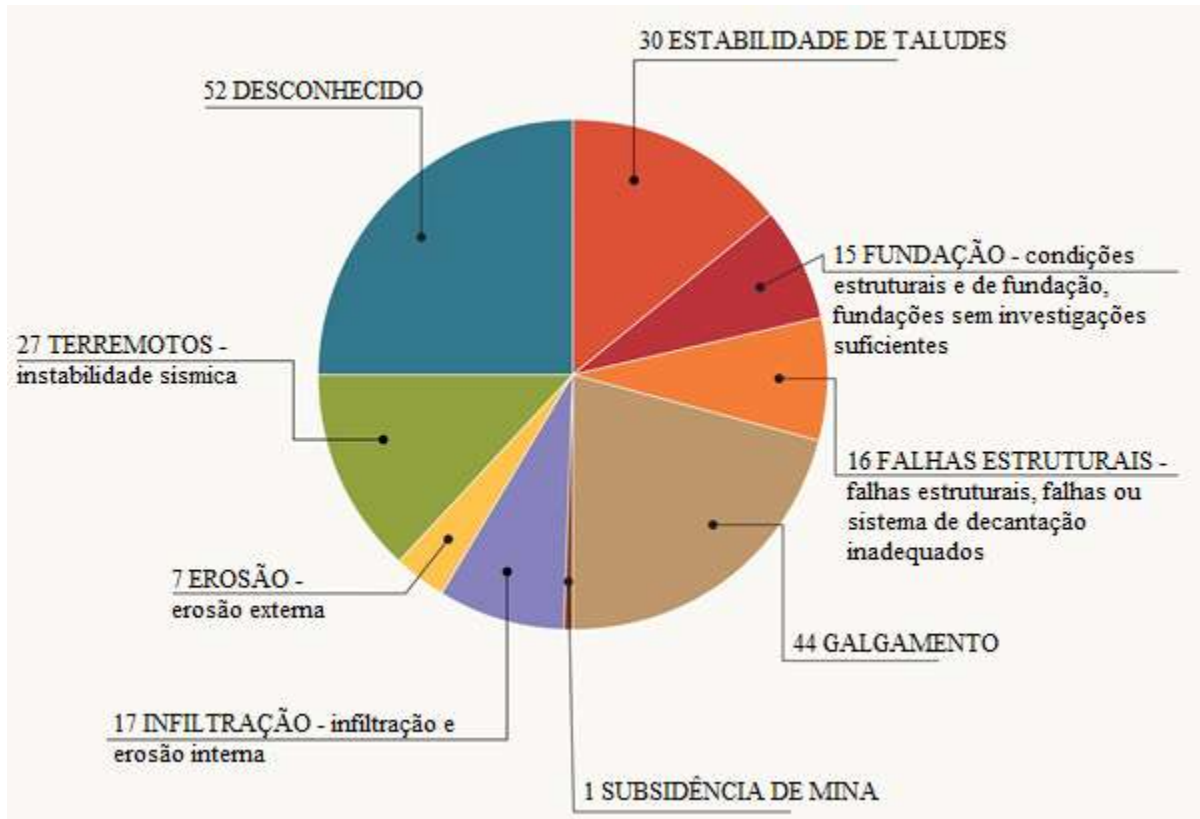


Figura 17 - Principais causas de ruptura em barragens de rejeito entre 1915 – 2016 (THYGESEN, 2017, modificado).

Como o projeto requer que a magnitude dos eventos hidrológicos e sísmicos sejam considerados máximos, existe uma tendência em fazer suposições que são economicamente favoráveis, de curto prazo e assumindo-se que as atuais e futuras tecnologias podem e irão minimizar os riscos de longo prazo associados ao projeto, operações e fechamento da instalação (CHAMBERS & HIGMAN, 2011). Porém, as estatísticas apontam e sugerem que estas questões precisam ser abordadas adequadamente.

Acidentes relacionados à estabilidade de taludes, fundações e estruturas são comumente atribuídos ao projeto ou falhas na construção, e podem ser solucionados com melhores práticas durante o projeto e construção, adotando-se maiores margens de segurança (CHAMBERS & HIGMAN, 2011).

Apesar da maior disponibilidade de tecnologias para o projeto, operação e construção de barragens de rejeitos, acidentes ainda continuam acontecendo, e como consequência tem-se grandes perdas econômicas, degradação ambiental e em alguns casos, perdas humanas (ICOLD, 2001).

Mesmo após o encerramento das atividades na instalação, ainda há necessidade contínua de monitoramento e manutenção. Como grande parte das barragens de rejeito ainda estão ativas ou em fase de remediação, grande parte das experiências relacionadas à estabilidade à longo prazo (mil anos ou mais) das barragens de rejeitos após o encerramento das atividades ainda é limitada (ICOLD, 2006).

Alguns dos fatores que requerem monitoramento para estabilidade da barragem à longo prazo incluem infiltrações através da barragem, fundação e pilares, superfície freática, poropressões, movimentos horizontais e verticais na barragem e fatores externos como erosão, intrusão de vegetação e animais, intemperismo e forças provocadas por gelo e geada (ICOLD, 2006). A eliminação de futuros incidentes em barragens de rejeitos requer um bom gerenciamento da água, de modo que as probabilidades de galgamento, “piping”, infiltrações e instabilidade de taludes sejam reduzidas (ENGELS, 2006).

A gestão da água não inclui apenas o gerenciamento dos fluxos de água, mas também a coleta, controle e tratamento de infiltrações. Estabelecer um balanço de água estável durante o projeto é muito importante para prevenir problemas com a gestão da água durante as fases de operação e encerramento das atividades, sendo essencial que a barragem seja projetada para controlar e manipular as entradas e saídas de água, bem como qualquer flutuação imprevisível (por exemplo, tempestades). O balanço hídrico da barragem deve levar em conta que maiores volumes de água podem requerer armazenamento durante as estações de seca para manter a produção da planta, além de considerar fatores como derretimento de neve e gelo, inundações a montante e a ocorrência de tempestades, de forma a evitar qualquer perda de nível da borda livre (ENGELS, 2006).

Durante o projeto todas as entradas e saídas de água devem ser consideradas para determinado local e deve incluir todas as combinações de fatores de risco para o pior caso (por exemplo, falhas no sistema de decantação, tempestades, neve e/ou gelo derretido) (DPI, 2003). Uma forma de determinar o balanço hídrico da barragem é considerar a média de entradas e saídas anuais de água, estimar as taxas de infiltração, evaporação e superfície freática (para determinar o movimento das águas subterrâneas e plumas de infiltração), que pode ser obtido através de uma modelagem hidrogeológica (ENGELS, 2006). A água armazenada em uma barragem pode ser reutilizada na planta de beneficiamento, na recuperação de lagoas e/ou tratadas e descarregadas no meio ambiente. A Figura 18 apresenta os ganhos e perdas de água mais comuns para uma barragem convencional.

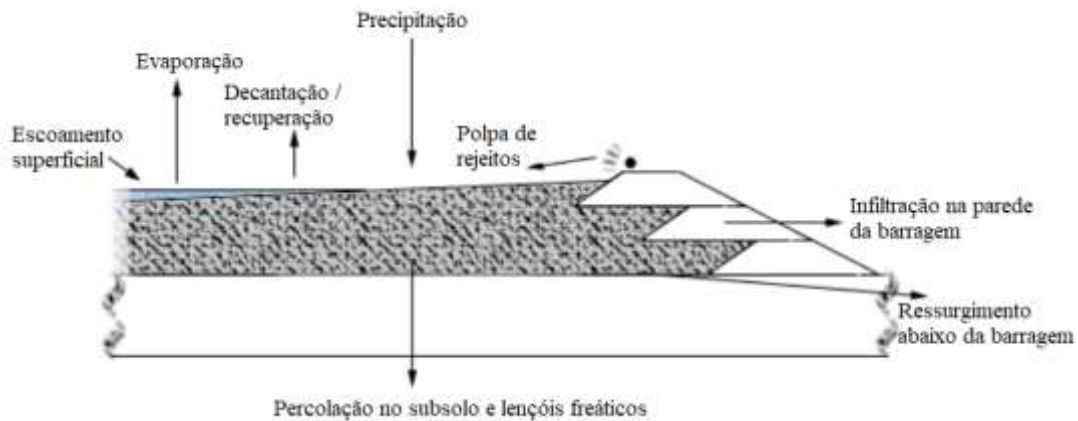


Figura 18 - Balanço hídrico de uma barragem de rejeitos convencional (VICK, 1990, modificado).

O controle da lagoa sobrenadante é provavelmente o procedimento mais importante no manejo da água em uma barragem. Quando feito de forma inadequada pode resultar em galgamento, aumento nas poropressões, redução da borda livre e aumento nas taxas de infiltração, que podem levar à instabilidade e maiores riscos de falhas (ENGELS, 2006). O monitoramento e o gerenciamento adequados da lagoa sobrenadante são necessários para operar uma barragem com segurança.

O(s) sistema(s) de decantação deve(m) ser projetado(s) para lidar com o gerenciamento diário da lagoa, incluindo tempestades. Seu projeto deve permitir uma grande capacidade de água pluvial devido a tempestades que possam vir a ocorrer. Caso o sistema de drenagem não seja rápido o suficiente, a borda livre pode ser perdida. Como guia, o sistema de decantação deve ser capaz de remover a água da chuva entre 2 a 4 semanas, dependendo das condições climáticas (ENGELS, 2006).

Os métodos mais comuns de controle de água dentro de uma barragem são bacias de decantação e torres de decantação. Uma bacia de decantação consiste em uma plataforma flutuante que contém bombas usadas para recuperar a água da lagoa sobrenadante e enviá-la de volta à usina de beneficiamento. Já uma torre de decantação é uma estrutura que consiste em uma torre oca vertical ou inclinada (*riser*) que permite que a água seja bombeada para fora da torre ou drenada por gravidade através de dutos subterrâneos (ENGELS, 2006).

O aumento no peso dos rejeitos pode provocar rachaduras e danificar um canal de decantação que flui por baixo e através de uma instalação de represamento (ENGELS & DIXON-HARDY, 2004). Falhas em canais e torres de decantação podem gerar problemas na gestão da água. A falha em um sistema de decantação pode não ser visível imediatamente para um operador, até que o fluxo seja diminuído e ocorra a presença de sedimentos (rejeitos)

(ICOLD & UNEP, 2001). Os níveis de água no reservatório podem subir rapidamente e pode ocorrer galgamento se os planos de contingência não forem implementados (ENGELS, 2006).

As lagoas de recuperação (ou lagoas de decantação) armazenam a água que está sendo decantada. Fica localizada em uma área fora da barragem de rejeitos e sua água é enviada para tratamento ou bombeada de volta a usina de beneficiamento para reutilização. Deve ter tamanho e volume suficientes para equilibrar os fluxos de água determinados no projeto, e devem ser revestidas para impedir a contaminação de águas subterrâneas (ENGELS, 2006).

Normalmente, a borda livre mínima é determinada pela legislação nacional/local e/ou pelas políticas da empresa, levando em conta o balanço de água e as condições médias e extremas para evitar sua perda durante a operação. Para promover uma boa drenagem, a lagoa sobrenadante deve estar o mais longe possível dos aterros (manter uma borda livre alta e uma praia larga), e idealmente deve possuir pequena área, para minimizar a infiltração (ENGELS, 2006).

O fluxo de escoamento através dos rejeitos armazenados no depósito é inevitável. Por essa razão, o controle da infiltração é um requisito tão importante no gerenciamento da água, tanto durante as fases operacionais quanto pós-operacionais (DME, 1999). O projeto de uma instalação de armazenamento de rejeitos deve levar em consideração o controle de infiltrações para garantir que a instalação permaneça estável e que as regulamentações ambientais sejam cumpridas (ENGELS, 2006).

Inspeções visuais de uma instalação de rejeitos podem determinar as operações superficiais (por exemplo, controle de lagoas, gerenciamento de descarga, integridade das tubulações), mas o desempenho interno de uma instalação só pode ser identificado pelo monitoramento de mudanças e anomalias dos efluentes de escoamento (ENGELS, 2006).

A superfície freática é definida como a posição entre a zona de saturação e a zona de aeração (EC, 2004). Para a estabilidade em longo prazo, aterros de rejeitos dependem do rebaixamento da superfície freática e, portanto, devem existir sistemas adequados de drenagem (ENGELS, 2006). Todas as zonas de drenagem instaladas durante a construção do aterro precisam ser adequadas às características particulares dos efluentes e dos rejeitos.

De acordo com Fourie (2003), reduzir a quantidade de água presente nos rejeitos (rejeitos espessados, em pasta ou empilhamento a seco, por exemplo) ajuda a reduzir a infiltração e eliminar os requisitos de gerenciamento de água, reduzindo-se as perdas por infiltração e a contaminação do lençol freático, uma vez que há menos umidade presente nos rejeitos depositados e, geralmente, nenhuma lagoa sobrenadante.

### 3.3 MÉTODOS ALTERNATIVOS DE DISPOSIÇÃO DE REJEITOS

Atualmente, existe uma preferência pela disposição de rejeitos em superfície, visto que a disposição subterrânea é aplicada no preenchimento de cavidades subterrâneas previamente lavradas. A disposição de rejeitos em barragens convencionais (barragens de terra compactada) ainda é o método mais aplicado atualmente. Sua construção pode ser feita em etapas, com alteamentos ao longo do tempo. Para rejeitos com granulometria grossa (acima de 0,074 mm), a técnica mais utilizada é a de aterro hidráulico (FIGUEIREDO, 2007). Nesta técnica, o transporte do material do aterro é feito através de tubulações contendo aproximadamente 85% de água (DE SOUZA, 2013).

Nesta seção, serão apresentadas metodologias alternativas (consideradas não convencionais quando comparadas a barragens convencionais) para disposição de rejeitos. A aplicação de novas alternativas para a disposição de rejeitos provindos de atividades de mineração vem sendo estudada e tem sido assunto de grande interesse por parte de empresas de mineração, que vem buscando a redução dos impactos ambientais e custos relacionados aos processos de contenção e recuperação de água do processo.

#### 3.3.1 Disposição de rejeitos na forma de aterro hidráulico

Quando o próprio rejeito é utilizado na construção de barragens, ela se comporta como um aterro hidráulico, através do lançamento hidráulico dos rejeitos (hidromecanização). Algumas premissas devem ser obedecidas na utilização deste método, como: separação da fração grossa e fina, controle dos processos de separação granulométrica, e utilização de sistemas de drenagem e compactação eficientes, proteção superficial da barragem, entre outros (IBRAM, 2016). Um problema deste método é a formação de potenciais focos de liquefação, que aumentam o risco de ruptura, devido a vibrações no terreno provocadas por desmonte com explosivos próximo das barragens, alteamentos muito rápidos, entre outros (SANTOS, 2010).

Rejeitos mais granulares podem ser utilizados na construção do aterro da barragem sem passarem por um processo de desaguamento, enquanto rejeitos mais finos comumente precisam passar por um processo de secagem para serem utilizados na execução de aterros. No primeiro caso, o tempo de drenagem da camada de material lançada condiciona a velocidade de construção do aterro, sendo este suficientemente curto para continuidade dos serviços (FIGUEIREDO, 2007).

Alteamentos são aplicados devido ao custo mais baixo e devido à possibilidade de serem construídos com uma maior variedade de materiais, como solo natural de empréstimo, ciclonagem dos rejeitos (fração grossa), rochas residuais (estéreis), deposição hidráulica ou uma combinação de materiais (VICK, 1990).

Os alteamentos realizados através da técnica de aterro hidráulico são aplicados de forma a minimizar os custos que a implantação de uma barragem convencional pode vir a gerar. Mas apesar destas barragens apresentarem desempenho satisfatório no caso de rejeitos granulares, existe uma falta de controle e imprevisão do comportamento do material depositado, influenciando na estrutura como um todo, gerando restrições e dúvidas sobre o método de hidromecanização (ENGELS, 2006).

A técnica de disposição consiste inicialmente na construção de um dique de partida (que pode ser composto de solo ou material de enrocamento), seguidos por alteamentos cuja função é conter os rejeitos lançados hidráulicamente. Então os rejeitos são lançados a montante formando uma praia de rejeitos, que serve de fundação para futuros alteamentos (FIGUEIREDO, 2007).

A disposição dos rejeitos na praia de rejeitos pode ser efetuada através de um ou vários canhões de lançamento (*spigots*), ou através de hidrociclones. No caso de canhões a separação granulométrica ocorre na praia de rejeitos, em função da velocidade de descarga, da concentração e das características mineralógicas do rejeito (RAFAEL, 2012).

No caso de hidrociclones, uma partição granulométrica (*underflow* e *overflow*) é realizada anteriormente ao lançamento, comumente nas proximidades da barragem, auxiliando na conformação do barramento, como mostra a Figura 19 (FIGUEIREDO, 2007).



Figura 19 - Série de hidrociclones localizados na crista de uma barragem (FIGUEIREDO, 2007).



A grande vantagem do método é a utilização do próprio rejeito em sua construção, reduzindo os custos iniciais e de longo prazo, especialmente considerando-se que os alteamentos são construídos concomitantemente à geração do rejeito na planta, em várias etapas. Além disso, o método proporciona alta taxa de construção quando comparados a barragens convencionais, possibilidade de construção de aterros submersos, simplicidade dos mecanismos utilizados, entre outros (FIGUEIREDO, 2007).

O método apresenta as seguintes desvantagens, segundo Figueiredo (2007): dificuldade de controle da superfície freática, menor capacidade de armazenamento, susceptibilidade ao “piping”, geração de superfícies erodíveis e grande probabilidade de liquefação. Disto isto, o método deve ser implementado seguindo rigoroso controle de campo e acompanhamento das obras.

### 3.3.2 Disposição de rejeitos espessados e/ou em pasta

No beneficiamento de minérios, as operações de separação sólido-líquido englobam o desaguamento, evaporação e secagem do minério. Procedimentos mecânicos são empregados no desaguamento, já na evaporação e secagem emprega-se o calor. Dentre as operações unitárias utilizadas no processo de tratamento e beneficiamento de minérios para separação sólido-líquido, prevalece-se o peneiramento, ciclonagem, centrifugação, espessamento, filtragem, evaporação e secagem, e a escolha da operação ideal depende essencialmente das características do minério e de aspectos econômicos (GUIMARÃES, 2011).

As operações de separação sólido-líquido são comumente empregadas pelas seguintes razões (GUIMARÃES, 2011):

- Reutilização e recuperação da água no processo;
- Reduzir 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. Diante disto, podem apresentar consistência de polpa, pasta ou torta, de acordo com o teor de sólidos presente, e conseqüentemente comportamentos geotécnicos distintos, segundo Gomes (2006) apud Figueiredo (2007). A Tabela 4 apresenta o percentual de sólidos esperado para cada estado físico dos rejeitos segundo Watson *et al.* (2010). O processo de desaguamento dos rejeitos é

comumente executado através de espessadores ou filtros a vácuo, para posterior aumento da porcentagem de sólidos e aperfeiçoamento dos parâmetros de resistência do material (GUIMARÃES, 2011).

Tabela 4 - Estados físicos dos rejeitos e correspondente teor de sólidos esperado (WATSON *et al.* 2010).

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

Entende-se como rejeito em pasta, um material em estágio intermediário entre uma polpa de alta densidade e tortas. É um material homogêneo que não flui facilmente se confinado e não ocorre a liberação de água durante sua disposição final. Contudo, alguns rejeitos espessados de alta densidade podem apresentar estas mesmas características, se comportando como uma massa viscosa e homogênea que não apresenta segregação e que em sua disposição não libera consideráveis quantidades de água. Além disso, para formação de pasta, requer-se considerável quantidade de finos no material (FIGUEIREDO, 2007).

Existem alguns conceitos para caracterização dos rejeitos e suas formas, segundo Figueiredo (2007) alguns destes conceitos incluem:

- Rejeitos em polpa, que são rejeitos que contém considerável quantidade de água, tornando-se susceptível a segregação. Seu transporte para deposição é comumente realizado através de bombas de deslocamento positivo;
- Rejeitos em pasta, também chamados de “*paste tailings*”, são rejeitos espessados com acréscimo de aditivos químicos (como floculantes e coagulantes). Porém o termo também é comumente aplicado a rejeitos espessados de alta densidade. Pode ser utilizado como *backfill* ou *paste fill* em minas subterrâneas e em disposição em superfície;
- Rejeitos espessados, também chamados de “*thickened tailings*”, são rejeitos com alto percentual de sólidos, mas que ainda apresentam consistência de polpa e possibilidade de bombeamento;

- Rejeitos filtrados, conhecidos como torta, “*wet cake tailings*” ou “*dry cake tailings*”, devido a seu caráter saturado (ou parcialmente saturado) ou insaturado, respectivamente e, além disso, não podem ser submetidos a bombeamento.

O espessamento é a principal etapa de recuperação de água em uma usina de beneficiamento mineral. Promove a separação entre sólido-líquido de polpas geralmente muito diluídas através da sedimentação por gravidade, e tem como produto de “*underflow*” polpas ou pasta mineral. Os rejeitos produzidos pelo espessamento podem ser classificados de acordo com o grau de desaguamento e espessamento obtido, em rejeitos de baixa, média e alta densidade (ENGELS, 2006). Na figura 20 podemos observar as diferentes consistências de pastas derivadas do processo de espessamento.



Figura 20 - Exemplos típicos de rejeitos espessados (FIGUEIREDO, 2007).

A tecnologia de disposição de rejeitos espessados (“*Thickened Tailings Disposal*”) ou em pasta (“*Paste Tailings Disposal*”) tem-se mostrado como um método eficiente e uma alternativa aceitável para disposição de rejeitos, no intuito de recuperação de água e, especialmente, como alternativa praticável ao método de disposição de rejeitos em forma de polpa em barragens convencionais e na forma de aterro hidráulico, apesar de este último apresentar vantagens quando comparado a disposição em barragens convencionais (ROBINSKY, 2000).

A técnica de disposição de rejeitos em pasta é atualmente praticada em alguns países como Canadá e Austrália, especialmente na disposição de rejeitos provindos do beneficiamento de alumina (lama vermelha). Além disto, o método pode ser aplicado no preenchimento de câmaras de minas subterrâneas sob forma de “*backfill*” ou “*pastefill*”. Em superfície, é aplicado como opção para reduzir a utilização de grandes áreas pra disposição de

rejeito e de forma a minimizar os riscos de disposição de polpa em barragem convencional (ENGELS, 2006).

A preparação de rejeitos espessados e/ou em pasta inicia-se, como o nome sugere, por meio de desaguamento mecânico de polpas com baixo teor de sólidos, comumente através de espessadores de grande porte e forma troncônica (diâmetros em média de 50 metros e profundidades variando entre 1 e 2 metros). Pode haver ou não a adição de floculantes, em primeiro caso os floculantes incrementam substancialmente os efeitos da sedimentação, e em segundo caso, um sistema de pás em movimentos realiza a remoção do material (FIGUEIREDO, 2007).

Em seguida, o rejeito pode ou não ser encaminhado a uma planta específica para preparação da torta, de acordo com as necessidades de melhoria nas características de resistência do rejeito, podendo também ser adicionado outros materiais, como estéril, cimento e/ou areia, para formação de material de preenchimento de cavidades subterrâneas (FIGUEIREDO, 2007).

O transporte de rejeitos espessados é comumente realizado através de bombas de deslocamento positivo, especialmente quando as pressões de bombeamento são superiores a 5Mpa. Embora bombas centrífugas possam ser usadas para bombeamento de pastas quando as propriedades do rejeito são favoráveis (ENGELS, 2006).

Após deposição os rejeitos tendem a fluir e depositar conforme a topografia natural do ambiente em que foram depositados, dependendo do mecanismo utilizado em seu adensamento (formando polpas espessadas ou pastas) e do processo de evaporação natural. Em terrenos planos, a disposição comumente ocorre através de um ponto central, fazendo com que os rejeitos adquiram formato cônico, de taludes suaves e uniformes. Já no caso da disposição em vales ou taludes, o rejeito tende a fluir e adensar, fluindo de acordo com a topografia ou sendo barrado por um dique de contenção. Inclinações de 1,0 a 1,5 graus (maiores no caso de rejeitos em pasta) são recomendadas para garantir um bom sistema de drenagem (FIGUEIREDO, 2007).

Após a deposição, fissuras são formadas, devido ao ressecamento dos rejeitos. Novas camadas de deposição preenchem estas fissuras, formando uma estrutura mais estável. A água liberada após a deposição e qualquer escoamento superficial deve ser coletada em uma lagoa no pé da pilha (ENGELS, 2006).

A Figura 21 ilustra a conformação dos rejeitos dispostos em diferentes condições topográficas, considerando polpa de alta densidade (rejeito espessados) e pasta.

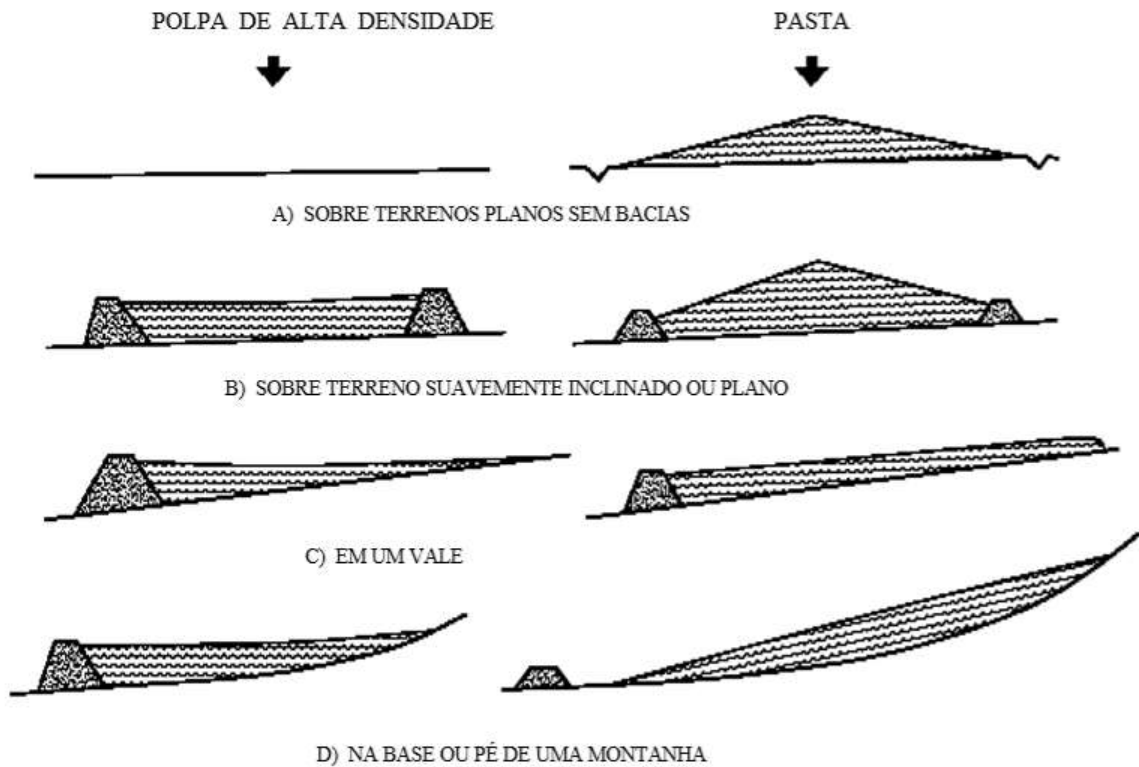


Figura 21 - Ângulos de disposição para polpas de alta densidade e para pasta, para diferentes tipos de terreno (OSORIO, 2005).

Os equipamentos a serem utilizados variam com relação à geometria e dependem basicamente das características do rejeito e do nível de adensamento desejado em seu *underflow* (ENGELS, 2006). A Figura 22 apresenta alguns exemplos de espessadores comumente utilizados no adensamento de polpas de minério de ferro.









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

Figura 22 - Tipos de espessadores para adensamento de polpas de minério de ferro (GUIMARÃES, 2011).

A principal vantagem do método é a possibilidade de maior recuperação e reuso da água, minimizando também perdas por infiltração e evaporação. Entretanto, custos operacionais são maiores devido a este processo de desaguamento (ENGELS, 2006). A Tabela 5 apresenta uma comparação entre os custos operacionais e de desativação, e potencial recuperação da água para rejeitos em polpa e rejeitos espessados ou pastas.

Tabela 5 - Custos relativos aos diferentes sistemas de disposição de rejeitos (FIGUEIREDO, 2007).

<b>Tipo de rejeito</b>	<b>Custo operacional (\$US/ton)</b>	<b>Custo de desativação (em 100)</b>	<b>Potencial de recuperação de água (em 10)</b>
Polpa	0,3 - 1,2	100	3
Espessado ou em pasta	0,6 - 3,5	50	6

O Quadro 3 apresenta outras vantagens e desvantagens do método de disposição de rejeitos espessados ou em pasta.

Quadro 3 - Vantagens e desvantagens da disposição de rejeitos espessados e/ou em pasta (ENGELS, 2006).

<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
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 a 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

### 3.3.3 Disposição em pilhas controladas / rejeitos filtrados

O processo de filtração consiste basicamente na operação de separação dos sólidos presentes em meio aquoso através da passagem da polpa através de um meio filtrante, possibilitando a passagem do líquido e retendo as partículas sólidas. É comumente aplicada etapas de adensamento de polpa, como ciclonagem ou espessamento, previamente a aplicação da filtração, para adequar da porcentagem de sólidos requerida na alimentação dos filtros (GUIMARÃES, 2011).

O líquido resultante do processo denomina-se filtrado, enquanto os sólidos constituem a torta. De acordo com Davies (2011), os rejeitos que passam por este procedimento de filtração podem ser filtrados a úmido, sendo então denominados “*wet cake*” apresentando alto grau de saturação, ou a seco, sendo então nomeados “*dry cake*” e possuindo menor grau de saturação. A presença excessiva de finos inviabiliza o método.

Os rejeitos filtrados não podem ser transportados por tubulação como no caso da polpa, devido a seu baixo teor de umidade. Devem então ser transportados através de caminhões ou correias transportadoras, depositado, espalhados com auxílio de tratores e então compactados para formar um depósito de rejeitos insaturados (DAVIES & RICE, 2001). Este tipo de armazenamento produz um depósito estável que normalmente não requer paredes de contenção, e são comumente denominadas pilhas secas ou “*dry stack*”, como mostram as Figuras 23 e 24 (ENGELS, 2006).



Figura 23 - Empilhamento a seco de rejeitos usando caminhões como transporte (ENGELS, 2006).





Figura 24 - Empilhamento a seco de rejeitos utilizando correias transportadoras na mina La Coipa, no Chile (ENGELS, 2006).

É importante ressaltar que rejeitos filtrados e empilhados à seco são rejeitos que passaram por processos de desaguamento e podem não mais apresentar características de rejeitos saturados, como por exemplo, podem apresentar poropressões negativas (sucção) e comportamentos distintos de rejeitos saturados (ENGELS, 2006).

Para que a filtração 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). O Quadro 4 apresenta os tipos de filtração, suas respectivas características principais, os modelos de filtro e fornecedores para cada tipo.

Quadro 4 - Mecanismos de filtragem e os principais fornecedores (GUIMARÃES, 2011).

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 centrífuga	Utiliza a força centrífuga para forçar a passagem do líquido	Centrífugas verticais e Decanters	Andritz, GEA (Westfália), 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

Davies (2011) apresenta estatisticamente, como mostra Figura 25, que a técnica de filtragem de rejeitos vem se tornando uma prática comum ao redor do mundo, inclusive vem sendo mais aplicada que a disposição de rejeitos em forma de pasta e a co-disposição de rejeitos, tornando esta prática uma possível alternativa para outros métodos de disposição.

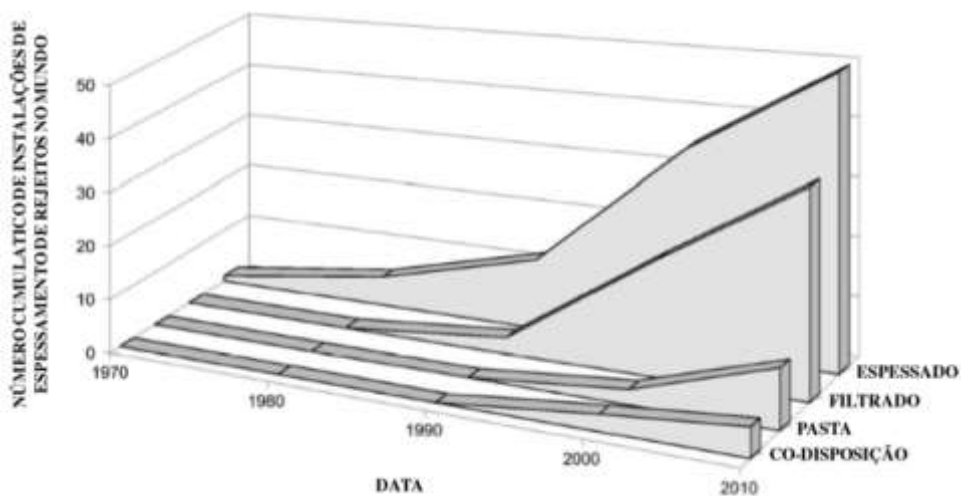


Figura 25 - Tendências no uso de rejeitos desaguados na mineração (DAVIES, 2011, modificado).

As vantagens da disposição de rejeito filtrado são mais aparentes em regiões áridas, altamente sísmicas ou frias, ou onde o espaço é limitado. Embora seja um método considerado mais caro que o descarte convencional, seus custos podem ser compensados pela maior eficiência de armazenamento e menor impacto ambiental (ENGELS, 2006). Por serem insaturadas, as pilhas são suscetíveis à oxidação. Além disso, embora as perdas totais de água sejam menores, ainda devem ser tomadas providências para controlar a infiltração de águas subterrâneas (DAVIES & RICE, 2001).

Uma grande vantagem do método, além da maior recuperação de água, consiste na redução da área necessária para disposição, reduzindo custos e minimizando impactos ambientais (ENGELS, 2006). 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). Outras vantagens e desvantagens do método são apresentadas no Quadro 5.

Quadro 5 - Vantagens e desvantagens da disposição de rejeitos em pilhas secas / rejeitos filtrados (ENGELS, 2006, modificado).

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 a 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

Outro mecanismo de separação da água e da fração argilosa de rejeitos é a escavação de rejeitos já secos em barragens de rejeito já construídas, transportando este rejeito através de caminhões e depositando em pilhas controladas, enquanto a barragem é utilizada para disposição de novos rejeitos. Neste caso, para garantir a estabilidade das pilhas, pode ser necessário misturar os rejeitos com materiais de empréstimo, que podem ser finos ou granulares. Os componentes de uma pilha controlada são: dique de partida, drenos periféricos na pilha, drenos internos e drenos superficiais caso a pilha seja construída em um talude (LOZANO, 2006).

### 3.3.4 Disposição compartilhada / co-disposição

A co-disposição ou disposição compartilhada de rejeitos e estéreis gerados nas operações de lavra é uma metodologia alternativa que vem sendo estudada em algumas minas ao redor do Brasil e do mundo. Engels (2006) define co-disposição como sendo a combinação da disposição de estéreis comumente de granulometria grossa, com rejeitos do processo, de forma que os finos do rejeito preencham os vazios dos grãos de estéril. Este processo aumenta a resistência e estabilidade dos rejeitos, permitindo acesso mais rápido aos rejeitos para reabilitação e reduzindo as consequências da carga estática e dinâmica (DPI, 2003). Quando os rejeitos e estéreis são dispostos em um local sem ser previamente misturados, a técnica pode ser definida como disposição compartilhada (ENGELS, 2006).

O desmonte de rochas nas frentes de lavra produz material estéril de tamanhos variados e que apresentam elevados índices de vazios. Estes vazios são favoráveis a alocação de rejeitos finos, proporcionando melhoria nas condições de drenabilidade, ganho de resistência, maior recuperação de água e possibilidade de recuperação progressiva das áreas de disposição (MMSD, 2002).

Segundo Figueiredo (2007) neste método a disposição pode ocorrer em ambientes confinados, como na disposição em cavas, ou em barragens de contenção e pilhas de estéreis. A segregação dos finos depositados faz com que se forme uma camada superior e inferior (respectivamente, de rejeitos grossos e finos) na praia, onde a camada superior é rapidamente drenada possibilitando a movimentação de máquinas em tempo relativamente curto após deposição.

Embora o termo geral 'co-disposição' se refira à mistura de rejeitos e estéreis finos e grosseiros, existem diversas maneiras de se realizar este processo, de forma a se adequar determinada técnica ao seu local de aplicação. Genericamente, o processo de co-disposição compreende as seguintes técnicas, segundo Figueiredo (2007):

- Disposição de rejeitos em um depósito de estéril, onde os estéreis são usados para criar uma berma ou diques de contenção para depósito dos rejeitos, formando pequenas lagoas e camadas na pilha de estéril;

Neste método ocorrem adensamento e ressecamento dos rejeitos e disposição de uma nova camada de estéril sobre os rejeitos consolidados, criando-se um ciclo, como mostra a Figura 26. Aspectos como a espessura dos rejeitos, teor de sólidos e taxa de adensamento são

fatores importantes no desenvolvimento do projeto, sendo geralmente considerada uma relação de espessura de estéril e rejeito da ordem de 4:1.

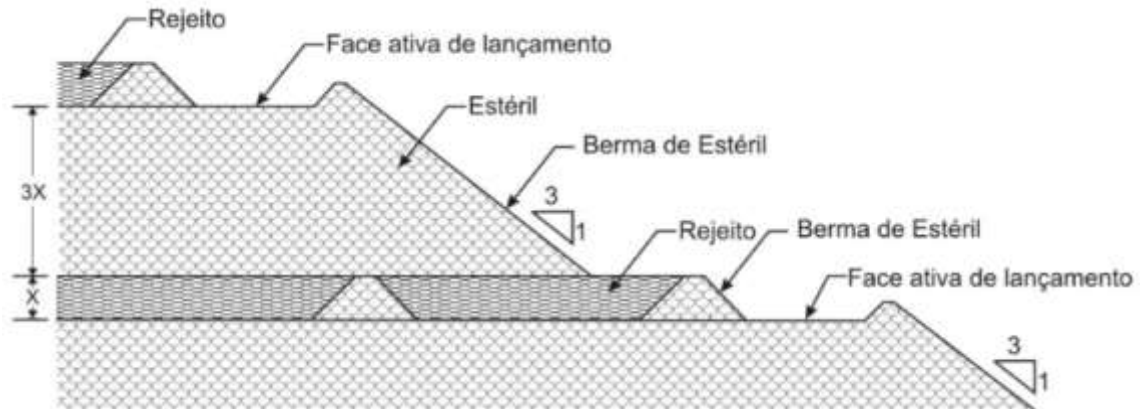


Figura 26 - Bacias de rejeito construídas no depósito de estéril (LEDUC & SMITH, 2003, modificado).

A vantagem deste método são os baixos custos operacionais quando comparado aos outros métodos de co-disposição, entretanto, deve-se atentar a construção de diques e formação de lagoas de forma a impedir a formação de poropressões e comprometimento da estabilidade dos taludes.

- Mistura de rejeito e estéril (geralmente por meios mecânicos) durante o processamento e transporte (caminhões e/ou correias transportadoras), ou dentro da própria instalação de armazenamento, promovendo preenchimento dos vazios, gerando material homogêneo e aumentando a densidade do material;

A mistura de rejeitos e estéreis diretamente na instalação pode ocorrer criando-se um único fluxo de deposição no topo do depósito, próximo a crista do talude, como mostra a Figura 27, ou através de correias transportadoras.



Figura 27 - Mistura de rejeito com estéril no topo do depósito (LEDUC & SMITH, 2003, modificado).

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 de rejeitos em depósitos de estéreis através de furos e tubulações de perfuração instalados no topo do depósito;

A disposição dos furos pode ser: furos inclinados (Figura 28) e/ou furos verticais (Figura 29). Conforme aconteça o avanço do depósito, a extremidade das tubulações estará diretamente conectada ao sistema de distribuição dos rejeitos.

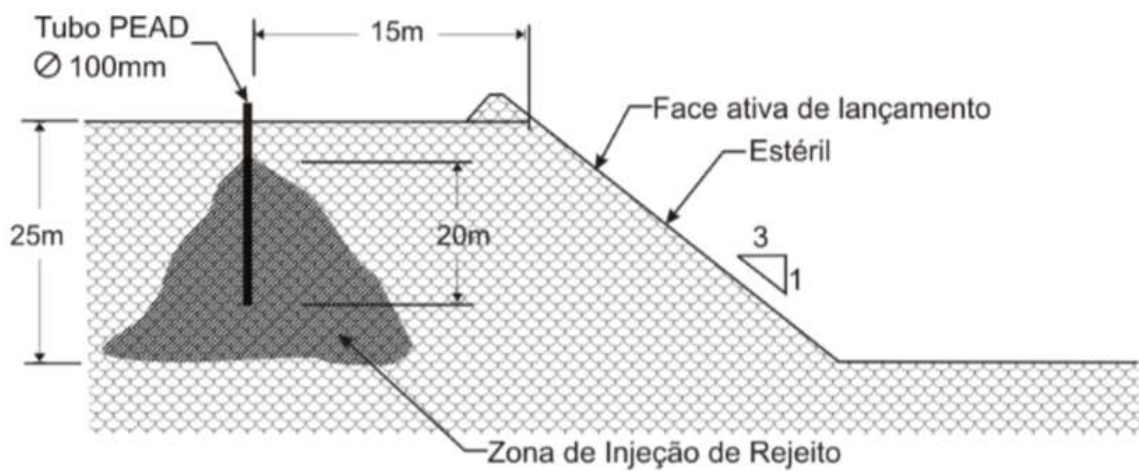


Figura 28 - Injeção de rejeito em furos verticais no topo do depósito de estéril (LEDUC & SMITH, 2003, modificado).

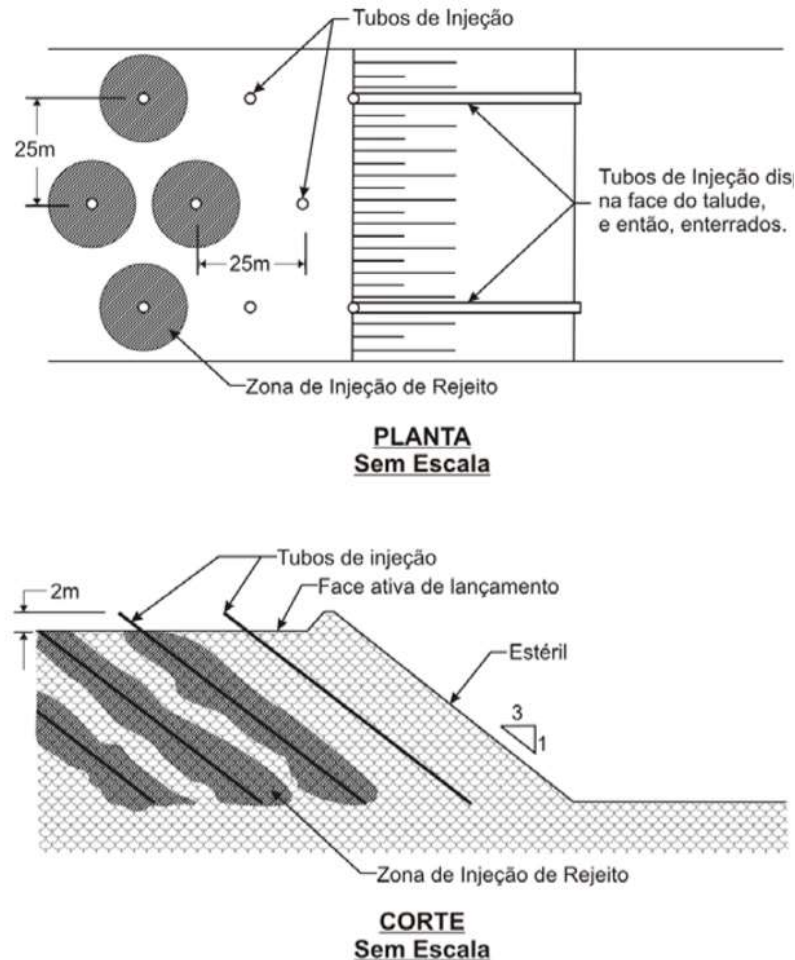


Figura 29 - Injeção de rejeito em furos inclinados no topo do depósito de estéril (LEDUC & SMITH, 2003, modificado).

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.

- Disposição de rejeitos e estéreis em camadas finas independentes, permitindo que os rejeitos penetrem naturalmente nos vazios das rochas estéreis. Adicionando-se outra camada de rochas e criando-se um ciclo de camadas de deposição.

A espessura das camadas de rejeito varia de 0,2 a 0,5 metros para que ocorra a dissipação das poropressões geradas no interior do maciço de rejeitos e infiltração natural nas camadas de estéril, cujas espessuras variam entre 1 e 5 metros, como mostra a Figura 30.

Tem a desvantagem de possibilidade de aplicação não uniforme dos rejeitos no depósito, o que poderia comprometer a estabilidade do depósito através da geração de excessos de poropressões.



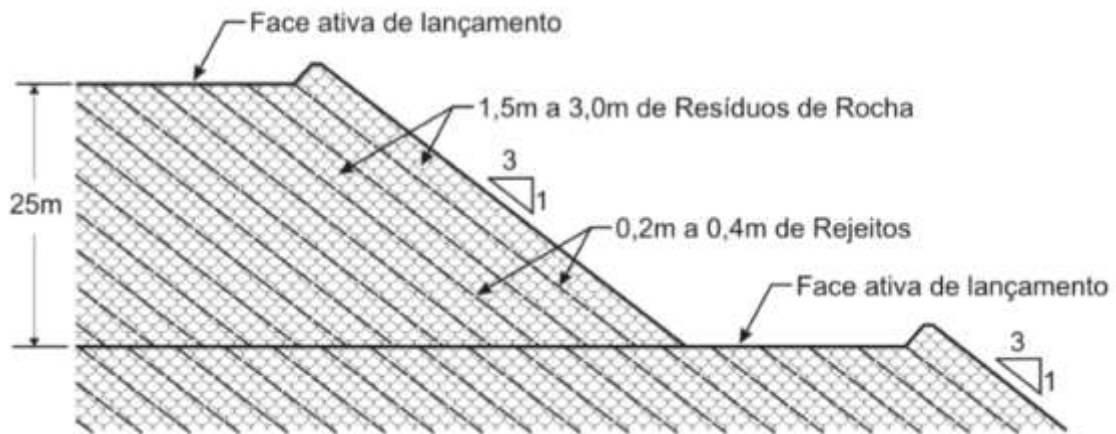


Figura 30 - Disposição de rejeito em camadas finas no topo do depósito (LEDUC & SMITH, 2003, modificado).

A principal vantagem do método de co-disposição 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 deposição, 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).

### 3.3.5 Disposição em “pit”

O armazenamento de rejeitos em “pit”, ou em cavas, é, como o nome sugere, o processo de disposição de rejeitos em minas exauridas ou conjuntamente a extração mineral, como mostra a Figura 31. 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).



Figura 31 - Disposição em cava a céu aberto (LOZANO, 2006).

A Figura 32 apresenta as duas possíveis formas de deposição: quando a atividades de extração foram encerradas (a) e quando as atividades de extração ocorrem simultaneamente à disposição de rejeitos (b).

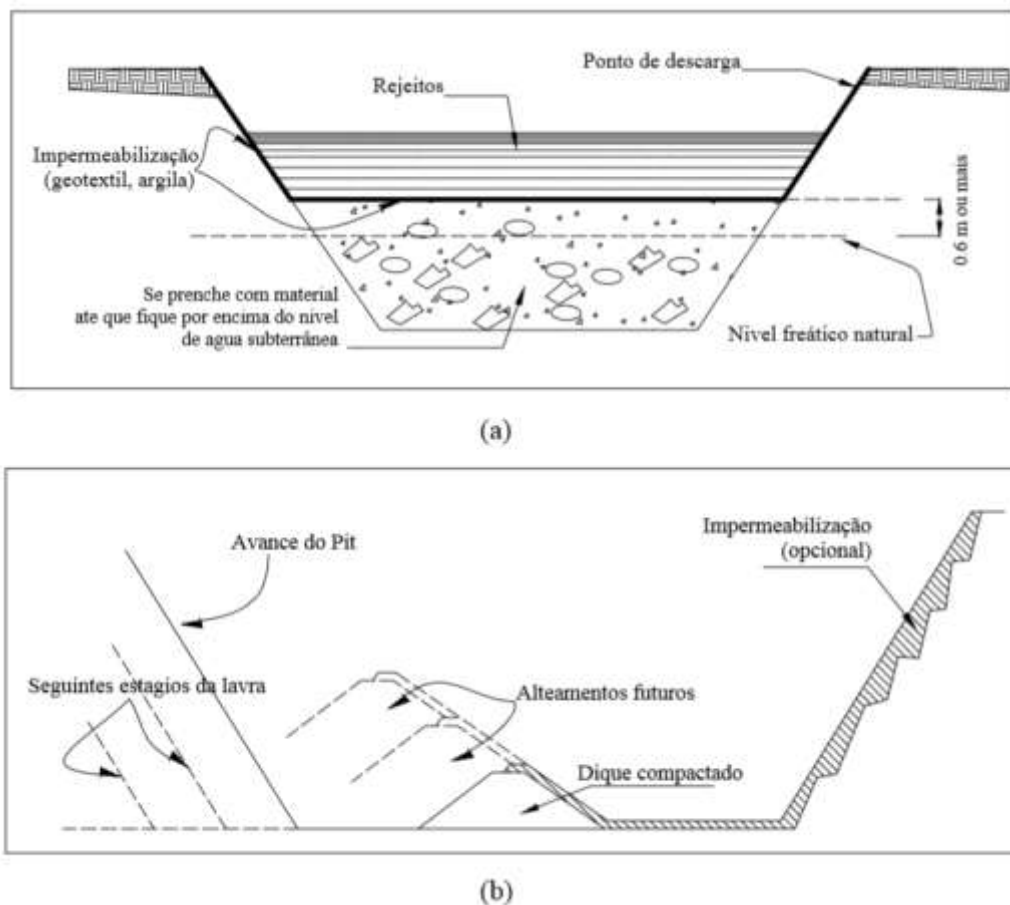


Figura 32 - Deposição em cavas: (a) Extração do minério total; (b) Deposição feita ao mesmo tempo que a extração do minério (RITCEY, 1989, modificado).

Devido à profundidade e à taxa geralmente alta de elevação dos rejeitos, a densidade dos rejeitos pode ser baixa. Portanto, as taxas de consolidação podem ser altas e duradouras quando comparados ao método de armazenamento convencional. Isso significa que à medida que os rejeitos se consolidam, formam-se depressões ao longo do tempo, dificultando o contorno de fechamento (ENGELS, 2006).

No caso de a mina ainda estar em operação, as cavas podem ser reabastecidas com rejeitos para preencher estas depressões com novos rejeitos, o que aumenta a capacidade de armazenamento. Outra alternativa é instalar uma tubulação com uma curva de 90 graus, onde a extremidade do tubo é instalada na posição vertical (*risers*) até o centro da depressão provocada pelos rejeitos secos, fazendo com que os rejeitos sejam descarregados até se formar uma pilha cônica de rejeitos. À medida que a consolidação dos rejeitos vai acontecendo, a forma cônica desaparece e a depressão causada é reduzida (ENGELS, 2006).

As vantagens do método incluem a facilidade de recuperação da área lavrada, produção de menores impactos ambientais e visuais, minimização de riscos potenciais e custos operacionais (PORTES, 2013).

A principal desvantagem do método é o risco de contaminação da água ao redor da cava, o que pode requerer um sistema de impermeabilização nos taludes da cava (ENGELS, 2006). Outras desvantagens são: crescimento elevado do nível de rejeitos devido a forma da cava resultando em baixa resistência e pequenas taxas de consolidação; risco a estabilidade de minas subterrâneas vizinhas; é necessário monitoramento de infiltrações pois existe o risco de contaminação do lençol freático; inviabiliza futura extração de minérios de menor teor; logística de extração devido à construção de estruturas de contenção de rejeitos dentro da cava (DME, 1999).

### **3.3.6 Outros métodos de disposição**

#### **3.3.6.1 Disposição subterrânea**

Os rejeitos podem ser depositados como preenchimento de minas subterrâneas previamente mineiradas. Neste caso, são comumente misturados a algum material, que pode ser areia, cimento, estéril ou outro material, e são bombeados para preencher os vazios gerados pela exploração de minério de forma a promover suporte e prevenção do colapso de uma mina subterrânea. Por exemplo, pode ser aplicado no método de lavra “*room and pillar*” como forma de suporte para futura extração do material presente nos pilares de sustentação e

maximizar a recuperação do corpo de minério, ou no método de lavra “*cut and fill*”, fornecendo suporte e preenchendo os vazios gerados pela extração do minério (ENGELS, 2006).

De acordo com Figueiredo (2007), atualmente pratica-se duas técnicas de preenchimento de minas subterrâneas, definidas de acordo com o propósito desejado. A primeira ocorre simultaneamente com a lavra, onde o preenchimento proporciona suporte para a formação de novo piso para desmonte e lavra do piso imediatamente acima, e o preenchimento pode ser obtido da mistura de rejeito com material estéril ou areia, na forma de “*backfill*” ou “*paste fill*”. Já a segunda técnica consiste em promover de forma permanente a estabilidade do maciço rochoso através do preenchimento das câmaras previamente lavradas. O preenchimento pode ocorrer de forma simultânea à lavra ou após encerramento das atividades, e para casos de maior demanda por resistência comumente é utilizada a mistura de rejeito (*paste fill*) e/ou estéril, com areia e cimento, sendo que o cimento não é sempre necessário quando a demanda por estabilidade não é tão grande.

Acrescentar cimento a mistura ajuda a prevenir contaminação do lençol freático visto que o rejeito pode sofrer alterações químicas e físicas. Em rejeitos piritosos, ajuda a reduzir a oxidação e geração de ácidos, reduzindo a mobilização de metais (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 (ENGELS, 2006). O Quadro 6 apresenta outras vantagens e desvantagens do método.

Quadro 6 - Vantagens e desvantagens da disposição subterrânea de rejeitos (ENGELS, 2006, modificado).

<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
Fornece 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 pra 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

De acordo com Engels (2006) existem quatro tipos de preenchimento utilizados em minas subterrâneas. O Quadro 7 apresenta as características gerais de cada um.

Quadro 7 - Tipos de preenchimento utilizado em minas subterrâneas (ENGELS, 2006, modificado).

<b>Pastefill</b>	O preenchimento em pasta é semelhante ao depósito de pasta em superfície. Os rejeitos são desidratados até geralmente atingirem >65% de sólidos (por peso) e bombeados nas cavidades subterrâneas geralmente através de bombas de deslocamento positivo. A pasta tem uma aparência homogênea e quando depositada no subsolo há pouco ou nenhum vazamento da água contida.
<b>Sandfill</b>	O preenchimento por “sandfill” é usado quando os rejeitos são ciclados para separação de lamas e frações de areia. As lamas são descartadas devido à sua baixa permeabilidade e são geralmente armazenadas em superfície. As areias são bombeadas hidráulica nas câmaras subterrâneas e podem ser misturadas com outros materiais, como cimento, se necessário. À medida que as areias se depositam e consolidam, o excesso de água é eliminado ou perdido por infiltração.
<b>Cemented fill</b>	O preenchimento cimentado consiste em rejeitos e estéreis depositados em câmaras subterrâneas vazias. Ele é usado quando o armazenamento de estéreis é necessário 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. É útil quando baixos volumes de cimento são necessários (implicações de custo), e é utilizado como impermeabilizante.
<b>Rockfill</b>	Preenchimento a seco são rochas residuais, areias, cascalhos ou rejeitos secos. É mais adequado para o método “cut and fill”. Podem ser descarregados através de caminhões, aberturas ou carregadeiras subterrâneas (LHD).

### 3.3.6.2 Disposição de rejeitos em ambientes aquáticos

A disposição de rejeitos em ambientes aquáticos é a descarga de rejeitos em rios, lagos e mares. A descarga de rejeitos em ambiente marinhos é a prática mais comum de deposição

de rejeitos em ambientes aquáticos e envolve a descarga de rejeitos em grandes profundidades no mar. O descarte no mar pode ser aplicado quando outras técnicas em terra não são possíveis devido ao terreno, alta atividade sísmica, alta precipitação e falta de disponibilidade de terra. Esta é uma prática comum na região oeste do Pacífico, devido a condições de terreno, como terrenos íngremes e/ou instáveis (ENGELS, 2006).

Um dos objetivos da descarga de rejeitos em ambientes marinhos é minimizar a exposição ao oxigênio dissolvido para prevenção de oxidação e mobilização de contaminantes (NORMAN, 1998). As maiores desvantagens desse método de armazenamento são o fato de os fluxos do rejeito serem imprevisíveis à medida que são descarregados, os impactos ambientais desconhecidos e o potencial de migração de contaminação (EC, 2004).

Em algumas situações, os rejeitos podem ser descarregados com sucesso no mar provocando menor impacto ambiental quando comparado a outros métodos convencionais de disposição, além de considerável redução dos custos. O armazenamento em superfície geralmente tem um impacto ambiental permanente e altos custos em sua manutenção, enquanto a descarga no mar pode ter um impacto ambiental temporário, sem necessidade de manutenção depois de finalizadas as atividades minerárias (MMSD, 2002).

A descarga em rios envolve diversas obrigações ambientais e custos elevados relacionados a remediação e recuperação ambiental, gerando grande oposição e preocupações públicas, principalmente da percepção do público (ENGELS, 2006). A descarga de rejeitos em ambientes marinhos também deve ocorrer em zonas específicas, abaixo da zona de turbulência causada por ventos e ondas, geralmente com mais de 100 metros de profundidade (MMSD, 2002).

#### 4 ANÁLISE DOS MÉTODOS

Com base na revisão bibliográfica considerada neste trabalho, observa-se que 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, tornando atrativos os métodos de desaguamento abordados.

Uma questão importante é o fator econômico do projeto. Os custos associados a cada método devem ser analisados. Embora os custos operacionais para aplicação de métodos de disposição de rejeitos espessados, em pasta ou filtrados sejam possivelmente mais altos que para o descarte convencional, esses custos podem ser compensados pela redução de gastos em outras áreas, como a não necessidade de construção de uma grande barragem de rejeitos e reutilização da água. Já na disposição de rejeitos por aterro hidráulico, os custos são considerados relativamente mais baixos que em barramentos convencionais, especialmente devido à possibilidade de utilização do próprio rejeito em sua construção e alteamentos. A disposição em “pit” também se apresenta muito atraente neste quesito, mas depende da disponibilidade de espaço, que no caso é uma cava exaurida ou com disponibilidade para execução desta operação. Ainda assim, esta análise deve ser feita especificadamente para cada local. Mesmo que tais métodos ainda não sejam viáveis economicamente no presente para determinada mina, novas tecnologias poderão proporcionar a viabilidade de tais métodos no futuro.

A possibilidade de recuperação e conservação de água também são dois dos principais impulsionadores da implantação destes métodos. 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.

Clima e topografia são fatores muito relevantes na escolha do método de disposição de rejeitos. Métodos de disposição de rejeitos espessados, em pasta ou filtrados são freqüentemente mais bem sucedidos em climas secos. Já a topografia influencia na estabilidade e necessidade de aterros de apoio para os métodos de disposição de rejeitos desaguados. A disposição de rejeitos espessados ou em pasta geralmente não é viável em terrenos íngremes sem um aterro de apoio. Já a disposição de rejeitos filtrados pode ser implantada em uma maior variedade de terrenos desde que os requisitos de estabilidade, operação e fechamento sejam levados em consideração.



A sismicidade inviabiliza a aplicação de alguns métodos, como a realização de alteamentos a montante, que não podem ser realizados em ambientes de alta sismicidade, devido à instabilidade. Alteamentos a jusante podem ser aplicados em ambientes de alta sismicidade, mas não são comumente viáveis devido à alta demanda de materiais para alteamento. Nesse aspecto, a disposição de rejeitos filtrados em pilhas secas também leva vantagem, pois as estruturas de contenção são evitadas.

A remoção de água da polpa de rejeitos requer grande quantidade de energia. Além disto, a localização da planta em relação ao local de disposição dos rejeitos tem grande influência no consumo de energia, e pode vir a inviabilizar o método, pois com o aumento da energia, novas despesas são adicionadas. Por isto, é importante que o local de descarga de rejeitos seja próximo ou em declive com relação à planta. Rejeitos filtrados podem ser transportados através de caminhões ou correias transportadoras, mas rejeitos espessados ou em pasta requerem um sistema de bombeamento para serem transportados.

As barragens construídas através da técnica de aterro hidráulico podem apresentar desempenho satisfatório desde que bem controlada e bem avaliada tecnicamente, mas ainda assim existe a dificuldade em se prever o comportamento do material depositado, o que pode vir a afetar a estabilidade da estrutura, gerando dúvidas sobre a aplicação deste método. Entretanto, com o aumento das regulamentações ambientais, o controle de segurança dessas barragens tem sido mais rigoroso nesse aspecto. A co-disposição de rejeitos e estéreis também pode apresentar risco de instabilidade devido à aplicação não uniforme dos rejeitos no depósito.

Constata-se então que, embora os métodos alternativos de disposição de rejeitos abordados apresentem diversas vantagens, é necessária uma análise do local para prever a viabilidade dos mesmos. A técnica de disposição de rejeitos filtrados apresenta grande potencial para a redução de riscos relacionados a barragens de contenção, e já vem sendo adotada por muitas empresas. Com o desenvolvimento de novas tecnologias pode apresentar redução dos custos e vir a ser mais amplamente aplicada futuramente.

## 5 CONCLUSÃO

Como cada mina é considerada única em termos de localização, propriedades do material, abastecimento de água, processo de beneficiamento empregado, obrigações ambientais, custos de energia, entre outros, é difícil prever qual método de disposição de rejeitos deve ser empregado sem antes realizar um estudo prévio das características da mina e principalmente dos rejeitos. Cada caso deve ser avaliado individualmente. Em geral, o método de disposição mais utilizado continua sendo barragens de rejeito convencionais, mesmo com o avanço dos métodos de recuperação de água.

A análise dos rejeitos em termos de sedimentação, reologia, geotecnia, etc., bem como as condições da área e uma análise econômica, são fundamentais para avaliar o potencial de implementação dos métodos alternativos. Em casos onde existe escassez de água, altos riscos ambientais ou quando o processo garante a recuperação de reagentes ou metais de valor na água, a remoção de água adicional pode ser alcançada e encorajada.

A aplicação dos métodos de disposição de rejeitos espessados, em pasta e filtrados são as ideais na busca pela reutilização de água, maior disponibilidade de espaço e maior estabilidade destes rejeitos. Além disto, o transporte e a remoção da água destes rejeitos requer mais energia, que conseqüentemente, resulta no aumento dos custos.

A disposição de rejeitos filtrados pode proporcionar uma maior densidade e eficiência no armazenamento de rejeitos, portanto, o método tem potencial, em especial quando requer maior disponibilidade de espaço. Os custos operacionais 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.

A co-disposição ou disposição compartilhada dos rejeitos, embora seja uma técnica considerada promissora, ainda é considerada incipiente no Brasil, portanto existe uma carência de experiências práticas e estudos sobre o método, e apesar de auxiliar na redução do risco de carregamento estático e dinâmico, ainda são necessários estudos para melhorar a estratégia de deposição e otimizar a mistura de resíduos grossos e finos, de forma a aumentar a estabilidade.

A disposição de rejeitos como preenchimento de minas subterrâneas ou em “pit” são métodos bastante atrativos, além de fornecer suporte e preenchimento dos vazios gerados pela extração do minério. Entretanto, necessitam da disponibilidade das cavas para aplicação, e oferece risco de contaminação da água ao redor da cava.

O descarte de rejeitos em ambientes aquáticos pode ser aplicado quando outras técnicas em terra não são possíveis, mas devido ao grande potencial de risco de contaminação, não é comumente aplicada.

A Tabela 6 apresenta um breve resumo comparativo entre as formas de disposição de rejeitos, compreendendo: rejeitos lançados em reservatório, aterro hidráulico, rejeitos filtrados e empilhados, e rejeitos espessados e/ou em pasta.

Tabela 6 - Comparativo entre as formas de disposição de rejeitos.

<b>Item</b>	<b>Rejeitos lançados em reservatório</b>	<b>Aterro hidráulico, rejeitos filtrados e empilhados</b>	<b>Rejeitos espessados e/ou em pasta</b>
% sólidos	25 a 45	>85	50 a 85
Construção de um dique de partida	Sim	Não	Sim
Construção de bacias de contenção para água recuperada	Sim	Não	Sim
Utilização de flocculantes	Sim	Não	Sim/Não
Necessidade de bombas de deslocamento positivo	Sim/Não	Não	Sim/Não
Necessidade de correias transportadoras	Não	Sim	Não
Necessidade de compactação do rejeito após disposição	Não	Sim/Não	Não

Portanto, pode-se concluir que a metodologia de disposição de rejeitos a ser empregada deve levar em conta principalmente as condições e requisitos específicos de cada mina. A disposição de rejeitos desaguados tem se mostrado como uma alternativa atraente a medida que as regulamentações ambientais se tornam mais rigorosas.

## REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Estudo de ruptura de barragens**. Brasília: Engecorps Engenharia S.A. 2012.
- ARAUJO, C. B. **Contribuição ao estudo do comportamento de barragens de rejeito de mineração de ferro**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 133 p. 2006.
- BRAWNER, C. O.; CAMPBELL, D. B. The tailings structure and its characteristics - a soil engineer's viewpoint. **International Tailings Symposium**, Miller Freeman Publications, Tucson, p. 59-101, 1973.
- CHAMBERS, D. M.; HIGMAN, B. **Long term risks of tailings dam failure**. Seldovia, 34 p. 2011.
- DAVIES, M.P.; RICE, S. An alternative to conventional tailing management – dry stack filtered tailings. **Internacional Conference on Tailings and Mine Waste**, Fort Collins, n. 8, p. 441-422, 2001.
- DAVIES, M.P. Filtered dry stacked tailings – the fundamentals. **Tailings and Mine Waste Conference**, Vancouver, 9 p. 2011.
- DE SOUSA, M. M. **Estudo para o projeto geotécnico da barragem de Alto Irani, SC**. Projeto de Graduação. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 129 p. 2013.
- DEPARTMENT OF MINERALS AND ENERGY (DME). **Guidelines on the Safe Design and Operating Standards for Tailings Storage**. Western Australia, 1999.
- DEPARTMENT OF PRIMARY INDUSTRIES (DPI). **Management of Tailings Storage Facilities - Environmental Guidelines**. Victoria: Minerals & Petroleum Division, 2003.
- EUROPEAN COMMISSION (EC) (2004). **Draft Reference Document on Best Available Techniques for Management of Tailings and Waste-Rock in Mining Activities**. Sevilha: Edificio EXPO, 2004.
- ENGELS, J. **An expert management system for surface tailings storage**. Tese de Doutorado. University of Leeds, Reino Unido, 2006.
- ENGELS, J.; DIXON-HARDY, D. Tailings disposal - Managing increasing higher volumes of waste from mines. **International Symposium on Environmental Geotechnology and Global Sustainable Development**, Helsinki and Espoo, Finland, n. 7, 2004.
- ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). **Technical Report - Design and Evaluation of Tailings Dams**. Washington: Office of Solid Waste, 1994.
- ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). **Proposed Determination of a Revised Licence - Lisheen Mine (Anglo American)**. Wexford, 2000.

FAHEY, M.; NEWSON, T. A.; FUJIYASU, Y. **Engineering with tailings**: v. 2. Rio de Janeiro: Environmental Geotechnics, p. 947-973, 2002.

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

FOURIE, A. B. **In Search of the Sustainable Tailings Dam: Do High-Density Thickened Tailings Provide the Solution**. University of the Witwaterstrand, Africa do Sul, 2003.

GIPSON, A. H. **Tailings disposal - The last 10 years and future trends**. Fort Collins, 1998.

GUIMARÃES, N. C. **Filtragem de rejeitos de minério de ferro visando a sua disposição em pilhas**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 114 p. 2011.

GUMIERI, A. G.; BUENO, B. S.; MINETTE, D. C. L. E. Estudo do adensamento de rejeitos de mineração. **Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos**, Brasília, n. III, p. 1823-1827, 1998.

ICOLD & UNEP. **Tailings Dams - Risk of Dangerous Occurrences: Lessons learnt from practical experiences**. Paris, 2001.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO (IBRAM). **Gestão e Manejo de Rejeitos da Mineração**. 2016. Disponível em: <<http://www.ibram.org.br/sites/1300/1382/00006222.pdf>>. Acesso em: 12 mai. 2018.

INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS (ICOLD). **Tailings Dams - Risk of Dangerous Occurrences: Lessons Learnt from Practical Experiences**, 2001.

INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS (ICOLD). **Improving Tailings Dam Safety: Critical Aspects of Management, Design, Operation and Closure**. United Nations Environmental Programme, 2006.

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

LIMA, L. M. K. **Retroanálise da formação de um depósito de rejeitos finos de mineração construído pelo método subaéreo**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 90 p. 2006.

LOZANO, F. A. E. **Seleção de locais para barragens de rejeito usando o método de análise hierárquica**. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, São Paulo, 115 p. 2006.

MINING, MINERALS AND SUSTAINABLE DEVELOPMENT (MMSD). **Mining for the Future - Appendix A: Large Volume Waste Working Paper**, 2002.

NORMAN, D. **Innovations and Trends in Reclamation of Metal Mine Tailings in Washington**. Washington, p. 29-42, 1998.

OSORIO, C.A.H. **Caracterização de Pastas Minerais**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 177 p. 2005.

PORTES, A. M. C. **Avaliação da disposição de rejeitos de minério de ferro nas consistências polpa e torta**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 150 p. 2013.

RAFAEL, H. M. A. M. **Análise do Potencial de Liquefação de uma Barragem de Rejeito**. Dissertação de Mestrado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 103 p. 2012.

RITCEY, G. M. **Tailings management: Problems and solutions in the mining industry**, vol. 6. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1989.

RITCEY, G. M. **Tailings Management in gold plants**. Hydrometallurgy, p. 3-20, 2005.

ROBERTSON, A. M. Site selection and design for uranium mine waste and plant tailings. **Council of Mining and Metallurgical Institutions Congress**. Johannesburg, p. 861-886, 1982.

ROBINSKY, E. I. **Sustainable development in disposal of tailings**. Tailings and Mine Waste. Colorado, p. 39-48, 2000.

SANTOS, D. A. M. **Técnicas para a disposição de rejeitos de minério de ferro**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010.

SILVEIRA, E.B.S.; READES, D.W. Barragens para contenção de rejeitos. **Seminário Nacional de Grandes Barragens**. Rio de Janeiro, 35 p. 1973.

THYGESEN, K. **Mine Tailings Storage: Safety is no accident**. 2017. Disponível em: <<http://www.grida.no/resources/11424>>. Acesso em: 10 mai. 2018.

VICK, S. G. **Planning, Design, and Analysis of Tailings Dams**. BiTech Publishers Ltd, Canada, 369 p. 1990.

VICK, S. G. Siting and design of tailings impoundments. **Mining Engineering**, Nova York, n.6, v.33, p. 653-657, 1981.

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

**GLOSSÁRIO**

BACKFILL	Enchimento de mina subterrânea em polpa
CEMENTED FILL	Enchimento de mina subterrânea feito de cimento
CUT AND FILL	Método de lavra subterrânea por corte e enchimento
DRY CAKE	Rejeitos filtrados a seco
DRY STACK	Pilhas secas
GANGA	É a parte não aproveitada da fragmentação de minérios
OVERFLOW	Fluxo de finos, ou “lamas”
OVERTOPPING	Ruptura por galgamento
PASTEFILL	Enchimento de mina subterrânea em pasta
PASTE TAILINGS	Rejeitos em pasta
PIPING	Erosão interna gerada no corpo da barragem
RISERS	Dutos / tubulações
ROCKFILL	Enchimento de mina subterrânea a seco
ROOM AND PILLAR	Método de lavra subterrânea por câmaras e pilares
SANDFILL	Enchimento de mina subterrânea em pasta, feito de areia
SPIGOTS	Canhões de lançamento de rejeitos (espigotes)
TAILINGS	Rejeitos
UNDERFLOW	Fluxo de grossos (granulometria grossa)
WET CAKE	Rejeitos filtrados a úmido