

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE
TECNOLOGIA DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA QUÍMICA

AVALIAÇÃO DAS CAUSAS, IMPACTOS E ALTERNATIVAS
RELACIONADOS AO ROMPIMENTO DE BARRAGENS
CONVENCIONAIS NA INDÚSTRIA DE MINERAÇÃO

Maria Vitoria Libarino Reis

Trabalho de Graduação apresentado ao
Departamento de Engenharia Química da
Universidade Federal de São Carlos

Orientador: Prof. André Bernardo

São Carlos – SP

2022

BANCA EXAMINADORA

Orientador: André Bernardo, DEQ/UFSCar

Convidado: Rosineide Gomes da Silva Cruz, DEQ/UFSCar

Professor da Disciplina: Mônica Lopes Aguiar, DEQ/UFSCar

Trabalho de Graduação apresentado no
dia _____ de _____ de
_____ perante a seguinte
banca examinadora:

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, Edinalva e Josenildo pelo incentivo e imensurável apoio ao longo dessa caminhada. Obrigada por serem meu alicerce.

Sou grata também aos meus irmãos, Patrique e Rhuan, pelo carinho e cuidado que sempre tiveram comigo, e aos meus sobrinhos Maria Eduarda, João Guilherme e Ísis, que mesmo longe foram motivo de alegria e renovação de forças.

Aos amigos que São Carlos me deu, e que viveram comigo as maiores alegrias e dificuldades dessa jornada nos últimos 5 anos. Eder, Juliana, Matheus, Paulo, Leonardo e Mariana, quero levar vocês para vida.

Aos meus amigos veteranos de curso, André, Kelly e Vitória, sou muito grata por nossos caminhos terem se cruzado.

À minha irmã de alma Hiasminni, por ser minha confidente e melhor amiga.

Agradeço também a todos os meus familiares, que mesmo a quilômetros de distância nunca deixaram de se fazer presentes.

À família Barros Maciel, por todo acolhimento e carinho nos últimos anos.

A todos da equipe Visagio com quem tive a chance de trabalhar, por todo apoio e incentivo nesta reta final.

Sou grata à UFSCar pela oportunidade proporcionada de cursar uma universidade pública de qualidade, e a todos os professores que de alguma forma contribuíram para minha formação, em especial ao meu professor orientador André Bernardo pelo apoio na elaboração deste trabalho.

Por último, sou grata à vida, pela possibilidade de realizar meus sonhos com saúde, e todo apoio emocional, financeiro e espiritual necessário.

RESUMO

Os atuais acontecimentos relacionados ao rompimento de barragens de rejeitos de mineração, potencializados pela forte ocorrência de chuvas nas regiões brasileiras onde elas estão localizadas, tornaram emergente a necessidade de se avaliar os impactos ambientais e socioeconômicos gerados, além de se estudar alternativas para a atividade de mineração no país. Ações vêm sendo realizadas pela mineradora Vale para reparação dos danos causados pelo rompimento da Barragem de retenção de resíduos na cidade de Brumadinho-MG, desastre ocorrido em janeiro de 2019. O Acordo firmado pela Vale e o Governo de Minas Gerais foi negociado em R\$ 37,68 bilhões de reais, destinados a projetos de reparação socioeconômica e socioambiental. Com a busca do mercado externo, especialmente da China, por minério de ferro com maior qualidade, surge a necessidade de extração de minérios com alto teor de ferro e maior profundidade de exploração, resultando em uma maior produção de rejeitos. As empresas mineradoras vêm então buscando alternativas para disposição destes rejeitos, de forma a reduzir os impactos e riscos gerados pela utilização de barragens convencionais. No presente trabalho, através de uma revisão bibliográfica, foram apresentados os fenômenos apontados como possíveis causas para o rompimento de barragens. Especificamente, foram avaliados os fenômenos de liquefação, *piping* e galgamento, apontados como as principais causas para o colapso destas estruturas. Estudou-se, ainda, os processos de beneficiamento do minério e de empilhamento e aproveitamento de rejeitos, associados ao cenário atual da indústria de mineração. Em função da necessidade de mitigação dos riscos associados às barragens já existentes, este trabalho visou ainda, contribuir com o estudo dos planos de monitoramento e controle de riscos voltados para estas obras. Através dos estudos realizados, foi possível verificar a aderência atual das indústrias de mineração às alternativas de baixo custo para disposição de rejeitos, e como estas não são as melhores a longo prazo nos quesitos de segurança e sustentabilidade. Observou-se também, a falta de estudos no ramo da engenharia química que possam contribuir com o desenvolvimento do setor de mineração, tanto na etapa de beneficiamento do minério como nas etapas modelagem dos aspectos fluidodinâmicos de uma barragem de contenção de rejeitos, sendo estes aspectos sugeridos para aprofundamento e discussão em futuros trabalhos.

Palavras-chave: Barragens de rejeito, Rompimento, Impactos ambientais, Alternativas

ABSTRACT

The current events related to the rupture of mining tailings dams, potentiated by the heavy rainfall in the Brazilian regions where they are located, have made the need to assess the environmental and socioeconomic impacts generated, in addition to studying alternatives for the mining activity in the country. Actions have been taken by the mining company Vale to repair the damage caused by the rupture of the waste retention dam in the city of Brumadinho-MG, a disaster that occurred in January 2019. The Agreement signed by Vale and the Government of Minas Gerais was negotiated in R\$ 37.68 billion of reais, earmarked for socio-economic and socio-environmental repair projects. With the search in the foreign market, especially China, for higher quality iron ore, there is a need to extract ores with high iron content and greater depth of exploration, resulting in a greater production of tailings. Mining companies have been looking for alternatives for the disposal of these tailings, in order to reduce the impacts and risks generated by the use of conventional dams. In the present work, through a bibliographic review, the phenomena identified as possible causes for the rupture of dams were presented. Specifically, the phenomena of liquefaction, piping and overtopping, identified as the main causes for the collapse of these structures, were studied. The processes of ore beneficiation and the stacking and use of tailings were also assessed, associated with the current scenario of the mining industry. Due to the need to mitigate the risks associated with current dams, this work also aimed to contribute to the study of risk monitoring and control plans aimed at these works. Through the studies carried out, it was possible to verify the current adherence of the mining industries to low-cost alternatives for the disposal of tailings, and how these are not the best in the long term when evaluated safety and sustainability aspects. It was also observed the lack of studies in the field of chemical engineering that can contribute to the development of the mining sector, either in ore beneficiation stage or in the modeling stages of fluid dynamic aspects of a tailing containment dam, being these aspects suggested for deepening and discussion in future works.

Key-words: Tailings dams, Failure, Environmental impacts, Alternatives

SUMÁRIO

Banca Examinadora.....	I
Dedicatória.....	II
Agradecimentos.....	III
Resumo.....	IV
Abstract.....	V
Lista de Figuras.....	VI
Lista de Tabelas e Quadros.....	VII
Nomenclatura.....	VIII
1- INTRODUÇÃO E OBJETIVOS.....	1
2- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	2
2.1- A indústria de mineração no Brasil.....	2
2.2- Processo de beneficiamento do minério de ferro.....	3
2.2.1- Cominuição.....	4
2.2.2- Classificação.....	6
2.2.3- Concentração.....	9
2.2.3.1- Concentração de minérios de ferro de alto teor.....	9
2.2.3.2- Concentração de minérios de ferro de baixo teor.....	11
2.2.3.2.1- Concentração magnética.....	11
2.2.3.2.2- Flotação.....	12
2.2.3.2.3- Processo de beneficiamento de minério de ferro na SAMARCO S.A.....	12
2.2.4- Principais produtos da mineração de ferro.....	13
2.3 – Barragens de rejeitos convencionais.....	15
2.3.1- Projeto de barragens.....	17
2.3.1.1- Densidade <i>in situ</i>	18
2.3.1.2- Limites de Atterberg.....	18
2.3.1.3- Índice de vazios inicial.....	19

2.3.1.4- Consolidação.....	20
2.3.1.5- Compressibilidade.....	20
2.3.1.6- Permeabilidade.....	20
2.3.1.7- Resistência ao Cisalhamento.....	21
2.3.2- Transporte e Descarga de Rejeitos.....	21
2.3.3- Gestão de Riscos.....	22
2.3.4- Análise de possíveis causas para colapso nas estruturas.....	25
2.3.4.1- Piping.....	25
2.3.4.2- Liquefação.....	26
2.3.4.3- Galgamento.....	27
2.3.5- Alternativas para disposição de rejeitos.....	28
2.3.6- Reaproveitamento de resíduos da mineração.....	30
2.3.7- Estudo de Caso – Brumadinho.....	31
2.3.7.1- Impactos ambientais e sociais.....	32
2.3.7.2- Legislações aplicadas.....	33
3- CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	33
3.1- Papel do profissional de engenharia química na gestão dos riscos.....	34
3.2- Tendências do setor de mineração.....	35
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	36

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1.	Fluxograma típico de processamento mineral	4
Figura 2.2.	Tipos de circuito de britagem: A) Circuito aberto sem peneiramento prévio; B) Circuito aberto com peneiramento prévio; C) Circuito fechado configuração reversa; D) Circuito fechado configuração direta	5
Figura 2.3.	Ilustração das seções e/ou partes de um hidrociclone	7
Figura 2.4.	Curvas de partição típicas de um hidrociclone com a ilustração dos diâmetros medianos de corte	8
Figura 2.5.	Fluxograma de beneficiamento do Minério de Ferro de Carajás	10
Figura 2.6.	Fluxograma de beneficiamento do Minério de Ferro da Usina de Germano, SAMARCO	12
Figura 2.7.	Principais produtos do beneficiamento do minério de ferro	14
Figura 2.8.	Ilustração do alteamento a montante	15
Figura 2.9.	Ilustração do alteamento a jusante	16
Figura 2.10.	Ilustração do alteamento por linha de centro	16
Figura 2.11.	Comportamento da densidade in situ de amostras de rejeito conforme variação da profundidade	18
Figura 2.12.	Métodos de descarga perimetral: a) pontos múltiplos (spigotting); b) descarga pontual	22
Figura 2.13.	Alargamento do tubo inicial ao decorrer do processo de erosão	25
Figura 2.14.	Área coberta pelos rejeitos e cobertura original da terra antes do desastre	31

LISTA DE TABELAS E QUADROS

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1.	Resumo comparativo entre os principais métodos de construção de barragens	17
--------------------	---	----

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1.	Granulometria dos principais produtos do beneficiamento do minério de ferro	14
Quadro 2.2.	Causas e evidências associadas aos possíveis modos de falha da Barragem de Conceição em Itabira-MG	23
Quadro 2.3.	Vantagens e desvantagens de diferentes métodos para disposição de rejeitos	29

1. INTRODUÇÃO

A extração de minério em território brasileiro teve início no século XVIII, após expedições realizadas pelos bandeirantes em nome da coroa portuguesa na busca por metais valiosos e pedras preciosas. Impulsionado pela mineração e pelo crescente fluxo populacional vindo de Portugal, o cenário econômico brasileiro passou por mudanças significativas. Foi desenvolvido um polo econômico na região sudeste do país, marcado pela diversificação na economia e aumento das atividades comerciais.

De acordo com o Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM), em meados dos anos de 1950, a contribuição das atividades de mineração no PIB do país era de cerca de 0,4%. No primeiro trimestre de 2020, a participação do setor mineral no PIB brasileiro passou a ser de aproximadamente 4%.

O minério é extraído a partir de jazidas minerais, estruturas que concentram substâncias minerais com teores conhecidos e valor econômico comprovado. O clima tropical do Brasil é favorável à existência dessas jazidas ricas em minério. O minério de ferro é indispensável para a produção de itens essenciais no cotidiano da população, tendo no ano de 2020 contribuído com 66% do faturamento total do setor (IBRAM, 2021). Ele é a principal matéria prima para a produção do aço, que é utilizado para produção de maquinário e ferramentas, veículos, estruturas para construção civil, etc. Localizada no sudoeste do estado do Pará, encontra-se a mina de Carajás, considerada a maior mina de minério de ferro a céu aberto do mundo.

Depois de extraído, o minério de ferro é transportado até a usina, onde são separados a terra e os minérios sem valor, para que o minério bruto seja britado e peneirado. A água utilizada para lavagem do minério é bombeada para estruturas denominadas barragens de rejeitos.

Com a introdução da força a vapor e com o aumento da capacidade de processamento dos minerais de alto valor econômico, a geração de rejeitos aumentou significativamente. Ao longo dos anos, diversas falhas nessas estruturas de contenção foram responsáveis por desastres ambientais, associados à perda de vidas humanas. Em 1965, no Chile, a ruptura da barragem El Cobre culminou em 210 vítimas, como consequência de um terremoto. Segundo relatório da ONU, até o ano de 2018 a pior tragédia por rompimento de barragem havia sido na Itália, em 1985, quando 267 pessoas morreram após a liberação de cerca de 200 mil metros cúbicos de rejeitos.

No Brasil, o episódio mais recente e considerado como um dos maiores desastres com rompimento de barragem de minério no mundo, ocorreu em 2019 na cidade de Brumadinho, em Minas Gerais. Dentre as principais consequências do acidente, estão a morte de 272 vítimas e a contaminação do Rio Paraopeba, um dos afluentes do rio São Francisco. É importante destacar, que em novembro de 2015, o país havia passado por outro desastre em decorrência do rompimento da barragem de Fundão em Mariana, Minas Gerais, em que foram lançados cerca de 34 milhões de metros cúbicos de rejeitos no meio ambiente contaminando importantes rios como o Gualaxo do Norte, do Carmo e o Rio Doce. A barragem era operada pela mineradora Samarco S/A, controlada pelas empresas Vale e BHP Billiton.

Este trabalho tem como objetivo a avaliação do cenário industrial de mineração em relação às atividades de disposição de rejeitos, em busca de processos de disposição alternativos, assim como visa avaliar os principais fenômenos apontados como causas para o rompimento de barragens. Considerando o cenário atual brasileiro, que conta com cerca de 435 barragens regularizadas para contenção de minério (ANA, 2020), serão avaliados também a gestão dos riscos e controles voltados ao projeto destas estruturas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 A Indústria de Mineração no Brasil

As primeiras lavras de minério no Brasil foram as de ouro, criadas em meados de 1800. Naquele tempo, a perfuração das rochas era realizada de forma rudimentar, através de ponteiros e marretas e facilitada pela utilização de pólvora caseira. Ainda assim, a Mina da Passagem, em Mariana, e a Mina Velha, em Nova Lima, ambas localizadas no estado de Minas Gerais, eram consideradas referência em tecnologia. Em 1908 foi criada a Brazilian Hematite Syndicate, que em 1911 viria a se tornar a Itabira Iron Ore Company, primeira empresa autorizada a explorar ferro na região de Minas Gerais. Em 1939, foi fundada a Companhia Brasileira de Mineração e Siderurgia. Em 1941, um grupo de empresários fundou a Companhia Itabira de Mineração, com o objetivo de explorar as minas da Itabira Iron Ore - esta empresa foi a escolhida por Getúlio Vargas para junto à Companhia Brasileira de Mineração e Siderurgia para criar a Companhia Vale do Rio Doce (CVRD). Nesta época, o Brasil sofria pressão para entrar na segunda guerra mundial, e a criação da CVRD seria

capaz de garantir o fornecimento de minério de ferro para a indústria bélica americana na luta contra o nazismo.

Nos anos 2000, o Brasil foi marcado pelo grande aumento no preço das commodities e por consideráveis investimentos no setor de mineração. Além disso, houve um aumento na demanda de minérios, especialmente por minério de ferro, fatores que impactaram positivamente o desenvolvimento setorial. Dados do Departamento Nacional de Produção Mineral revelam que nessa época, o ranking de países responsáveis pelas vendas externas brasileiras de minério era liderado pelos Estados Unidos, seguido da União Europeia.

Com o crescimento exponencial das economias dos países emergentes, como a China, apoiado pelo fortalecimento da produção de aço no país, esta passou a ocupar lugar significativo na compra por minério de ferro. Se em 2001 a China era responsável por 18% do minério de ferro importado, em 2014 ela passou a importar 68% do minério de ferro mundial (ITC, 2017 apud WANDERLEY, L. J. M, 2017).

A mineração brasileira de bens metálicos é expressivamente voltada à exportação. Dados do Ministério de Minas e Energia reportam que entre janeiro e março de 2020, a participação das exportações do setor mineral no total das exportações brasileiras foi de cerca de 22%, com destaque para as exportações de minério de ferro, responsáveis por 9,3% do total das exportações brasileiras. Já as importações do setor mineral representaram, no mesmo período, 13,5% do total das importações do país. No ano de 2020, o minério de ferro foi responsável por 66% do total de faturamento do setor de mineração.

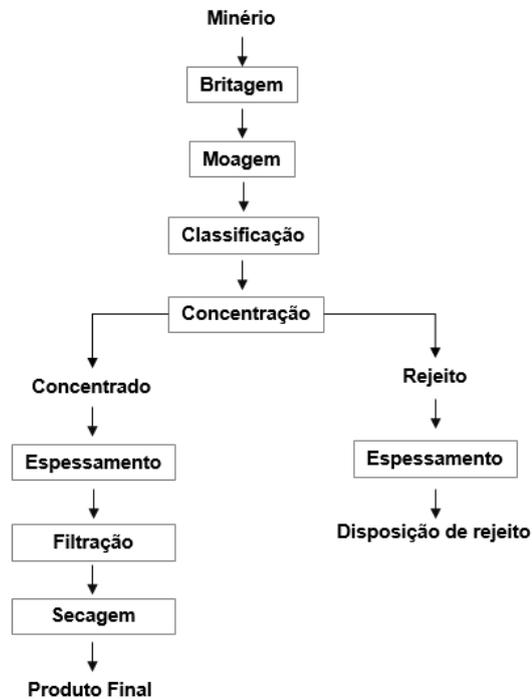
Como resultado do desenvolvimento social e tecnológico gerado pelo setor, o IDHM - índice de Desenvolvimento Humano Municipal das cidades que possuem atividades de mineração é em média mais elevado do que o de outras regiões. No estado de Minas Gerais, o IDHM dos municípios com atividade mineral é de 0,731, enquanto a média deste índice para outros municípios do Brasil é de 0,659. Isso ocorre principalmente pela geração de empregos e pela capacidade de inovação tecnológica e arrecadação tributária do setor.

2.2 Processo de Beneficiamento do Minério de Ferro

É de conhecimento geral que, raramente, um minério pode ser utilizado tal como é lavrado. Isso ocorre, pois, a concentração do minério é essencial para seu aproveitamento prático industrial. O processo de beneficiamento do minério visa separar e concentrar os minérios de interesse daqueles que não possuem valor comercial, denominados rejeitos. Para isso, algumas etapas são essenciais no processamento da matéria prima extraída. A figura

2.1, apresentada a seguir, conta com a representação de um fluxograma típico de processamento mineral.

Figura 2.1. Fluxograma típico de processamento mineral



Fonte: Tavares (Adaptado), 2009

2.2.1 Cominuição

Após a lavra do minério, a primeira etapa do beneficiamento consiste na separação física dos materiais por fragmentação através de ação mecânica. Segundo Tavares (2009), a maneira empregada na indústria para cominuição destas partículas é a aplicação de grandes quantidades de energia em britadores e moinhos. Por conta do grande consumo energético exigido nas etapas de cominuição, é justamente nessa fase que se concentram os custos diretos de produção (cerca de 50% a 75% dos custos totais diretos de produção da usina).

Na cominuição das partículas mais grossas, em que se necessita maior aplicação de energia, utilizam-se os britadores. À medida que as partículas se tornam mais finas, são utilizados os moinhos. A cominuição pode ser realizada a seco ou a úmido, sendo a britagem geralmente operada a seco (WILLS, 2006 apud BASTOS, 2015). Dentre as vantagens do processamento a úmido estão a não emissão de poeiras e a dissipação do calor gerado. O processamento a seco, no entanto, é usualmente aplicado em casos em que o mineral é muito

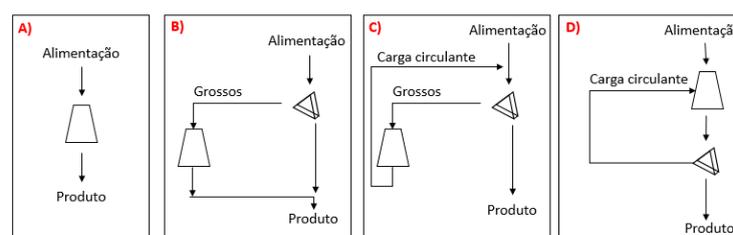
abrasivo, uma vez que a mistura da água com o minério pode ser corrosiva e causar desgaste por abrasão.

Nos circuitos de britagem e moagem, é realizado o peneiramento para separação de partículas de dimensão desejada. O peneiramento a úmido consiste na adição de água ao material a ser peneirado para facilitar a passagem das partículas finas através da tela de peneiramento. Assim como britadores e moinhos, existem diversos tipos de equipamentos que podem ser utilizados no processo de peneiramento, a serem selecionadas a partir da dimensão das partículas a serem peneiradas e da eficiência necessária. De maneira geral, as peneiras vibratórias são as mais importantes no processo de beneficiamento de minérios, visto que possuem alta eficiência e são capazes de induzir a segregação do material de alimentação.

Os britadores são, então, frequentemente associados a grelhas ou peneiras vibratórias, equipamentos que possuem o objetivo de aliviar a carga de alimentação ajustando as partículas às dimensões adequadas. Os estágios subsequentes de britagem são definidos como britagem primária, secundária, terciária, e eventualmente britagem quaternária.

A etapa de britagem pode ser realizada de duas formas: em circuito aberto e em circuito fechado. Quando o circuito é aberto, o material passante na peneira (*undersize*) é combinado com o produto do britador que alimentará a operação seguinte. A britagem primária ocorre sempre em circuito aberto. Nos circuitos fechados, o material cominuído passa por um processo de separação por tamanhos, de forma que as partículas de maior dimensão que ficam retidas retornam ao equipamento de cominuição. Esse fluxo é denominado “carga circulante”. A visualização dos diferentes tipos de circuito pode ser obtida pela figura 2.2.

Figura 2.2. Tipos de circuito de britagem: A) Circuito aberto sem peneiramento prévio; B) Circuito aberto com peneiramento prévio; C) Circuito fechado configuração reversa; D) Circuito fechado configuração direta



Fonte: Felipe (Adaptado), 2019

No processamento mineral, comumente são utilizados os britadores de mandíbulas, giratórios, cônicos, de rolo e de impacto.

2.2.2 Classificação

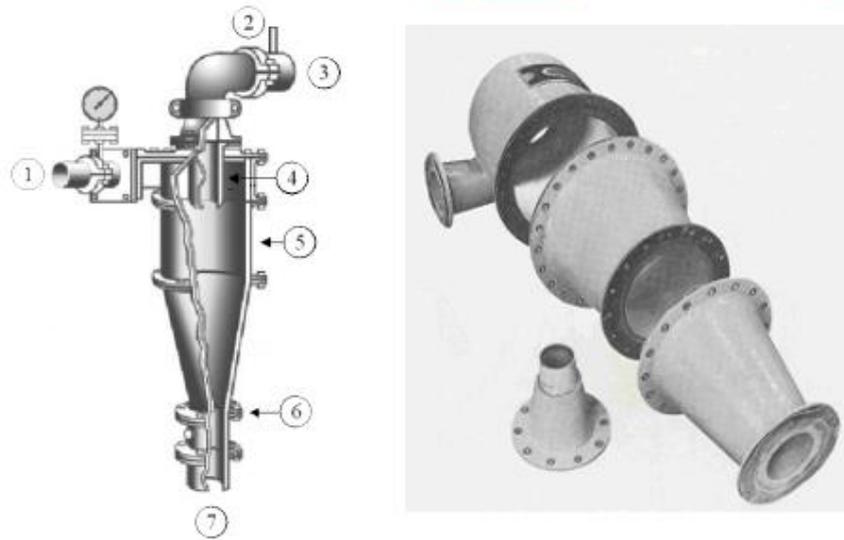
A etapa posterior, denominada etapa de classificação, consiste na separação das partículas por tamanho. Uma forma comum de classificação destas partículas é a deslamagem, que faz referência à retirada das lamas através de equipamentos deslamadores para que a etapa posterior de beneficiamento ocorra sem a interferência de partículas muito finas (SANTOS, 2018)

Para isso, utilizam-se colunas separadoras, na qual o fluido ascende a uma velocidade uniforme. Essas colunas podem utilizar tanto água como ar como fluido para separação dos materiais. Quando o fluido utilizado é água, os equipamentos mais empregados são cones estáticos, hidrociclones e classificadores espirais. Quando o ar é utilizado, empregam-se usualmente os ciclones e aero separadores dinâmicos (DUTRA, 2019 apud SOUZA, 2010). Segundo Tavares (2019), para as instalações de pequena capacidade, são utilizados os classificadores espirais, enquanto para as instalações de grande porte, é mais comum o uso de hidrociclones, que apresentam maior versatilidade e são mais eficientes para separação de partículas muito finas.

Os hidrociclones são alimentados com as partículas de minério durante a etapa de classificação, resultando em dois diferentes produtos: *overflow* e *underflow*. O objetivo é que a alimentação (material cominuído nas etapas anteriores) seja separado em duas diferentes correntes de saída, que se distinguem pela distribuição granulométrica das partículas. O *overflow* é a corrente de saída composta pelas partículas mais finas que foram classificadas, enquanto o *underflow* engloba as partículas mais grossas de minério que foram alimentadas ao equipamento. A figura 2.3 ilustra as seções de um hidrociclone.

Figura 2.3. Ilustração das seções e/ou partes de um hidrociclone

1- alimentação. 2- suspiro; 3 – overflow; 4- *vortex finder*; 5 – seção cônica; 6 – *apex*; 7 - *underflow*



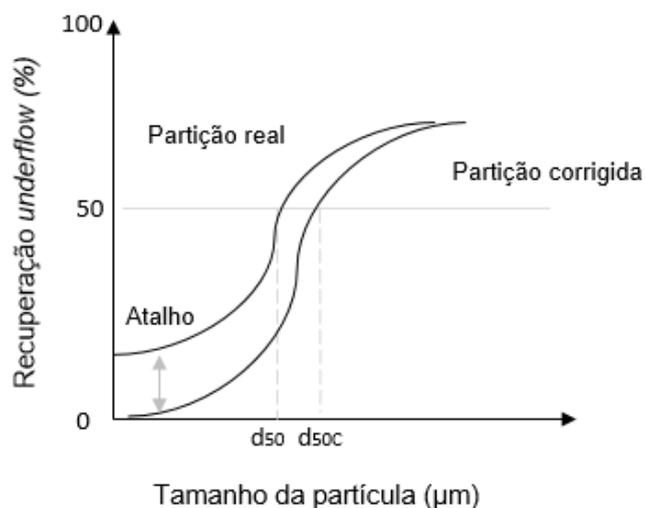
Fonte: Sampaio; França e Braga (Adaptada), 2017

O hidrociclone consiste em uma parte cilíndrica que se afunila dando origem a uma seção cônica, que possui em seu vértice uma abertura denominada *apex*. A alimentação é introduzida tangencialmente à seção cilíndrica, onde é realizado o descarregamento do *overflow* através do tubo *vortex finder*. O bombeamento das partículas de minério para a alimentação gera energia potencial que é transformada em energia cinética, produzindo assim um movimento rotacional do material a ser classificado. De acordo com Kelly (1982) apud Sampaio, França e Braga (2017), as partículas de maior diâmetro tendem a ocupar as regiões mais periféricas do equipamento, enquanto as partículas de menor diâmetro ocupam a região central. Na região central o sentido do escoamento é invertido, e então a maior parte do fluxo que contém as partículas de menor diâmetro, escoam através do *vortex finder*.

Uma vez que a classificação através do hidrociclone não é capaz de fornecer um tamanho exato para as partículas grossas ou finas, as análises são realizadas através do conceito de porcentagem das partículas passantes na abertura de uma determinada malha. Essa análise granulométrica é realizada utilizando um diâmetro de corte na classificação, que por convenção é d_{50} (diâmetro de partículas com 50% de probabilidade de ir para o *underflow* ou *overflow*, durante a classificação). Esse diâmetro é resultado da plotagem dos dados da análise granulométrica realizada experimentalmente, em que no eixo das abscissas são plotados os tamanhos das partículas que compõem o fluxo de alimentação do hidrociclone, e no eixo das ordenadas plotam-se os valores da recuperação da corrente de

underflow. Em resumo, quanto maior o diâmetro do hidrociclone, maior será o corte granulométrico da classificação, visto que os equipamentos maiores proporcionam menor aceleração às partículas. Entende-se que, quando desejadas granulometrias muito finas, será necessário um grupo de hidrociclones de pequeno diâmetro associados em paralelo (SAMPAIO; FRANÇA e BRAGA, 2017). A figura 2.4 ilustra uma curva de típica de hidrociclone com a representação dos diâmetros de corte.

Figura 2.4. Curvas de partição típicas de um hidrociclone com a ilustração dos diâmetros medianos de corte



Fonte: Sampaio; França e Braga (Adaptado), 2017

Segundo Ferreira (2007) apud Santos (2018), a operação de deslamagem por meio de hidrociclones pode ser feita em três etapas consecutivas de classificação, através de equipamentos denominados raspadores, limpadores e deslamadores. Os ciclones raspadores constituem a primeira etapa, onde ocorre a primeira classificação do material. Após a primeira etapa, as partículas grosseiras (*underflow*) são enviadas para os ciclones limpadores, onde ocorre nova classificação e o material mais fino é enviado para os ciclones deslamadores. Nos ciclones limpadores, o *underflow*, que é composto pelas partículas de interesse, é direcionado para a etapa de concentração e o *overflow* segue para a planta de tratamento de finos. A última etapa é composta pelos ciclones deslamadores, onde ocorre nova classificação e, usualmente, o *underflow* é enviado para concentração e o *overflow* para a planta de finos.

2.2.3 Concentração do minério de ferro

Até meados dos anos 60, o processo de concentração do minério de ferro no Brasil era relativamente simples, uma vez que eram lavrados minérios com alto teor de ferro (maiores que 60%). À medida que a indústria extrativa foi se desenvolvendo, notou-se a escassez de minérios desse tipo, e foi iniciada também a extração dos minérios denominados itabiritos, que possuem teor mais baixo de ferro (usualmente entre 50 e 60%).

2.2.3.1 Concentração do minério de ferro de alto teor

Quando se é extraído um minério de alto teor e com baixa proporção de impurezas como areia (SiO_2) e alumina (Al_2O_3), os custos com as etapas de tratamento são menores e a etapa de concentração pode ser até dispensável em algumas ocasiões.

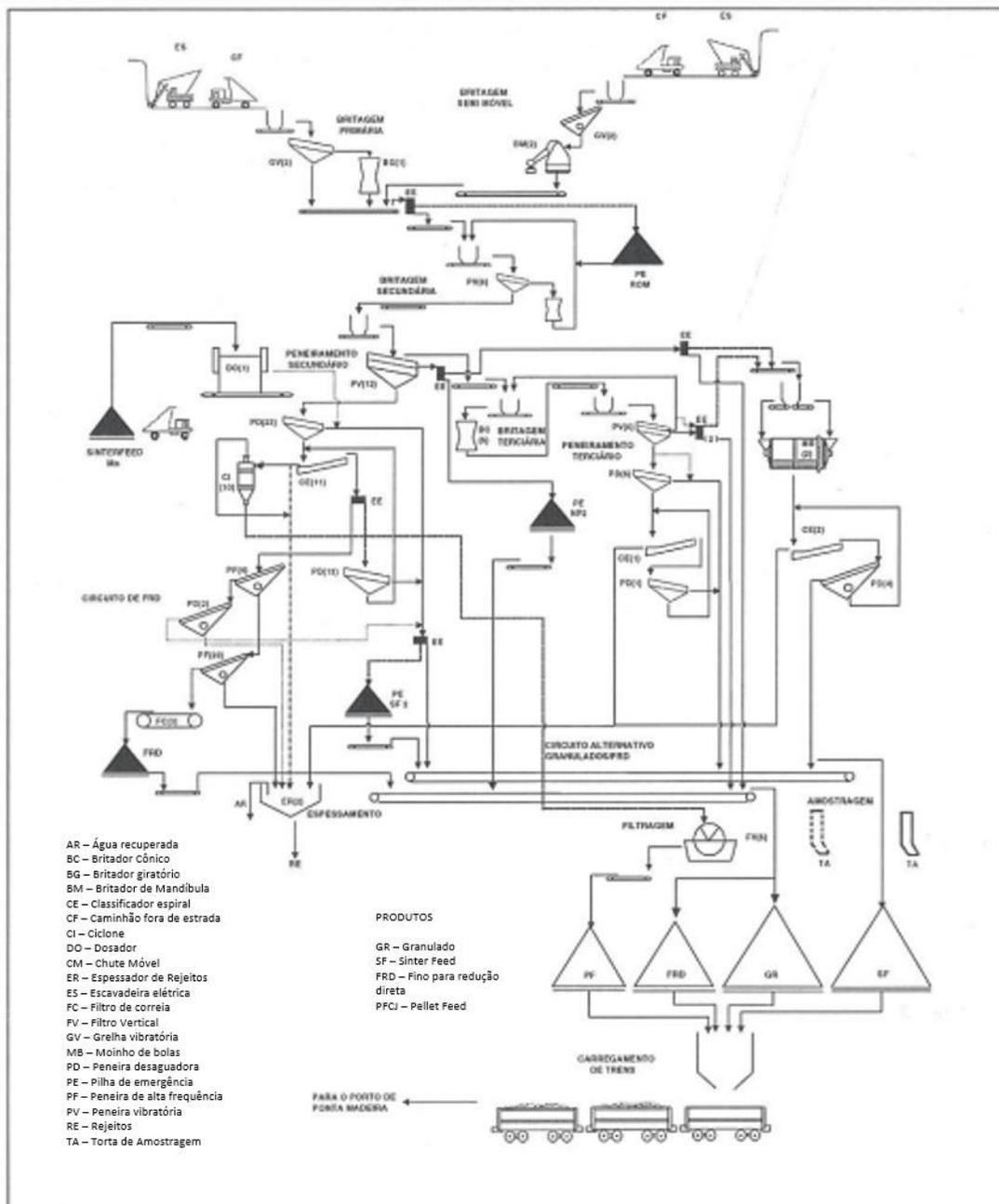
A mina de ferro de Carajás, no Pará, por exemplo, conta com um minério de ferro de teor 66%, e seu processamento consiste apenas nas etapas de britagem (primária, secundária e terciária), classificação, peneiragem, desaguamento, moagem e filtragem. O desaguamento é utilizado para a remoção da grande quantidade de água que é incorporada durante as outras operações, enquanto o objetivo da filtragem é reduzir a umidade do material de 20 % para 10%. Os rejeitos são depositados em duas barragens denominadas Gelado e Geladinho, onde são inspecionados os parâmetros de vazão de efluentes de água no vertedouro, corpo estrutural da barragem, nível de permeabilidade da parede, entre outros (SAMPAIO, LUZ e LINS, 2001).

De acordo com Sampaio, Luz e Lins (2001), o processo consiste em uma etapa de britagem primária realizada em duas estações, uma fixa e uma semimóvel. Em ambas as estações, os caminhões fora-de-estrada descarregam o minério em grelhas vibratórias. Para a britagem fixa, o *oversize* da grelha segue para o britador giratório, e o *undersize* junta-se à descarga do britador e alimenta o chute-móvel, equipamento que permite a divisão de fluxo proporcional entre duas descargas. No caso da britagem semimóvel, o caminho é semelhante, porém o circuito é composto por um alimentador de sapatas, uma grelha vibratória, um britador de mandíbulas e uma transportadora de correia. O produto resultante do britador de mandíbulas junta-se à fração fina da grelha vibratória e alimenta o chute móvel.

A partir desse ponto, todo o material passa pela britagem secundária, onde o minério é retomado do chute móvel e alimenta uma bateria de seis peneiras vibratórias, seguidas de três britadores cônicos que trabalham em circuito fechado. A fração passante segue para o

peneiramento secundário, onde são utilizadas peneiras vibratórias de duplo deque. A fração retida no primeiro deque da etapa de peneiramento secundário, é então britada na etapa de britagem terciária. No peneiramento terciário via úmida ocorre o peneiramento do material decorrente da britagem terciária. O material retido no primeiro deque retorna à britagem, enquanto a fração retida no segundo deque passa pelas peneiras desaguadoras (SAMPAIO, LUZ e LINS, 2001). Todo o processo descrito anteriormente pode ser observado a partir da figura 2.5.

Figura 2.5. Fluxograma de beneficiamento do Minério de Ferro de Carajás



Fonte: Sampaio, Luz e Lins (Adaptado), 2001.

2.2.3.2 Concentração do minério de ferro de baixo teor

Quando o minério lavrado apresenta baixo teor em ferro, podem ser utilizadas diferentes técnicas para sua concentração. As mais comuns são a flotação e a concentração magnética. As principais plantas de processamento de minério de ferro no Brasil operam através da flotação catiônica reversa (SILVA, 2015). A escolha do processo de concentração de minério de ferro a ser aplicado depende de vários fatores, entre eles o teor do minério de ferro e o teor do concentrado que se deseja obter, composição química e mineralogia do minério, malha de liberação, tamanho de grão, fatores econômicos e efeitos sobre a pelotização (HOUOT, 1982 apud LOPES, 2009).

2.2.3.2.1 Concentração magnética

De acordo com Crisóstomo (2015), a separação magnética com o objetivo de concentrar minérios consiste na aplicação de um campo magnético, onde o material magnetiza-se ou não, e pode assim ser classificado em três diferentes tipos:

Ferromagnéticos: dipolos elementares são permanentes e se alinham na direção do campo eletromagnético aplicado;

Paramagnéticos: dipolos elementares são permanentes, mas a magnetização varia linearmente com o campo magnético aplicado;

Diamagnéticos: dipolos elementares não são permanentes e os elétrons formam dipolos opostos ao campo magnético atuante.

A separação magnética pode ser feita tanto a seco como a úmido. O método a seco é usado, em geral, para granulometria grossa e a úmido para granulometrias mais finas (CRISÓSTOMO, 2015). Os separadores magnéticos de baixa intensidade podem ser utilizados via seco ou via úmido. Quando utilizados via seco, podem ser usados para a remoção de impurezas altamente magnéticas, para a concentração de metais de alto magnetismo com valor agregado, e até para o beneficiamento de minérios de ferro granulados. Quando via úmido, são empregados na concentração de minérios de ferro

magnéticos. Para concentração de materiais de maior granulometria e baixo potencial magnético, são apropriados os separadores magnéticos de alta intensidade a seco.

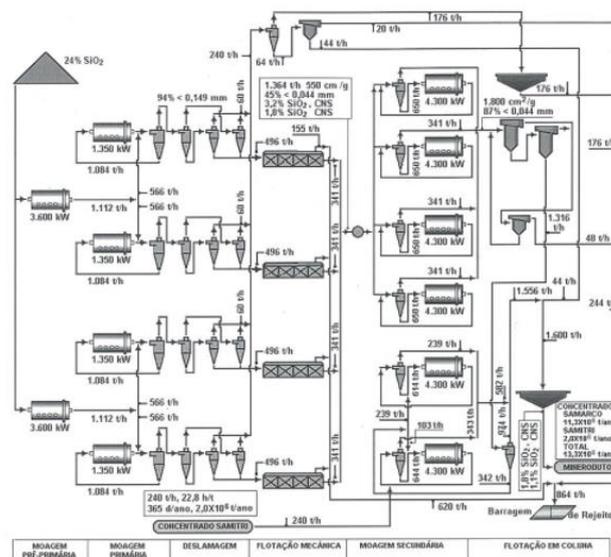
2.2.3.2.2 Flotação

Lopes (2009) descreve a flotação como o processo onde ar é borbulhado através de uma polpa de minério de ferro de determinada granulometria e é inserido reagente de flotação para modificação da superfície dos óxidos de ferro, de forma que essas partículas sejam capazes de aderir nas bolhas de ar e sejam conduzidas à superfície, onde serão removidas em forma de espuma. A flotação pode ser realizada de forma direta ou reversa, sendo a segunda mais comum. Na flotação direta, o óxido de ferro é flotado utilizando-se substâncias aniônicas como ácidos graxos, enquanto na flotação reversa são utilizados reagentes catiônicos (aminas) e depressores (amido).

2.2.3.2.3 Processo de beneficiamento de minério de ferro na SAMARCO S.A.

A SAMARCO Mineração S.A. é pioneira na concentração de minério de ferro de baixo teor (itabirito) através da concentração por flotação. As etapas do processo de beneficiamento estão descritas na figura 2.6.

Figura 2.6. Fluxograma de beneficiamento do Minério de Ferro da Usina de Germano, SAMARCO



Fonte: Sampaio, Luz e Lins, 2001.

Neste processo, que tem suas etapas representadas na figura 2.6, o início se dá pela etapa de britagem, realizada em circuito fechado e em dois estágios. Posteriormente, o minério britado segue para duas etapas de moagem: pré-primária, realizada à úmido em dois moinhos de bolas; e primária, realizada em circuito fechado reverso através de quatro linhas paralelas. O produto final da moagem primária segue para deslamagem por meio de hidrociclones, onde a operação é feita por três etapas compostas por ciclones limpadores, raspadores e deslamadores, como já descrito neste trabalho. Após deslamagem, este minério é concentrado utilizando o método da flotação reversa, onde são adicionados hidróxido de sódio, para controle de pH, e amido gelatinizado para deprimir os óxidos e hidróxidos de ferro. Após a flotação convencional, o concentrado é submetido a uma nova etapa de classificação, denominada dupla classificação. O concentrado passa então por uma remoagem, com o objetivo de facilitar a passagem do material através do mineroduto, e obter a superfície específica adequada ao processo subsequente de pelletização. Ainda, o material passa por nova flotação, desta vez por circuito de flotação por colunas, até obtenção da concentração desejada. Este concentrado é então espessado e transportado em forma de polpa com 66% de sólidos. A lama resultante também é bombeada para espessadores de rejeito, que serão dispostos posteriormente em barragens de contenção, e a água recuperada é recirculada sem tratamento adicional (SAMPAIO, LUZ e LINS, 2001).

2.2.4 Principais produtos da mineração de ferro

Os produtos do processo de beneficiamento do minério de ferro possuem características e granulometria distintas, visto que possuem diferentes aplicações. Os principais produtos podem ser classificados como *Granulado*, *Sinter Feed* ou *Pellet Feed*, que se diferem de acordo com os valores de granulometria apresentados no quadro 2.1, e cada um dos produtos estão apresentados na figura 2.7.

Quadro 2.1. Granulometria dos principais produtos do beneficiamento do minério de ferro

Produto	Granulometria
<i>Granulado</i>	> 6,3 mm
<i>Sinter Feed</i>	Entre 0,15 mm e 6,3 mm
<i>Pellet Feed</i>	<0,15 mm

Fonte: Adaptado de CSN

Figura 2.7. Principais produtos do beneficiamento do minério de ferro



Fonte: CSN (Adaptado), 2022

Como a principal aplicação destes produtos é na indústria de aço, a rota de produção do aço se diferencia de acordo com o produto de ferro utilizado. Os produtos Sinter Feed e Pellet Feed não podem ser utilizados diretamente nos fornos de redução devido a sua granulometria, e por isso necessitam ser aglomerados através da sinterização ou pelotização. A sinterização é um processo de aglomeração a quente em que são utilizados os finos minerais, coque, fundentes e adições, resultando no *sínter*, que poderá ser utilizado em alto-forno. A pelotização também utiliza de finos de minério que não eram antes aproveitados, mas este processo gera pelotas, pequenas esferas de ferro, através do processamento térmico. Devido à sua esfericidade, as pelotas proporcionam espaço dentro das cargas de alto forno, e possuem a resistência necessária para não serem esmagadas, obstruindo assim o equipamento.

2.3. Barragens de rejeitos convencionais

O método mais tradicional para disposição de rejeitos do processo de beneficiamento de minérios, é a utilização de barragens de contenção. Estas barragens podem ser construídas a partir do solo ou através do próprio rejeito a ser armazenado. A construção destas estruturas pode ser realizada de três diferentes formas: a montante, a jusante e em linha de centro, representadas respectivamente nas figuras 2.8, 2.9 e 2.10. No primeiro caso, considerado mais simples e rudimentar, é inicialmente construído um dique de partida. Posteriormente, o rejeito é lançado por canhões em direção a montante a linha de simetria do dique, dando origem à praia de deposição, que fornecerá o material necessário para a construção dos próximos alteamentos. Apesar de ser o método mais comum, este apresenta riscos quando se trata da segurança da barragem, já que os alteamentos são construídos sobre materiais previamente depositados e não consolidados, apresentando suscetibilidade à liquefação.

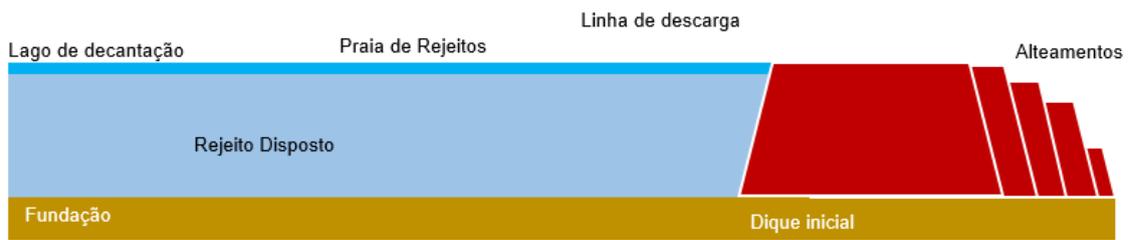
Figura 2.8. Ilustração do alteamento a montante



Fonte: Ibram (Adaptado), 2016

No segundo caso, quando escolhido o alteamento a jusante, os alteamentos subsequentes ao dique de partida são construídos a jusante do mesmo. As barragens alteadas por este método apresentam maiores custos devido ao volume de material necessário para construção. As vantagens envolvidas no processo de alteamento para jusante consistem no controle do lançamento e da compactação, de acordo com técnicas convencionais de construção. Nenhum alteamento ou parte da barragem é construído sobre o rejeito previamente depositado (Klohn, 1981 apud Ibram, 2016).

Figura 2.9: Ilustração do alteamento a jusante



Fonte: Ibram (Adaptado), 2016

Para a última opção, quando utilizado o método de linha de centro, ocorre uma disposição intermediária dos alteamentos entre os métodos a jusante e a montante, onde o eixo vertical dos alteamentos coincide com o eixo do dique de partida, conforme figura 2.9.

Figura 2.10. Ilustração do alteamento por linha de centro



Fonte: Ibram (Adaptado), 2016

A escolha do método de construção da barragem irá variar de acordo com o tipo de processo industrial, custos associados, o nível de produção de rejeitos, topografia, sismicidade, etc. No entanto, uma vez que o método a montante apresenta maior facilidade de execução e menor despesas envolvidas, este tem sido o mais escolhido pelas mineradoras. A tabela 2.11 apresenta as principais diferenças entre os métodos apresentados.

Tabela 2.11. Resumo comparativo entre os principais métodos de construção de barragens

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

Fonte: Cardoso, Pimenta e Zingano, 2016

É possível observar que o método mais comum para alteamento de barragens de contenção pelas empresas mineradoras, denominado alteamento a montante, apresenta como única vantagem ser o método de menor custo, mas carrega com si as desvantagens de não ser um método seguro e apresentar susceptibilidade à fenômenos comumente responsáveis pelo colapso das estruturas.

2.3.1 Projetos de Barragens

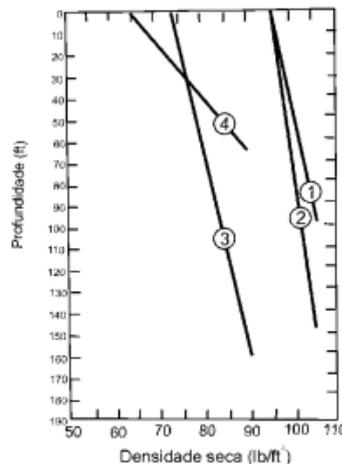
Quando é utilizado o próprio rejeito para construção da barragem, antes de ser lançado na estrutura, o material passa por uma última etapa de beneficiamento chamada de espessamento. É nesta etapa que a água é removida significativamente e recuperada para outros fins. Para isso, são empregados espessadores e hidrociclones, sendo o último menos comum para o espessamento em decorrência do seu elevado custo operacional. Os rejeitos espessados são então transportados até as barragens para disposição em forma de polpa, através de calhas e tubulações que podem ou não contar com bombeamento.

Conforme citado neste trabalho, o método mais comum é o lançamento destes rejeitos a montante da superfície da praia de rejeitos anteriormente formada. O rejeito final obtido será constituído por líquidos, gases e sólidos, material que deve ser analisado geotecnicamente através de alguns parâmetros antes de sua deposição. As principais características geotécnicas dos rejeitos que devem ser conhecidas são: densidade *in situ*; limites de Atterberg; índice de vazios inicial; consolidação ou adensamento; compressibilidade; permeabilidade e resistência ao cisalhamento (SOARES, 2010).

2.3.1.1 Densidade *in situ*

De acordo com Soares (2010), a densidade *in situ* é geralmente expressa em termos de densidade seca ou índice de vazios e depende da gravidade específica, granulometria e conteúdo argiloso. Tanto a densidade *in situ* quanto a umidade do rejeito dependem do método de lançamento e de sua posição. De forma geral, por conta da compressibilidade dos rejeitos depositados hidraulicamente, os valores de densidade aumentam conforme a profundidade. A figura a seguir ilustra este comportamento.

Figura 2.11. Comportamento da densidade *in situ* de amostras de rejeito conforme variação da profundidade



Fonte: Soares, 2010

2.3.1.2 Limites de Atterberg

Os limites de Atterberg referem-se ao limite de liquidez (LL), limite de plasticidade (LP) e limite de contração (LC), sendo iguais aos valores de umidades que separam um

estado de consistência do solo de outro (Ribeiro, Souza, 2018). O limite de plasticidade se refere à capacidade do material de ser moldado, sob certas condições de umidade, sem que o volume seja variado. O limite de liquidez é aquele que define a umidade do solo quando este passa do estado líquido para o estado plástico, enquanto o limite de contração se refere ao valor de umidade no qual o solo sai do estado semi-sólido para o estado sólido. De acordo com Soares (2010), a maior parte dos rejeitos resultantes dos processos de beneficiamento mineral não possui plasticidade, dificilmente atingindo índice de plasticidade acima de 25%.

2.3.1.3 Índice de vazios inicial

O índice de vazios inicial (e_i) é o utilizado para determinar o limite entre a sedimentação e a consolidação. Soares (2010) cita que, em geral, essa determinação é uma tarefa complexa, e por isso, adota-se um índice de vazio inicial de valor usualmente arbitrário. Assume-se então que o valor de e_i é aproximadamente igual ao índice de vazios correspondente ao limite de liquidez da amostra, multiplicado por 7, conforme a equação a seguir:

$$e_i = 7G * \frac{LL}{100} \quad (2.1)$$

onde G representa o peso específico dos sólidos secos e LL a porcentagem que define o limite de liquidez do material.

2.3.1.4 Consolidação

A consolidação pode ser definida como a relação entre os índices de vazio máximo e mínimo do material analisado. Entende-se que os materiais depositados na superfície apresentam maiores valores de índice de vazio, enquanto os materiais situados nas camadas mais profundas possuem baixos valores desse índice (SOARES, 2010). A Compacidade Relativa de um material granular pode ser definida através da seguinte equação:

$$CR = \frac{(e_{max} - e)}{(e_{max} - e_{min})} \quad (2.2)$$

em que:

e_{max} = índice de vazios máximo

e_{min} = índice de vazios mínimo

e = índice de vazios do material na situação em que se encontra, definido pela relação entre o volume de vazios e o volume de sólidos.

2.3.1.5 Compressibilidade

Compressibilidade é a propriedade que um material tem de reduzir seu volume em relação a uma determinada pressão externa aplicada sobre o mesmo (PINTO, 2006 apud Siviero, 2019). Quando os rejeitos granulares lançados se encontram sob condições de saturação completa, isto é, quando todos os vazios estão preenchidos com água, associado a condições de baixa densidade e/ou permeabilidade, caso ocorra a aplicação violenta de pressões externas, é favorecida a ocorrência de fenômenos como a liquefação, que será abordado posteriormente neste trabalho. De acordo com Miguel (2012), para rejeitos arenosos o valor do índice de compressibilidade (C_c) varia geralmente entre 0.05 a 0.1, enquanto para a maioria de lamas de baixa plasticidade C_c se situa entre 0.2 a 0.3.

2.3.1.6 Permeabilidade

Permeabilidade é a propriedade que o rejeito possui apresenta de permitir o escoamento de água através dele. Os rejeitos granulares apresentam maior permeabilidade, enquanto os rejeitos de granulometria mais fina encontram maiores dificuldades na percolação da água através de seus poros. No campo, normalmente são utilizados amostradores especiais e sondas piezométricas para a determinação das relações de compressibilidade e permeabilidade. No Laboratório existem vários equipamentos para a determinação dessas relações. Dentre esses, nas últimas décadas, o ensaio de adensamento por forças de percolação (HCT) tem se destacado por fornecer resultados mais consistentes. (SILVA, 2008 apud MENEZES, 2017).

É importante que este parâmetro seja monitorado e apresente valores baixos, uma vez que a alta percolação de água entre o rejeito tende a provocar o aparecimento de canais na estrutura de contenção, responsáveis pelo deslocamento de partículas e possível formação de colapso, fenômeno conhecido como *piping*.

Após a deposição dos rejeitos na barragem, ocorre o processo de segregação hidráulica, em que partículas de diferentes tamanhos são dispostas a distâncias específicas do ao ponto onde foram lançadas. É mais acentuado em casos de alta vazão do rejeito, baixas concentrações de polpa e baixas velocidades de fluxo. Após a segregação, ocorre uma zona de alta permeabilidade próxima do ponto de descarga, uma zona de baixa permeabilidade distante do ponto de lançamento e uma zona de permeabilidade intermediária entre as mesmas.

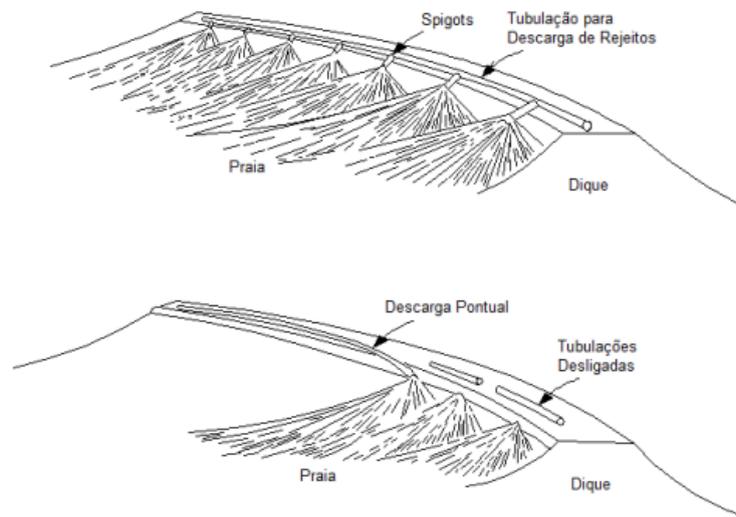
2.3.1.7 Resistência ao Cisalhamento

A tensão de cisalhamento é aquela aplicada por forças de sentidos opostos. A resistência ao cisalhamento pode ser definida como a tensão cisalhante que ocorre no plano de ruptura no instante da ruptura. Este parâmetro é calculado através dos ângulos de atrito do material analisado. A angulosidade das partículas dos rejeitos proporciona um ângulo de atrito de 3 a 5°, maiores em relação àqueles dos materiais naturais de mesma densidade e ao mesmo nível de tensões. Os ângulos de atrito destes materiais decrescem com o nível de tensão aplicada, com valores na faixa de 35 a 40°, quando submetidos a tensões baixas, atingindo 28 a 33° para tensões mais elevadas (SOARES, 2010).

2.3.2 Transporte e Descarga

O transporte da polpa até as barragens de contenção é usualmente realizado através de tubulações, sendo possivelmente empregadas bombas auxiliares para passagem do fluxo. O sistema de tubulações é dimensionado levando em conta a velocidade mínima para que as partículas não se sedimentem causando a obstrução da canalização. Soares (2010) afirma que a seleção desse sistema de transporte é realizada levando em conta fatores como a consistência e volume do rejeito, a topografia da área de manuseio dos rejeitos e o clima local. A descarga dos rejeitos em uma praia de rejeitos pode ser realizada de forma pontual em um único local ou em vários pontos de descarga (spigotting), conforme figura 2.11 (RAFAEL, 2012).

**Figura 2.12. Métodos de descarga perimetral: a) pontos múltiplos (spigotting);
b) descarga pontual**



Fonte: Rafael, 2012

2.3.3 Gestão de Riscos

Segundo estudo publicado em 2010 pela revista Geotechnical News, a taxa de frequência de rupturas de barragens de rejeitos é de 1,2%, valor 100 vezes maior do que a de barragens para armazenamento de água (0,01%). Das 790 barragens de rejeitos de mineração existentes no Brasil, mais de 200 estão classificadas como de alto potencial de risco (FEBRABAN, 2019).

Para mitigação dos riscos associados às barragens de mineração, tendo em vista as tragédias que já ocorreram com a ruptura dessas estruturas, a portaria n. 70.389/2017 do Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM) exige que os empreendedores, responsáveis legais pela segurança das barragens, elaborem um Plano de Ação de Emergência para Barragens de Mineração (PAEBM). Este plano é constituído por um documento técnico no qual estão identificadas as situações de emergência em potencial da barragem, são estabelecidas as ações a serem executadas nesses casos e definidos os agentes a serem notificados. Cabe ao empreendedor neste documento estabelecer, em conjunto com a Defesa Civil, estratégias de alerta, comunicação e orientação à população potencialmente afetada nas Zonas de Autossalvamento, ou seja, regiões imediatamente à jusante da

barragem, em que se considera não haver tempo suficiente para intervenção dos agentes de proteção em caso de acidente.

A barragem de Conceição em Itabira-MG, empreendida pela mineradora Vale, conta com os seguintes dispositivos de instrumentação e monitoramento nas proximidades:

- Piezômetros;
- Indicadores de nível de água (INA);
- Marcos topográficos superficiais;
- Medidores de vazão;
- Medidor de nível do reservatório;
- Inclinômetro;
- Radar;
- Estação robótica;
- Batimetria;
- Pluviômetro;
- Medidor de turbidez

O quadro 2.2, retirado do PAEBM da barragem de Conceição, descreve as causas e evidências associadas aos possíveis modos de falha da estrutura.

Quadro 2.2. Causas e evidências associadas aos possíveis modos de falha da Barragem de Conceição em Itabira-MG

Evidências ¹	Causa	Modo de Falha
<ul style="list-style-type: none"> • Diminuição da borda livre; • Aumento do nível de assoreamento comprometendo o volume de amortecimento; • Visualização de objetos, troncos, animais, solo, etc. dentro e/ou na entrada do sistema extravasor; • Problema identificado na estrutura vertente (deslocamentos, trincas e outros problemas estruturais); • Recalques e abatimentos na crista; • Problemas identificados nas estruturas geotécnicas adjacentes (erosões, trincas, abatimentos, superfícies de ruptura); • Escoamento de água sobre a crista / talude de jusante. 	<ul style="list-style-type: none"> • Volume de amortecimento insuficiente; • Obstrução do sistema extravasor; • Vazões afluentes acima da capacidade do extravasor; • Falha na estrutura vertente; • Deformação excessiva do maciço, com recalque da crista; • Pluviosidade elevada; • Ruptura de estruturas adjacentes ao reservatório. 	<p>Galgamento</p>

<ul style="list-style-type: none"> • Zonas encharcadas ou saturadas no talude de jusante ou na fundação e/ou nas ombreiras a jusante do maciço; • Surgências de água; • Carreamento de partículas no fluxo de água; • Variação das poropressões² (leitura dos piezômetros); • Aumento ou redução considerável nas vazões medidas, sem causas aparentes; • Borbulhamento no pé do talude; • Recalques, abatimentos e subsidências. 	<ul style="list-style-type: none"> • Inexistência de sistema de drenagem interna; • Falha no sistema de drenagem interna (obstrução, colmatção, transição inadequada, etc.); • Gradientes hidráulicos elevados; • Fissuramento do maciço; • Fuga de material por condutos que atravessam o maciço 	<p>Percolação não controlada de água e/ou piping no maciço ou na fundação</p>
<ul style="list-style-type: none"> • Recalques, abatimentos, subsidências e/ou desalinhamentos na crista, bermas, taludes e drenagem externa; • Trincas longitudinais e/ou transversais; • Erosões; • Visualização de superfície crítica de ruptura; • Surgências d'água e áreas encharcadas; • Elevação das poropressões (leituras dos piezômetros); • Alteração na vazão da drenagem interna (leituras dos medidores de vazão); • Variações dos deslocamentos no maciço e/ou fundação (leituras dos instrumentos) 	<ul style="list-style-type: none"> • Baixa resistência do material de fundação/ maciço; • Inexistência e/ou falha no sistema de drenagem interna; • Mau funcionamento do sistema de drenagem superficial; • Vazamentos em tubulações de água e/ou rejeito próximo a barragem; • Aumento do nível freático no maciço; • Aumento de fluxo d'água advindo das encostas da barragem; • Inclinação excessiva dos taludes; • Eventos sísmicos 	<p>Instabilização</p>

¹ Cabe destacar que as evidências para cada causa apresentada são somente um indicativo inicial, devendo ser avaliada por profissional treinado, toda e qualquer anomalia identificada

² Este fator só pode ser considerado como evidência caso o instrumento seja locado no ponto exato da deflagração do piping

Fonte: Vale, 2020

Em um empreendimento como o de barragens de mineração, o gerenciamento do risco é constituído por todas as etapas do projeto, desde a construção e análise dos parâmetros do projeto, até a operação e desativação da barragem. Entende-se pelo gerenciamento do risco as fases de identificação, avaliação, abordagem e monitoramento do risco, a fim de minimizar as perdas sobre o projeto. Atualmente são utilizados pelas empresas de mineração diversos métodos para análise e classificação dos riscos, entre eles o método Hazard and Operability Analysis (HAZOP), que pode ser traduzido para Análise dos Perigos e da Operacionalidade e que classifica através de palavras-chaves, os desvios das grandezas que repercutem no desempenho do sistema; o método Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) ou Análise dos Modos de Falha e dos seus Efeitos, que analisa os possíveis modos de falha do sistema e suas causas, sequelas, meios de determinação e prevenção; e também o método

da Árvore de Falhas, que determina possíveis complicações a partir de um ponto inicial e calcula a probabilidade de que elas ocorram. Outra ferramenta muito utilizada pelas empresas mineradoras em suas atividades operacionais é a Análise Preliminar de Riscos (APR), utilizada com o objetivo de estimar riscos associados a determinadas atividades, a partir da descrição do risco, suas causas e consequências.

2.3.4 Análise das possíveis causas para colapso nas estruturas

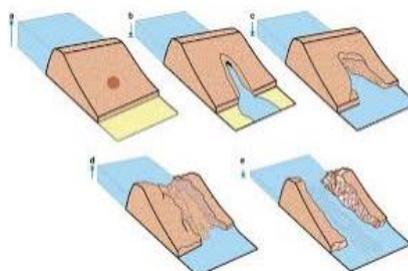
Dentre os modos de falhas mais comuns das barragens de mineração, estão os fenômenos de liquefação, galgamento e piping.

2.3.4.1 Piping

A falha por *piping* pode ser descrita como uma falha por erosão interna, que progride até a formação de um tubo de escoamento dos grumos de jusante para montante no maciço de rejeitos compactados em uma barragem. Ladeira, Espósito e Naghettini (2007) afirmam que fatores como o grau de compactação do solo, a adequada graduação no tamanho das partículas de materiais nas áreas de transição de materiais com granulometria diferente e o adequado monitoramento de parâmetros geotécnicos, são importantes para evitar o processo de formação de *piping*. A pressão da água nos espaços vazios das partículas sólidas, conhecida como poropressão, quando encontrada em valores elevados pode ser uma evidência do início do processo de erosão.

No caso da falha por *piping*, o tubo inicial é especificado com uma conduta retangular ou trapezoidal, que sofre aumento de altura e largura devido ao processo de erosão, dando origem à ruptura final (TONUSSI, 2017).

Figura 2.13. Alargamento do tubo inicial ao decorrer do processo de erosão



Fonte: Okeke e Wang, 2016

O mecanismo de alargamento da tubulação está relacionado às forças hidrodinâmicas produzidas pelo fluxo da água. A evolução do tubo através da barragem altera a dinâmica do fluxo da água de baixa pressão, através dos microporos do solo, para alta pressão, através do tubo de ampliação. Nesta fase de mudança de pressão, o alargamento até o subseqüente processo ruptura se desenvolvem de forma rápida.

Solos não plásticos (sem coesão), como areias, podem entrar em colapso quando saturados sob inundação, e não são capazes de manter uma rachadura quando saturados, ao contrário de solos plásticos (coesos) como argilas, areias argilosas e pedregulhos argilo-arenosos, que são geralmente mais resistentes à erosão do que solos sem coesão (SHERARD et al., 1963; KOVÁCS, 1981; FEMA, 2011 apud GOMES, 2019). A plasticidade das partículas é então um fator relevante na formação de *piping*, visto que a ligação entre partículas de solos plásticos funciona como uma camada impermeabilizante que evita a passagem de água.

2.3.4.2 Liquefação

O fenômeno de liquefação está diretamente relacionado ao grau de saturação dos solos e às condições de carregamento não drenado. Entre as partículas, nos chamados espaços vazios, pode ocorrer ar e água, nos casos em que o rejeito apresenta grau de saturação abaixo de 100%, ou apenas água, quando estes se encontram em estado de saturação completo. A água que ocupa esses espaços vazios exerce uma pressão que pode ser medida através de um piezômetro. Se devido à aplicação de pressão ou excesso de carga o contato entre os grãos for rompido, a resistência do rejeito diminui e este passa a se comportar como um fluido. Neto (2009) cita que uma mudança do arranjo estrutural dos grãos para a estrutura de fluxo começaria quase acidentalmente como em um núcleo e seria espalhada para a massa como uma reação em cadeia. Este fenômeno pode ser ativado tanto por um gatilho estático quanto por um gatilho dinâmico. A liquefação estática é gerada por carregamento cíclicos ou monotônicos, que geram excessos de poropressão, enquanto a liquefação dinâmica é comumente originada por abalos sísmicos ou abalos provocados por explosão.

Rafael (2012) afirma que quanto menor o nível do solo compactado, maior a susceptibilidade à liquefação, tendo em vista que a ocorrência desse fenômeno é geralmente observada em regiões onde o nível de água situa-se a poucos metros abaixo da superfície. A susceptibilidade também é influenciada pela distribuição granulométrica e formato da partícula. Solos bem graduados e com formato angular tendem a possuir menor potencial de liquefação.

Quantitativamente, essa análise de susceptibilidade pode ser calculada através do parâmetro de estado (Ψ), conceito introduzido por Been e Jefferies (1985), em que deve ser determinado se o solo é contrátil ou dilatante. Este cálculo é realizado por meio do índice de vazios inicial (e_0) e do índice de vazios permanente (e_{ss}). O índice de vazios permanente é obtido através da linha de estado permanente ou steady state line (SSL), que de maneira geral pode ser visualizada como uma curva no espaço tridimensional $e - \sigma' - \tau$, sendo e o índice de vazios; σ' a tensão efetiva de confinamento; e τ a tensão cisalhante.

$$\Psi = e_0 - e_{ss} \quad (2.3)$$

Valores positivos de Ψ resultam em solos contráteis, suscetíveis à liquefação, enquanto valores negativos de Ψ resultam em solos dilatantes, não considerados suscetíveis ao fluxo de liquefação.

2.3.4.2 Galgamento

A ruptura por galgamento, também chamada de ruptura hidrológica ou em inglês “*overtopping*”, ocorre quando o nível d’água no reservatório se eleva além da cota da crista da barragem. Um estudo realizado pela Agência Nacional de Águas - ANA (2013) cita que este fenômeno normalmente ocorre depois de períodos de chuvas muito intensas, que produzem cheias superiores à capacidade dos vertedouros. Outra possibilidade para que ocorra o galgamento, é quando ocorre a ruptura a montante de outra barragem, de forma que a barragem a jusante não seja capaz de verter todo o volume, provocando assim uma ruptura em cascata.

Para cálculo da probabilidade de falha por galgamento, são utilizados conceitos da engenharia hidráulica que dão origem à seguinte função de desempenho:

$$Z = \left(\frac{Hr}{\text{Sobrelevação}} \right) - 1 \quad (2.4)$$

Em que Hr é a altura da crista da barragem e a Sobrelevação corresponde a soma do nível d' Água máximo de operação com sobrelevações induzidas no reservatório. A partir desta função de desempenho, a metodologia estatística de Monte Carlo pode ser utilizada para determinar a probabilidade de galgamento associada a cada tempo de retorno através da distribuição de probabilidades (LIMA, ESPÓSITO e NAGHETTINI, 2015)

2.3.5 Alternativas para disposição de rejeitos

Tendo em vista o histórico de acidentes causados pelo rompimento de barragens convencionais e os impactos sociais e ambientais gerados, o estudo de alternativas mais seguras para disposição dos rejeitos de mineração tem ganhado destaque. Dentre essas alternativas estão a disposição dos rejeitos filtrados, em pasta ou o empilhamento dos rejeitos a seco.

O empilhamento a seco consiste na desidratação do rejeito em forma de polpa. Neste caso, o material seria filtrado e transportado por caminhões ou correias transportadoras até ser disposto em pilhas. De acordo com estudo realizado por Paixão, M.; Wilken, A (2021), alguns inconvenientes deste método são o intenso tráfego de caminhões necessário para transporte do material, a demanda de volumes elevados de solo vegetal para revegetação do depósito e pouca disponibilidade de área para as estruturas.

Para disposição dos rejeitos em formato de pasta, o material a ser disposto deve passar pelo processo de espessamento utilizando espessadores em regime contínuo com a adição de floculantes para agregar as partículas sólidas em suspensão (LARA, 2011 apud STELA, DUARTE e PEREIRA, 2020). Para escolha deste método, no entanto, devem ser avaliadas as características pluviométricas e o relevo da região de disposição.

Guimarães (2011) afirma que para disposição dos rejeitos filtrados, podem ser utilizados diversos tipos de filtros (filtro horizontal de correia, filtro de disco convencional, filtro prensa horizontal etc.) com o objetivo de se obter tortas com umidade aproximada entre 6% e 12% para posterior disposição do rejeito em pilhas, diminuindo assim o impacto ambiental gerado.

Existe ainda outro método alternativo: a co-disposição e disposição compartilhada de rejeitos. Neste caso, o rejeito é disposto em conjunto com o estéril da mina (material escavado descartado diretamente na operação de lavra, sem ser processado na usina de beneficiamento), com o objetivo de aumentar as propriedades de resistência do material.

Stela, Duarte e Pereira (2020) consolidaram as principais vantagens e desvantagens dos métodos apresentados no quadro 2.3:

Quadro 2.3. Vantagens e desvantagens de diferentes métodos para disposição de rejeitos

Método	Vantagens	Desvantagens
Tecnologias de filtragem aplicáveis aos rejeitos de mineração (GUIMARÃES, 2011)	<ul style="list-style-type: none"> • Redução de área necessária para disposição; <ul style="list-style-type: none"> • Menor impacto ambiental; • Redução da água nova no processo; <ul style="list-style-type: none"> • Baixo custo operacional • Variedade de equipamentos 	<ul style="list-style-type: none"> • Custo de aquisição dos equipamentos; • Máquinas para transporte e empilhamento; <ul style="list-style-type: none"> • Relação entre a capacidade da mina e a taxa unitária de filtragem; • Pode não ser viável para lamas
Empilhamento a seco dos rejeitos de minério de ferro (GOMES, 2016)	<ul style="list-style-type: none"> • Reutiliza a água no processo; • Redução do custo operacional; • Reduz o custo de construção de barragens 	<ul style="list-style-type: none"> • Custo de aquisição dos equipamentos; • Granulometria pode inviabilizar o processo; • Não é possível bombear
Espessamento e transporte do material em pasta (LARA, 2011)	<ul style="list-style-type: none"> • Permite bombeamento do rejeito; • Reutiliza a água do processo; • Redução do custo de investimento e operação; • Maiores ângulos de repouso 	<ul style="list-style-type: none"> • Sólidos podem alterar consistência do material; • Custo energético e de equipamentos; • Distância entre a área de disposição e o local de origem pode inviabilizar o processo
Co-disposição e disposição conjunta do rejeito em cava exaurida (SILVA, 2014)	<ul style="list-style-type: none"> • Recupera a área minerada; • Dispensa o uso de bombas; • Emprega equipamentos já utilizados; • Melhoria das características geotécnicas 	<ul style="list-style-type: none"> • Limitação da mistura entre estéril e rejeito; • Característica geotécnicas; • Rejeito quimicamente ativo ou tóxico; • Contaminação de lençóis freáticos

Fonte: Stela, Duarte e Pereira, 2020

2.3.6 Reaproveitamento de resíduos da mineração

Além do estudo de alternativas à disposição dos rejeitos, há também a preocupação com o reaproveitamento dos resíduos gerados a fim de reduzir o volume de rejeitos, minimizando assim os impactos ambientais, e conseqüentemente obter retorno econômico por materiais que teriam fim de descarte. Apesar dos rejeitos não serem classificados como substâncias especificamente tóxicas, estes são materiais sólidos com grande concentração de óxidos e pobres em material orgânico, que, se descartados na natureza causam a morte dos rios e animais e inviabilizam para uso a água do local em que forem depositados, por isso seu reaproveitamento deve ser feito apenas após caracterização apropriada.

Andrade (2014) cita que o reaproveitamento dos rejeitos da mineração de ferro para aplicação em concreto está mais limitado pela sua granulometria do que por sua composição química, isso porque o rejeito não possui nenhum composto que seja prejudicial a esse uso, como impurezas orgânicas, sulfatos, cloretos ou materiais carbonosos. Entretanto, nos agregados para concreto e argamassas a presença de óxidos de ferro dá coloração avermelhada a estes materiais, o que é indesejável do ponto de vista estético. Para materiais cerâmicos, rejeitos ricos em óxido de ferro podem ser benéficos quando incorporados em pequenas quantidades, uma vez que podem contribuir significativamente com a queima destes materiais e manutenção da temperatura durante o resfriamento evitando problemas e defeitos nas peças, e, ainda economizando energia nos fornos.

Já existem tecnologias existentes para reaproveitamento dos resíduos de mineração na indústria civil. No ano de 2012, a Minério Itaúna Ltda. - MINERITA, implantou um projeto que consiste na reutilização da sílica (areia) proveniente da rota industrial da produção de sinter-feed da mineradora, que misturado ao cimento adquirido no mercado regional, água e outros componentes secundários, constituem os materiais necessários à produção de pré-moldados para o setor da construção civil (SILVEIRA, 2015).

Após sete anos de pesquisa, a mineradora Vale produziu no ano de 2021, mais de 250 mil toneladas de areia advinda do reaproveitamento de material anteriormente descartado em pilhas e barragens. A areia produzida foi destinada à venda para empresas e doações a prefeituras. Este material é destinado a uso em argamassa, concreto, pavimentação de rodovias, entre outros.

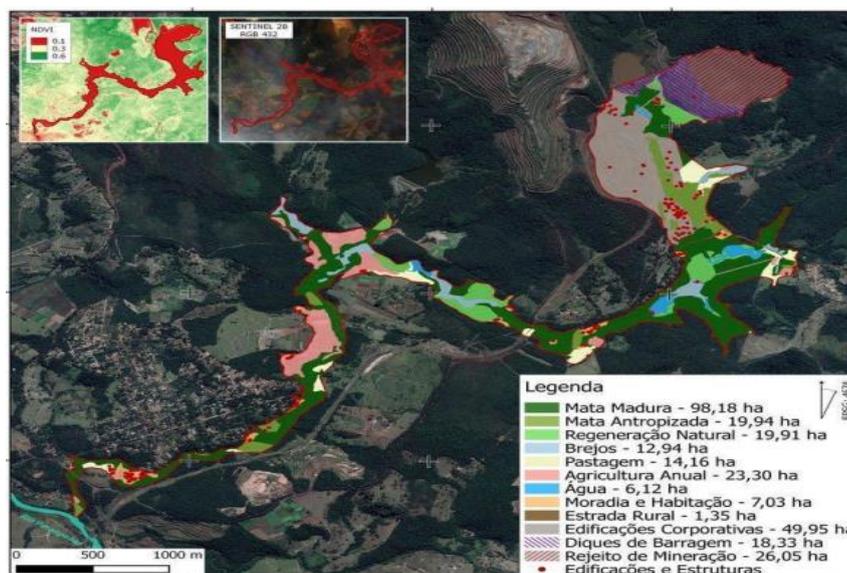
2.3.7 Estudo de Caso - Brumadinho

No dia 25 de janeiro de 2019 ocorreu o rompimento da Barragem 1, empreendida pela empresa Vale, no Município de Brumadinho, em Minas Gerais. A Barragem 1, da Mina de Córrego do Feijão, havia sido construída pelo método a montante em 1976 pela Ferteco Mineração e adquirida pela Vale em abril de 2001. Relatório entregue em 2021 ao Ministério Público de Minas Gerais pela Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), aponta que o rompimento se deu em razão do fenômeno de liquefação.

De acordo com dados da Vale, no momento do rompimento, a estrutura encontrava-se inativa, ou seja, não recebia rejeitos, e também não haviam atividades operacionais em andamento. A empresa também informou que a barragem contava com 94 piezômetros e 41 indicadores de nível d'água, equipamentos de controle que disponibilizavam dados analisados periodicamente pela equipe técnica de geotecnia.

As ondas gigantes chegaram a cerca de 80 quilômetros por hora, transbordando o volume de 11,7 milhões de metros cúbicos de rejeitos contidos na barragem. A extensão atingida foi de 297,28 hectares de terra, incluindo áreas cobertas por residências, pastagens e vegetação nativa. Na área operacional da Mina, trabalhavam cerca de 600 funcionários, e foi onde ocorreu a maior parte das mortes. Estima-se que o mar de lama tenha percorrido todo o percurso atingido em menos de 30 minutos.

Figura 2.14. Área coberta pelos rejeitos e cobertura original da terra antes do desastre



Fonte: Pereira, Guimarães e Cruz, 2019

2.3.7.1 Impactos ambientais e sociais

Dentre os impactos do rompimento, estão listados diversos danos no meio físico e biótico. A lama liberada atingiu o rio Paraopeba, afluente do Rio São Francisco. O rio que antes possuía fins de abastecimento para consumo humano, proteção das comunidades aquáticas, recreação de contato primário, irrigação, aquicultura e pesca, passou a ter seu uso inviabilizado após o desastre.

Dados divulgados na Comissão Parlamentar de Inquérito de Brumadinho (2019), revelam que uma rede formada pelo Instituto Mineral de Gestão das Águas - IGAM, em conjunto com a Agência Nacional de Águas - ANA, a Companhia de Saneamento do Estado de Minas Gerais - COPASA, e a Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais - CPRM, liberou dias após o rompimento da barragem B1, no dia 30 de janeiro de 2019, um informativo das concentrações das espécies químicas relacionadas à qualidade da água ao longo do rio Paraopeba. O informativo destacou uma concentração de ferro de 3095,5 mg/L, valor 2.200 vezes maior que o máximo permitido, e uma concentração de manganês de 736,500 mg/L, que representa 7.365 vezes mais que o valor permitido.

Para saúde humana, a lama de rejeitos também pode apresentar alto potencial contaminante quando ingerida indiretamente, através da água contaminada, irrigação e até pela poeira liberada no ar. A ingestão de metais pesados de forma continuada em altas concentrações pode causar problemas neurológicos. Estudos também indicam que a ingestão de alumínio por longo tempo pode causar Alzheimer.

No meio físico, foram identificadas alterações no relevo local, contaminação da água e dos solos, assoreamento do curso d'água, modificação do fluxo do rio, degradação dos solos, entre outros impactos, enquanto no meio biótico, houve perda de biodiversidade, diminuição da população de mamíferos, répteis, peixes e animais aquáticos, alteração das comunidades vegetais e afugentamento de pássaros e animais terrestres. Dentre os impactos sociais, estão listados o aumento do desemprego e dos problemas de saúde, a perda de vidas humanas, de gado e moradia, a geração de insegurança na população, a diminuição da renda familiar e a total alteração no modo de vida da população local (COSTA *et al.*, 2019).

2.3.7.2 Legislações aplicadas

A Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), estabelecida pela Lei nº 12.334/2010, já visava a regularização das barragens quanto aos padrões de segurança de acordo com o Plano de Segurança da Barragem (PSB), programa de gerenciamento obrigatório para cada uma das estruturas. O PSB deverá ser composto, além de outros documentos de gestão, pelo PAEBM, já citado neste trabalho.

Além da legislação já vigente, após o desastre ambiental de Brumadinho foi publicada a Política Estadual de Segurança de Barragens (PESB), originária da Lei Ordinária nº 23.291 de 25 de fevereiro de 2019, do projeto de lei popularmente conhecido como “Mar de Lama Nunca Mais”. A PESB determina a descaracterização de todas as barragens alteadas pelo método à montante, além de aumentar as exigências para emissão de novas licenças para construção de barragens de rejeitos. Alguns especialistas acreditam a obrigatoriedade da descaracterização de todas as barragens à montante não seja o melhor caminho a ser seguido, visto que da mesma maneira que existem barragens à montante que possam ser bem monitoradas e geridas, o que aumenta a sua estabilidade, também existem barragens sem alteamento, alteadas à jusante ou por linha de centro que são mal administradas e monitoradas, se tornando mais propícias ao rompimento (SOUZA, 2019).

Em 05 de abril de 2019, a Defensoria Pública assinou com a Vale um Termo de Compromisso para parametrização dos pagamentos de indenizações individuais aos atingidos. No dia 4 de fevereiro de 2021, foi assinado entre a Vale, o Governo de Minas Gerais, o Ministério Público do Estado, o Ministério Público Federal e a Defensoria Pública de Minas Gerais, o Acordo Integral para Reparação dos Danos causados pela mineradora em Brumadinho. Com valor estimado de 37,7 bilhões, o acordo define obrigações a pagar e a fazer a serem cumpridas pela Vale, tendo em vista a reparação socioeconômica e ambiental.

3. Considerações Finais

Mesmo com a evolução das legislações no Brasil que regulamentam as atividades de extração de minérios, não há garantia da eficácia na segurança das estruturas, fato que pode ser observado pela quantidade de desastre ocorridos e pela dimensão dos impactos gerados. Além disso, a existência de legislações não garante a fiscalização das barragens. Quando ocorreu o rompimento da barragem do Córrego do Feijão, em Brumadinho (MG), haviam apenas 35 profissionais responsáveis pela fiscalização das barragens de todo território

nacional. Passados exatos três anos do rompimento, o governo federal mantém apenas 14 servidores para fiscalizar as 350 barragens de mineração existentes em Minas Gerais.

É fato que a extração mineral, em especial do minério de ferro, movimenta a economia do país e promove grande desenvolvimento social e tecnológico, no entanto, a imagem do setor mineral tem sido afetada pela falta de segurança das estruturas utilizadas para contenção dos rejeitos gerados.

Avaliando o potencial brasileiro para atividades minerais, observa-se a urgência da necessidade por novos estudos para métodos alternativos de disposição que não necessitem de altos investimentos. O método de filtração de rejeitos antes de sua disposição apresenta-se viável e garante o reaproveitamento de grande parte da água utilizada no processo, mas exige alto custo de implementação. A mineradora Vale colocará em operação no segundo trimestre de 2022, sua quarta planta de filtração de rejeitos de mineração, desta vez na mina de Brucutu, em Minas Gerais. Para empresas de grande porte, é um investimento ideal a longo prazo, mas não é praticável quando se tratam de empresas de pequeno porte que não possuem capital suficiente para aderência aos métodos mais custosos.

Quando analisado o aspecto de custo, observa-se que a escolha dos métodos para alteamento de barragens e disposição de rejeitos do processo de beneficiamento é em grande parte norteado por escolhas que geram menos custos para as mineradoras, mas que não são as melhores a longo prazo quando avaliados os fatores de segurança e sustentabilidade. A tendência é que após os desastres ambientais ocorridos e a forte preocupação da sociedade associada às atividades do setor, cada vez mais sejam cobrados métodos mais seguros nas atividades de mineração, assim como ações que comprovem a preocupação dessas empresas na gestão e reaproveitamento de seus resíduos.

3.1 Papel do profissional de engenharia química nas atividades de mineração

Apesar da obrigatoriedade de descaracterização de barragens construídas por alteamentos a montante no estado de Minas Gerais, ainda existem muitas destas estruturas que não foram eliminadas, tendo em vista o tempo levado para descaracterização e a prorrogação dos prazos inicialmente acordados entre o governo e as mineradoras impactadas pela lei. É papel do profissional de engenharia química a análise dos fenômenos, em especial dos aspectos fluidodinâmicos da liquefação, apontada como causa para o desastre com barragens de maior proporção ocorrido no Brasil. Já existem alguns trabalhos que estudam a aplicação da fluidodinâmica computacional (CFD) para modelagem hidráulica de

barragens de água, mas não foram encontradas muitas pesquisas na literatura que aplicam CFD em barragens de contenção de rejeitos de mineração, sendo o aprofundamento deste tema sugerido como continuação deste trabalho.

Além disso, as etapas de classificação e concentração do minério de ferro podem ser estudadas e otimizadas pelo engenheiro químico de forma garantir maior qualidade do minério produzido, tendo em vista a demanda externa por minérios cada vez mais puros. Sugere-se, também, para estudos futuros acerca do tema, pesquisas voltadas aos diferentes tipos de flotação para beneficiamento do minério de ferro e das combinações mais eficientes de reagentes a serem utilizadas em cada caso.

Ainda, como já citado neste trabalho, a gestão dos riscos de um projeto de barragens se inicia desde os estágios iniciais de construção, sendo necessária a atuação de um engenheiro experiente na análise de todas as etapas. Metodologias como HAZOP para identificação dos riscos já são muito utilizadas no campo da engenharia química para análise de riscos industriais, e também poderiam ser objeto de estudo quando aplicadas à indústria de mineração.

3.2 Tendências do setor de mineração

De acordo com o IBRAM (2021), a tendência para os próximos anos no setor de mineração é o forte investimento em ESG (*Environmental, social and corporate governance*), abordagem que pode ser traduzida para o português como Governança Ambiental, Social e Corporativa. Este conceito está relacionado ao foco na redução de emissão de gases, na preservação do meio ambiente, no aprimoramento das políticas de relacionamento com a comunidade e em políticas de inclusão e diversidade. O estudo afirma ainda que as mineradoras que não se atentarem a estes fatores correm o risco de não receberem investimentos em seus projetos. Além disso, a aposta é também na demanda por minérios específicos utilizados na fabricação de carros elétricos como níquel, lítio, cobalto e também o próprio minério de ferro, fato que traduz o destaque do mercado de mineração como protagonista do desenvolvimento tecnológico e transpõe a importância de novos estudos voltados a este setor.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

A produção do minério de ferro: entenda como se forma o nosso principal produto.

Vale, 2016. Disponível em: <http://www.vale.com/brasil/pt/aboutvale/news/paginas/a-producao-minerio-de-ferro-entenda-forma-principal-produto.aspx>. Acesso em: 05 fev. 2022.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Relatório de Segurança de Barragens**. Brasília, 2021. 68 p.

ANDRADE, Luana Caetano Rocha de. **Caracterização de rejeitos de mineração de ferro, in natura e segregados, para aplicação como material de construção civil**. 2014. 112 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2014. Disponível em: <https://www.locus.ufv.br/bitstream/123456789/6664/1/texto%20completo.pdf>. Acesso em: 25 mar. 2022.

AUGUSTO, Karen Soares. **Identificação Automática do Grau de Maturação de Pelotas de Minério de Ferro**. 2012. 183 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Materiais e de Processos Químicos e Metalúrgicos, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012. Disponível em: <https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/colecao.php?strSecao=resultado&nrSeq=21365@1>. Acesso em: 21 fev. 2022.

BASTOS, Patrícia Cardoso. **Análise comparativa entre o uso de métodos convencionais e o uso de softwares para a seleção de britadores e peneiras**. 2015. 116 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia de Recursos Minerais, Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, 2015. Disponível em: https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/BUBD-A2NGAS/1/monografia__patr_cia_bastos___trabalho__final_.pdf. Acesso em: 15 fev. 2022.

BRASIL. Câmara dos Deputados. Comissão Parlamentar de Inquérito. **Relatório final da CPI do Rompimento de Brumadinho**. Disponível em:

<https://politica.estadao.com.br/blogs/fausto-macedo/wp-content/uploads/sites/41/2019/11/RELAT%C3%93RIO-CPI-BRUMADINHO.pdf>. Acesso em: 20 mar. 2022.

BRASÍLIA. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. . **Boletim do Setor Mineral 2020 (abril)**. 2020. Disponível em: https://ibram.org.br/wp-content/uploads/2021/02/Boletim_SGM-3_06-3.pdf. Acesso em: 07 fev. 2022.

CARDOZO, Fernando Alves Cantini; PIMENTA, Matheus Montes; ZINGANO, André Cezar. Métodos construtivos de barragens de rejeitos de mineração – uma revisão. **Holos**, [S.L.], v. 8, n. 1, p. 77-85, dez. 2016. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte (IFRN).

COSTA, Alfredo *et al.* Avaliação dos danos ambientais provocados pelo desastre tecnológico da mineradora vale s.a. no vale do rio Paraopeba. **Revista Sapiência: Sociedade, Saberes e Práticas Educacionais**, [S.I.], v. 8, n. 2, p. 210-246, 2019.

CRISÓSTOMO, Rejane Cristina. **A Separação Magnética de Minérios de Ferro no Brasil- Uma Revisão**. 2015. 39 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia de Recursos Minerais, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, 2015. Disponível em: https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/BUBD-AC9RSH/1/monografia_rejane.pdf. Acesso em: 07 mar. 2022.

CSN MINERAÇÃO. **A companhia**. [s.d.]. Disponível em: <https://ri.csnmineracao.com.br/a-companhia/minerio-de-ferro/>. Acesso em: 15 fev. 2022.

Esclarecimentos sobre a Barragem I da Mina de Córrego do Feijão. Vale, 2019. Disponível em: <http://www.vale.com/brasil/PT/aboutvale/news/Paginas/Esclarecimentos-sobre-a-barragem-I-da-Mina-de-Corrego-do-feijao.aspx>. Acesso em: 21 mar. 2022.

Estudo revela ligação entre mineração e IDH de municípios no Brasil. Vale, 2018. Disponível em: <http://www.vale.com/brasil/pt/aboutvale/news/paginas/estudo-revela-ligacao-entre-mineracao-e-idh-de-municipios-no-brasil.aspx>. Acesso em: 05 fev. 2022.

FEDERAÇÃO BRASILEIRA DE BANCOS. **Gestão de riscos em barragens de rejeitos no brasil.** 2019. Disponível em: <https://cafecom sustentabilidade.febraban.org.br/pdfs/cafecom sustentabilidade-0057.pdf>. Acesso em: 08 mar. 2022.

FELIPE, Rafael Alves de Souza. **Modelagem e simulação do circuito de britagem de córrego do sítio I com desenvolvimento de modelo para moinho de martelos.** 2019. 129 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mineral, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3134/tde-18072019_142325/publico/RafaelAlvesdeSouzaFelipeCorr19.pdf. Acesso em: 15 fev. 2022.

FERREIRA, Talita Quaresma. **O boom das commodities dos anos 2000: uma análise do impacto da alta das commodities nas taxas de investimento direto externo no brasil.** 2018. 69 f. Monografia (Especialização) - Curso de Economia, Instituto de Economia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018. Disponível em: <https://pantheon.ufrj.br/bitstream/11422/11948/1/TQFerreira.pdf>. Acesso em: 03 fev. 2022.

GOMES, Francisco Hiago de Siqueira. **Quantificação de risco de piping em barragens de terra via abordagens probabilística e fuzzy.** 2019. 129 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019. Disponível em: https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/41784/3/2019_dis_fhsgomes.pdf. Acesso em: 12 mar. 2022

GUIMARÃES, Nilton Caixeta. **Filtragem de rejeitos de minério de ferro visando a sua disposição em pilhas.** 2011. 129 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011. Disponível em: https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/BUOS-8MTF32/1/disserta_o_filtragem_de_rejeitos_de_min_rio_de_ferro_visand.pdf. Acesso em: 07 mar. 2022.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. **Mineração industrial tem saldo positivo em 2020.** 2021. Disponível em: <https://ibram.org.br/noticia/mineracao-industrial-tem-saldo-positivo-em->

fedb0059caf2c10581ab_325347561cf292b434b74adcc60c1f33.pdf. Acesso em: 07 mar. 2022.

LIMA, Fernando Neves; NAGHETTINI, Mauro; ESPÓSITO, Terezinha. Avaliação da probabilidade de galgamento da barragem da PCH de Cajuru por simulação de Monte Carlo. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 20, n. 3, p. 722-730, abr. 2015. Disponível em: https://abrh.s3.sa-east-1.amazonaws.com/Sumarios/182/d93da8dabf192e95d67353aea7da871d_f3ac56336934b1793abdb0b6680afee8.pdf. Acesso em: 17 mar. 2022.

LOPES, Gilmara Mendonça. **Flotação direta do minério de ferro**. 2009. 176 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mineral, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2009. Disponível em: https://www.repositorio.ufop.br/bitstream/123456789/2471/1/DISSE RTA%C3%87%C3%83O_Flota%C3%A7%C3%A3oDiretaMin%C3%A9rio.pdf. Acesso em: 21 fev. 2022.

LOPES, Luciano M. N. O rompimento da barragem de Mariana e seus impactos socioambientais. **Sinapse Múltipla**, [S.I.], v. 5, n. 1, p. 1-14, dez. 2016. Disponível em: <http://periodicos.pucminas.br/index.php/sinapsemultipla/article/view/11377/9677>. Acesso em: 19 fev. 2022.

LUZ, Adão Benvindo da; SAMPAIO, João Alves; FRANÇA, Silvia Cristina Alves. **Tratamento de Minérios**. 5. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. 896 p.

MENEZES, Ana Carolina Carvalho de. **Análise do comportamento de rejeitos de mineração de ferro submetidos ao ensaio hct**. 2017. 88 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2017. Disponível em: <https://www.locus.ufv.br/bitstream/123456789/11526/1/texto%20completo.pdf>. Acesso em: 10 mar. 2022.

MINAS GERAIS. MINISTÉRIO PÚBLICO FEDERAL EM MINAS GERAIS. **Desastre da Vale: relatório elaborado por universidade da Espanha aponta causas do rompimento da barragem em Brumadinho (MG)**. 2021. Disponível em: <http://www.mpf.mp.br/mg/sala-de-imprensa/noticias-mg/desastre-da-vale-relatorio->

elaborado-por-universidade-da-espanha-aponta-causas-do-rompimento-da-barragem-em-brumadinho-mg. Acesso em: 21 mar. 2022.

NETO, João Pimenta Freire. **Estudo da liquefação estática em rejeitos e aplicação de metodologia de análise de estabilidade**. 2009. 179 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Geotécnica, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2009. Disponível em: [https://www.repositorio.ufop.br/bitstream/123456789/3232/1/DISSERTA%
c3%87%c3%83O_%20EstudoLiquefa%
c3%a7%c3%a3oEst%c3%a1tica.PDF](https://www.repositorio.ufop.br/bitstream/123456789/3232/1/DISSERTA%c3%87%c3%83O_%20EstudoLiquefa%c3%a7%c3%a3oEst%c3%a1tica.PDF). Acesso em: 12 fev. 2022.

OKEKE, Austin Chukwueloka-Udechukwu; WANG, Fawu. Hydromechanical constraints on piping failure of landslide dams: an experimental investigation. **Geoenvironmental Disasters**, [S.I.], v. 3, n. 4, p. 1-17, mar. 2016.

PAIXÃO, Marina Damasceno; WILKEN, Adriana Alves Pereira. **Alternativas de disposição de rejeitos de mineração na avaliação de impacto ambiental no estado de minas gerais**. Rev. Geogr. Acadêmica, [S. I.], v. 15, n. 1, p. 33-56, 2021

PEREIRA, Luís Flávio; GUIMARÃES, Ricardo Morato Fiúza; CRUZ, Gabriela de Barros. Impactos do rompimento da barragem de rejeitos de Brumadinho, Brasil: uma análise baseada nas mudanças de cobertura da terra. **Journal Of Environmental Analysis And Progress**. [S. I.], p. 122-129. fev. 2019. Disponível em: <http://www.ead.codai.ufrpe.br/index.php/JEAP/article/view/2373/482483023>. Acesso em: 17 mar. 2022

PUGA, Fernando Pimentel; CASTRO, Lavínia Barros de (Org.). **Visão 2035 : Brasil, país desenvolvido : agendas setoriais para alcance da meta**. 1. ed. Rio de Janeiro: Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, 2018. 437 p. ISBN 9788587545640.

RAFAEL, Herbert Miguel Angel Maturano. **Análise do Potencial de Liquefação de uma Barragem de Rejeito**. 2012. 103 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012. Disponível em: <https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/colecao.php?strSecao=resultado&nrSeq=20720@1>. Acesso em: 15 fev. 2022.

RIBEIRO, K D; SOUZA, L K. Limites de atterberg e sua correlação com a granulometria e matéria orgânica dos solos. **Brazilian Journal Of Biosystems Engineering**. Minas Gerais, p. 185-196. jun. 2018.

SANTOS, Bianca de Castro. **AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DA DESLAMAGEM DE MINÉRIO DE FERRO VIA DECANTAÇÃO E HIDROCICLONAGEM**. 2018. 68 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Minas, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Araxá, 2018. Disponível em: <https://www.eng-minas.araxa.cefetmg.br/wp-content/uploads/sites/170/2018/05/Bianca-de-Castro-Santos.pdf>. Acesso em: 24 mar. 2022.

SAMPAIO, J. A.(Ed.) ; FRANÇA, S. C. A.(Ed.); BRAGA, P. F. A. (Ed). **Tratamento de minérios: práticas laboratoriais**. Rio de Janeiro: CETEM, 2007. 570p.

SAMPAIO, João Alves. Ferro: cvrd/mina n5. In: SAMPAIO, João Alves; LUZ, Adão Benvindo da; LINS, Fernando Freitas. **Usinas de beneficiamento de minérios no Brasil**. Rio de Janeiro: Cetem/McT, 2001. p. 86-91.

SILVA, Angelo Quintiliano Nunes da. **Modelagem da relação teor-recuperação da célula de flotação pneumática**. 2015. 134 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015. Disponível em: https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/BUBD-9WUK2T/1/dissertacao_mestrado_angelo_quintiliano_nunes_da_silva.pdf. Acesso em: 15 mar. 2022.

SILVA, Ludmila Cruz Rezende Senna e. **Barragem de Rejeitos na Indústria Mineral Brasileira**. 2017. 52 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/20626/8/BarragensRejeitosInd%c3%bacteria.pdf>. Acesso em: 03 mar. 2022.

SILVEIRA, Marina Duque. **Utilização de resíduos de mineração na construção civil**. 2015. 39 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, 2015. Disponível em:

https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/BUBD-A2SHGH/1/marina_duque_silveira_utiliza_o_de_residuos_de_minera_o_na_constru_o_civil_cecc_ufmg_jan15.pdf. Acesso em: 19 mar. 2022.

SIVIERO, Pérsida da Rosa. **Análise da variação de compressibilidade e permeabilidade de rejeito de mineração bauxita**. 2019. 69 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Civil de Infraestrutura, Centro Tecnológico de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/197430/TCC%20%20P%c3%a9side%20da%20Rosa%20Siviero.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 08 mar. 2022.

SOARES, Lindolfo. BARRAGEM DE REJEITOS. In: LUZ, A; SAMPAIO, J. A.; ALMEIDA, S. L. M. **Barragem de Rejeitos**. 5. ed. Rio de Janeiro: Cetem/MCT, 2010. Cap. 19. p. 831-887. Disponível em: <http://mineralis.cetem.gov.br:8080/bitstream/cetem/769/1/CL00410010.pdf>. Acesso em: 05 fev. 2022.

SOUZA, Natasha Almeida Fernandes de. **Análise crítica de rotas de processamento de minérios de ferro itabiríticos**. 2010. 122 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Metalúrgica, Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010. Disponível em: <http://repositorio.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10003574.Pdf>. Acesso em: 05 fev. 2022.

SOUZA, Thainá Suzanne Alves. **Evolução histórica da legislação brasileira e do estado de minas gerais relacionado ao tema de disposição de rejeitos de mineração em barragens**. 2019. 93 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2019. Disponível em: https://www.monografias.ufop.br/bitstream/35400000/2342/1/MONOGRAFIA_Evolu%C3%A7%C3%A3oHist%C3%B3ricaLegisla%C3%A7%C3%A3o.pdf. Acesso em: 15 mar. 2022.

STELA, Luis Henrique Pereira; DUARTE, Juliana Canto; PEREIRA, Camila Ortulan. **MÉTODOS DE DISPOSIÇÃO DOS REJEITOS DE MINÉRIO DE FERRO**

ALTERNATIVOS AO MÉTODO DE BARRAGENS: UMA REVISÃO. **Revista Brasileira de Processos Químicos**, Campinas, v. 1, n. 1, p. 1-58, dez. 2020.

TAVARES, L.L.L., **Apostila Processamento de Recursos Minerais I**, 2009.

TONUSSI, Artur Pagotto. **Estudo de ruptura de barragem por piping**. 2017. 65 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade do Sul de Santa Catarina, Florianópolis, 2017. Disponível em: <https://repositorio.animaeducacao.com.br/bitstream/ANIMA/4623/1/Estudo%20de%20ruptura%20de%20barragem%20por%20piping.pdf>. Acesso em: 17 mar. 2022.

Vale inova ao produzir areia sustentável que reduz a geração de rejeitos. Vale, 2021. Disponível em: <http://www.vale.com/brasil/pt/aboutvale/news/paginas/vale-inova-ao-produzir-areia-sustentavel-que-reduz-a-geracao-de-rejeitos.aspx>. Acesso em: 21 mar. 2022.

Wanderley, L. J. M. **Do Boom ao Pós Boom das commodities: o comportamento do setor mineral no Brasil**. Versos - Textos para Discussão PoEMAS. 2017. 1(1), 1-7.

VALE. **PAEBMs**. Disponível em: <http://www.vale.com/brasil/PT/aboutvale/servicos-para-comunidade/minas-gerais/Paginas/Projetos.aspx>. Acesso em: 15 mar. 2022

Zawawi, M. H., Aziz, N. A., Radzi, M. R. M., Hassan, N. H., Ramli, M. Z., Zahari, N. M., Muda, Z. C. (2018). **Computational fluid dynamic analysis at dam spillway due to different gate openings**. Disponível em: <https://sci-hub.se/https://doi.org/10.1063/1.5066886>. Acesso em: 24 mar. 2022