

Abril 2019 - ISSN: 1696-8352

## **ESTUDO DE CASO- COMPARATIVO DOS MÉTODOS DE DISPOSIÇÃO DE REJEITO DE MINERAÇÃO NO ESTADO DE MINAS GERAIS – BRASIL.**

Larissa Pedrosa Batista<sup>1</sup>  
Júnia Soares Alexandrino<sup>2</sup>  
Adriano José de Barros<sup>3</sup>  
Telma Ellen Drumond Ferreira<sup>4</sup>  
Tatiana Valeria Mendes da Cruz<sup>5</sup>

Para citar este artículo puede utilizar el siguiente formato:

Larissa Pedrosa Batista, Júnia Soares Alexandrino, Adriano José de Barros, Telma Ellen Drumond Ferreira y Tatiana Valeria Mendes da Cruz (2019): "Estudo de caso- comparativo dos métodos de disposição de rejeito de mineração no estado de Minas Gerais – Brasil", Revista Observatorio de la Economía Latinoamericana, (abril 2019). En línea:

<https://www.eumed.net/rev/oel/2019/04/rejeito-mineracao-brasil.html>

### **RESUMO**

Os recursos minerais têm extrema importância para o desenvolvimento da humanidade, uma vez que, tudo que nos circunda, está diretamente ou indiretamente relacionado com a extração e aproveitamento dos recursos minerais como matéria-prima para suprir a demanda mundial. Todavia, apesar da importância da atividade minerária, sabe-se que esta acarreta efeitos negativos como a supressão de grandes áreas de vegetação e escavações para retirada do minério, o que resulta em um grande volume de minério movimentado. Como os resíduos gerados pelas atividades de mineração, sendo eles estéreis ou rejeitos, são um dos grandes e principais impactos negativos causados pela atividade, merecem atenção quando se trata do correto manuseio e destinação. A disposição final dos rejeitos pode ser executada em cavidades subterrâneas, em ambientes subaquáticos ou, mais comumente, na superfície dos terrenos (barragens, pilhas, cavas exauridas, etc), sendo o aterro hidráulico uma das práticas brasileira adotada pelas mineradoras. Desde o acontecimento do rompimento da Barragem de Fundão da Samarco em novembro de 2015, pesquisadores, técnicos e engenheiros buscam por meios de armazenar o estéril e o rejeito de uma forma mais segura, diminuindo os riscos e impactos socioambientais associados, levando em consideração a influência no tipo de estéril e rejeito, e seu beneficiamento, na forma e parâmetros exigidos na construção do método. Acerca disto, este trabalho consiste em analisar os métodos de disposição de rejeito, comparar os métodos existentes para disposição de rejeito de mineração, avaliar seus riscos e deficiências ponderando o porquê de alguns métodos não serem viáveis, julgando os seguintes parâmetros: maior segurança das estruturas a curto e longo prazo gerando assim um menor risco de acidente; os riscos socioambientais que causam ou podem causar; os custo operacional (OPEX), o custo inicial com a infraestrutura e investimento (CAPEX) e a taxa de recuperação de água que cada sistema apresenta.

Palavras chave: Rejeitos, Métodos de disposição, Mineração, Comparativo.

<sup>1</sup> Graduação em Engenharia de Minas.UEMG

<sup>2</sup> Doutorado em Tecnologia Mineral pela UFMG, professora UEMG.

<sup>3</sup>Doutorando em Geografia e Geoprocessamento, PUC Minas. E-mail: adrianojosebarros@yahoo.com.br.

<sup>4</sup> Professora de Metodologia de Pesquisa, UEMG.

<sup>5</sup> Graduação em Engenharia de Minas.UEMG

## ABSTRACT

It's well known that mineral resources are extremely important for the development of humanity, since everything that surrounds us is directly or indirectly related to the extraction and use of mineral resources as raw material to supply the world demand. However, despite the importance of the mining industry, it is also known that it causes negative effects as well, such as the suppression of large areas of vegetation and excavations to withdraw the ore, which results in a large volume of ore moved. Because the waste and tailings are the great and main negative impacts caused by mining, they deserve special attention when it is about its correct handling and destination. The final disposal of tailings can be carried out in underground cavities, in underwater environments or, more commonly, on the surface (dams, piles, exhausted pits, etc.). In Brazil, the method adopted by most companies has been the hydraulic landfill, so-called tailings dam, or dykes. Since the failure of the Samarco Fundão Dam in November of 2015, researchers, technicians and engineers have looked for safer ways to dispose waste and tailings, minimizing risks and social and environmental impacts, as well considering the influence of the type of waste or tailing and its beneficiation process, and the form and parameters required in the construction of the method. Regarding this, this work analyzes the waste disposal methods, comparing the existing methods for disposal of mining tailings, assessing their risks and deficiencies, and considering the reasons why some methods are not feasible, considering the following parameters: short and long term, the social and environmental risks they cause or can cause; the cost of operation (OPEX), infrastructure and initial investment (CAPEX) and the water recovery rate that each system presents.

Keywords: Tailings, Disposal Methods, Mining, Comparison.

## 1 INTRODUÇÃO

Atualmente, os recursos minerais têm uma extrema importância para o desenvolvimento de diversos segmentos do setor industrial do país, além de contribuir significativamente para a geração de riquezas. Diante disso, o minério de ferro, por ser um dos minerais mais abundantes da crosta terrestre, tem uma grande responsabilidade econômica e é considerado um importante componente industrial, pois é matéria-prima básica para a fabricação do aço que é utilizado em muitas linhas de produção.

A exploração desse recurso vem causando vários debates, visto que toda extração de minerais desencadeia uma série de problemas socioeconômicos e ambientais. A mineração gera impactos numa escala local e também gera alterações biológicas, geomorfológicas, hídricas e atmosféricas, entre os quais se destacam: modificação irreversível nas paisagens pela remoção da vegetação e superfície economicamente viável nas áreas de extração, poluição e assoreamento dos recursos hídricos, crescimento dos processos erosivos, poluição atmosférica e sonora, e evasão forçada de animais silvestres previamente existentes na área de extração mineral (PENNA *et al*, 2015).

Conforme o Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM, 2016), a mineração compreende um conjunto de atividades destinadas a pesquisar, descobrir, mensurar, extrair, tratar ou beneficiar e transformar recursos minerais, de forma a torná-los benefícios econômicos e sociais.

Nas empresas de mineração existem dois tipos de resíduos sólidos que são os principais responsáveis pelos impactos ambientais que estas empresas provocam: o estéril e o rejeito. O Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH, 2002), através da Resolução n° 29, de 11 de dezembro de 2002, em seu Art. 1°, define estéril como: "qualquer material não aproveitável como minério e descartado pela operação de lavra antes do beneficiamento, em caráter definitivo ou temporário". São produzidos no decapeamento da jazida e geralmente são dispostos em pilhas. Também segundo o CNRH (2002), o rejeito é definido como sendo o material descartado proveniente de plantas de beneficiamento de minério. Geralmente, resulta uma grande quantidade e sua disposição varia se a mineração é subterrânea ou superficial, e também de acordo com os objetivos econômicos e com o processo de extração que o empreendimento utiliza.

O método comumente utilizado para disposição desses rejeitos de minérios nas minerações é a construção de barragens convencionais, com dique de solo, onde ocorre a separação sólido-líquido por sedimentação natural (IBRAM, 2016).

Este trabalho de pesquisa se direciona pelas seguintes perguntas de investigação: considerando a demanda das linhas de produção mundial, como tomar a necessidade da extração dos minerais e o contínuo aumento da geração de rejeitos, compatíveis com a preocupação ambiental? Quais os métodos alternativos que podem ser usados a fim de diminuir os riscos provenientes da construção de barragens? E quais os fatores que levam alguns métodos de disposição de rejeito não serem comumente adotados pelas empresas?

São conhecidos os vários acidentes que marcaram a história da mineração brasileira e mundial. Alguns passaram despercebidos pela população por não atingirem grandes proporções, mas outros foram destaques e ganharam repercussão.

A partir desse crescente número de acidentes, ocorridos especialmente pelo rompimento de barragens de rejeito de mineração nos últimos anos, do aumento do volume e altura máxima das estruturas a cada década, agravada pela escassez de qualificação na área de segurança de barragens e com o aumento do número de estruturas novas, viu-se a necessidade de um aprofundamento nos estudos a respeito da gestão de riscos de barragens de rejeito de mineração e de métodos alternativos na disposição de rejeito, a fim de diminuir os riscos socioambientais.

Essa preocupação justifica, a busca contínua de fundamentos e causas, do tema em estudo nesta pesquisa, assim como uma maior preocupação aliada a um controle mais eficiente no cumprimento das obrigações decorrentes da Lei Nº 12.334/2010 - Política Nacional de Segurança de Barragens, a fim de ampliar a difusão do tema, a mobilização social e a capacitação dos profissionais da área.

Segundo Willinghoefer (2015), a preocupação com a segurança de barragens se tornou crescente nas últimas décadas. Em razão disso, foram estabelecidas legislações em diversos países do mundo, com o intuito de regulamentar as etapas de construção e operação e definir planos de ação emergencial. No Brasil, no ano de 2010, foi sancionada a primeira lei relacionada ao tema, a Lei nº 12.334, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (BRASIL, 2010).

Visto isso, as mineradoras carecem de incorporar alternativas de disposição de rejeitos ao seu planejamento, visando principalmente à segurança e à estabilidade do empreendimento, por meio da escolha adequada do método de disposição e do cumprimento dos requisitos básicos de segurança existentes.

Este estudo tem como objetivo, discorrer sobre os métodos de disposição de rejeito de mineração introduzindo os conceitos, tratando dos pontos estratégicos e importância, analisando vantagens e desvantagens, como os riscos e deficiências que cada método apresenta inviabilizando sua aplicação.

Sendo assim, para a execução deste trabalho, que pode ser caracterizado como uma pesquisa bibliográfica, foram utilizadas como principais bibliografias o manual de Gestão e Manejo de Rejeitos da Mineração – Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM, 2016), que trata da evolução das práticas de gestão e manejo de rejeitos de mineração e o Manual para Elaboração de Planos de Ação Emergencial para Barragens de Mineração (PAEBM) escrito por Rafaela Baldi Fernandes (2017), que expõe um conjunto de metodologias orientativas que auxiliam na gestão de segurança das barragens.

O trabalho apresenta-se em cinco capítulos. O primeiro aborda a Introdução. O segundo apresenta o Referencial Teórico. O terceiro apresenta a Metodologia utilizada para o desenvolvimento da pesquisa, o quarto capítulo apresenta os Resultados e Discussão, e o quinto apresenta as Considerações Finais.

## **2 REFERENCIAL TEÓRICO**

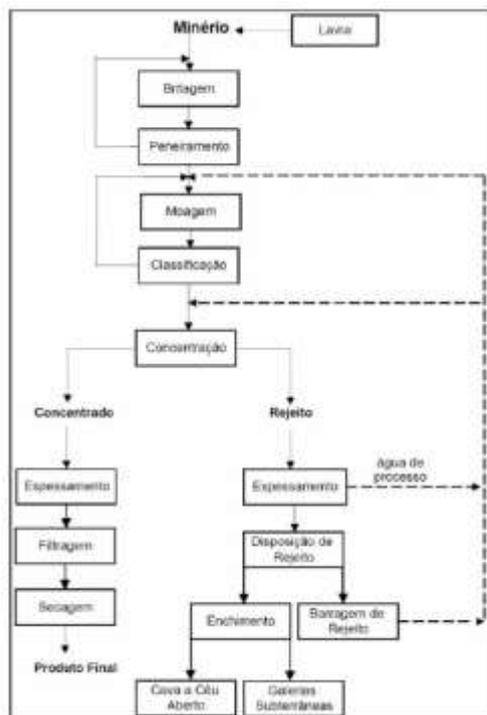
### **2.1 Tratamento de minério**

A extração de minérios inicia-se com o minério bruto (ROM), pois ao ser lavrado, passa por um conjunto de operações, que tem início com a perfuração da rocha, prossegue com o desmonte e termina com a remoção do material até as pilhas de estoque ou até a planta de concentração (LUZ e LINS, 2010).

Na planta de tratamento de minérios, o minério chega em forma de ROM. Luz e Lins (2010) abordam sobre as seguintes operações que constituem essa etapa: cominuição, fase de redução de tamanho para se obter a liberação do mineral, composta pelas operações de britagem e de moagem. O circuito engloba as operações de separação por tamanhos (peneiramento) e classificação (ciclonação, classificação em espiral); concentração: gravítica, magnética, eletrostática, flotação etc.; operações de desaguamento, cuja finalidade é realizar a eliminação de parte da água do concentrado. Tais operações são compostas pelo espessamento e filtragem, e secagem, que pode

ser realizada através de secador rotativo, *spray dryer*, secador de leito fluidizado; por fim, a disposição do rejeito, como pode ser observado na Figura 1.

Figura 1 - Fluxograma típico do beneficiamento de minérios com recirculação de água.



Fonte: LUZ e LINS (2010).

## 2.2 Diferença entre estéril e rejeito

O volume e a massa movimentados diariamente pelas minerações geram grande quantidade de resíduo a ser estocado, material este proveniente da extração mineral e da concentração de minerais (SILVA *et al.*, 2012). Esses resíduos podem ser divididos em:

- Estéril é o material oriundo do decapeamento da mina ou proveniente da extração mineral, não sofre nenhum processo de beneficiamento ou concentração. São os minerais que não possuem valor agregado ou possuem valor secundário, ou seja, não são economicamente viáveis por possuírem baixo teor ou não serem rentáveis ao ponto de pagar o investimento necessário para extraí-los e beneficiá-los, e são dispostos nas chamadas pilhas de estéril (CNRH, 2002).
- Os rejeitos são provenientes do descarte de resíduos do processo de beneficiamento dos minerais, no qual os minerais são processados por métodos mecânicos e/ou químicos nos quais se divide o mineral bruto, denominado *Run of Mine* (ROM) em concentrado, que agrega interesse econômico, e o rejeito, que não agrega interesse econômico (CNRH, 2002).

## 2.3 Disposição de Rejeito de Mineração

Há três formas de disposição de rejeito: a céu aberto, subterrânea ou subaquática, e uma das principais fontes de degradação ambiental oriundas das atividades de mineração é a disposição inadequada de rejeito decorrente do processo de beneficiamento (LOZANO, 2006).

Conforme o IBRAM (2016), o método de disposição de rejeito a céu aberto é o mais comum atualmente, mesmo sendo considerado como um processo de alto grau de poder degradante ao meio ambiente, também é o método mais viável. Na disposição subterrânea, os rejeitos são bombeados para o subsolo para que possam preencher as câmaras que restam após a extração do minério. Não geram tanto impacto ambiental, mas não é um método muito viável economicamente, por isso não é tão utilizado. O subaquático é um método raramente utilizado, por gerar um alto impacto ao ecossistema aquático, na maioria das vezes irreversível, não se tornando viável para as empresas (LOZANO, 2006).

Para que haja uma disposição correta do rejeito, conforme regem as Normas Reguladoras de Mineração (NRM - 19, DNPM, 2002), todo e qualquer tipo de disposição de material, seja de estéril ou

de rejeito de mineração, tem que ser bem planejado, monitorado e acompanhado pelos devidos responsáveis. A escolha do método de disposição e do local contam com vários fatores, incluindo as condições geológicas, topográficas e análises geotécnicas, das propriedades mecânicas dos materiais, do poder de impacto ambiental dos rejeitos e aprovações ambientais, para que assim se evitem riscos socioambientais (IBRAM, 2016).

Os rejeitos apresentam variadas características geotécnicas, físico-químicas e mineralógicas. Os rejeitos que contêm granulometria fina, são denominados lama, e quando têm granulometria grossa (acima de 0,074 mm), são denominados rejeitos granulares (DUARTE, 2008).

Caso o descarte decorra por transporte de caminhões ou correias transportadoras é classificado como descarte a granel, e na forma de polpa (mistura de água e sólidos), pode ser transportado por meio de tubulações com a utilização de sistemas de bombeamento ou por gravidade (ARAÚJO, 2006).

De acordo com Fernandes (2017), as metodologias para disposição de rejeito a céu aberto, podem ser classificadas como: lançamento em reservatórios (barragens de contenção de rejeito), aterro drenado (empilhamento drenado), rejeitos desaguados e empilhados (empilhamento a seco), rejeitos espessados e em pasta (co-disposição), tubos de geotêxtil de alta resistência (geobags). Estes métodos são abordados de forma geral, mas podem ser combinados entre si afim de obter um sistema de disposição mais eficiente que atenda às necessidades de cada projeto.

Além de todos estes métodos para disposição de rejeito, há anos, empresas em parceria com universidades vêm estudando formas e desenvolvendo alternativas para aproveitar os rejeitos provenientes do beneficiamento do minério de ferro.

Segundo a Minas Jr. Consultoria Mineral, o aproveitamento dos rejeitos tornaria desnecessário a forma de deposição em barragens ou outros métodos de disposição. Com isso há uma constante busca por um meio de reaproveitar este material descartado, com objetivo de dar-lhes uma destinação comercial e que mitigue os impactos ambientais causados pela deposição dos rejeitos. Assim, foram desenvolvidas técnicas de reaproveitamento de rejeito processado e utilizam-os na construção civil.

Silveira (2015), apresenta uma técnica de reaproveitamento de rejeito desenvolvida pela empresa Minerita – Minérios Itaúna Ltda em parceria com o Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial (SENAI) para a produção de blocos pré-moldados em concretos confeccionados a partir da sílica obtida do processo de beneficiamento da mineradora. Os testes foram aprovados em 2012, com laudo emitido pelo SENAI, considerado um produto de excelente qualidade para fabricação de blocos vazados e/ou não vazados, meios fios, postes para cercamento e pisos intertravados para trânsitos leves a pesados.

## **2.4 Classificação dos Rejeitos**

Fernandes (2017), divide os rejeitos em quatro categorias, classificando-os conforme a porcentagem de sólido e água que apresentam no momento que são descartados pela usina de beneficiamento para a etapa final do processo, que é a disposição de rejeito. Estas categorias dividem-se em: rejeito não espessado - polpa, rejeitos espessados ou em pasta, rejeitos filtrados e rejeitos ciclados.

### **2.4.1 Rejeitos não espessados - Polpa**

Os rejeitos são partículas sólidas oriundas do processo de beneficiamento de minério, com pouco ou nenhum valor econômico. Geralmente os processos de beneficiamento são a úmido, procedimento que necessita de uma grande demanda de água, diante disso, chama-se de polpa o rejeito que é eliminado da usina de beneficiamento com aproximadamente 70% de água e 30% de partículas em suspensão. A polpa é um material mais arenoso, com granulometria mais grossa, acima de 0,074mm, não muito plástico, altamente permeável e com boa resistência ao cisalhamento (LOZANO, 2006 e RAFAEL, 2012).

Como a porcentagem de água na polpa é relativamente alta, o transporte até o sistema de disposição ocorre por gravidade através de canaletas ou tubos, com ou sem bombeamento, dependendo da elevação da planta e o local de disposição. Atualmente, usam-se tubulações de polietileno de alta densidade (HDPE), pois a polpa geralmente é abrasiva e de alta viscosidade. Ao dimensionar o sistema de tubulação, deve-se atentar para a densidade da polpa e tamanho das partículas ao calcular a velocidade mínima de fluxo, afim de evitar que o rejeito se sedimente e obstrua a tubulação (RAFAEL, 2012).

Segundo Rafael (2012) a metodologia comumente utilizada para a disposição de rejeito em forma de polpa é a barragem de contenção de rejeito. “A disposição dos resíduos em uma praia de rejeitos pode ser efetuada em um ou em vários pontos de descarga (spigotting)” (p. 23), já o lançamento dos rejeitos pode ser realizado por hidrociclones, no qual a classificação granulométrica é feita antes do lançamento; ou por canhões, que realiza a classificação granulométrica na praia de decantação em função da velocidade de descarga, da concentração e das características mineralógicas do rejeito (RAFAEL, 2012).

Observando os rejeitos classificados como granulares, areias finas e médias, provenientes do beneficiamento de minério de ferro, pode-se notar que possuem “alta permeabilidade e baixa compressibilidade, com ocorrência de sedimentação e adensamento em tempos relativamente curtos o que, sob ponto de vista geotécnico, os classificaria como materiais favoráveis” (RAFAEL, 2012, p 28).

Segundo Gomes (2004) apud Portes (2013) a classificação dos rejeitos de mineração são:

- Rejeitos em polpa (*slurry*) – rejeitos com baixos teores de sólidos presentes que apresentam pequena resistência ou nenhuma resistência ao transporte por gravidade ou por bombeamento;
- Rejeitos espessados ou polpas de elevada densidade (*thickened tailings*) – rejeitos parcialmente desaguados, mas que apresentam ainda a consistência de uma polpa, sendo passíveis de bombeamento;
- Rejeitos em pasta (*paste tailings*) – rejeitos espessados que apresentam consistência típica de pasta (comumente mediante a incorporação de algum tipo de aditivo químico, como cimento *portland*, por exemplo), resultando em um material não susceptível a fluir facilmente quando não confinado e nem a liberar quantidades significativas de água durante a sua disposição final;
- Rejeitos filtrados úmidos (*wet cake tailings*) – rejeitos na forma de uma massa saturada ou quase-saturada, não mais passível de bombeamento;
- Rejeitos filtrados secos (*dry cake tailings*) – rejeitos na forma de uma massa não saturada (grau de saturação tipicamente entre 70% e 85%), não passível de bombeamento.

#### 2.4.2 Disposição de Rejeito por Separação Sólido Líquido

Segundo Guimarães (2011) o processo de separação sólido-líquido compreende todas as operações unitárias onde ocorre o desaguamento, evaporação e secagem do minério, podendo-se destacar nas usinas de beneficiamento de minério de ferro: peneiramento, ciclonação, espessamento e filtração.

A técnica de separação sólido líquido, tem o potencial de armazenar os resíduos descartados de uma forma mais estável e inerte, uma vez que os rejeitos convencionais têm de 30 a 50% de sólidos e depois desta operação passam a ter de 55 a 75% de sólidos, dependendo das variáveis de processo (MENDES, 2016).

Segundo Sousa (2012), a separação sólido/líquido é uma das etapas do beneficiamento de minério que visa:

- Recuperação de água para ser utilizada novamente no processo;
- Adequar a porcentagem de sólidos para etapas subsequentes;
- Redução da umidade dos produtos para transporte e comercialização;
- Preparação de rejeitos visando transporte e disposição.

Conforme Rodrigues (2017) o processo de separação sólido líquido consiste no desaguamento da polpa e consequente aumento do teor de sólidos, o qual é realizado por meio de espessadores, ciclones ou em potentes filtros a vácuo. Os rejeitos podem apresentar diferentes estados físicos, como: polpa, pasta ou torta, além de comportamentos geotécnicos distintos (FIGUEIREDO, 2007).

A forma de deposição do produto gerado pelo processo de desaguamento, pode ser em barragens, cavas exauridas, em pilhas ou até mesmo empilhar na superfície do chão, e a água, obtida do resultado deste sistema pode ser reciclada em outros processos. Sendo assim, seguem algumas formas de separação sólido líquido que podem ser utilizadas como etapas do processo de disposição de rejeito.

##### 2.4.2.1 Rejeitos Espessados

Foi idealizado e denominado como *thickened tailings*, *thickened discharge* ou *central discharge* por Shields (1974) e desenvolvido por Robinsky (1979) e Vick (1983), além de ser citado por Lima (2006).

A técnica de disposição de rejeitos espessados ou TTD - “Thickened Tailings Disposal” foi introduzida pioneiramente por Robinsky (1968), citado em Robinsky (2002), inserido como uma técnica alternativa viável para disposição dos rejeitos gerados nas minerações, frente aos potenciais riscos inerentes à disposição de rejeitos em formas de polpa em barragens convencionais e/ou frente à falta de controle durante o processo construtivo de aterros hidráulicos, embora este último também apresente vantagens com relação às barragens convencionais. Segundo Slotte et al. (2005), a tecnologia de rejeitos espessados ou em pasta tem-se mostrado como um método eficaz de disposição de rejeitos, no intuito de recuperação de água e, principalmente, como alternativa viável à metodologia de disposição em barragens de rejeito. (FIGUEIREDO, 2007, p.28).

De acordo com Lara (2011), a operação de espessamento tem o intuito de adequar as polpas para operação subsequente, visando transporte e descarte mais eficazes e recuperação de água para reciclo industrial, recuperação de sólidos ou solução de operações de lixiviação, utilizada em processos hidrometalúrgicos. O espessamento tem como finalidade a separação de partículas em suspensão do meio líquido, pela ação do campo gravitacional, do empuxo e da resistência ao movimento, ou seja, é baseada na diferença das densidades dos constituintes, para obter uma fase mais densa e uma fase líquida clarificada, a que oferece ao processo características de baixo custo e grande simplicidade operacional.

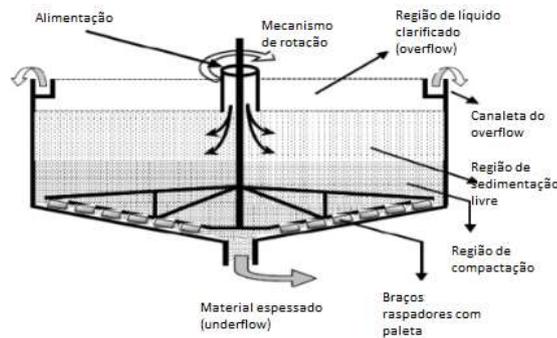
Lara (2011) e Sousa (2012) citam também os fatores que afetam a sedimentação de uma suspensão aquosa de partículas ou flocos, que são:

- Tamanho e Forma de Partículas - Partículas esféricas ou com forma aproximada e de maior diâmetro têm uma maior facilidade de sedimentar do que partículas de mesma massa com formato irregular e muito fina, que permanecem um tempo maior em suspensão. “A faixa granulométrica influencia nos custos e desempenho nas operações” (SOUSA, 2012, p. 4). Uma alternativa para as partículas irregulares e de pequeno diâmetro é a floculação, que promove a agregação, resultando em unidades maiores e com forma mais aproximada da esférica (LARA, 2011).
- Porcentagem de sólido na polpa - Suspensões muito concentradas, com a quantidade de sólidos na suspensão, apresentam características de sedimentação bem diferentes, originando o fenômeno conhecido como sedimentação impedida, pois a taxa de sedimentação deixa de ser constante para se tornar decrescente. “A porcentagem de sólido influencia na velocidade de sedimentação, no desempenho da filtração e na floculação das características do flocos formado” (LARA, 2011 e SOUSA, 2012, p. 6).
- Características de superfície – Uma das características que difere as suspensões floculadas é a taxa de sedimentação que é consideravelmente maior do que a suspensão original, devido ao maior tamanho do floculado que acaba tendo uma grande quantidade de água nos seus interstícios. A grande dificuldade na determinação destas variáveis é a interação com o tipo de floculante utilizado e com as condições físico-químicas sob as quais ocorreu a floculação. “As características de superfície podem influenciar na agregação/dispersão da polpa e a escolha do tipo de reagente que deverá ser utilizado no espessador e na filtração” (LARA, 2011 e SOUSA, 2012, p. 6).
- Tanque de Sedimentação - A geometria e as dimensões do tanque influenciam diretamente no processo de sedimentação, pois se a concentração de sólidos é muito alta, é importante que o tanque seja alto o suficiente para que o processo de sedimentação aconteça livremente e a existência de paredes ou obstáculos no trajeto da partícula promove a redução da taxa de sedimentação (LARA, 2011).
- Viscosidade do Fluido e da Polpa – “A viscosidade do fluido é influenciada pela temperatura, logo, dentro de certos limites, é possível aumentar a velocidade de decantação através do aumento da temperatura”. (LARA, 2011 e SOUSA, 2012, p. 6).

O equipamento que realiza essa operação é conhecido como espessador, o qual é composto por um tanque de sedimentação. Este tanque é aberto com formato cilíndrico e fundo ligeiramente cônico. A alimentação da polpa ocorre pela parte superior central, enquanto a descarga do líquido sobrenadante transborda e é recolhido em uma calha que circunda o tanque. Tem como função

receber uma alimentação e gerar dois produtos (*underflow*), com maior concentração de sólidos e (*overflow*) água clarificada que é reutilizada durante o processo, conforme ilustrado na Figura 2 (SOUSA, 2012).

Figura 2 – Diagrama ilustrativo de um espessador contínuo convencional.



Fonte: Sousa (2012).

Podemos observar que com o passar dos anos, houve um desenvolvimento histórico dos espessadores por meio de aperfeiçoamentos tecnológicos e geométricos destes equipamentos, conforme segue no Quadro 1.

Lara (2011) apud Sousa (2012) propõe que para conseguir polpas mais adensadas ou pasta de minério de ferro pode-se escolher os espessadores tipo *High Density* (espessador de alta capacidade) ou *Deep Cone* (espessador de lamelas), respectivamente.

As vantagens desses dois espessadores é que eles ocupam menor área unitária, tendo assim uma economia de espaço, o que os tornam mais atraente industrialmente, e tem maior produtividade comparada aos espessadores convencionais, pois tem um aumento na capacidade de sedimentação, além de uma rápida sedimentação das partículas, “como o tempo de sedimentação é proporcional à altura de queda vertical, este tempo pode ser reduzido, diminuindo-se o espaçamento entre as lamelas” (SOUSA, 2012, p.23).

Quadro 1 – Tipos de espessadores comumente utilizados para o espessamento de rejeito de minério de ferro.

Tempo	Tipo	Forma	Características
	<p>Convencional</p> 		<p>Ação ineficiente do floculante,</p> <p>Grande área, Ø até 150m,</p> <p>Obtém baixa densidade.</p>
	<p><i>High Rate ou High Capacity</i></p> 		<p>Adição de floculante,</p> <p>Menor área se comparado ao Convencional,</p> <p>Obtém densidade similar ao Convencional.</p>
	<p><i>High Density</i></p> 		<p>Menor área e maior altura que o <i>High Capacity</i>,</p> <p>Obtém máxima densidade.</p>
	<p><i>Deep Cone</i></p> 		<p>Aumento da altura em relação ao <i>High Density</i>,</p> <p>Maior redução de área,</p> <p>Produção de pasta.</p>

Fonte: Portes (2013).

O que diferenciam os espessadores de alta capacidade e de lamelas dos convencionais são as lamelas ou alguma modificação no posicionamento da alimentação da suspensão, mas o que difere o *High Density* do *Deep Cone* é a necessidade de uso de floculantes para melhor desempenho no espessador de *Deep Cone*.

Os rejeitos são espessados na planta, com ou sem adição de floculantes.

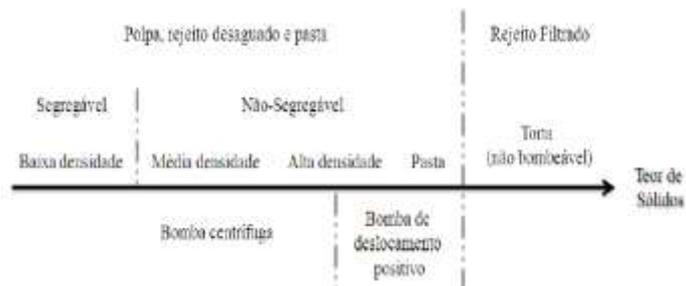
Para auxiliar o processo de sedimentação podem ser utilizados reagentes. Os reagentes atualmente mais utilizados no processo de espessamento de rejeitos são os floculantes e os coagulantes. Floculantes são polímeros naturais ou sintéticos de alto peso molecular que auxiliam na sedimentação de partículas suspensas. Coagulantes são minerais naturais, tais como cal e sais férricos, que são eficazes para suspensões coloidais, sendo menos eficientes se comparados aos floculantes (Meggyes e Debreczeni, 2006). Nesse contexto, ressalta-se também a importância do pH no estado de agregação e dispersão das polpas (PORTES, 2013, p. 20).

Contudo, a diferença entre adicionar ou não floculantes está na consistência e resistência do produto do espessamento. Figueiredo (2007), define que o produto do espessador pode apresentar diferentes estados físicos, sendo que rejeitos desaguados parcialmente, são aqueles que manifestam aumento da resistência à capacidade de escoamento mesmo assim ainda apresentam a consistência de uma polpa, com alto teor de sólidos e ainda passível de bombeamento, já os rejeitos em pasta, são rejeitos espessados mediante a incorporação de algum tipo de aditivo químico.

Segundo Rodrigues (2017), a consistência do produto final do espessamento é muito importante pois pode interferir diretamente na escolha do método e do transporte utilizado até o local de deposição do rejeito.

A Figura 3 apresenta as diversas consistências obtidas para os rejeitos espessados, apresentando o aumento do teor de sólidos, que é uma característica intrínseca do material.

Figura 3 – Consistências do rejeito com o aumento do teor de sólidos.



Fonte: Portes (2013) adaptado de Slottee e Johnson (2009).

Quando a polpa de rejeito apresenta baixa densidade e alto teor de água, fica suscetível ao fenômeno da segregação durante a disposição e para que ocorra o transporte da polpa via tubulação, utilizando bombas centrífugas, é necessário que haja uma velocidade crítica onde, acima desta, o fluxo é turbulento e arrasta os sólidos, mas abaixo desta os sólidos se sedimentam e podem obstruir a tubulação (PORTES, 2013).

Já o rejeito espessado de alta densidade, também apresentado como pasta, apresenta uma baixa susceptibilidade a segregação e foram desaguados ao ponto de formar uma massa homogênea, sendo o transporte deste material também condicionado à sua velocidade crítica e necessário o uso de bombas centrífugas (FERNANDES, 2017).

Na Figura 4 são apresentados os aspectos visuais de pastas de rejeito, considerando diferentes graus de espessamento (FIGUEIREDO, 2007).

Figura 4 – Exemplos típicos de rejeitos espessados.



Fonte: Figueiredo (2007).

Segundo as classificações de Figueiredo (2007), a diferença entre a consistência de polpa para a consistência de pasta é que usualmente a polpa “pode fluir a uma distância suficiente a partir do ponto de descarga, ao longo da superfície de deposição” (p. 28). Enquanto o termo pasta apresenta estado plástico, característica de baixo fluxo e viscosidade apropriada.

E segundo Fernandes (2017) as diferenças entre rejeitos espessados para rejeitos em pasta são: porcentagem do teor de sólidos entre eles, conforme pode-se observar no Quadro 2, a modificação das propriedades dos rejeitos espessados e que o rejeito em pasta precisa apresentar características adequadas para sua formação, como, no mínimo 15% de material com granulometria abaixo de 0,020mm.

Quadro 2 – Tipos de rejeito em função do teor de sólidos.

Tipos de Rejeito	Teor de Sólidos (%)
Polpa	20 a 30
Espressados	50 a 60
Pasta	60 a 75

Fonte: Fernandes (2017).

A desvantagem no tipo de rejeito espessado é que este tem um alto custo devido a adição de aglomerantes, afim de aumentar a estabilidade dinâmica, a qual reduz o potencial de erosão e previne infiltrações quando estes são depositados, este fator leva esse tipo de rejeito a apresentar um custo operacional maior comparado ao tipo de rejeito em pasta (FERNANDES, 2017).

Já os rejeitos em pasta apresentam a desvantagem na inviabilidade de seu transporte a longas distâncias, pois como são rejeitos desaguados ao ponto de não apresentarem velocidade crítica de fluxo quando bombeados e nem segregação quando depositados por exibirem uma alta viscosidade, requer o uso de bombas potentes, como bombas de deslocamento positivo (FERNANDES, 2017).

Osório *et al* (2008) apud Lara (2011), destaca algumas vantagens que o método de disposição de pasta de rejeito apresenta: maior recuperação/ recirculação de água, maiores ângulos de repouso, menores custos de investimento e de operação, menor impacto ambiental.

O rejeito em pasta expandiu-se após estudos desenvolvidos para aplicabilidade da sua disposição como material de preenchimento das minas subterrâneas, assim denominado como *backfill* ou *pastefill*, e por apresentar uma quase inexistência da parte líquida, este método também manifestou “elevado potencial para sua disposição em superfície, minimizando os riscos associados à disposição de rejeitos (polpa) em barragens convencionais” (FIGUEIREDO, 2007, p. 29).

Na indústria mineral, os espessadores visam à disposição dos sólidos concentrados em barragens, cavas de minas ou galerias de minas subterrâneas com polpas com percentagens de sólidos elevadas (SOUSA, 2012).

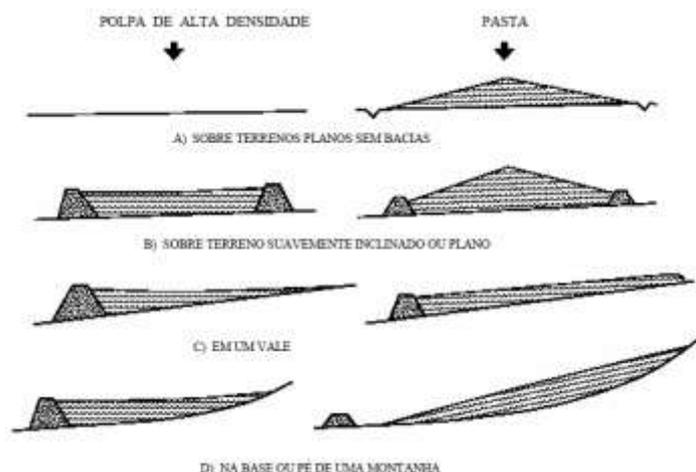
Como primeiro exemplo de mina no mundo a adotar o método de pasta de rejeito espessado temos a mina de Bulyanhulu na Tanzânia, segundo dados da empresa, 25% do volume total de pasta de rejeitos são misturados com uma parcela do estéril e utilizado como material de preenchimento no subsolo (*backfill*) e o restante deste volume, 75% dos rejeitos, são dispostos em superfície através de um sistema de tubulação com descarte em torres múltiplas. A deposição dos rejeitos em pasta é realizada em camadas finas de no máximo 0,3m e em ciclos regulares para que ocorra a desidratação e o ressecamento dos rejeitos (FIGUEIREDO, 2007).

Neste contexto, Figueiredo (2007), afirma que para rejeitos em forma de polpa ou pasta, no “sistema de disposição final tende a apresentar uma conformação bastante distinta da praia de rejeitos em uma barragem convencional ou conformada sob a técnica de aterro hidráulico” (p.32).

A Figura 5 explicita sobre condições topográficas distintas à diferença no comportamento da disposição dos rejeitos de alta densidade e pasta.

Quando a pasta é depositada, continuará a fluir até estabelecer as condições de equilíbrio para a sua disposição final. Esta precisa que ocorra o adensamento e o ressecamento do material, ou seja, evaporação da massa de água do rejeito (FIGUEIREDO, 2007).

Figura 5 - Ângulos de disposição para polpas de alta densidade e para pasta, para diferentes tipos de terreno.



Fonte: Figueiredo, 2007.

A forma de deposição destes tipos de rejeitos geralmente ocorre da mesma forma, gerando uma pilha cônica, normalmente com ângulos de 2 a 10% que favorecem a estabilidade do depósito. A drenagem favorece a ocorrência de rachaduras à medida que o material vai ressecando, o que contribui para a elevada produção de poeira (FERNANDES, 2017).

Segundo Portes (2013) as principais vantagens do método de disposição de rejeitos espessado e os principais aspectos limitadores ou as desvantagens desta aplicação, segue no Quadro 3.

Quadro 3 - Vantagens e desvantagens do Método de Espessamento de Rejeito.

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Redução da água armazenada no depósito, reduzindo relativamente os custos do sistema de disposição, causando menor impacto ambiental.</li> <li>• A recirculação de água da planta de espessamento de rejeitos.</li> <li>• Redução da área necessária para a disposição de rejeitos, o que reduz o tempo de reabilitação futura desta área.</li> <li>• Melhores condições de recuperação da área no fechamento. Devido à inclinação obtida em um depósito, a superfície é sujeita ao rápido escoamento e secagem, propiciando a existência da vegetação.</li> <li>• Possibilidade de uso como material de fundação, assim como é feito para os empilhamentos drenados e barragens alteadas para montante.</li> <li>• As melhores características de permeabilidade e estabilidade, associadas à menor área ocupada, ocasionam menores riscos, dependendo ainda da qualidade da construção e da gestão dessas estruturas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• A taxa de produção deve ser pertinente com a tecnologia de espessamento de rejeitos adotada.</li> <li>• A reologia (resistência à deformação) do rejeito deve permitir a aplicação da técnica de espessamento de rejeitos. <ul style="list-style-type: none"> <li>• Existência de mão de obra especializada.</li> <li>• Condições topográficas podem inviabilizar o uso da tecnologia de espessamento de rejeitos frente ao método de disposição convencional.</li> </ul> </li> <li>• Necessidade de um alto nível de tecnologia e infraestrutura locais.</li> <li>• Aumento do consumo de energia.</li> <li>• Necessidade da construção de uma barragem para reservar a água extraída dos rejeitos e para coleta da água da chuva e sedimentos, que deve estar localizada a jusante do depósito de rejeitos.</li> <li>• Custos elevados associados à infraestrutura.</li> </ul>

Fonte: Portes (2013), citado por Rodrigues (2017).

#### 2.4.2.2 Rejeitos Filtrados

Segundo Guimarães (2011), a operação unitária de filtração pode ser definida como uma separação sólido líquido na qual a polpa passa através de um meio filtrante, as partículas sólidas retidas constituem a torta e o líquido passante, é denominado filtrado. Sendo assim, uma elevada porcentagem de partículas finas pode inviabilizar o processo de filtração (PORTES, 2013).

Os rejeitos podem ser filtrados a úmido, denominados de *wet cake tailings*, o qual apresenta grau de saturação próxima de 100%, ou podem ser filtrados a seco, *dry cake tailings*, que apresenta de 70 a 85% de grau de saturação (PORTES, 2013).

Guimarães (2011) afirma que, os filtros têm a função de retirar a água da polpa por ação de uma força incidente sobre as partículas, que pode ser obtida através de gravidade, vácuo, pressão ou centrifugação, afim de que ocorra a filtração.

Guimarães (2011) organizou as informações dos tipos de filtração com suas características e modelos de filtro exemplificados no Quadro 4.

Quadro 4 - Mecanismos de filtração e os principais fornecedores.

<b>Tipos</b>	<b>Características</b>	<b>Modelos de Filtros</b>
Filtração a vácuo	Criada uma pressão negativa debaixo do meio filtrante	Filtro de tambor, de disco convencional, filtro horizontal de mesa e filtro horizontal de correia
Filtração sob pressão	Uma pressão positiva é aplicada na polpa	Filtro prensa horizontal, filtro prensa vertical
Filtração centrífuga	Utiliza a força centrífuga para forçar a passagem do líquido	Centrífugas verticais e Decanters
Filtração hiperbárica	Em que se combinam vácuo e pressão	Filtro de disco encapsulado ou hiperbárico
Filtração capilar	Utiliza a ação de capilares de meios cerâmicos porosos para efetuar o desaguamento	Ceramec

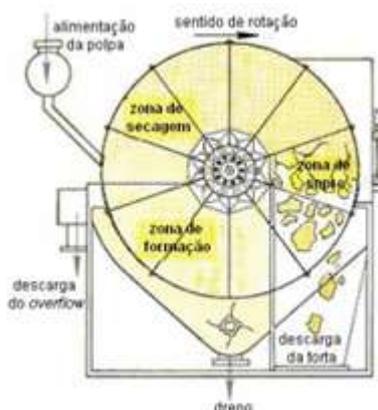
Fonte: Guimarães, 2011.

Na filtração a vácuo, é criada uma pressão negativa abaixo do meio filtrante, enquanto que, na filtração sob pressão, uma pressão positiva é aplicada na polpa. Existem processos de filtração em que se combina vácuo e pressão (filtração hiperbárica) e outros que se beneficiam da ação dos capilares de meios cerâmicos porosos combinados com a de aplicação de vácuo (filtração capilar).

Nos filtros *Hi-Bar* (hiperbáricos), a pressão aplicada na operação pode chegar a 6 bar acima da pressão atmosférica. Para tanto, os filtros são acondicionados em um vaso de pressão e operam hermeticamente fechados. Um sistema de válvulas e portinholas especiais possibilita a descarga do filtrado e da torta sem precisar abrir o equipamento (GUIMARÃES, 2011, p. 27).

O tipo de filtração mais usual nas usinas de minério de ferro é a hiperbólica, que pode ser obtida através de vácuo e pressão. São comumente usados filtros de discos convencionais (figura 6) para produtos *pellet feed* e filtros horizontais de correia para *sinter feed* (GUIMARÃES, 2011).

Figura 6 - Ciclo de filtragem de um filtro de disco convencional.



Fonte: Guimarães (2011).

O meio filtrante é um elemento importante para o resultado final da filtração, pois é este que retém os sólidos no processo de filtragem. Geralmente o meio filtrante é uma tela de tecido que podem ser fabricados de poliéster, nylon, polietileno ou polipropileno. A fabricação destas telas pode ser feita com três tipos de fios, como o “monofilamento, quando o fio é único como uma linha de pesca ou multifilamento, quando vários fios são trançados juntos como um fio de lã” (p. 29). E quando o tecido apresenta os dois tipos de fios citados anteriormente juntos no mesmo tecido, são denominados como monomultifilamento (GUIMARÃES, 2011).

O tipo de fio, a forma como este está arranjado no tecido e o tipo de matéria-prima a ser filtrada, influenciam na escolha do tipo do meio filtrante. A seleção do meio filtrante é baseada na eficiência da retenção das menores partículas, na vida útil do meio filtrante, busca-se uma boa permeabilidade e não obstruir facilmente o meio filtrante. Para ter um filtrado mais clarificado o meio filtrante tem que ter malhas mais fechadas, mas com isso aumenta a probabilidade de entupir. Quando o meio filtrante “cega”, ou seja, é obstruído, aplica-se um jato de lavagem para ajudar a limpar o meio filtrante (GUIMARÃES, 2011).

Segundo Guimarães (2011), no processo de filtragem da polpa do minério há muitas variáveis que afetam este desempenho. Estas variáveis, foram agrupadas em categorias relacionadas aos sólidos, à torta/filtrado, à polpa e ao equipamento, conforme apresentado no Quadro 5.

Quadro 5 - Variáveis que afetam a velocidade de filtragem.

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

Fonte: Guimarães (2011).

Guimarães (2011) estabelece também que dentre as variáveis apresentadas no quadro acima, pode-se destacar que:

- A taxa de filtragem cresce com a redução do ciclo de filtragem, porém pode acarretar o aumento da umidade da torta, ou a obtenção de tortas extremamente finas, que poderão prejudicar a descarga;
- O aumento da temperatura da polpa favorece a filtragem uma vez que ocorre uma redução da viscosidade do filtrado. Porém essa operação não é usual por ser inviável economicamente;

- Polpas com concentração de sólidos mais elevada favorecem a filtração. A maioria dos filtros requer uma concentração de sólidos mínima na sua alimentação para garantir o seu desempenho (principalmente os filtros que operam a vácuo). Por isto é usual o adensamento da polpa por espessadores, ciclones ou outro equipamento antes da filtração;
- Partículas de distribuição granulométrica grossa formam tortas com interstícios maiores. Dessa forma, o líquido atravessa com maior facilidade o meio filtrante aumentando a velocidade de filtração e reduzindo a umidade da torta;
- O valor de PH da polpa está relacionado ao estado de dispersão das partículas; maior dispersão, menor fluxo de filtrado e maior umidade da torta;
- Os reagentes auxiliares de filtração são utilizados para reduzir a tensão superficial do líquido auxiliando na passagem do fluxo.
- As lamas apresentam um efeito negativo na filtração uma vez que elas tendem a “cegar” o meio filtrante. Desta forma, com o objetivo de reduzir o efeito das lamas e aumentar a taxa de filtração, algumas vezes são adicionados floculantes nos tanques.

Nos filtros, os rejeitos são desaguados até teores de umidade que não possibilitam o bombeamento dos mesmos. Logo têm de ser transportado por caminhões ou transportadores de correia até a área de disposição final, onde os materiais são lançados, espalhados e compactados em camadas ou estabilizados em pilhas. Porém, após disposto, geralmente é necessário que o rejeito filtrado passe por processo de secagem, entre as etapas de espalhamento do rejeito e compactação, operação que pode durar de 3 a 5 dias, afim de reduzir a umidade para que seja possível obter a densidade seca máxima especificada para a próxima etapa, que é a compactação (PORTES, 2013).

Portes (2013) retrata que se os rejeitos filtrados atenderem a estes requisitos específicos eles podem ser depositados de forma estável, são eles:

- Espessamento de solos até uma concentração de 60%.
- Deslamagem com filtros até a umidade final;
- A torta formada, também denominada *cake*, é transportada por correias transportadoras ou caminhões, sendo distribuída por tratores.
- A compactação é feita com rolos pé de carneiro em camadas até atingir um grau de compactação em torno de 85%.

Segundo Fernandes (2017) e Portes (2013) o método de filtração de rejeito por pressão apresenta vantagens e desvantagens, como as observadas no Quadro 6.

Quadro 6 - Vantagens e desvantagens do Método de Filtração de Rejeito.

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Possibilita maior controle sobre o nível desejado de umidade da torta, teor de umidade menor que 20%;</li> <li>• Geralmente não requer contenção;</li> <li>• Maior eficiência de desaguamento, apropriado para área que a reserva de água é crítica;</li> <li>• Facilidade da recuperação da área através da revegetação;</li> <li>• Adequado para áreas de alta atividade sísmica, pois não é um rejeito que está saturado e terá problemas com desenvolvimento de pressões neutras e liquefações.</li> <li>• Redução da área necessária para a disposição de rejeitos comparado com outros métodos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Custos elevados associados à infraestrutura e operação: planta de desaguamento (energia e manutenção) e ao transporte e disposição final;</li> <li>• A presença da proteção em enrocamento nas faces dos taludes entre bermas serve para minimizar os efeitos da erosão nos rejeitos compactados.</li> <li>• Indicado para operações de baixa frequência (20.000 toneladas por dia) devido ao custo da planta de filtração.</li> </ul>

Fonte: Adaptado por Portes (2013) e Fernandes (2017).

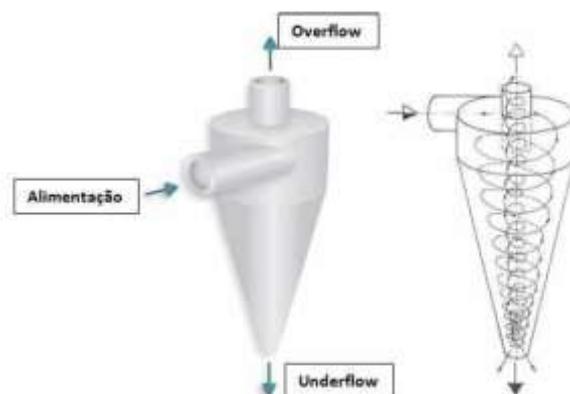
#### 2.4.2.3 Rejeitos Ciclizados

Após o processo de beneficiamento, quando o rejeito não apresenta características adequadas de acordo com a distribuição granulométrica, resistência e/ou permeabilidade, mas apresenta partículas sólidas com diâmetros na faixa de 5 a 200 mm, deve-se aplicar o processo de ciclização realizado pelo equipamento chamado de hidrociclone ou também conhecido apenas

como ciclone. Esses equipamentos são aplicados em diferentes campos tecnológicos, mas são mais comumente utilizados nos processos de desaguamento de rejeito e classificação do minério. Porém deve-se atentar ao fato de que este processo só tem êxito quando não ocorrer diferenças de densidades relativas entre as frações granulométricas (CARVALHO, 2017).

O hidrociclone é uma estrutura metálica ou de plástico que tem formato de uma seção cilíndrica acoplada a uma seção cônica, conforme ilustrado na Figura 7. Esta configuração e o modo de alimentação geram a ação do campo centrífugo, assim, as partículas em suspensão e submetidas a acelerações centrífugas são separadas do meio aquoso (PEIXOTO, 2012).

Figura 7 - Esquema básico de um hidrociclone.



Fonte: Peixoto (2012).

Este equipamento apresenta uma entrada para a alimentação da polpa que ocorre pela lateral superior do hidrociclone, e duas saídas, sendo uma na parte inferior para o rejeito grosso ou *underflow*, e outra saída na parte superior para o material mais fino ou *overflow* (FIGUEIREDO, 2007).

Segundo Carvalho (2017), dentro do equipamento, ocorre uma separação das partículas mais densas das menos densas por gravidade a alta pressão sob a ação do movimento centrífugo devido a alimentação tangencial, pois esta gera um forte movimento em espiral descendente da polpa dentro do ciclone. Uma parte do líquido que contém as partículas da fração fina é descartada através de um tubo cilíndrico chamado de coletor de *overflow* ou *vortex finder*, fixado no topo do hidrociclone. As partículas grossas e o líquido restante deixam a parte circular do equipamento em direção à seção cônica e, posteriormente, para o orifício de *underflow*. A seção cônica dos hidrociclones tem como principal finalidade a recuperação de energia cinética para manutenção dos níveis de velocidade dentro do equipamento.

A partículas em suspensão dentro do hidrociclone, sofrem a ação de 2 forças, a aceleração gravitacional e a força centrífuga. O movimento das partículas ocorre nas direções tangencial e vertical e em sentido oposto ao das forças de arraste e centrífuga (CARVALHO, 2017).

O processo de ciclonagem tem duas funções, a primeira é retirar a água da polpa, que geralmente ocorre perto da planta de beneficiamento visando a recirculação da água no processo industrial. A segunda função é a partição granulométrica que ocorre normalmente próxima à barragem de rejeito, pois visa a utilização de rejeitos mais grosseiros na construção de barramentos (CARVALHO, 2017).

Nos processos de clarificação ou de desaguamento uma maneira de aumentar a eficiência desses equipamentos consiste em se adotar uma bateria de hidrociclones, sendo em série ou em paralelo (Figura 8). Já no sistema de disposição de rejeitos, as frações granulométricas são separadas. O *underflow* por ter uma granulometria mais grossa é utilizado na construção dos diques de barramento, enquanto o material fino, *overflow*, é lançado diretamente no reservatório para a formação de praia de rejeitos.

Figura 8 - Bateria de hidrociclones localizados na crista de uma barragem.



Fonte: Carvalho (2017).

## 2.5 Técnicas de disposição de rejeito à céu aberto

Segundo o IBRAM (2016), o método convencional de disposição de rejeito e o mais usado pelas mineradoras é o reservatório criado por diques de contenção, mais conhecido como barragens de rejeito. Mas, existem outras alternativas de disposição de rejeito a céu aberto, que também serão abordadas neste trabalho.

Para estabelecer o tipo de disposição de rejeito que irá adotar, cada empreendimento avalia de acordo com suas particularidades e características, realizando uma análise minuciosa de caracterização tecnológica dos rejeitos como ensaios laboratoriais e metodologias de investigação de campo, de modo a priorizar a segurança, preocupando em minimizar os impactos ambientais e o custo (FERNANDES, 2017).

### 2.5.1 Barragem de Contenção de Rejeito

Uma barragem é uma estrutura artificial que forma uma barreira para reter uma grande quantidade de água. Sendo assim, uma barragem de contenção de rejeito também é uma estrutura artificial, geralmente é alteado com material natural de empréstimo, estéreis da cava ou até mesmo o próprio rejeito. É construída com a função de barrar o material represado, ou seja, armazenar os resíduos considerados estéril no processo de beneficiamento de minérios (RAFAEL, 2012).

Na Lei Federal 12.334, de 20 de setembro de 2010, estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) e cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB) que “se aplica a barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais”. Esta lei define barragem como “qualquer estrutura em um curso permanente ou temporário de água para fins de contenção ou acumulação de substâncias líquidas ou de misturas de líquidos e sólidos, compreendendo o barramento e as estruturas associadas” (BRASIL, 2010).

Vianna (2015) considera que “(...) as barragens devem atender basicamente a três princípios de projeto: do controle do fluxo, da estabilidade e da compatibilidade das deformações”. Apesar da grande diversidade observada na configuração das seções transversais e nos materiais empregados, os projetos de barragens devem possuir, portanto, alguns elementos essenciais, como vedação, drenagem interna e estabilização.

Existe uma diferença fundamental no modo de construção, dependendo do tipo de barragem. Duarte (2008) salienta que as barragens convencionais são para fins de armazenamento e controle especificamente de água ou geração de energia hidroelétrica, e têm um projeto de construção homogêneo, ou seja, em uma única etapa, sendo assim, é usado um material compacto e específico

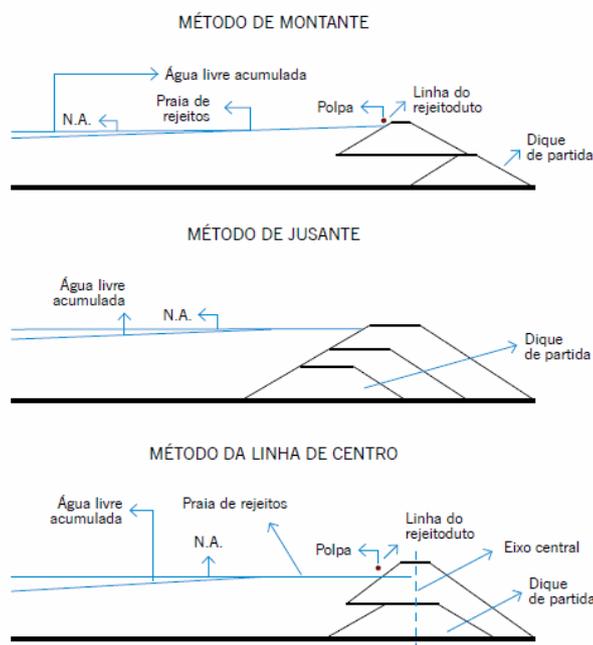
para construção de grandes estruturas. Já as barragens de rejeito apresentam um processo contínuo de construção, ou seja, a construção é feita em etapas ao longo da operação da mina e utilizam o próprio rejeito para formar o dique de contenção.

Silva Filho (2001) citado por Melo (2014, p. 7) define que as barragens de solo e/ou enrocamento são "(...) aquelas construídas com materiais naturais, tais como argilas, siltes e areias, ou com materiais produzidos artificialmente, tais como britas, enrocamentos ou rejeitos de mineração". Diante disso, neste trabalho serão abordadas especialmente as barragens de solo ou enrocamento por serem as estruturas mais comuns para o depósito de rejeitos.

Segundo Resende (2016), as características e o tipo de barragem, assim como a forma de disposição dos rejeitos, dependem do tipo dos rejeitos, ou seja, estão relacionados diretamente ao tipo de minério e ao processo empregado para o seu beneficiamento.

Os alteamentos podem assumir diferentes configurações, cada uma com suas características, especificações, vantagens e desvantagens. Os métodos de alteamentos são geralmente classificados em três classes: método por montante, método por jusante e método por linha de centro, conforme ilustrado na Figura 9. Os nomes referem-se à direção em que os alteamentos são feitos em relação ao dique inicial (LOZANO, 2006).

Figura 9 – Métodos de alteamentos por Montante, por Jusante e por Linha de Centro.



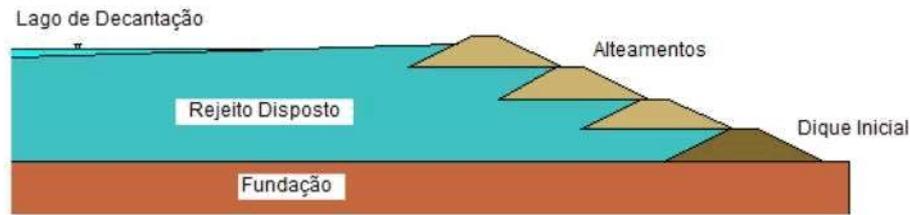
Fonte: Espósito (2000) adaptado por Duarte (2008).

#### 2.5.1.1 Método por montante

A montante é o lugar que está mais próximo das cabeceiras de um rio consiste de um ponto mais baixo para o mais alto subindo a correnteza na direção da nascente, ou seja, a nascente é o ponto mais a montante de um curso de água (SIGNIFICADOS, 2017).

Trata-se do método mais antigo, simples e econômico de construção de barragens (IBRAM, 2016), a Figura 10 ilustra uma barragem de rejeito a montante.

Figura 10 – Barragem de rejeito, método por montante.

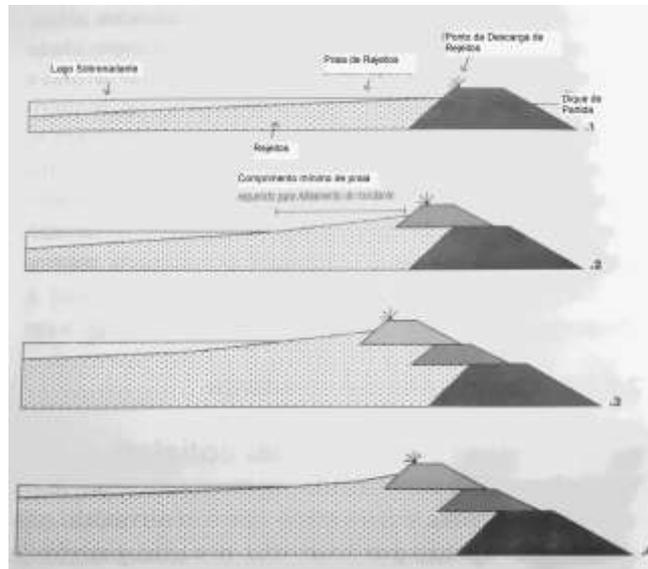


Fonte: Rafael (2012).

No manual de Gestão e Manejo de Rejeito de Mineração do IBRAM (2016), diz que a etapa inicial consiste na construção de um dique de partida. Após realizada essa etapa, a polpa é descarregada a montante do dique, ao longo do perímetro da crista, formando assim a praia de deposição. Ocorre, então, a segregação granulométrica, ficando a fração mais grossa e densa depositada próxima ao maciço e as frações mais finas e leves em suspensão, fluindo em direção ao lago de decantação, zona interna da bacia de sedimentação. Essa praia de deposição tornará à fundação e, eventualmente, fornecerá material de construção para o próximo alteamento. A inclinação das praias é normalmente de 1%, sendo assim inadequado para métodos que desejam-se obter um acúmulo considerado de água, pois esta inclinação não gera altura suficiente para uma grande retenção de água. O tamanho dos diques nos alteamentos é uma variável que depende das necessidades operacionais do processo. O dique inicial, geralmente, é sempre maior que os diques das etapas seguintes. Deste modo, o procedimento continua sucessivamente até que a cota final prevista em projeto seja atingida. A Figura 11 mostra o desenho esquemático do processo de alteamento pelo método de disposição de rejeito por montante.

É considerado mais econômico em curto prazo, mas é um método crítico em relação à segurança, pois apresenta um baixo controle construtivo (TRONCOSO, 1997 citado por IBRAM, 2016).

Figura 11 – Sequência de alteamento da barragem pelo método por montante.



Fonte: Fernandes (2017).

O agravante, neste caso, está ligado ao fato dos alteamentos serem realizados sobre materiais previamente depositados e não consolidados. Assim, sob condição saturada e estado de compactação fofo, estes rejeitos (granulares) tendem a apresentar baixa resistência ao cisalhamento e susceptibilidade à liquefação por carregamentos dinâmicos e estáticos (ARAÚJO, 2006).

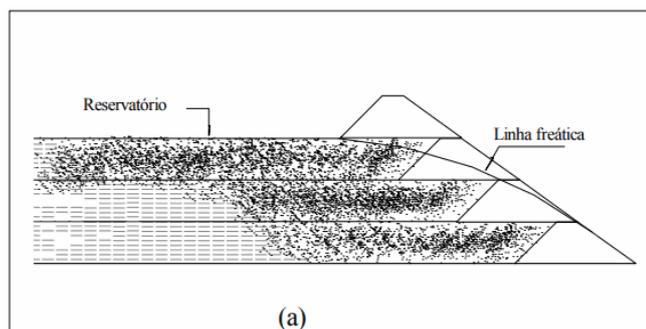
As vantagens e desvantagens desse método são destacadas no Quadro 7.

Quadro 7 - Vantagens e desvantagens do Método por Montante.

Vantagens:	Desvantagens:
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Menor custo de construção e operacional;</li> <li>• Maior velocidade de alteamento;</li> <li>• Menores volumes na etapa de alteamento;</li> <li>• Pouco uso de equipamentos de terraplenagem e pouca mão de obra.</li> <li>• Facilidade de operação;</li> <li>• Pode ser construída em topografias muito íngremes, onde o limitante principal é a área de deposição.</li> <li>• Custo relativo ao maciço relativamente baixo, pois pode-se usar solo natural, rejeito arenoso e estéreis rochosos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Menor coeficiente de segurança, em função da linha freática (Figura 12);</li> <li>• A superfície crítica de ruptura passa pelos rejeitos sedimentados, porém não devidamente compactados (Figura 13), com a probabilidade de liquefação por vibrações naturais ou por explosões e movimento de equipamentos, quando os alteamentos são realizados com os rejeitos. Isto devido à fundação dos alteamentos ser constituída de areias saturadas fofas não compactada e/ou não classificadas (rejeitos descarregados por <i>spigots</i>);</li> <li>• Há possibilidade de ocorrer entubamento, resultando no surgimento de água na superfície do talude de jusante, principalmente quando ocorre concentração de fluxo entre dois diques compactados (Figura 14), a possibilidade da ocorrência de <i>piping</i> é devido à linha freática estar muito próxima do talude da jusante e sem a devida compactação dos rejeitos, ou quando ocorre a concentração de fluxo entre dois diques compactados;</li> <li>• O rejeito total deve apresentar no mínimo 60% de areia, baixo teor de sólidos para segregação granulométrica;</li> <li>• Necessidade de controlar a formação da praia;</li> <li>• Não adequado para estocar volumes significativos de água;</li> <li>• Não adequado para área de sismicidade;</li> <li>• Restrições quando a taxa de aumento, máximo de 15m por ano;</li> </ul>

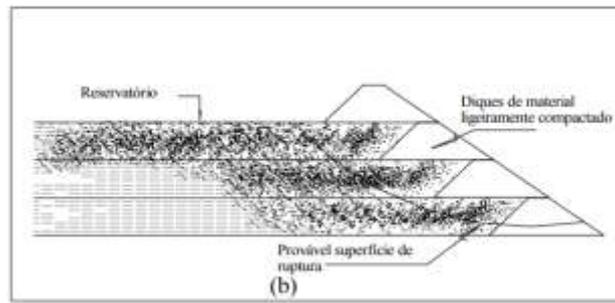
Fonte: Soares (2010), Leite (2011) e Fernandes (2017).

Figura 12 – Linha freática elevada.



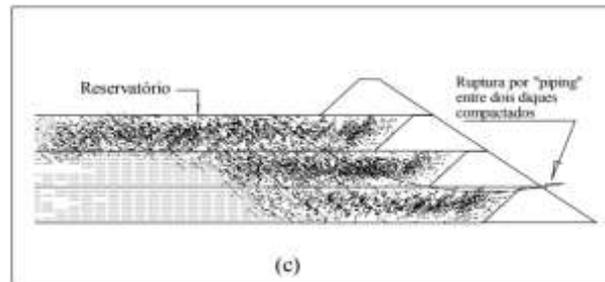
Fonte: Silveira e Reades (1973) por Lozano (2006).

Figura 13 – Superfície provável de ruptura passa pelos rejeitos.



Fonte: Silveira e Reades (1973) por Lozano (2006).

Figura 14 – Risco de ruptura por piping.



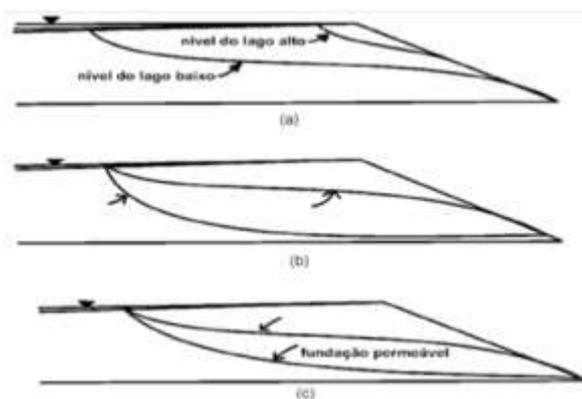
Fonte: Silveira e Reades (1973) por Lozano (2006).

Dentre os cuidados e aplicação de medidas relacionadas a esse método com o propósito de melhorar a segurança e desempenho da obra, são normalmente recomendados os cuidados a seguir (SOARES, 2010):

- I. O lançamento da polpa deve ocorrer a montante do talude do dique inicial e dos demais alteamentos.
- II. O nível de água deve ficar afastado da crista, pois é essencial evitar o acúmulo de água nessa região, adotando-se sistemas para esgotamento das águas de chuva e liberadas pela polpa.
- III. Os rejeitos carecem de ter fração arenosa, para auxiliar na drenagem e para que possibilite a segregação do material próximo à crista da barragem.
- IV. Não se recomenda esse método de alteamento em áreas que ocorram vibrações, sejam de origem tectônica (sismos naturais), provocadas por desmonte com explosivo na mina ou por passagem de veículos (sismos induzidos),
- V. As barragens não deverão ser muito altas e a velocidade de alteamento fica conforme as particularidades de cada tipo de rejeito, visto que a segurança da barragem depende da resistência mobilizável dos rejeitos, que é vinculado pelas pressões neutras, que estão relacionadas à velocidade de aumento das sobrecargas provocado pela velocidade de alteamento da barragem e pela velocidade de dissipação das pressões neutras.
- VI. A estabilidade das barragens de rejeito também é determinada pelo avanço do lago de decantação, que pode elevar a superfície do nível freático no corpo da barragem, fazendo a água atingir as partes altas do talude de jusante da barragem, possibilitando a formação do processo de entubamento (Figura 15a).
- VII. Comumente praias com baixa segregação dos rejeitos lançados, entubamento e baixa permeabilidade, podem favorecer a elevação do nível freático no corpo da barragem, sendo capaz de ocorrer algum entubamento causado pela surgência d'água no talude de jusante da barragem (Figura 15b).
- VIII. O nível freático também poderá elevar-se caso as fundações da barragem sejam impermeáveis. Sendo assim, a passagem da água ocorre apenas pelo corpo do barramento, podendo gerar o aparecimento de água no talude de jusante, o que também pode causar a formação de entubamento (Figura 15c).
- IX. É necessário atentar para o talude de jusante contra erosões provocadas pela ação de chuvas, à medida que a barragem vai sendo alteada. Nessa situação, a condução das águas é feita por meio de canaletas e caixas de passagem.

- X. É obrigatório manter a proteção superficial por cobertura vegetal. O monitoramento da obra deve ser feito durante todo o período de alteamento, prosseguindo durante a fase de desativação.

Figura 15 (a, b, c) - Posicionamento do nível freático em função das características do projeto.



Fonte: Nieble (1986) por Lozano (2006).

#### 2.5.1.2 Método por jusante

A jusante, vem do latim “*jusum*” que significa vazante, para o lado da foz, ou seja, é o fluxo normal da água, vai de um ponto mais alto para um ponto mais baixo do curso de água. Por isso, se diz que a foz é o ponto mais a jusante de um rio (SIGNIFICADOS, 2014).

Assim este método é denominado por que nos alteamentos o eixo da barragem se desloca para jusante, como ilustrado na Figura 16.

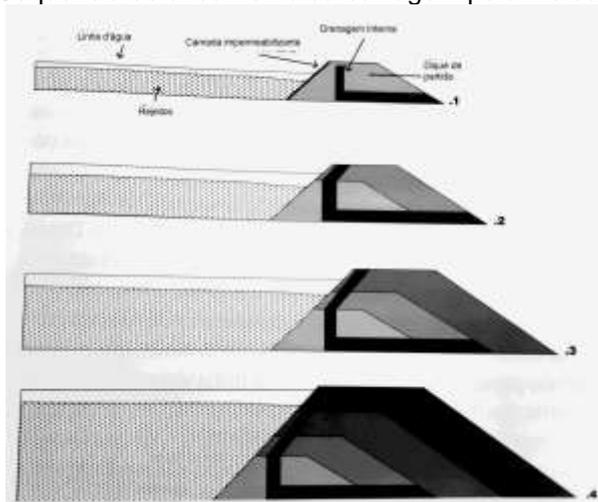
Figura 16 – Método construtivo por jusante.



Fonte: Rafael (2012).

Na etapa inicial, forma-se o dique de partida, impermeável, contendo uma drenagem interna, composto por filtro inclinado e tapete drenante, geralmente formado por solo ou enrocamento compactado. Em seguida, formam-se os alteamentos subsequentes que se deslocam a jusante do dique de partida e dão sequência até a cota final prevista em projeto, segundo ilustrado na Figura 17 (IBRAM, 2016).

Figura 17 – Sequência de alteamento da barragem pelo método por jusante.



Fonte: Fernandes (2017).

Segundo Fernandes (2017), comparando-se com o método por montante pela perspectiva geotécnica, esta é uma alternativa mais segura, pois preserva a geometria inicial do maciço, uma vez que o alteamento não ocorre em cima do material depositado, porém, em contrapartida, o volume de material movimentado para a realização do alteamento é bem superior, o que torna este o fator de maior desvantagem do método, o elevado custo relacionado ao grande volume de material movimentado para execução do aterro. Na etapa de projeto e avaliação de viabilidade do método a ser escolhido, deve-se considerar o volume de material de empréstimo que existe no local e atentar que, o volume de material necessário para o alteamento cresce de forma exponencial, ou seja, para que o projeto se torne economicamente viável o material de empréstimo do local deve ser bem apurado de forma que tenha vida útil enquanto haja o empreendimento. Este método, antagônico ao método por montante, apresenta uma eficácia maior quando há uma necessidade de acúmulo de um grande volume de água e há uma probabilidade insignificante de que ocorra uma liquefação, podendo ser adotado em zonas sísmicas e utilizar equipamentos vibratórios para a compactação dos materiais.

Nesse método, os rejeitos são hidrociclados e o underflow é lançado no talude de jusante sobre compactação e controle construtivo. Somente são utilizados os rejeitos grossos no alteamento, os quais são compactados quando as características de umidade da zona o permitem, sendo assim, um dos fatores que permite a estas barragens poderem ser projetadas para grandes alturas (SOARES, 2010).

As vantagens e desvantagens desse método foram descritas no Quadro 8.

Quadro 8 - Vantagens e desvantagens do Método Construtivo por Jusante.

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Possui uma operação simples.</li> <li>• Tem maior segurança por alteamento controlado (disposição da fração grossa dos rejeitos a jusante, sistemas de drenagem e compactação): há poucas probabilidades de <i>piping</i> e de rupturas horizontais.</li> <li>• Propicia a compactação de todo o corpo da barragem e por isso tem menor probabilidade de entubamento e de rupturas horizontais, em consequência da maior resistência ao cisalhamento;</li> <li>• Maior resistência a vibrações provocadas por sismos naturais e vibrações em razão do emprego de explosivos nas frentes de lavra, a susceptibilidade de liquefação é muito menor;</li> <li>• É eficiente para o controle das superfícies freáticas, por conter instalação de sistema contínuo de drenagem e impermeabilização.</li> <li>• O estéril proveniente da lavra pode ser utilizado, misturado nos alteamentos.</li> <li>• É adequado para qualquer tipo de rejeito e com disposição variada;</li> <li>• Adequado para retenção e acúmulo de maior volume de água;</li> <li>• Não há restrição quanto a taxa de aumento.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Custo mais elevado, devido à complexidade dos diques de partida e de enrocamento e aos sistemas de drenagem;</li> <li>• Maior volume de material a ser movimentado e compactado, principalmente nas primeiras etapas da construção.</li> <li>• Menor velocidade de alteamento;</li> <li>• Não possibilita a proteção com cobertura vegetal e tampouco drenagem superficial durante a fase construtiva;</li> <li>• Necessita-se do emprego de hidrociclones e a construção de enrocamento de pé para conter o avanço do underflow;</li> <li>• Requer a construção de dique a jusante para contenção dos materiais do underflow.</li> <li>• Exige um sistema de drenagem eficaz, pois há a probabilidade de ocorrer colmatção.</li> <li>• Em zonas de alta pluviosidade há uma certa complexidade na operação do método a jusante, pois é possível que os rejeitos possam não ser compactados adequadamente, devendo-se esperar épocas de estio para a operação de equipamentos em cima dos rejeitos.</li> </ul>

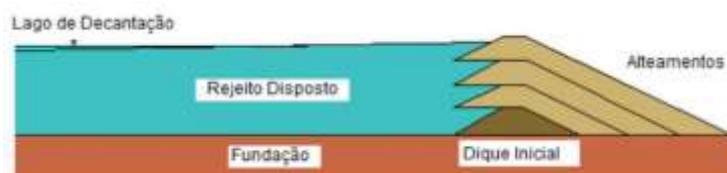
Fonte: Soares (2010), Leite (2011) e Fernandes (2017).

### 2.5.1.3 Método de Linha por Centro

Soares (2010) diz que se trata de um método intermediário entre o método por montante e por jusante, inclusive em termos de custo, e é assim chamado devido ao eixo da barragem ser mantido na mesma posição enquanto ela é elevada, mas o comportamento estrutural desse método aproxima-se mais do método por jusante.

A princípio, é construído um dique inicial e os rejeitos são lançados perifericamente a montante do mesmo, formando uma praia, como ilustrado na Figura 18. O alteamento subsequente é realizado lançando-se os rejeitos sobre a praia anteriormente formada e sobre o talude de jusante do dique de partida. Nesse processo, o eixo da crista do dique inicial e dos diques resultantes dos sucessivos alteamentos são coincidentes (SOARES, 2010), a Figura 19 apresenta o desenho esquemático do processo de alteamento deste método.

Figura 18 – Método Construtivo por Linha de Centro.

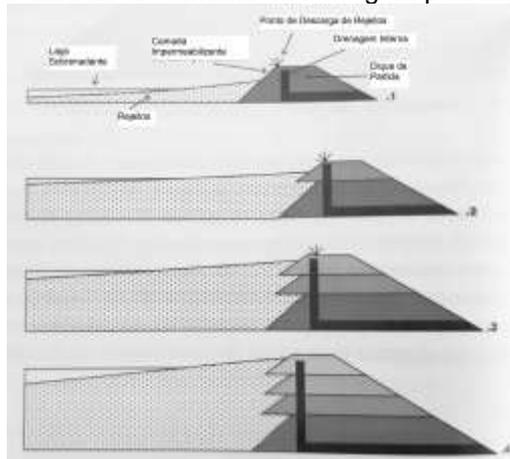


Fonte: Rafael (2012).

Esse método considera as vantagens dos métodos por montante e por jusante e deprecia as desvantagens, como exposto no Quadro 9.

Em síntese, Soares (2010) expõe que o método por montante, além de ser o mais antigo é o mais empregado na atualidade, tem menor custo e maior velocidade de alteamento. O lançamento ocorre a partir da crista por *spigots*, onde as frações grossas se depositam junto ao corpo da barragem. Já no método por jusante, considerado um dos métodos mais seguros, há uma construção de um dique inicial, com dreno interno e impermeabilização a montante e, também, uma separação dos rejeitos na crista do dique por meio de hidrociclones. No método por linha de centro, que é uma variação do método por jusante, há uma variação do volume de underflow em relação ao método por jusante.

Figura 19 – Sequência de alteamento da barragem pelo método por jusante.



Fonte: Fernandes (2017).

Quadro 9 - Vantagens e desvantagens do Método Construtivo por Linha de Centro.

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Facilidade construtiva;</li> <li>• O material para o alteamento pode vir de estéril ou do underflow dos hidrociclones;</li> <li>• Permite o controle da linha freática no talude de jusante;</li> <li>• Eixo dos alteamentos constante;</li> <li>• Redução do volume de “underflow” em relação ao método da jusante;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Operação complexa, com investimentos globais altos;</li> <li>• A área a montante é passível de escorregamentos;</li> <li>• Não permite tratamentos da superfície do talude de jusante;</li> <li>• Há necessidade do uso de hidrociclones;</li> <li>• Requer um enrocamento de pé para conter o avanço do underflow;</li> <li>• Necessidade de sistemas de drenagem eficientes e sistemas de contenção a jusante.</li> </ul>

Fonte: Soares (2010) e Leite (2011).

### 2.5.2 Empilhamento Drenado

Neste método, os rejeitos granulares são depositados sob a forma de pilhas (Figura 20) e adota-se uma estrutura drenante interna eficiente, que libera a água por meio de um sistema de drenagem interna, ou seja, este método não retém a água da polpa oriunda do processo de beneficiamento. Esta água percola através dos poros dos rejeitos que apresenta uma grande capacidade de vazão (IBRAM, 2016; PORTES, 2013).

Figura 20 - Empilhamento Drenado do Xingu, Mina de Alegria da Vale.



Fonte: Alves (2015) por Gomes, M. (2009).

O alteamento é realizado a montante com o próprio rejeito, com lançamento pela crista do dique de partida usando a técnica de aterro hidráulico. Após a conformação final do talude de jusante, é feita a drenagem superficial com canaletas e descidas d'água. Também é necessário a construção de uma estrutura de contenção na base da pilha para efeito de segurança e um aterro compactado, denominado como “*startup*”, com filtro e com aplicação por montante de rejeito de efeito que sustente o empilhamento (ALVES, 2015; FERNANDES, 2017).

Quando o rejeito a ser depositado é o produto de uma ciclonagem, pode-se lançar o *underflow*, que contém partículas mais granulares, próximo a crista da barragem, aproveitando este como material de contenção, já que ele apresenta comportamento geotécnico em termos de resistência ao cisalhamento e permeabilidade (FERNANDES, 2017).

Observa-se que o método expõe uma boa capacidade de suporte, propiciando o tráfego de equipamentos de terraplenagem para o alteamento da pilha. Por esse motivo, os rejeitos finos como a lama (*overflow*, no caso de rejeito oriundos do processo de ciclonagem) devem ser dispostos a parte, uma vez que não apresentam características geotécnicas adequadas (IBRAM, 2016; PORTES, 2013).

Em relação ao Método de Empilhamento Drenado, o IBRAM (2016) ressalta:

Este método tem sido utilizado no Brasil desde a década de 80, embora em poucos casos. É interessante notar que na Europa, surgiu recentemente a expressão “*pervious dam*” para designar um ‘novo método’ que está sendo proposto para reduzir o potencial de dano (IBRAM, 2016, p. 22).

Este método apresenta uma configuração mais segura para alteamento a montante, uma vez que proporciona uma boa drenabilidade ajudando no processo de adensamento do rejeito. Ele também apresenta um baixo risco a segurança e socioambiental, pois em caso de ruptura, como o rejeito encontra-se drenado, a massa carregada não atingirá grandes distâncias, apresentando assim um baixo potencial de dano. Afim de que o método apresente resultados eficazes é necessário sempre atentar para a granulometria no rejeito, que deverá permanecer grossa e uniforme, pois a presença de partículas finas pode afetar na drenagem do empilhamento, deixando-o saturado e interferindo na sua estabilidade (FERNANDES, 2017).

Portes (2013), apresenta os principais objetivos deste método:

- Obter um maciço não saturado e estável;
- Obter maior densidade e, portanto, maior capacidade e vida útil;
- Obter menor potencial de dano em uma eventual ruptura;
- Obter maior facilidade para o fechamento e recuperação ambiental;
- Aplicar de maneira segura o método por montante, com baixo risco de liquefação e de ruptura.

### 2.5.3 Empilhamento à Seco

O método de disposição de rejeito em empilhamento a seco, também conhecido como *dry stacking*, são rejeitos desaguados no ponto de não serem mais considerados saturados. É um dos

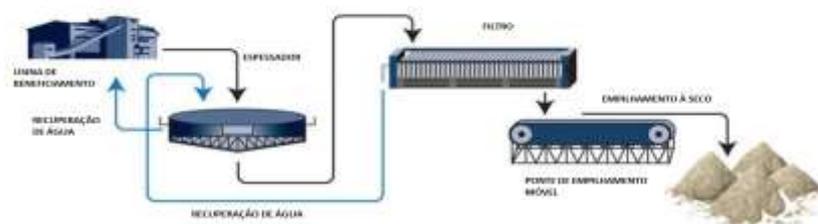
métodos mais antigo e muito utilizado pelas empresas de alumínio para disposição econômica de rejeitos de resíduo de produção de alumina (PORTES, 2013; IBRAM, 2016).

Neste método o rejeito fino (geralmente, menor que  $38\mu\text{m}$ ) é adensado em espessadores e bombeado para um reservatório onde ocorre a evaporação da umidade restante no rejeito com o teor de sólidos de aproximadamente 80% (IBRAM, 2016).

Geralmente é aplicado em áreas com espaço e recursos hídricos limitados, e em áreas nas quais condições topográficas e geotécnicas contra-indicam represas de contenção de rejeito (GOMES, A. 2016).

Esta técnica envolve outros métodos de análise, por se tratar de um material que pode desenvolver poropressões negativas (sucção) e comportamentos diferentes dos rejeitos saturados. Este rejeito contém parte de suas partículas saturadas e parte não saturada e por este motivo apresentam baixa umidade em razão disso não podem ser transportadas por bombas. O teor de umidade típico é geralmente menor que 20% que pode ser obtido pelo método de filtragem a partir de um sistema de pressão ou à vácuo (FERNANDES, 2017), na Figura 21 podemos observar o processo final de um beneficiamento que utiliza o método de disposição empilhamento a seco.

Figura 21 – Esquema representativo do processo para o empilhamento a seco.



Fonte: TAKRAF (2016).

Quando a mina tem problemas com abalos sísmicos ou uso de explosivos, deve-se atentar para um maior grau de compactação na pilha, mesmo este sendo um rejeito não saturado, por isto apresenta menos problemas com desenvolvimento de pressões neutras e liquefações (FERNANDES, 2017).

Este método pode ser aplicado em terrenos ondulados e íngremes, chegando a alcançar elevadas taxas de alteamento, devido ao estado de adensamento dos rejeitos, além de apresentar uma facilidade maior quando se trata de fechamento de mina e reabilitação do local de disposição (FERNANDES, 2017).

Carvalho (2017) cita que de acordo com Davies (2004), as principais considerações sobre o método, são:

- Preparação do local: execução do sistema de coleta e redirecionamento das águas superficiais e subterrâneas, de forma a evitar o contato da água com o rejeito, minimizando processos erosivos e geração de drenagem ácida, quando for o caso. Esta água “limpa” pode ainda ser reutilizada na planta de processo ou bombeada para uma estação de tratamento.
- Transporte e disposição de rejeitos: realizado com a utilização de correias transportadoras ou caminhões. Devido a questões de suporte de carga de fundação, para fins de trafegabilidade, e tendo em vista que o teor de umidade do rejeito filtrado pode se encontrar um pouco acima da umidade ótima de compactação, pode ser necessária a adoção de um plano operacional para disposição do rejeito, como em Cerro Lindo, Peru.
- Reutilização e fornecimento de água: um dos principais motivos que leva a adoção da técnica de disposição de rejeitos filtrados é a possibilidade recuperação de água para a planta de processos, volume este superior às demais consistência de rejeitos espessados. Esta vantagem é de extrema importância em ambientes áridos, onde a água é um recurso valioso.

O método de empilhamento a seco, também pode ser empregado para processamento e concentração magnética dos rejeitos de baixo teor, sem a utilização de água em seu beneficiamento. Esta tecnologia tem baixo custo operacional e baixo investimento. Com este processamento a seco é possível desagregar pilhas e barragens existentes, reduzindo consideravelmente seus volumes, o que evita a construção de novas barragens, e conseqüentemente, a geração de seus riscos (IBRAM, 2016).

O empilhamento a seco apresenta algumas vantagens e desvantagens quando comparados com outros métodos, como podemos observar no Quadro 10 a seguir:

Quadro 10 - Vantagens e desvantagens do Método Empilhamento a Seco.

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alta taxa na recuperação e reutilização de água;</li> <li>• Com redução do volume de outorga para água nova, item particularmente sensível em regiões com déficit hídrico;</li> <li>• O rejeito filtrado tem umidade residual baixa, geralmente de 19 - 22% de umidade, o que facilita a compactação de torta de filtro;</li> <li>• Exigência de área de terra reduzida para instalações de rejeitos de pilha seca em comparação com as instalações convencionais de armazenamento de rejeitos, por se permitir formação de pilha com ângulo de repouso superiores a 32° e dependendo das dimensões da área destinada para o descarte da torta, é possível a formação de pilhas com mais de 100 m de altura;</li> <li>• A torta gerada é facilmente manuseável e facilmente empilhável, permitindo transporte por correias de correia ou caminhões e utilização de galpões de estocagem e também a disposição em pilhas de ponta-de-aterro, onde o próprio tráfego dos caminhões ajuda a compactar o depósito;</li> <li>• Taxas de infiltração significativamente menores que as barragens convencionais;</li> <li>• Custo de instalação significativamente mais barato e tem maior facilidade para obter aprovação do órgão ambiental, por conta da eliminação de barragens;</li> <li>• O sistema de filtração/centrifugação é totalmente automatizado, exigindo apenas supervisão;</li> <li>• Após compactação da torta desaguada, forma-se uma camada extremamente impermeável, impedindo a re-suspensão dos sólidos, fato que elimina a necessidade de tratamento de efluentes líquidos originados das chuvas;</li> <li>• Todo o sistema de desaguamento (filtração/centrifugação) e empilhamento é cercado por canais de contenção e piscinas pulmão para absorção de picos de chuvas;</li> <li>• Redução drástica de substâncias solúveis que agredem o meio ambiente, como é o caso da soda cáustica na lama vermelha das refinarias de alumina – neste exemplo também cai o consumo de soda utilizada no processo bayer;</li> <li>• Redução do custo de energia consumida em bombeamentos – de rejeitos, de água nova, de água recuperada em barragens de rejeitos;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• O desempenho de filtração, semelhante ao desempenho de espessamento, está sujeito a mudanças na mineralogia do minério e características de processamento, que podem ter um impacto significativo na taxa de filtração e/ou no nível de umidade realizável;</li> <li>• Pode ser necessário incorporar equipamento adicional para variação em mineralogia, aumentando assim o capital e o custo operacional.</li> </ul>

Fonte: TAKRAF (2016) e Tessarotto (2015).

#### 2.5.4 Disposição em Cava

Esse tipo de deposição é feito em minas a céu aberto, em cavas exauridas ou onde ainda há extração de minério e não é necessária a construção de diques. Também pode ser denominado como “disposição em pit” e é uma opção pouco aplicada no setor de mineração (LOZANO, 2006; PORTES, 2013).

Refere-se a prática de lançamento de polpa de rejeitos nas cavas a céu aberto (Figura 22), com a intenção de reduzir a disposição na barragem de rejeito existente e eliminar a implantação de

nova barragem ou aumentar a vida útil da barragem existente. Esta prática traz vantagens ambientais para a barragem existente tais como: maior capacidade do reservatório da barragem; não provoca saturação do dique; menores riscos a jusante; e melhores possibilidades de revegetação no fechamento da barragem.

Figura 22 - Enchimento de cava com rejeitos provenientes da planta de

Concentração. Mina de Serra Azul, MG.



Fonte: ArcelorMittal (2016).

Para este método deve se atentar a parâmetros hidrogeológicos, pois se a rocha encaixante do minério não for consideravelmente impermeável, pode ocorrer migração de poluentes e percolação, e afim de evitar isto deve-se impermeabilizar os taludes com geomembranas ou argilas (LOZANO, 2006).

Este método apresenta vantagens e desvantagens com as apresentadas no Quadro 11.

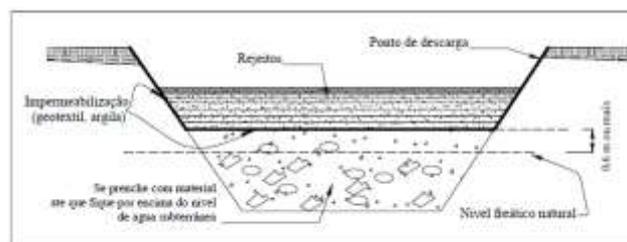
Quadro 11 – Vantagens e desvantagens do Método de Disposição em Cava.

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fácil recuperação das áreas degradadas;</li> <li>• Aplicação concomitante ao avanço da lavra,</li> <li>• Baixo impacto ambiental,</li> <li>• Redução de riscos ambientais e sociais,</li> <li>• Menor custo operacional.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• A logística de extração de minério devido à construção de estruturas de contenção de rejeitos dentro da cava,</li> <li>• Problemas de percolação e estabilidade (Vick, 1983 citado por Rafael, 2012)</li> <li>• Redução de recursos hídricos, pois permite uma recuperação maior comparada ao sistema de barragens.</li> </ul>

Fonte: Soares (2010) e Leite (2011).

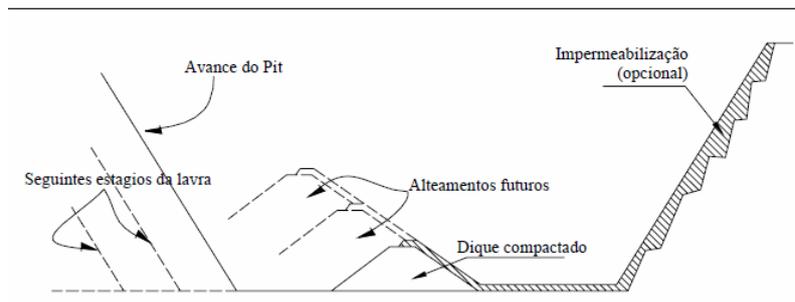
A Figura 23 apresenta os 2 tipos de deposição em cava. Na Figura 22- a) quando a extração de minério foi completa e na Figura 22- b) quando a deposição é feita ao mesmo tempo que a extração.

Figura 23 - Quando a extração de minério foi completa



Fonte: Lozano (2006).

Figura 24 - Quando a deposição é feita ao mesmo tempo que a extração.



Fonte: Lozano (2006).

### 2.5.5 Disposição Conjunta – Co-disposição e Disposição Compartilhada

Com a crescente dificuldade de liberação de novas áreas para a disposição final dos resíduos de mineração, por parte dos órgãos ambientais, uma alternativa consideravelmente viável seria integrar a disposição de rejeitos e estéreis num mesmo espaço físico, porém quase não se encontra registro dessa aplicação no Brasil (PEIXOTO, 2012).

Quando a mistura rejeito-rejeito ou rejeito-estéril é realizada antes ou durante a deposição no próprio ambiente define-se como co-disposição. Já disposição compartilhada define-se quando os materiais estéreis e os rejeitos são dispostos no mesmo espaço físico, sem precisar misturá-los (RODRIGUES, 2017).

Na co-disposição, visando uma melhoria na resistência e permeabilidade dos produtos finais, busca-se agregar resíduos de características geotécnicas diferentes por meio da disposição de rejeitos finos com estéreis de granulometria mais grosseira, resultantes do decapeamento da mina, possibilitando a formação de uma matriz fechada da mistura final (PEIXOTO, 2012).

Segundo Figueiredo (2007) existem várias técnicas de se realizar a co-disposição de estéreis e rejeitos, como:

- Disposição do rejeito em pontos específicos no depósito de estéril, em pequenas lagoas e diques de contenção dentro do depósito, formando pequenas camadas na pilha de estéril;
- Mistura do estéril e rejeito, durante as atividades de processamento e transporte (caminhões e/ou correias transportadoras) ou por mistura no próprio depósito de estéril, gerando um material homogêneo;
- Injeção dos rejeitos, após seu desaguamento e espessamento, sob a forma de pasta, diretamente no depósito de estéril, através de furos de injeção;
- Disposição do rejeito em camadas finas, diretamente no depósito de estéril, de maneira que o rejeito se infiltre na pilha, até secagem, para que, posteriormente, esta camada seja novamente coberta com material estéril.

No Quadro 12, Rodrigues (2017) apresenta as vantagens e desvantagens dos métodos de co-disposição e no Quadro 13, as vantagens e desvantagens do método de disposição compartilhada.

Quadro 12 - Vantagens e desvantagens do método de Co-disposição.

Vantagem	Desvantagem
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Redução de volume – melhoria das características geotécnicas e de densidade da mistura de rejeitos;</li> <li>• Redução de volume – melhoria das características geotécnicas e de densidade da mistura de rejeitos mais estéreis;</li> <li>• Melhoria das características de resistência e de deformabilidade quando os resíduos misturados possuem granulometria muito diferentes;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Necessidade de maiores cuidados no projeto e de controle durante a operação do sistema;</li> <li>• Possibilidade de comprometimento das características de resistência e de deformabilidade quando resíduos muito finos são misturados a resíduos grossos em grandes proporções;</li> <li>• Comprometimento ambiental quando um dos rejeitos for quimicamente ativo ou tóxico.</li> </ul>

<ul style="list-style-type: none"> <li>• Redução de comprometimento ambiental de áreas para disposição de resíduos;</li> <li>• Recuperação de área minerada.</li> </ul>	
---	--

Fonte: Rodrigues (2017).

Quadro 13 - Vantagens e desvantagens do método de Disposição Compartilhada.

Vantagem	Desvantagem
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aproveitamento de áreas já utilizadas anteriormente para disposição de rejeitos ou de estéreis (estéreis lançados sobre bacias exauridas de rejeito ou rejeitos lançados sobre platôs de pilhas de estéreis);</li> <li>• Redução de comprometimento ambiental de áreas para disposição de resíduos;</li> <li>• Recuperação de áreas minerada.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Necessidade de maiores cuidados no projeto e de controle durante a operação do sistema;</li> <li>• Comprometimento ambiental quando um dos resíduos for quimicamente ativo ou tóxico.</li> </ul>

Fonte: Rodrigues (2017).

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nessa seção serão apresentados e discutidos os resultados obtidos a partir do presente estudo.

Sabe-se que a mineração é uma importante fonte de renda para o Brasil, principalmente para o setor primário da economia, visto que o subsolo brasileiro apresenta um grande e rico depósito mineral, como ouro, minério de ferro, cobre, alumínio, nióbio e outros. Minerais que são matérias-primas e transformados em produtos indispensáveis para o avanço tecnológico e da sociedade.

Mas mesmo com todo benefício econômico e financeiro, a mineração também deixa sua marca negativa com os impactos socioambientais gerados. Uma vez que, para ocorrer a exploração mineral há a necessidade de supressão de grandes áreas de vegetação e escavações para retirada do minério, o que resulta em uma grande movimentação de estéril e minério.

Com o avanço da tecnologia e da expansão das empresas, transcorre uma crescente exploração de matéria-prima para suprir a demanda mundial. Com isso, formaram-se órgãos e sistemas de gestão ambiental que tem como objetivo garantir a sustentabilidade, ou seja, fiscalizar o uso de práticas e métodos das empresas que se empenham em mitigar os efeitos negativos causados pela mineração.

O termo sustentabilidade é muito aplicado atualmente, pois é através dele que as pessoas buscam metodologias para definir ações, soluções e planos que visam a exploração consciente e inteligente dos recursos naturais que são preservados para as gerações futuras, ou seja, a sustentabilidade concorda com o desenvolvimento econômico e material desde que sem agredir ao meio ambiente.

Como os resíduos gerados pelas atividades de mineração são um dos grandes e principais impactos negativos causados, estes merecem atenção no que tange o seu correto manuseio e destinação. Desde o acontecimento do rompimento da Barragem da Samarco em novembro de 2015, pesquisadores, técnicos e engenheiros buscam por meios de armazenar o estéril e o rejeito de uma forma mais segura, levando em consideração a influência no tipo de estéril e rejeito, e seu beneficiamento, na forma e parâmetros exigidos na construção do método, entre outros. Para isto começaram a desenvolver melhorias nas metodologias alternativas à disposição em barragens de rejeito.

E através de um comparativo entre os métodos de disposição de rejeito de mineração podemos observar neste trabalho as vantagens e desvantagens de cada método abordado, enfatizando no Quando 15 um resumo do comparativo com os principais atributos que influenciam na escolha de um método, como: maior segurança das estruturas a curto e longo prazo gerando assim um menor risco de acidente; os riscos socioambientais que causam ou podem causar; custo operacional (OPEX), o custo inicial com infraestrutura e investimento (CAPEX) e a taxa de recuperação de água que cada sistema apresenta.

Quadro 15 – Quadro comparativo dos métodos de disposição de rejeito com as principais características que podem influenciar na sua escolha de um método.

Nome do Método	Risco de Acidentes	Risco Socioambiental	Custo Operacional	Custo Inicial	Recuperação da Água	Total
Barragem - Método por montante		↑			10	45
Barragem - Método por jusante		↑			10	45
Barragem - Método por Linha de centro		↑			10	40
Empilhamento Drenado					15	65
	↑					
Empilhamento a seco				↑	15	55
	↑					
Disposição em Cava				↑	10	55
	↑					
Disposição Conjunta e Co-disposição					5	45

Fonte: a autora (2018).

Legenda:

	5 pontos - alto		10 pontos - médio		15 pontos - baixo		Muito alto ou muito baixo
---	-----------------	---	-------------------	---	-------------------	---	---------------------------

No quadro 15 podemos observar que o método comparativo utilizado, foi por tiras, indicando que se for alto, equivalente a cor vermelha, vale apenas 5 pontos pois é algo que gera um impacto negativo, se for amarelo, é de nota intermediária, pontuação 10, gera impactos, porém apresenta pontos positivos e relevantes a serem analisados e o verde, apresenta a melhor nota, 15, pois se destaca no quesito avaliado, apresentando bons resultados e poucos ou nenhum impacto. Apenas no parâmetro “Recuperação de Água” que foram considerados apenas nota como método de avaliação. E quando o item analisado apresenta a marcação com a seta, ↑, este indica que está acima da média, aprontando que se destaca sendo muito alto ou muito baixo comparado com outros métodos e características.

Analisando o quadro, ao compararmos os métodos de barragem de rejeito por alteamento por montante, por jusante e por linha de centro, observamos que a taxa de recuperação mantém-se na mesma proporção pros três tipos de alteamento e apresentam um risco socioambiental muito alto já que seu rejeito é totalmente saturado, mas o método por alteamento por montante apresenta maiores riscos de acidente e conseqüentemente, socioambiental, apesar de apresentar um custo inicial considerado médio e um custo de operação baixo, por necessitar de uma pouca movimentação de

material para alteamento, comparado aos métodos por jusante e por montante. Sendo assim, mesmo o método por jusante tendo a mesma classificação que o método por montante, do ponto de vista ambiental, ele se destaca por apresentar características de um método mais seguro, com menor risco de acidente que o método por montante.

O empilhamento drenado e o empilhamento a seco, apresentam o custo operacional de médio a elevado, devido a necessidade da separação sólido líquido, obtendo no processo final uma alta taxa de recuperação de água e rejeitos menos saturados. O método de empilhamento a seco requer um investimento um pouco mais elevado devido a aquisição de equipamentos como espessadores e/ou filtros. Como seus rejeitos não são saturados, este método apresenta um risco de acidentes muito baixo, sendo assim, seu risco socioambiental também é baixo, por não apresentarem características que os levam a movimentar a longa distância.

A disposição de rejeitos em cavas exauridas apresenta risco de acidentes muito baixo, por ser um método altamente seguro, e um baixo risco socioambiental. Seu custo operacional é considerado médio, devido algumas necessidades e particularidades de algumas mineradoras, e neste quadro ele se apresenta inviável em certos empreendimentos devido ao alto investimento inicial, sendo calculado pelo transporte entre a planta de beneficiamento e as cavas. Além de apresentar alta taxa de evaporação e infiltração, o que leva a depender de parâmetros hidrogeológicos também, onde a rocha encaixante do minério deverá ser consideravelmente impermeável. Esta água que se infiltra pelas cavas exauridas, se torna um fator positivo quando o rejeito não apresentar características químicas que prejudiquem a qualidade da água subterrânea, uma vez que esta infiltração recarregará o lençol freático.

O método de disposição conjunta e co-disposição, mantém-se na média em todos os parâmetros avaliados, mostrando-se com apenas uma baixa recuperação de água. Um método não muito seguro e que se apresenta com risco de acidentes por necessitar de cuidados no projeto e de controle durante a operação.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com este trabalho, foi possível perceber o quão importante é a mineração para o desenvolvimento tecnológico. Os minerais são as matérias-primas nas linhas de produção. Com isso, constata-se a grande necessidade da extração dos minerais, aliada ao aumento da geração de rejeitos e, conseqüentemente, a preocupação ambiental, uma vez que se trata de recursos não renováveis.

A pesquisa possibilitou um maior conhecimento sobre os tipos de rejeito gerado pela mineração e algumas classificações de técnicas de disposição de rejeito, suas características, vantagens e desvantagens, riscos e deficiências. Também verificamos que o método brasileiro preferencialmente adotado para a disposição de rejeito são as barragens de contenção de rejeito de mineração.

Por fim, ao avaliar e comparar os métodos citados, verificou-se que o método de empilhamento drenado se demonstra com resultado claramente positivo, pois pode ser considerado um exemplo concordante no gerenciamento de riscos, com baixo risco de acidente, por conseguinte, baixa probabilidade de gerar impactos socioambientais, pois seus rejeitos não são saturados e não atingirão grandes distâncias caso haja algum rompimento. Uma alta taxa de recuperação e recirculação de água na planta de beneficiamento, diminuindo o gasto com água no processo de beneficiamento. Com custos de operações regulares, que poderá atender a maioria dos empreendimentos de forma que não inviabiliza a operação, mas apresenta-se com em desvantagem quando trata-se de custo inicial, que é um investimento médio-alto, por necessitar de equipamentos e uma infraestrutura adequada para a separação sólido líquido.

## REFERÊNCIAS

ALVES, Henrique Oliveira. **Estudo Comparativo de Duas Técnicas de Lavra em Barragem de Rejeito Sob o Ponto de Vista Geotécnico**. UFMG: Curso De Mestrado Em Geotecnia E Transportes. Belo Horizonte. 2015. Disponível em: <<https://www.ufmg.br/pos/geotrans/images/stories/diss-055.pdf>>. Acesso em 13 set. 2018.

ARAÚJO, Cecília Bhering. **Contribuição ao Estudo do Comportamento de Barragens de Rejeito de Mineração de Ferro**. UFRJ: Programas de Pós-Graduação de Engenharia. Rio de Janeiro, 2006. Disponível em: <

[http://wwwp.coc.ufrj.br/teses/mestrado/geotecnia/2006/Teses/ARAUJO\\_CB\\_06\\_t\\_M\\_geo.pdf](http://wwwp.coc.ufrj.br/teses/mestrado/geotecnia/2006/Teses/ARAUJO_CB_06_t_M_geo.pdf) >. Acesso em 18 abr. 2018.

**BRASIL. Lei 12.334, de 20 de setembro de 2010.** Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais, cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens e altera a redação do art. 35 da Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, e do art. 4º da Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000. Diário Oficial da União, Brasília, 20 set. 2010. Disponível em: <[https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/lei/l12334.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12334.htm)>. Acesso em 9 maio 2015.

CARVALHO, Wesley Durval Soares de. **Sistema De Disposição Compartilhada De Estéreis E Rejeitos Desaguados Da Mina De Fernandinho.** Ouro Preto: Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da UFOP. 2017. Disponível em: <[https://www.nugeo.ufop.br/uploads/nugeo\\_2014/teses/arquivos/sistema-de-disposicao-compartilhada-de-estereis-e-rejeitos-desaguados-da.pdf](https://www.nugeo.ufop.br/uploads/nugeo_2014/teses/arquivos/sistema-de-disposicao-compartilhada-de-estereis-e-rejeitos-desaguados-da.pdf)> Acesso em 15 set. 2018.  
CNRH (CONSELHO NACIONAL DE RECURSOS HÍDRICOS) Ministério do Meio Ambiente. Publicada no dou em 04/07/02 Resolução nº 22, de 24 de maio de 2002. Disponível em <<http://www.ceivap.org.br/ligislacao/Resolucoes-CNRH/Resolucao-CNRH%2022.pdf>> Acesso em 10 maio 2017.

DNPM (DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL) Portaria nº 12, NRM nº 19, de 22 de janeiro de 2002. Disposição de estéril, rejeito e produto. Disponível em: <<https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=184542>>. Acesso em 27 nov 2017.

DUARTE, Anderson Pires. **Classificação das barragens de contenção de rejeitos de mineração e de resíduos industriais no estado de minas gerais em relação ao potencial de risco.** UFMG. Belo Horizonte. 2008.

FERNANDES, Rafaela Baldi. **Manual para elaboração de planos de ação emergencial para barragens de mineração.** Belo Horizonte: Rem: Ver Instituto Minere. 2017. Livro.

FIGUEIREDO, Marcelo Marques. **Estudo de Metodologias Alternativas de Disposição de Rejeitos para a Mineração Casa de Pedra – Congonhas/Mg.** Dissertação de Mestrado. Mestrado Profissional em Engenharia Geotécnica da UFOP. Ouro Preto. 2007.

GUIMARÃES, Nilton C. **Filtragem de Rejeitos de Minério de Ferro Visando a sua Disposição em Pilhas.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte: 2011.

GOMES, Marco Antônio. **Caracterização tecnológica no aproveitamento do rejeito de minério de ferro.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2009.

GOMES, Ana Claudia Franca. **Estudo de aproveitamento de rejeito de mineração.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – UFMG, Belo Horizonte, 2016.

IBRAM (INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO) **Gestão e Manejo de Rejeito de Mineração.** Brasília. 2016. Disponível em < <http://www.ibram.org.br/sites/1300/1382/00006222.pdf>> Acesso em 19 ou 2017.

LARA, A. F. M. **Espessamento e transporte de pasta mineral.** 2011. Curso de Especialização Em Engenharia De Recursos Minerais CEERMIN. Disponível em: < <http://www.ceermin.demin.ufmg.br/monografias/50.PDF>>. Acesso em 19 maio 2018.

LEITE, Wanderson Pereira. **Recuperação e Recirculação de Água no Processamento Mineral.** (Monografia) Curso de Especialização em Engenharia de Recursos Minerais – CEERMIN. 2011.

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

[http://www.repositorio.ufop.br/bitstream/123456789/2246/1/DISSERTA%C3%87%C3%83O\\_Retroan%C3%A1liseForma%C3%A7%C3%A3oDep%C3%B3sito.pdf](http://www.repositorio.ufop.br/bitstream/123456789/2246/1/DISSERTA%C3%87%C3%83O_Retroan%C3%A1liseForma%C3%A7%C3%A3oDep%C3%B3sito.pdf) >. Acesso em 07 nov 2017.

LOZANO, Fernando Arturo Erazo. **Seleção dos Locais para Barragens de Rejeito usando o Método de Análise Hierárquica**. Escola Politécnica da Universidade do Estado de São Paulo. São Paulo. 2006.

LUZ, A. B., LINS, F. A. F. Capítulo 1 – Introdução ao Tratamento de Minérios. [A. do livro] Adão Benvindo da Luz, João Alves Sampaio e Sílvia Cristina Alves França. **Tratamento de Minérios**. 5. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. Disponível em: <<http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/712/3/CCL00220010.pdf> > Acesso em 10 maio 2017.

MELO, Alexandre Vaz de. **Análises de risco aplicadas a barragens de terra e enrocamento: estudo de caso de barragens da Cemig GT**. 2014. Dissertação (mestrado) Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia. Disponível em: <<http://text-br.123dok.com/document/oz1oweq9-analises-de-risco-aplicadas-a-barragens-de-terra-e-enrocamento-estudo-de-caso-de-barragens-da-cemig-gt.html>>. Acesso em 10 maio 2017.

MENDES, Júlia Castro, **Quais as alternativas para barragens de rejeito?** Professora Mestre, em Engenharia Civil. 2016. Disponível em <<https://blogreciclos.wordpress.com/2016/04/18/quais-as-alternativas-as-barragens-de-rejeito/comment-page-1/>> Acesso em 29 de abril de 2018.

Minas Jr. Consultoria Mineral. **Barragens de Rejeitos: Métodos alternativos**. 2017. Disponível em: <<http://www.minasjr.com.br/barragens-de-rejeitos-metodos-alternativos/>> Acesso em 3 nov 2017

PENNA, D. C. R.; ARAGAO, G. A. S.; FUSARO, T. C. **Complementariedade entre o monitoramento e análises de risco na gestão da segurança de barragens**. In: XXX Seminário Nacional de Grandes Barragens, 2015, Foz do Iguaçu. XXX Seminário Nacional de Grandes Barragens, 2015. Disponível em: <[http://http://www.cbdb.org.br/xxxsngb/download/trabalhos\\_tecnicos/tema113/COMPLEMENTARIEDADE%20ENTRE%20O%20MONITORAMENTO%20E%20AN%C3%81LISES%20DE%20RISCO%20NA%20GEST%C3%83O%20DA%20SEGURAN%C3%87A%20DE%20BARRAGENS.pdf](http://http://www.cbdb.org.br/xxxsngb/download/trabalhos_tecnicos/tema113/COMPLEMENTARIEDADE%20ENTRE%20O%20MONITORAMENTO%20E%20AN%C3%81LISES%20DE%20RISCO%20NA%20GEST%C3%83O%20DA%20SEGURAN%C3%87A%20DE%20BARRAGENS.pdf)> . Acesso em 01 maio 2017.

PEIXOTO, Cláudio Lineu Pereira. **Proposta de nova metodologia de desaguamento de rejeitos em polpa**. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Ouro Preto, Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas. Ouro Preto, 2012. Disponível em: <[http://www.repositorio.ufop.br/bitstream/123456789/2856/1/DISSERTA%C3%87%C3%83O\\_PropostaNova%20Metodologia.PDF](http://www.repositorio.ufop.br/bitstream/123456789/2856/1/DISSERTA%C3%87%C3%83O_PropostaNova%20Metodologia.PDF) >. Acesso em: 07 nov 2017

PORTES, A. M. C. **Avaliação da disposição de rejeitos de minério de ferro nas consistências polpa e torta**. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia. 2013. Disponível em: <<https://www.ufmg.br/pos/geotrans/images/stories/diss023.pdf>>. Acesso em: 07 nov 2017

RAFAEL, Herbert Miguel Angel Maturano Rafael. **Análise do Potencial de Liquefação de uma Barragem de Rejeito**. Dissertação de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. PUC – Rio. Rio de Janeiro. 2012.

RESENDE, Tamires Gomes. **A Importância da Gestão de Riscos num Projeto de Mineração – Barragem de Rejeito**. (Monografia). Curso de Graduação em Engenharia de Minas. UEMG - Universidade Estadual de Minas Gerais. João Monlevade. Minas Gerais. 2016.

RODRIGUES, André Buttros. **Riscos da Disposição de Rejeitos da Mineração e Técnicas Alternativas de Disposição**. Monografia. Departamento de Engenharia de Minas. Ouro Preto. 2017.

SIGNIFICADOS.COM. O site dos Significados é um repositório de significados, conceitos e definições sobre os mais variados assuntos. Explicamos o que é, o que significa e o que quer dizer cada coisa.- Biblioteca online. Disponível em <<https://www.significados.com.br/>> acesso em 08 abril 2017.

SILVA, Ana Paula Moreira; VIANA, João Paulo; CAVALCANTE, André Luiz. **Resíduos Sólidos na Atividade de Mineração**. Ipea. 2012. Disponível em <[http://www.cnrh.gov.br/projetos/pnrs/documentos/cadernos/11\\_CADDIAG\\_Res\\_Sol\\_Minerao.pdf](http://www.cnrh.gov.br/projetos/pnrs/documentos/cadernos/11_CADDIAG_Res_Sol_Minerao.pdf)> Acesso em 22 de novembro de 2017.

SILVEIRA, Marina Duque. **Utilização de resíduos de mineração na construção civil**. UFMG: Escola de Engenharia, Departamento de Engenharia de Materiais e Construção. Curso de Especialização em Construção Civil. 2015. Disponível em <[http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/bitstream/handle/1843/BUBD-A2SHGH/marina\\_duque\\_silveira\\_utiliza\\_o\\_de\\_residuos\\_de\\_minera\\_o\\_na\\_constru\\_o\\_civil\\_cecc\\_ufmg\\_jan15.pdf?sequence=1](http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/bitstream/handle/1843/BUBD-A2SHGH/marina_duque_silveira_utiliza_o_de_residuos_de_minera_o_na_constru_o_civil_cecc_ufmg_jan15.pdf?sequence=1)>. Acesso em 24 set 2017.

SOARES, Lindolfo. **Barragem de Rejeito**. CETEM: Coordenação de Processos Mineraiis – COPM. Rio de Janeiro. 2010. Disponível em <<http://mineralis.cetem.gov.br:8080/bitstream/cetem/769/1/CCL00410010.pdf>> Acesso em 06 nov 2017.

SOUSA, Patrícia Andrade. **Espessamento de Polpas**. UFMG: Departamento de Engenharia de Minas. Minas Gerais. 2012. Disponível em <<http://www.ceermin.demin.ufmg.br/monografias/18.PDF>> Acesso em 21 nov. 2017.

TAKRAF, Apresentação do grupo TAKRAF Tenova de equipamentos e serviços, Belo Horizonte, Minas Gerais. 2017. Material disponibilizado pela empresa em CD-ROM.

TESSAROTTO, C. Exceltech Engenharia Ltda. **Empilhamento A Seco Para Rejeitos De Processos Mineraiis (Dry Stacking)**. XXVI Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa, Poços de Caldas, Minas Gerais. 2015. Disponível em <[https://artigos.entmme.org/download/2015/separa%C3%87%C3%83o\\_s%C3%93lido-l%C3%8Dquido/TESSAROTTO,%20C.%20-%20EMPILHAMENTO%20A%20SECO%20PARA%20REJEITOS%20DE%20PROCESSOS%20MINERAIIS%20\(DRY%20STACKING\).pdf](https://artigos.entmme.org/download/2015/separa%C3%87%C3%83o_s%C3%93lido-l%C3%8Dquido/TESSAROTTO,%20C.%20-%20EMPILHAMENTO%20A%20SECO%20PARA%20REJEITOS%20DE%20PROCESSOS%20MINERAIIS%20(DRY%20STACKING).pdf)> Acesso em 20 nov. 2018.

VIANNA, Luiz Filipe Venturi. **Metodologias de análise de risco aplicadas em planos de ação de emergência de barragens**: auxílio ao processo de tomada de decisão. Mestrado em Geotecnia E Transportes. Escola de Engenharia da UFMG. Belo Horizonte. 2015.

WILLINGHOEFER, Matheus. **Avaliação do risco de rompimento da barragem de uma pequena central hidrelétrica na bacia do rio do peixe**. Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC. 2015.