

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA



Barragens de Rejeitos na Indústria Mineral Brasileira

**Ludmila Cruz Rezende
Senna e Silva**

Uberlândia – MG

2017

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

Barragens de Rejeitos na Indústria Mineral Brasileira

Ludmila Cruz Rezende Senna e Silva

Monografia de graduação apresentada a Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos necessários para a aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso do curso de Engenharia Química.

Uberlândia – MG

2017

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA MONOGRAFIA DA DISCIPLINA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE LUDMILA CRUZ REZENDE SENNA E
SILVA APRESENTADA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA, EM 21 DE
DEZEMBRO DE 2017.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Ricardo Amâncio Malagoni

Orientador – FEQUI/UFU

Prof. Dr. Euclides Antônio Pereira Lima

PPGEQ/UNIUBE

Prof. Dr. Luiz Gustavo Martins Vieira

FEQUI/UFU

AGRADECIMENTOS

À Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia pela organização e suporte para a realização desta caminhada.

À minha família e amigos, presentes nos bons e maus momentos, me acompanhando e me dando apoio em todos os aspectos da minha vida.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Ricardo Amâncio Malagoni, pelo apoio, incentivo e auxílio para a realização deste trabalho e em muitos outros momentos de minha graduação.

Aos professores da banca avaliadora pelos conselhos, análises e críticas construtivas.

Sumário

Lista de Figuras	i
Lista de Tabelas.....	ii
Resumo	iii
Abstract	iv
1 – Introdução	1
2 – Revisão Bibliográfica	5
2.1 - Mineração.....	5
2.1.1 - Mineração no Brasil	6
2.2 - Barragens de Rejeitos	8
2.2.1 - Principais características geotécnicas dos rejeitos	10
2.2.1.1 - Densidade <i>in situ</i>	10
2.2.1.2 - Limites de Atterberg	11
2.2.1.3 - Índice de vazios inicial (e_i)	11
2.2.1.4 - Consolidação ou adensamento.....	11
2.2.1.5 - Compressibilidade	12
2.2.1.6 - Permeabilidade	12
2.2.1.7 - Resistência ao cisalhamento	13
2.2.2 - Operações para construção da barragem	13
2.2.2.1 - Espessamento	13
2.2.2.2 - Transporte	15
2.2.2.3 - Descarga	15
2.2.2.4 - Reaproveitamento da água	16
2.2.3 - Principais métodos de construção de barragens de contenção de rejeitos	17
2.2.3.1 - Método da linha de montante	17
2.2.3.2 - Método da linha de jusante	19
2.2.3.3 - Método da linha de centro	21
2.3 - Inspeções e Manutenções	22
2.4 - Legislações em Barragens de Rejeitos	23
3 – Acidente na Barragem de Fundão, Mariana – MG	25

3.1 - Impactos	27
3.2 - Causas	30
3.3 - Responsabilidades	32
3.4 - Indenizações	33
3.5 - Considerações finais	34
4 – Conclusão	35
4.1 - Conclusão	35
4.2 - Sugestões para trabalhos futuros	36
Referências Bibliográficas	37

Lista de Figuras

Figura 2.1 – Produção Mineral Brasileira (IBRAM, 2017).	7
Figura 2.2 – Principais Depósitos Minerais no Brasil (IBRAM, 2015).	8
Figura 2.3 – Aumento da densidade in situ de amostras de diferentes rejeitos com a profundidade (SOARES, 2010).	10
Figura 2.4 – Planta e seção esquemática de um espessador (SOARES, 2010).	14
Figura 2.5 – Esquema de um hidrociclone (COSTA et al., 2012).	14
Figura 2.6 – Em A, método de descarga de polpa periférica por um único ponto e, em B, método de descarga periférica de polpa por spigots (SOARES, 2010).	16
Figura 2.7 – Sequência de alteamento de barragens de rejeito pelo método de montante (LOZANO, 2006, modificada).	18
Figura 2.8 – Sequência de alteamento da barragem pelo método de jusante (SOARES, 2010, modificada).	20
Figura 2.9 – Sequência de alteamento pelo método de linha de centro (SOARES, 2010, modificada).	21
Figura 3.1 – Localização da barragem de Fundão (CATALÁN, 2015).	27
Figura 3.2 – O caminho dos rejeitos (FUNDAÇÃO RENOVA, 2017).	28

Lista de Tabelas

Tabela 1.1 – Casos de ruptura de barragens de contenção de rejeitos (adaptada de SOARES, 2010).....	3
Tabela 3.1 – Principais problemas envolvendo mineração no Brasil (adaptada de Farias, 2002).....	26

Resumo

A mineração é a extração de substâncias minerais a partir de depósitos ou massas minerais e é uma atividade essencial para a economia na atualidade. Os diversos minérios extraídos nessa atividade são utilizados na indústria em diferentes segmentos e fornecem um leque de opções para seu uso, por serem matéria-prima de inúmeros produtos. No entanto, a mineração apresenta uma imagem negativa para muitas pessoas devido ao seu histórico de acidentes e ao alto volume de rejeitos gerado a partir da exploração, representando um problema ambiental devido aos profundos impactos que pode gerar na região onde ocorre a atividade. Barragens de rejeitos são estruturas utilizadas para reter os rejeitos sólidos e líquidos provenientes da indústria mineradora. Como a demanda mundial por bens minerais é crescente, a quantidade de rejeitos também aumenta e, portanto o projeto dessas barragens deve ser minucioso e realizado de maneira a evitar acidentes de qualquer natureza e a diminuir seus impactos no meio ambiente. Assim, este Trabalho de Conclusão de Curso teve como objetivo geral apresentar um estudo sobre barragens de rejeitos na indústria mineral no território brasileiro. Como objetivo específico, realizou-se um estudo sobre os meios para se realizar o projeto de uma barragem de rejeitos e foi realizado um estudo de caso sobre o acidente ocorrido na Barragem do Fundão no município de Mariana, Minas Gerais, para se compreender melhor as causas e consequências do ocorrido e o que poderia ser feito para evitar tal desastre ambiental. Com o presente trabalho foi possível avaliar o quanto o conceito de responsabilidade e ética são importantes na indústria mineral brasileira e como novas tecnologias de reuso e descarte são necessárias e devem ser desenvolvidas.

Palavras-chave: Indústria Mineral, Barragem de Rejeitos, Impactos Ambientais.

Abstract

Mining is the extraction of mineral substances from deposits and is essential for the economy these days. The variety of minerals that are extracted from this activity are used in the industry in many segments and provide an amount of options for being used as raw material for innumerable products. However, mining has a negative image for many people due to its historical of accidents and the volume of rejects produced from the exploration, which represents an environmental problem because of the profound impacts that it can cause in the region where the mining goes on. Tailings dams are structures used to hold solid and liquid tailings from the mining industry. As the global demand for minerals is growing, the amount of tailings also increases and, therefore, the project of these dams must be meticulous and accomplished in a way to avoid any kind of accidents and to decrease the environmental impacts. Therefore, the objective of this undergraduate thesis was to present a study of tailings dams in the mining industry on the Brazilian territory. As a specific objective, a study was carried out about the ways to execute the project of a tailings dam and it was presented a case study about the accident occurred in Fundão Tailing, at Mariana, Minas Gerais, to comprehend the causes and consequences of the fact and what could have been done to avoid the disaster. With the present thesis it was possible to evaluate how the concept of responsibility and ethics are important in the Brazilian mineral industry and how new technologies of reuse and disposal are necessary and must be developed.

Keywords: Mining Industry, TailingsDam, Environmental Impacts

1 – Introdução

A mineração é o processo que envolve a extração, a elaboração e o beneficiamento de minerais concentrados na terra naturalmente. A indústria mineral é uma atividade indispensável para a humanidade nos tempos modernos, pois os recursos extraídos, como ferro, alumínio e manganês, dão origem a diversos produtos utilizados no dia a dia do homem, podendo citar ligas de aço, equipamentos eletrônicos e eletrodomésticos, cerâmicos, construção civil e combustíveis.

Para se obter um mineral puro a partir da rocha mineral, são necessárias várias etapas, sendo elas: pesquisa e exploração, lavra e beneficiamento. O produto final, ou concentrado, tem qualidade e valor agregado relativos ao processo do beneficiamento, pois é nessa etapa que o mineral é separado de outros produtos indesejados e preparado para comercialização.

Devido ao desenvolvimento econômico e tecnológico, a demanda mundial por bens minerais é cada vez maior. Com essa crescente produção mineral, há um aumento significativo do volume de massa do minério rejeitado nos processos de lavra e beneficiamento, e, portanto, é necessário se conter essa alta quantidade de rejeitos com segurança. Devido a um histórico de acidentes envolvendo a indústria mineral mundialmente e, levando em conta os impactos que essa atividade gera no meio ambiente, a mineração possui uma imagem muito negativa na sociedade. Por isso, para evitar quaisquer tipos de acidentes, os rejeitos, como principal fator dos impactos ambientais, devem ser contidos de maneira segura com um estudo realizado de maneira criteriosa.

Mas, como fazer a deposição adequada desses rejeitos? Para seu planejamento, primeiramente, é realizada uma busca pelo local ideal para implantação, levando em conta fatores que influenciem direta ou indiretamente a obra, tais como: características geológicas, hidrológicas, topográficas, geotécnicas, ambientais, sociais e fazer uma avaliação de riscos (LOZANO, 2006). A construção da barragem pode ser feita por meios tradicionais, como a compactação de terra ou pela utilização do próprio material resultante do beneficiamento, e devem atender exigências de proteção ambiental e de segurança, além de ser inserida como parte do processo produtivo. Barragens são estruturas construídas com o objetivo de realizar o represamento da água e de rejeitos.

O projeto de barragens construídas com rejeitos se enquadra na área de barragens convencionais, mas apresentando algumas diferenças fundamentais entre este e as barragens de

terra convencionais. A construção das barragens de rejeito é um processo gradual, sendo as barragens elevadas à medida que a mina é explorada e a quantidade de rejeitos cresce. Possibilita acompanhar o andamento dos resultados e a realização de alterações e aprimoramentos do projeto inicial. Já as barragens de terra são feitas pela compactação da terra, possuindo grandes volumes e funcionam pelo peso do aterro (LUZ *et al.*, 2010).

As etapas da vida útil de uma barragem de rejeitos compreendem a procura do local, o projeto da instalação, a construção, a operação e o fechamento definitivo (LOZANO, 2006). Com a crescente geração de rejeitos, é necessário um aumento das estruturas armazenadoras, atendendo requisitos básicos para um sistema de disposição de rejeitos seguro em barragens: facilidade de operação, inserção segura da obra no meio ambiente, viabilidade econômica.

A diversidade de tamanhos e usos das barragens de contenção reflete-se também nas condições de manutenção dessas estruturas. Há os que mantêm suas barragens de maneira segura, atendendo normas de segurança compatíveis com os padrões internacionais mais exigentes, enquanto algumas empresas deixam suas barragens esquecidas, sujeitas a enchentes ou a ultrapassagem dos níveis de segurança, podendo resultar no rompimento da estrutura. Isso ocorre devido às barragens não trazerem lucros imediatos à empresa, e ainda geram um aumento nos custos de produção, e assim, a disposição dos rejeitos na indústria mineradora tem sido negligenciada (DUARTE, 2008).

Como consequência dessa negligência e da falta de uma análise de riscos, muitos acidentes já ocorreram e trouxeram graves consequências ao meio ambiente e à sociedade próxima à área da barragem. As barragens são classificadas em diferentes níveis de potencial à danos ambientais e riscos à saúde da população. E, por menor que seja o nível, em casos de acidentes, os efeitos são severos e trazem muitos danos à todo o ecossistema que se encontra na região da barragem, podendo se estender para outros locais e afetando uma ampla área. A Tabela 1.1 apresenta alguns acidentes ocorridos em barragens de contenção de rejeitos com suas devidas causas e os danos causados, sendo que muitos desses acidentes deixaram vítimas e destruíram cidades e áreas próximas à estas, com danos muitas vezes irreparáveis e que deixaram marcas que serão sentidas por muitas gerações.

Tabela 1.1 – Casos de ruptura de barragens de contenção de rejeitos (adaptada de SOARES, 2010).

Ano	Local	Causas da Ruptura	Danos provocados
1965	El Cobre – Chile.	Terremoto/ liquefação.	210 vítimas, soterramento do povoado.
1970	Mufaline Mine – África.	Não definida.	89 vítimas – 453.000 m ³ de rejeitos saturados.
1972	Buffalo Creek – Estados Unidos.	Não definida.	110 mortos, 1100 feridos, 1500 casas destruídas, 595.000 m ³ de lama.
1974	Impala Platinum – África do Sul.	Entubamento.	12 vítimas, 3 milhões de m ³ de lama fluíram por 45 km, destruição de estradas, pontes e soterramento de reservatório de água potável.
1985	Prealpi – Itália.	Material de construção.	268 vítimas, liberação de 200.000 m ³ de rejeitos.
1986	Mina de Fernandinho – Itabirito, Minas Gerais.	Liquefação.	4 vítimas, destruição de laboratórios e equipamentos.
1996	Mina do Porco – Bolívia.	Entubamento.	3 vítimas, 300 km de rio contaminados.
2004	Mina da Ultrafértil S/A – Catalão, Minas Gerais.	Negligência no monitoramento da barragem.	Lama e rejeitos atingiram 7 km da área rural do município, matando fauna e flora.
2010	Mina de San José – Chile.	Deslizamento de rochas, bloqueando a saída da mina.	33 trabalhadores soterrados em uma mina a 700 m de profundidade durante 69 dias.
2015	Barragem de Fundão – Mariana, Minas Gerais.	Erro de operação e negligência no monitoramento da barragem.	19 vítimas, 62 milhões de m ³ de lama despejados, contaminação do Rio Doce, danos a monumentos históricos, à fauna e à flora.

Algumas falhas ocorridas em barragens de contenção de rejeitos custaram vidas e causaram danos ambientais consideráveis. Acidentes graves resultaram em grandes volumes de rejeitos descarregados no meio ambiente. A partir destas informações, este trabalho visou realizar um estudo sobre barragens de rejeitos no Brasil e como objetivo específico, foram levantados os principais motivos que levam a acidentes e a melhor maneira para se realizar o

projeto de barragens de retenção de rejeito, atendendo a legislações e especificações brasileiras. Foi feita uma introdução sobre a mineração e sobre a mineração no Capítulo 1. No capítulo 2 foi realizada uma revisão bibliográfica sobre barragens de rejeito, os principais aspectos que se deve observar ao realizar o projeto de uma barragem e sobre as legislações brasileiras que devem ser aplicadas à construção de uma barragem. No Capítulo 3, foi feito um estudo de caso sobre o acidente de Mariana, MG, visando o entendimento do ocorrido e suas consequências e como poderia ter sido evitado.

2 – Revisão Bibliográfica

O ato de extrair minerais da terra é realizado há muitas décadas pelo homem e é uma atividade de extrema importância, sendo que a partir da extração e do beneficiamento, o minério puro obtido é matéria prima para diversas indústrias. O homem faz o uso de diversos minérios, que são essenciais para a vida moderna, e o consumo desses minérios vem aumentando com o passar dos anos. No entanto, as atividades minerais geram uma grande quantidade de resíduos sólidos, dos quais os mais importantes em termos de volume são os gerados pela atividade de extração do minério (estéreis) e pelas usinas de beneficiamento (rejeitos). Com isso, este capítulo fará um estudo sobre a mineração e sobre barragens de rejeito, meio de descarte dos rejeitos utilizados na industrial mineral.

2.1 Mineração

A mineração é tomada como a atividade industrial com a função de extrair substâncias minerais do solo, a partir da perfuração ou contato com áreas de depósitos de massas minerais. Para fazer a exploração de uma mina é necessário realizar um estudo minucioso sobre a área a ser explorada, sendo feito um estudo de viabilidade e um planejamento criterioso, avaliando as condições geológicas, sociais e ambientais, tanto para uma exploração segura e viável quanto para a recuperação da zona afetada, para que esta possa ter um futuro e ser utilizada para outros fins após o fim das atividades de mineração no local. Alguns aspectos devem ser considerados fundamentais para se definir se a exploração é viável e o meio para realizá-la (LOPES, 2015):

- Visar à segurança e condições ambientais adequadas para os operários;
- Redução dos impactos causados ao meio ambiente;
- Reduzir e controlar os rejeitos gerados;
- Adaptar as condições geológicas à infraestrutura disponível;
- Melhoria da produtividade, com impacto direto na redução do custo.

O processamento do minério consiste de uma atividade que tem como objetivo obter um produto final com um teor elevado de minerais úteis, sendo realizados a lavra, o beneficiamento e o tratamento de rejeitos para se atingir tal objetivo. Para a escolha dos métodos, devem ser avaliados aspectos tecnológicos, sociais, econômicos e políticos. A lavra é o conjunto de atividades que realizam a extração das rochas na qual os minérios se encontram,

sendo que os tipos de método de lavra mais comuns, praticados no Brasil, são: lavra a céu aberto, lavra subterrânea, garimpagem manual ou mecânica e dragagem (ABREU, 2010). Embora seja possível destacar estes métodos de lavra principais, provavelmente existam mais de trezentas variações (MACÊDO *et al.*, 2001).

O beneficiamento do minério é composto de uma série de etapas com o objetivo de separar o minério dos rejeitos e concentrá-lo para se obter um material mais puro. Este processo consiste de oito etapas, sendo elas (GRUPO VISION, 2017):

- Britagem: através de peneiras e britador, esta etapa reduz a granulometria do minério.
- Moagem: também realizado para reduzir a granulometria, mas através de moinhos, para adequar o material para as próximas etapas.
- Deslamagem: retirar partículas ultrafinas que podem ser prejudiciais as etapas seguintes do beneficiamento.
- Peneiramento: separar o minério desejado dos rejeitos por granulometria.
- Jigagem: também separa o minério dos rejeitos, mas através da densidade.
- Separação magnética: também faz a separação, porém utiliza propriedades magnéticas.
- Flotação: separar o minério dos rejeitos por propriedades químicas e ajustar o minério quimicamente.

Este produto final é vendido por um preço estabelecido, de acordo com o teor de minério nele presente.

2.1.1 A Mineração no Brasil

Os primeiros relatos da atividade de mineração no Brasil datam do final do século XVII, quando se deu início a exploração de ouro em Minas Gerais (FARIAS, 2002). Desde então a indústria mineral se tornou um setor de extrema importância na economia brasileira, sendo responsável pela obtenção de matérias-primas utilizadas nas indústrias metalúrgicas, siderúrgicas, de fertilizantes, petroquímica, entre outras. Além disso, de acordo com dados do Ministério do Trabalho e Emprego (MTE) e do Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM) o setor Extrativo Mineral gerou cerca de 214 mil empregos diretos no ano de 2015 (dados de Julho/2015). O IBRAM calcula também que a indústria de mineração possua um efeito multiplicador de postos de trabalho, e que totaliza quase 2,7 milhões de trabalhadores que estão envolvidos de alguma forma com a atividade de mineração.

A mineração brasileira é um setor básico na economia nacional e representa quase 5% do Produto Interno Bruto brasileiro (IBGE, 2013), contribuindo para a melhoria da qualidade de vida da sociedade. A Figura 2.1 apresenta os dados da Produção Mineral Brasileira (PMB) nos anos de 1994 a 2016, sendo os valores exclusivos da indústria extrativa mineral, não incluindo petróleo e gás. Os dados foram divulgados em fevereiro de 2017. A PMB é a soma de todos os bens minerais produzidos no país e calculados em bilhões de dólares, segundo metodologia do IBRAM.

Produção Mineral Brasileira (PMB)

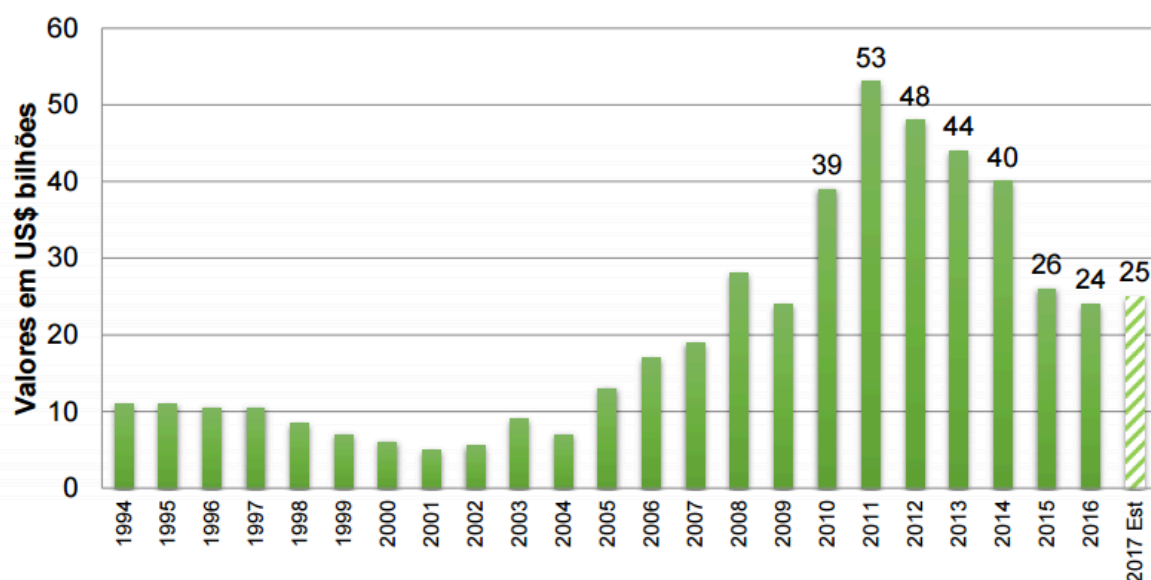


Figura 2.1 - Produção Mineral Brasileira (IBRAM, 2017).

O território brasileiro apresenta um grande potencial para a mineração, sendo um importante depósito mineral em termos mundiais e apresentando um montante de aproximadamente 72 minerais, sendo 23 minerais metálicos, 4 tipos de combustíveis e 45 tipos de minerais não metálicos (IBRAM, 2013). O país destaca-se principalmente na exploração de minério de ferro, bauxita, manganês e nióbio, sendo líder global deste correspondendo a mais de 90% da comercialização mundial de nióbio.

Segundo Farias (2002), no ano de 1999, os dados obtidos nas concessões de lavra demonstram que as empresas mineradoras no Brasil estão distribuídas regionalmente com 4% no norte, 12% no centro-oeste, 13% no nordeste, 21% no sul e 54% no sudeste. A indústria da mineração é predominantemente formada por micro e pequenas empresas (IBRAM, 2015). Na

Figura 2.2 pode-se observar os principais depósitos minerais no território brasileiro. Tal figura foi elaborada pelo IBRAM, com dados obtidos pelo Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM).

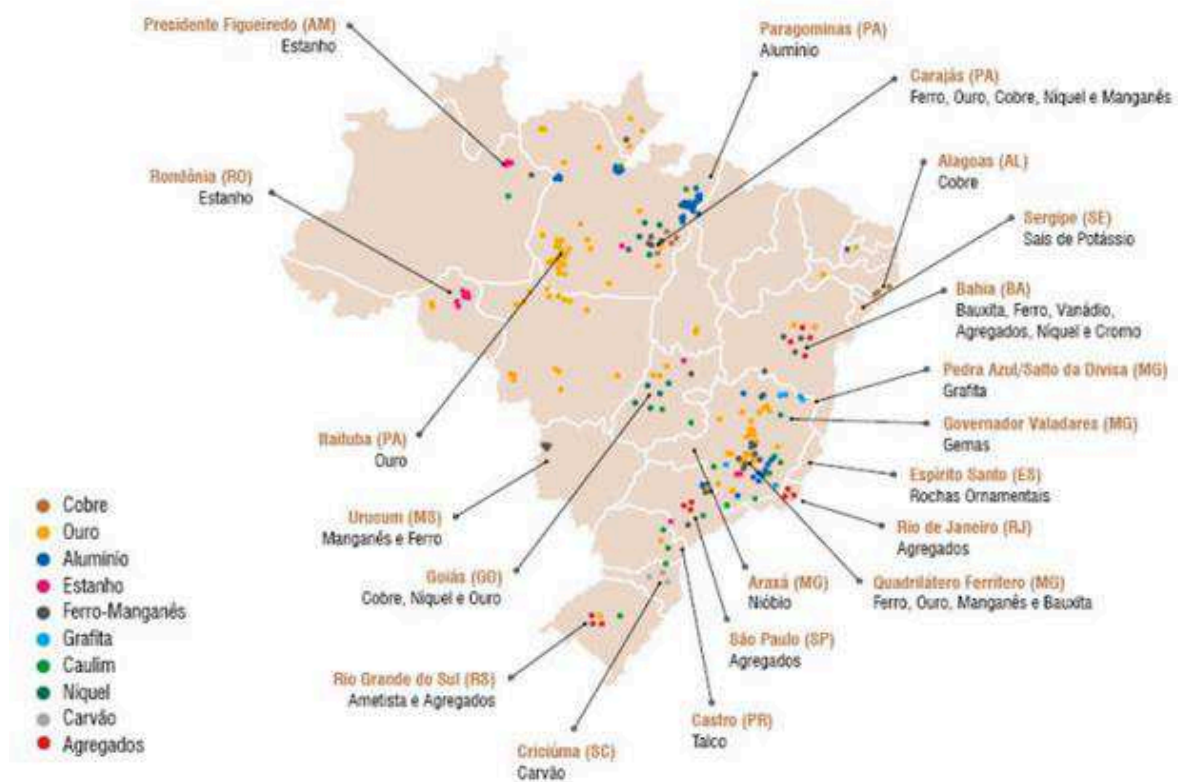


Figura 2.2 – Principais Depósitos Minerais no Brasil (IBRAM, 2015).

Portanto, torna-se de grande importância para a sociedade tomar conhecimento de como estas empresas influenciam a região não só economicamente como apresentado até aqui, mas, principalmente, ambientalmente, seguindo normas quanto ao descarte de seus rejeitos, a construção de suas barreiras e possuindo um plano de ação de emergências.

2.2 Barragens de Rejeitos

Os processos industriais de mineração são crescentes a cada ano, de acordo com o aumento da necessidade do homem quanto aos produtos que provêm dos minérios. No entanto, esse processo de obtenção e beneficiamento do minério conta com subprodutos que apresentam riscos ao meio ambiente. O rejeito é a fração do minério destituída de mineral útil e não possui valor econômico, obtido pelo processo de beneficiamento do minério, e são os principais responsáveis pelo impacto ambiental gerado pelas mineradoras (LOZANO, 2006). Portanto, para

a aplicação adequada da gestão ambiental, o tratamento e armazenamento desses rejeitos são de extrema importância e devem maximizar a segurança no descarte, minimizando os custos para a empresa.

Esses rejeitos são armazenados em barragens de contenção, que tem a finalidade de reter os rejeitos sólidos e a água dos processos de beneficiamento de minério. As barragens de rejeito são executadas em estágios, na medida em que os rejeitos são gerados, diluindo custos da construção e operação. De acordo com Duarte (2008), para a construção da barragem, algumas premissas devem ser seguidas, tais como: separação da fração grossa e fina (as propriedades geotécnicas são diferentes entre as frações), controle dos processos de separação (granulometria), utilização de sistemas de drenagens eficientes, compactação dos rejeitos (aumento da densidade e da resistência), proteção superficial da barragem, dentre outras.

Além dos impactos ambientais, ocorreram acidentes graves envolvendo barragem de rejeitos e que resultaram em grandes volumes de rejeitos descarregados no meio ambiente. Nesse âmbito, devido ao risco e ao histórico de acidentes em barragens de rejeitos, devem-se levar em conta todas as diretrizes para um projeto seguro de uma barragem. É necessário o conhecimento das características dos materiais utilizados na obra e do material a ser contido, a dinâmica construtiva, a operação e as características do meio no qual a obra será realizada para evitar quaisquer danos imprevistos. Além disso, o custo do projeto deve ser considerado.

O planejamento inicia com a pesquisa do melhor local para implantação, sendo influenciado por todas as variáveis direta ou indiretamente que possam interferir nas obras, como: características hidrológicas, topográficas, geotécnicas, ambientais, geográficas, sociais e avaliação dos riscos (SOARES, 2010). Os principais critérios que devem ser considerados para determinar a localização são:

- Maior relação entre o volume de reservatório e o volume do aterro da barragem (menor custo/benefício);
- Menor interferência do reservatório na comunidade local, promovendo a redução de custos com realocações e desapropriações;
- Menor distância possível da usina de beneficiamento, o que resulta em menor comprimento das linhas de condução dos rejeitos e de retorno da água;
- Menor distância possível da área da mina, o que possibilita, de forma mais econômica, a utilização do estéril ou de materiais adequados à construção da barragem inicial.

2.2.1 Principais características geotécnicas dos rejeitos

O rejeito final obtido após todas as etapas do beneficiamento é constituído por gases, líquidos e sólidos, variando em suas características a cada tipo de minério. Para o projeto de barragens de rejeitos, estudos devem ser realizados para se definir os parâmetros dos rejeitos, analisando-se a natureza do depósito, a forma como o rejeito será depositado e características do material, que são: massa específica aparente, umidade, limites de liquidez e plasticidade, índice de plasticidade e granulometria deste. Essas características determinam o comportamento geotécnico do material. Para uma análise geotécnica de um material deve-se conhecer suas principais características, sendo estas citadas a seguir.

2.2.1.1 Densidade *in situ*

A densidade é geralmente expressa em função da densidade seca ou índice de vazios e é função da gravidade específica, granulometria e conteúdo argiloso, e pode variar muito. Esse alto limite de variação da densidade dos grãos tem como consequência uma influência no comportamento da massa do rejeito final na barragem (SOARES, 2010).

A densidade *in situ* é função da posição e do método em que o material é lançado na barragem e, normalmente, possui maiores valores quanto mais profundo o material estiver na barragem. Isso ocorre devido à compressibilidade dos rejeitos depositados hidraulicamente (SOARES, 2010). Portanto, uma maior densidade *in situ* é desejada para os materiais que serão utilizados na construção da barragem. A Figura 2.3 ilustra esse comportamento.

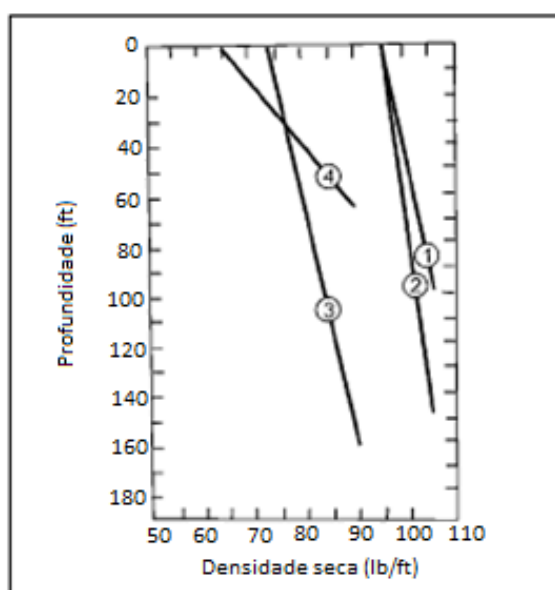


Figura 2.3 - Aumento da densidade *in situ* de amostras de diferentes rejeitos com a profundidade (SOARES, 2010).

2.2.1.2 Limites de Atterberg

Os solos podem apresentar diferentes tipos de consistência, a depender da quantidade de água que possuam. Essa consistência pode ser sólida, semi-sólida, plástica ou a de um fluido denso. Os limites de Atterberg são métodos para se avaliar a natureza de solos através de uma série de testes e ensaios, o que torna possível definir o limite de liquidez e o limite de plasticidade de um solo. O limite de liquidez é o teor de umidade que separa o estado plástico do estado líquido, ou seja, é o valor de umidade abaixo do qual o solo se comporta como material plástico. Segundo a NBR 6459/1984, o limite de liquidez é apresentado em porcentagem e o teor de umidade que representa tal limite é apresentado em um gráfico com dados obtidos em experimento. O limite de plasticidade é o teor de umidade que delimita o estado semi-sólido do plástico. É tido como o teor de umidade em que o solo deixa de ser plástico, tornando-se quebradiço, ou seja, abaixo desse valor o solo começará a fissurar ao tentar ser moldado (SOARES, 2010). O limite de plasticidade é também obtido por experimentos, segundo a NBR 7180/1984, e representado em porcentagem. Cada material possui um limite de liquidez e um limite de plasticidade próprios para uma dada condição de temperatura e pressão, e, portanto, conhecer esses limites é importante para entender o comportamento do solo conforme a umidade é alterada.

2.2.1.3 Índice de vazios inicial (e_i)

Determinar quando a sedimentação acaba e inicia-se a consolidação não é uma tarefa trivial, e, portanto, é necessário o uso de um índice de vazios inicial. De acordo com Soares (2010), esse índice é definido como o limite entre a sedimentação e a consolidação, e cada material apresenta um valor específico de índice de vazios por ser função do peso específico e do limite de liquidez. Para calcular o índice de vazios inicial, utiliza-se a Equação 2.1:

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

em que G representa o peso específico dos sólidos secos e LL o limite de liquidez do material (em porcentagem).

2.2.1.4 Consolidação ou adensamento

É o efeito em que um rejeito líquido passa a ser sólido e pode levar até dezenas de

anos. Os materiais mais próximos da superfície têm elevado índices de vazios, enquanto os materiais acumulados no fundo da barragem possuem um baixo índice, ou seja, sua densidade seca é elevada (SOARES, 2010). Cada material possui um valor de compacidade relativa para cada condição em que está aplicada, sendo que para os materiais de construção da barragem é desejável um menor valor de CR, para uma fundação estável. Assim, pode-se representar a compacidade relativa pela Equação 2.2:

$$CR = \frac{e_{m\acute{a}x} - e}{e_{m\acute{a}x} - e_{m\acute{i}n}} \quad (2.2)$$

sendo que: $e_{m\acute{a}x}$ é o índice máximo de vazios, $e_{m\acute{i}n}$ o índice mínimo de vazios e e índice de vazios do material no estado em que se encontra.

Sendo que o índice de vazios é representado pela Equação 2.3:

$$e = \frac{V_V}{V_S} \quad (2.3)$$

em que V_V é o volume de vazios e V_S o volume de sólidos.

2.2.1.5 Compressibilidade

É a propriedade que a matéria apresenta quando sofre a ação de forças adequadamente distribuídas, e com isso, tem seu volume diminuído, ou seja, a capacidade que um fluido possui de o volume por ele ocupado variar em função da pressão. A compressibilidade é função do material e das condições à que este está aplicado. Materiais com baixa compressibilidade são melhores para a construção de barragens por serem compostos de partículas de maior resistência e assim apresentarem uma melhor estabilidade mecânica dos taludes (HUMMES, 2007).

2.2.1.6 Permeabilidade

É a propriedade que representa uma maior ou menor dificuldade com que a percolação da água ocorra através dos poros do solo. Nos materiais granulares não coesivos como as areias, por exemplo, há uma grande porosidade o que facilita o fluxo de água através do solo, já nos materiais finos e coesivos como as argilas, o fluxo da água é mais dificultado. Essa grande variação do índice de permeabilidade dificulta muito sua determinação e pode-se dizer que é função da segregação, da dimensão dos grãos, da sua plasticidade, do modo como é lançado e da profundidade do material rejeitado (SOARES, 2010). Para as barragens é importante que o

material tenha baixa permeabilidade, sendo que cada material apresenta seus próprios níveis de permeabilidade dependendo das condições às quais está sendo aplicado. A baixa permeabilidade é importante pois a percolação da água pode provocar o carreamento de partículas do aterro e até o desenvolvimento de um "piping", ao longo desses caminhos, podendo causar erosão e liquefação na barragem (TEIXEIRA, 2017).

2.2.1.7 Resistência ao cisalhamento

O cisalhamento é um fenômeno de deformação ao qual um corpo está sujeito, ocorrendo quando forças são aplicadas em sentidos opostos sobre o corpo e provocam um deslocamento (SOARES, 2010). Portanto, os rejeitos devem apresentar uma alta resistência ao cisalhamento para que a barragem apresente maior resistência, sendo uma característica própria de cada material.

2.2.2 Operações para construção da barragem

Uma barragem de contenção construída com os próprios rejeitos de uma mina depende de uma série de operações que devem ser devidamente realizadas de maneira a evitar possíveis acidentes. O conjunto de operações para o projeto compreende: espessamento, hidrociclonagem, transporte e descarga da polpa, deposição dos rejeitos, sistema de recuperação da água, drenagem superficial e profunda e a construção da barragem (SOARES, 2010).

2.2.2.1 Espessamento

É o processo de remoção de parte da água contida na polpa do rejeito, para que uma parcela desta, que não esteja comprometida por contaminantes, seja reaproveitada no processo de beneficiamento do minério. Esta retirada da água acarreta em uma polpa mais densa, o que ajuda no seu transporte para a barragem de rejeitos (SOARES, 2010). Para esse procedimento podem ser utilizados espessadores ou hidrociclones, apresentados nas Figuras 2.4 e 2.5, respectivamente. Este é o estágio final do processo de beneficiamento. A fração mais grossa advinda deste processo é utilizada para a construção do maciço da barragem e a fração menos densa é levada ao reservatório da barragem.

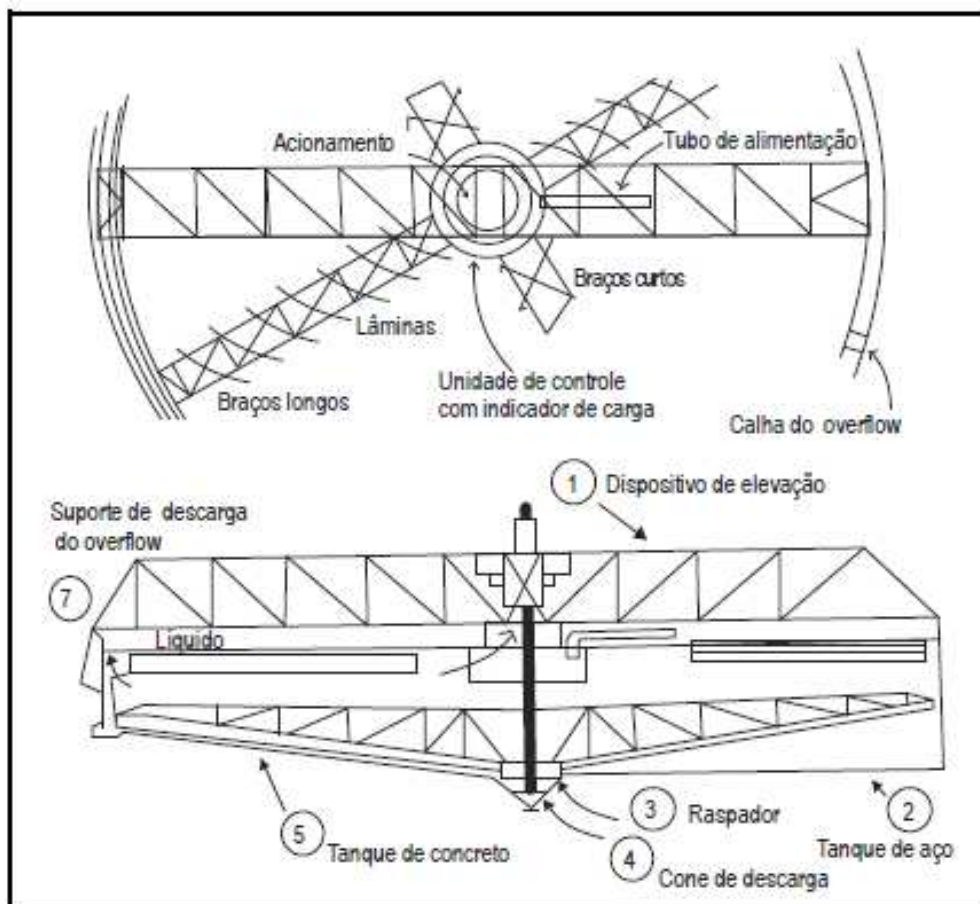


Figura 2.4 – Planta e seção esquemática de um espessador (SOARES, 2010).

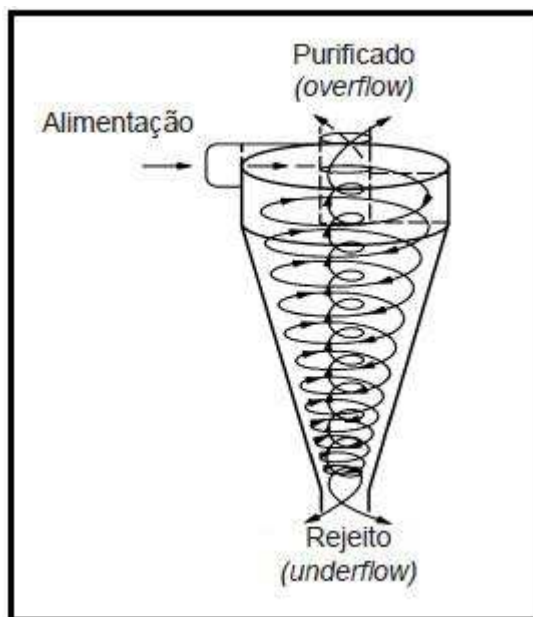


Figura 2.5 – Esquema de um hidrociclone (COSTA et al., 2012).

2.2.2.2 Transporte

Para se transportar a polpa advinda do processo de espessamento para os locais de deposição alguns fatores são importantes para um transporte seguro e eficaz. Como fatores determinantes estão a topografia da área de manuseio dos rejeitos, o volume a ser depositado, a consistência da polpa e o clima do local (SOARES, 2010). Esse transporte é mais comumente realizado em tubulações. A gravidade é utilizada no transporte e podem ser empregadas bombas como auxílio. Para o projeto da tubulação são realizadas análises de possíveis perdas de carga e da distância e das diferenças de cota entre a usina de beneficiamento e o local da deposição.

Para chegar a uma velocidade ideal para o transporte devem ser realizados estudos criteriosos, fundamentando-se na densidade, distribuição granulométrica e tamanho máximo das partículas da polpa. Essas análises são necessárias para que a velocidade não seja baixa o suficiente, evitando a sedimentação do material sólido e assim não ocorrer a obstrução da tubulação e que não seja muito elevada para evitar o desgaste das tubulações e perdas de cargas, o que provocaria um aumento nos custos. Para minimizar tais desgastes podem ser utilizadas tubulações com revestimento interno de borracha ou tubulações de polietileno de alta densidade, em casos de transporte com bombeamento de baixa pressão (SOARES, 2010).

O transporte dos rejeitos também pode ser realizado na forma a granel por calhas ou valetas, em locais de topografia descendente no sentido da usina para o local de deposição, por caminhões de mina, teleférico, correia transportadora ou podem ser feitas uma combinação desses métodos.

2.2.2.3 Descarga

No transporte da polpa até a área de disposição, as frações argilosas perdem sua plasticidade e coesão, por encontrarem-se acima de seu limite de liquidez, o que a faz se comportar como um fluido viscoso (SOARES, 2010). A tubulação de descarga, ou tubulação tronco, se inicia após a caixa de recepção da polpa e esta polpa é eliminada em um ou vários locais da barragem, esta chamada de descarga periférica por *spigots*. Os *spigots* são posicionados ao longo da tubulação e controlam a descarga da polpa através de válvulas individuais, lançando-a em áreas próximas. Se a polpa é eliminada em um único ponto, as tubulações que realizam o transporte devem ser desconectadas e realocadas, fazendo com que se forme uma sequência de depósitos adjacentes (SOARES, 2010). A Figura 2.6 ilustra os dois

tipos de descarga.

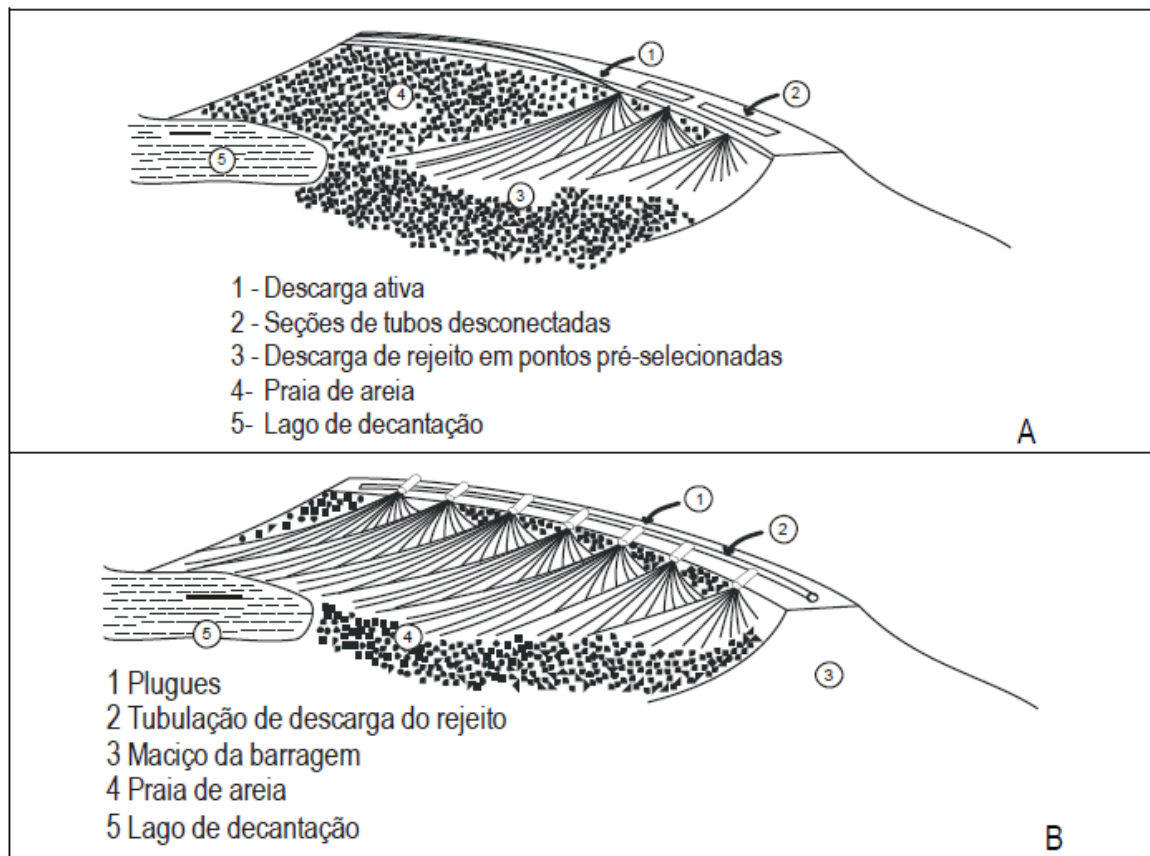


Figura 2.6 – Em A, método de descarga de polpa periférica por um único ponto e, em B, método de descarga periférica de polpa por spigots (SOARES, 2010).

Os rejeitos são lançados a montante da superfície da água do lago de decantação, em praias anteriormente formadas e que são distribuídas ao longo da barragem. Em alguns casos, são utilizados hidrociclones para a separação das frações mais finas das frações mais grossas da polpa, antes desta ser lançada na barragem. A fração mais grossa é utilizada para a construção do corpo da barragem, enquanto o material mais fino vai para os lagos de decantação na barragem (SOARES, 2010).

2.2.2.4 Reaproveitamento da água

A água contida na polpa do rejeito é em parte recuperada e reaproveitada no processo do beneficiamento do minério. Em alguns casos, há a presença de contaminantes na água e portanto não é possível reaproveita-la, pois tais contaminantes podem reduzir a eficiência do

processo de beneficiamento, podendo causar implicações como decantação, formação de praias, dentre outras (SOARES, 2010).

2.2.3 Principais métodos de construção de barragens de contenção de rejeitos

A construção de barragens de contenção de rejeitos por meio de alteamentos sucessivos começa pela instalação de uma barragem piloto, constituída por um dique inicial de terra compactada, de aproximadamente 5 metros (SOARES, 2010). Os seguintes alteamentos são formados pelo próprio rejeito depositado gradualmente, à medida que a mina é explorada. O hidrociclone é utilizado para a separação dos sólidos grossos dos finos, sendo que os grossos são depositados no fundo para a formação da barragem e os finos são lançados no reservatório da barragem.

O alteamento das barragens pode ser realizado de diferentes configurações, cada um com suas características, especificações, vantagens e desvantagens. Podem-se citar três métodos que são mais comuns e utilizados para esse tipo de projeto: método montante, método jusante e método de linha de centro. Essa denominação se refere à direção em que os alteamentos são feitos em relação ao dique inicial.

Para definição de qual o método mais adequado para a construção da barragem, deve-se fazer uma análise meticulosa das condições do projeto: topografia, hidrologia, geologia, tipos e propriedades do subsolo, granulometria e concentração dos rejeitos, velocidade de disposição, variação da capacidade de armazenamento do reservatório com o aumento da altura, disponibilidade de equipamentos de terraplanagem, compactação e equipes de controle (SOUZA e FILHO, 2015).

2.2.3.1 Método da linha de montante

Os alteamentos se apoiam diretamente na “praia” de rejeitos secos dentro do reservatório, se deslocando para montante do dique inicial, sendo os rejeitos depositados aproveitados na construção da estrutura de contenção (SOUZA e FILHO, 2015). O dique inicial deve ser impermeável, geralmente feito de um material argiloso.

A polpa é lançada a montante da linha de simetria do dique, formando uma praia de deposição, que servirá como fundação para a construção do novo alteamento. O processo é repetido até que seja atingida a cota de ampliação prevista no projeto.

Como os rejeitos têm uma distribuição granulométrica ampla, as partículas mais grossas e mais pesadas sedimentam mais rapidamente, ficando nas zonas próximo ao dique, e as partículas menores e menos densas ficam em suspensão e são transportadas para as zonas internas da bacia de sedimentação (VICK, 1983). A Figura 2.7 ilustra o processo em sequência desse método.

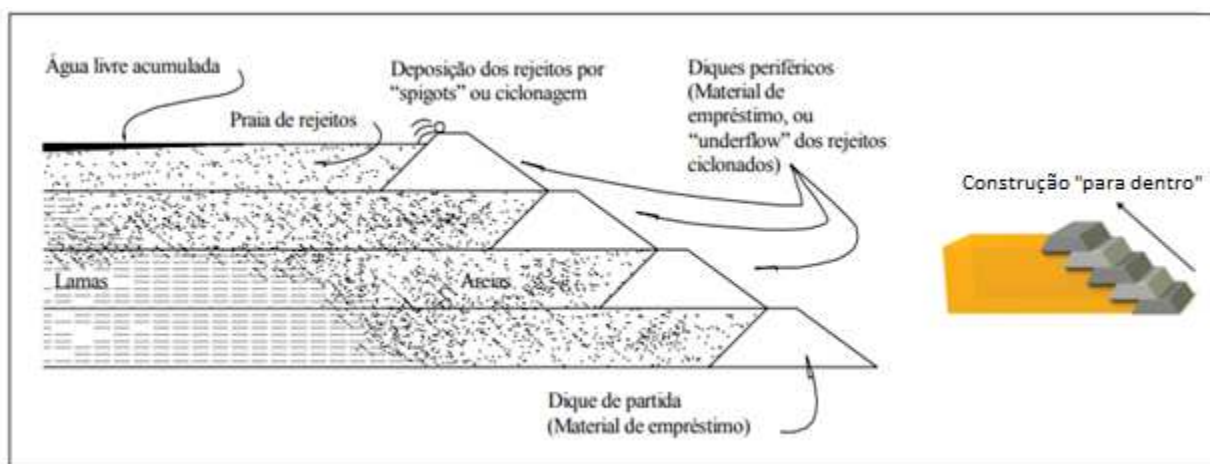


Figura 2.7 – Sequência de alteamento de barragens de rejeito pelo método de montante (LOZANO, 2006, modificada).

Para que o material rejeitado possa ser utilizado para a construção da barragem e sirva como base de um novo alteamento, é necessário que possua uma composição de 40 a 60% de areia e baixa densidade de polpa, para que o processo de segregação seja favorecido (SOARES, 2010). Para se garantir uma alta porcentagem de sólidos, pode-se utilizar o processo de ciclonagem.

O tamanho dos diques nos alteamentos é uma variável que depende das necessidades operacionais do processo. O dique inicial geralmente é sempre maior que os diques das etapas seguintes.

O método da montante apresenta vantagens como: menor custo de construção, maior velocidade de alteamento, menores volumes nas etapas de alteamento, pode ser construída em topografias mais íngremes e pouco uso de equipamentos de terraplanagem. Já as seguintes desvantagens podem ser citadas: menor coeficiente de segurança em função da linha freática; a superfície crítica de ruptura passa pelos rejeitos sedimentados, mas que não são devidamente compactados; possível ocorrência de entubamento, o que resultaria no surgimento de água na superfície do talude de jusante; risco de ruptura, provocado pela liquefação da massa de rejeitos, por efeito de sismos naturais ou vibrações causadas por explosões ou movimentação de

equipamentos (SOARES, 2010 e LOZANO, 2006).

Apesar de o método ser o mais simples e de menor custo, seus riscos são grandes e está associado à maioria dos casos de ruptura de barragens de rejeito. Portanto, são necessários cuidados extremos e estudos meticulosos para a construção dessas barragens com segurança e um bom desempenho e minimizando os riscos. De acordo com SOARES (2010), alguns desses cuidados são:

- os rejeitos devem ser lançados no perímetro do lago, imediatamente a montante do talude do dique inicial e dos alteamentos subsequentes;
- deve-se evitar retenções de água próximo à crista ou em áreas confinadas, por meio de um plano de lançamento de rejeitos e das manobras da tubulação de seu lançamento;
- os rejeitos devem ter fração arenosa, para favorecer a drenagem e serem lançados com uma concentração de sólidos que possibilite a segregação do material próximo à crista da barragem;
- o nível de água do reservatório deve ficar afastado da crista da barragem, adotando-se sistemas para esgotamento das águas de chuvas e aquelas liberadas pela polpa;
- em áreas que ocorram vibrações, este método não deve ser usado;
- as barragens não devem ter grandes alturas, e a velocidade de alteamento fica condicionada às propriedades dos rejeitos, visto que a segurança da barragem depende da resistência mobilizável dos rejeitos, que é condicionada pelas pressões neutras. Estas pressões estão relacionadas à velocidade de aumento das sobrecargas, provocado pela velocidade de alteamento da barragem e pela velocidade de dissipação das pressões neutras;

2.2.3.2 Método da linha de jusante

É o método mais caro, mas também o mais seguro. Os alteamentos são colocados sobre os níveis antigos e o eixo da barragem é construído a jusante da linha de centro, o que cria uma estrutura mais volumosa e geralmente mais forte (DUARTE, 2008). Primeiramente é construído um dique inicial de maneira semelhante ao método da montante, que deve ser compactado e ter uma drenagem interna e seu talude de montante deve ser impermeabilizado com argila compactada ou mantas plásticas específicas para impermeabilização (ARAÚJO, 2006).

Este método pode ser utilizado em barragens de grandes alturas, sendo que se deve

incorporar um sistema de impermeabilização e drenagem.

Após passar por um hidrociclone, a massa rejeitada é lançada na barragem, sendo que o *underflow*, ou a fração grossa, se deposita no talude da jusante sobre compactação e controle construtivo (SOARES, 2010). A Figura 2.8 ilustra o processo de alteamento pelo método de jusante.

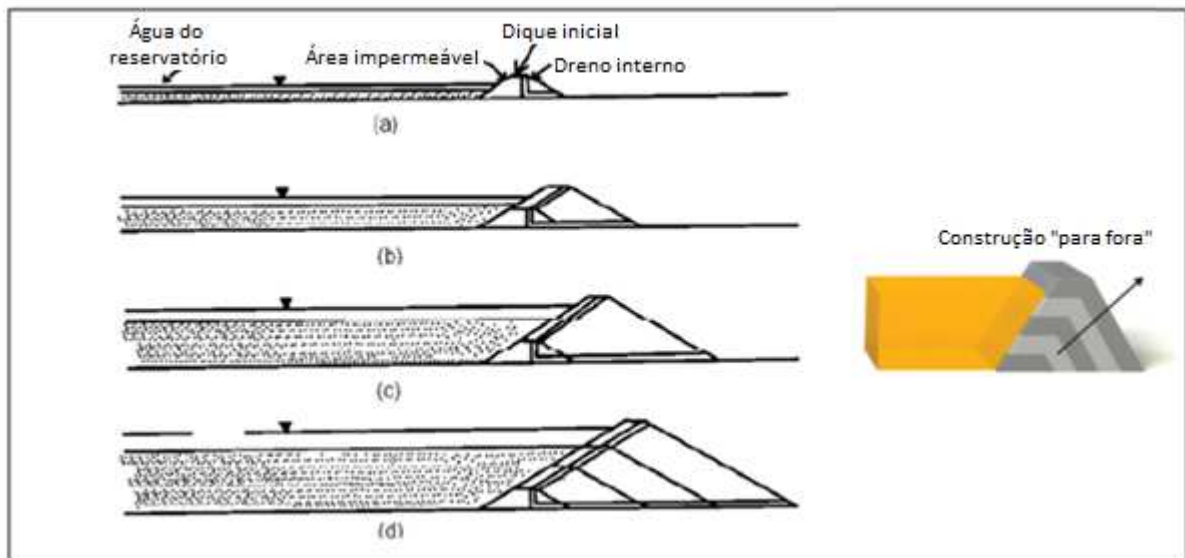


Figura 2.8 – Sequência de alteamento da barragem pelo método de jusante (SOARES, 2010, modificada).

De acordo com Soares (2010), Lozano (2006) e Duarte (2008), pode-se citar como vantagens do método:

- maior segurança por alteamento controlado;
- menor probabilidade de entubamento e de rupturas horizontais, em consequência da maior resistência ao cisalhamento;
- maior resistência a vibrações provocadas por sismos naturais e vibrações em razão do emprego de explosivos nas frentes de lavra;
- instalação de sistema de drenagem e impermeabilização, à medida que se processa o alteamento.

E como desvantagens do método:

- custo mais elevado;
- maior volume de material a ser movimentado e compactado;

- menor velocidade de alteamento da barragem;
- não possibilita a proteção com cobertura vegetal e tampouco drenagem superficial durante a fase construtiva, devido à superposição dos rejeitos no talude de jusante;
- requer o emprego de hidrociclones para conter o avanço do underflow;
- requer a construção de dique a jusante para contenção dos materiais do underflow.

2.2.3.3 Método da linha de centro

Semelhante ao método de jusante, os alteamentos são construídos sobre níveis antigos, mas com uma construção direcionada para cima e para fora, ou seja, o eixo da barragem é mantido na mesma posição enquanto ela é elevada (ARAÚJO, 2006). Inicialmente é construído um dique inicial e o rejeito é lançado à montante do mesmo, até formar uma praia. Com a subida do rejeito, lançado na praia, é construído um alteamento subsequente sobre o talude de jusante do dique de partida (SOARES, 2010). O eixo da crista do dique de partida e dos diques construídos posteriormente é coincidente. A Figura 2.9 ilustra o processo de construção de uma barragem por método de linha de centro.

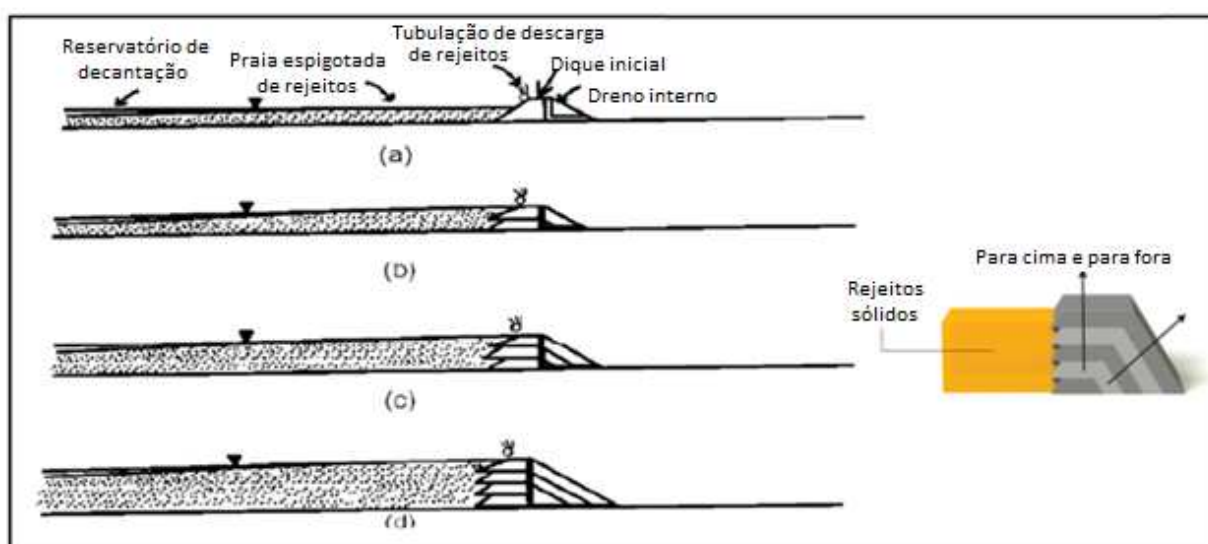


Figura 2.9 – Sequência de alteamento pelo método de linha de centro (SOARES, 2010, modificada).

Este é um método intermediário entre os dois anteriores, inserindo suas vantagens e minimizando as desvantagens. Podem ser citadas as seguintes vantagens (SOARES, 2010):

- facilidade de construção;

- o material para o alteamento pode vir de áreas de empréstimo, estéril ou do underflow dos hidrociclones;

- permite o controle da linha freática no talude de jusante.

As principais desvantagens são:

- a área a montante é passível de escorregamentos;

- necessário o uso de hidrociclones;

- não permite tratamentos da superfície do talude de jusante.

2.3 Inspeções e manutenções

Como o descarte dos materiais gerados na mineração é uma tarefa complexa e demanda grandes investimentos, muitas vezes são erroneamente descartados em barragens que não são devidamente construídas e inspecionadas. Barragens que não passam por manutenções e não são realizados treinamentos devidos com os funcionários responsáveis têm grandes riscos de rompimento, o que pode vir a causar acidentes de grande amplitude no local. Para evitar quaisquer imprevistos, as barragens devem passar por manutenções periódicas, seguindo normas e legislações que são de extrema importância para a vida útil e a segurança desta.

Segundo o Guia Prático de Pequenas Barragens da Agência Nacional de Águas (ANA), há três tipos de inspeção: de rotina, inspeção regular e inspeção especial. A primeira deve ser frequente, sendo que se recomenda sua realização mensal, e objetiva detectar a ocorrência de novas anomalias e acompanhar a evolução de anomalias anteriormente registradas. A segunda deve ser realizada a cada semestre e possui um grau de detalhamento superior. Deve ser requerido uma descrição dos aspectos a inspecionar, como as medições das dimensões de uma anomalia, sua classificação em termos históricos (nova, sem ou com evolução) e sua prioridade de intervenção (situação de alerta ou de emergência, de atenção, potencialmente grave e sem gravidade). Nessa inspeção também se realizam outras ações como verificação das condições do sistema de drenagem superficial, avaliação do estado da barragem (ocorrência de erosões superficiais, trincas ou deslizamentos) e a verificação das condições de operação do(s) vertedouro(s). Já a inspeção especial é realizada em caráter excepcional, como em casos de grandes cheias.

Além das inspeções, também é necessário um adequado programa de manutenção das barragens. A manutenção é o conjunto de tarefas destinadas a manter a barragem em adequadas

condições de segurança e de funcionalidade, sendo que quando devidamente realizadas, as manutenções protegem a barragem contra a deterioração, prolonga a sua vida e reduz grandemente a probabilidade de ruptura. O Guia Prático de Pequenas Barragens da Agência Nacional de Águas (ANA) cita dois tipos de manutenção: a preventiva e a corretiva. A primeira é efetuada frequentemente, visando evitar a ocorrência de uma anomalia, enquanto a manutenção corretiva é o conjunto de ações realizadas para reparação de anomalias já detectadas.

2.4 Legislações

Segundo o Guia Completo de Legislação de Segurança em Barragens (2016), do Instituto Minere, em relação à legislação, diversos órgãos fiscalizadores, como a Agência Nacional de Águas (ANA), a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) e seus órgãos descentralizados e o Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM) se reuniram para criar Resoluções e Portarias com a função de regulamentar alguns artigos da Lei 12.334/2010, de 20 de setembro de 2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de rejeitos industriais. Esta Política tem como objetivos garantir um rigoroso cumprimento de padrões de segurança, regulamentar, promover o monitoramento e acompanhar as ações de segurança empregadas pelos responsáveis por barragens, de maneira a reduzir a possibilidade de acidentes e suas consequências, em especial, junto à população próxima à área.

A PNSB deve conter dados técnicos da barragem, tais como dados de construção, operação, manutenção e o panorama do estado atual da segurança, obtido por meio das inspeções realizadas. O instrumento deve servir como uma ferramenta de planejamento de gestão da segurança da barragem e deverá ser atualizado a cada inspeção realizada, caso seja necessário e de acordo com as Revisões Periódicas de Segurança da Barragem, incorporando suas exigências e recomendações. Cada barragem deve possuir uma PNSB de acordo com sua classificação de risco.

Além da PNSB, pode-se citar a Norma Regulamentadora N° 22 sobre Segurança e Saúde Ocupacional na Mineração, que tem como objetivo disciplinar as normas a serem observadas na organização e no ambiente de trabalho, de forma a tornar compatível o planejamento e o desenvolvimento da atividade mineira com a busca permanente da segurança e saúde dos trabalhadores (BRASIL, 2015). A norma determina que toda mina ou quaisquer

atividade relacionada a esta deve passar por supervisão técnica de um profissional legalmente habilitado e esta deve ser registrada. Define também que a empresa deve interromper quaisquer atividades caso haja risco iminente para a saúde e segurança dos trabalhadores e da área próxima à mina, sendo responsável por implementar o Programa de Gerenciamento de Riscos (PGR) e coordenar as medidas necessárias em caso de acidentes, além de outras normas a serem seguidas pela empresa.

A legislação determina ainda que a fiscalização deve ter uma periodicidade adequada a cada tipo de barragem, de acordo com o nível risco, de “A” a “E”, sendo “A” de maior risco e “E” de menor classificação de risco possível (PINHEIRO, 2015).

3- Acidente na Barragem de Fundão, Mariana - MG

A indústria mineral é uma atividade necessária para o desenvolvimento da vida humana, sendo a base da cadeia produtiva, fornecendo o minério, que passa por transformações até a produção diversos produtos industrializados. Com essa alta exploração, há inevitavelmente uma alta quantidade de rejeitos gerados que não possuem valor econômico e, portanto, devem ser descartados nas barragens. Com a grande necessidade da atividade de mineração, há um crescente aumento desse material descartado, que apresenta grandes riscos tanto ao meio ambiente quanto à saúde pública, e, portanto, deve ser realizado de maneira minuciosa, seguindo regras de segurança e com uma gestão ambiental adequada (SOBREIRA *et al.*, 2016).

As empresas que realizam a atividade de exploração de minérios a partir do solo devem seguir vários protocolos e legislações, tanto para realizar as atividades de extração e beneficiamento, quanto para o descarte dos rejeitos obtidos a partir desses processos (SOUZA e FILHO, 2015). A empresa responsável pela exploração e descarte deve desenvolver uma estratégia de gestão de resíduos, sendo um exercício necessário e de extrema importância. Apesar de ser um processo complexo, pois visa conseguir um balanço razoável entre dois objetivos conflitantes: a maximização da redução dos riscos de contaminação/poluição e a minimização de custos financeiros, deve ser realizado com extremo cuidado e dando muita atenção em todos os pontos. Os rejeitos da planta produzem impactos ambientais, que devem ser minimizados ao máximo para o meio ambiente e a sociedade, além de reduzir os riscos de um possível rompimento ou transbordamento da barragem, o que poderia acarretar em danos profundos para toda a área e à população habitante próxima à barragem.

Portanto, as empresas de mineração devem seguir devidamente todas as regras e etapas desenvolvidas para proteger a área da barragem, zelando pela segurança e evitando assim a ocorrência de acidentes e imprevistos. Infelizmente, muitos não seguem devidamente tais critérios e acabam gerando problemas para a saúde da população que habita áreas próximas à mina e acarretam grandes impactos ao meio ambiente. Essa negligência acarretou diversos problemas e graves acidentes envolvendo barragens de rejeitos e que resultaram em grandes volumes de rejeitos descarregados no meio ambiente. Farias (2002) resume na Tabela 3.1 alguns dos impactos que ocorreram provenientes das atividades mineradoras no Brasil.

Tabela 3.1—Principais problemas envolvendo mineração no Brasil (adaptada de Farias, 2002).

Substância Mineral	Estado	Principais problemas	Ações Preventivas e/ou Corretivas
Ferro	MG	Antigas barragens de contenção, poluição de águas superficiais.	Cadastramento das principais barragens de decantação em atividade e as abandonadas; caracterização das barragens quanto à estabilidade; preparação de estudos para estabilização.
Ouro	PA	Utilização de mercúrio na concentração do ouro de forma inadequada; aumento da turbidez, principalmente na região de Tapajós.	Divulgação de técnicas menos impactantes; monitoramento de rios onde houve maior uso de mercúrio.
	MG	Rejeitos ricos em arsênio e contaminação de rios, córregos e do ar; intoxicação crônica de arsênio nos moradores da cidade de Paracatu, causando o desenvolvimento de diversas doenças.	Mapeamento e contenção dos rejeitos abandonados. Devida contenção dos rejeitos, principalmente o arsênio. Moradores evitem contato direto com solo e água próximos à mina.
Zinco	RJ	Barragem de contenção de rejeitos de antiga metalurgia, em péssimo estado de conservação.	Realização das obras sugeridas no estudo contratado pelo Governo do Estado do Rio de Janeiro.
Agregados para construção civil	RJ	Produção de areia em Itaguaí/Seropédica: contaminação do lençol freático, uso futuro da terra comprometido devido à criação desordenada de áreas alagadas.	Disciplinamento da atividade; estudos de alternativas de abastecimento.

Pode-se citar muitos outros casos que envolvem a mineração, muitas vezes causados por negligência das empresas responsáveis. Neste contexto, este capítulo faz um estudo de caso sobre o acidente ocorrido em Mariana, no estado de Minas Gerais, no dia 5 de novembro de 2015.

3.1 Impactos

O rompimento da barragem liberou cerca de 60 milhões de metro cúbicos de lama de rejeitos de minério, deixando 19 mortos e destruindo centenas de imóveis, e em consequência deixando milhares de pessoas desabrigadas (MARINHO, 2016). Este foi considerado o pior acidente envolvendo mineração no Brasil e o vazamento da lama causou um grande impacto ambiental que se estendeu até os estados do Espírito Santo e da Bahia.

A barragem do Fundão era destinada a conter os rejeitos do processo de beneficiamento do minério de ferro realizado pela empresa Samarco, controlada pela anglo-australiana BHP Billiton Brasil Ltda. e pela brasileira Vale S.A. (D'AGOSTINO, 2015). Esta sofreu um rompimento causando um efeito em cadeia que ocasionou o extravasamento da Barragem de Santarém, também localizada na área da empresa, e utilizada para acumulação de água e retenção de sedimentos (SEMAD, 2016). Pode-se observar na figura 3.1 a localização da barragem.



Figura 3.1 – Localização da barragem de Fundão (CATALÁN, 2015).

De acordo com Duarte (2008), em Minas Gerais, a FEAM (Fundação Estadual do Meio

Ambiente) através da Deliberação Normativa (DN) 62 (COPAM, 2002), alterada pela DN 87 (COPAM, 2005) e pela DN 113 (COPAM, 2007), realiza o cadastro e a classificação das barragens através do potencial de dano ambiental, considerando critérios de altura, volume, população a jusante, instalações a jusante e aspectos ambientais a jusante. A classificação é feita como barragens de Classe I, Classe II e de Classe III, sendo a de Classe I de baixo risco ambiental e a de Classe III uma barragem de alto potencial de dano ambiental. A barragem de Fundão era classificada como classe III.

Com o rompimento, a grande quantidade de lama que era contida nas barragens foi lançada até o distrito de Bento Rodrigues, localizada a aproximadamente 5 km abaixo das barragens, destruindo 80% das construções (BRANCO e PONSO, 2016) e seguindo até o Rio Gualaxo do Norte, a 55 km, desaguando no Rio do Carmo, no Rio Doce e continuando até atingir o litoral do Espírito Santo causando danos ambientais até o litoral da Bahia (SEMAD, 2016). A lama avançou com tal velocidade que chegou ao estado do Espírito Santo em menos de cinco dias. A Figura 3.2 ilustra o caminho da lama de rejeitos.

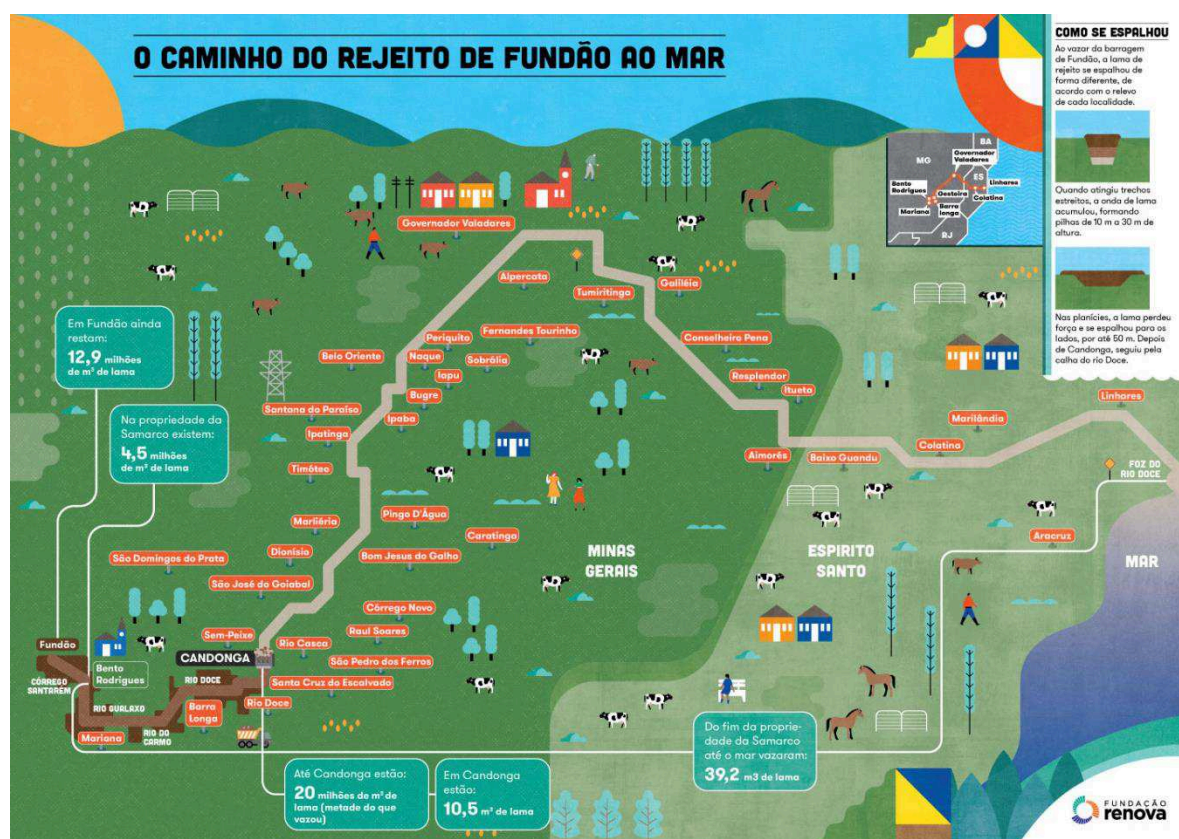


Figura 3.2 – O caminho dos rejeitos (FUNDAÇÃO RENOVA, 2017).

Com a lama se diluindo ao longo do Rio Doce, e atingindo cerca de 680 km de corpos

hídricos da bacia hidrográfica, foi suspensa a coleta de água, comprometendo o abastecimento à nove cidades e dificultando a assistência às vítimas (SAMARCO, 2016). Estudos indicam que no total, 39 municípios dos estados de Minas Gerais e Espírito Santo foram impactados com a lama.

De acordo com a Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável (Semad), a Defesa Civil de Minas Gerais classificou o desastre como de nível IV, ou seja, um desastre de porte muito grande, ocasionando danos de extrema significância e com muitos prejuízos. Os rejeitos, compostos principalmente por óxido de ferro, água e lama, formaram uma espécie de cobertura nos locais por onde passou, arrancando matas ciliares e, quando secarem, o que demorará anos de acordo com estudos, formarão um material parecido com cimento, pobre em matéria orgânica, e que impedirá o desenvolvimento da flora e por consequência da fauna. Além disso, devido à sua composição, a lama afetou o pH da terra e causou a desestruturação química do solo (SANTOS, 2015).

Quanto aos corpos d'água, a lama causou a morte de inúmeros organismos como algas e peixes devido à falta de oxigênio dissolvido na água e também por obstrução das brânquias. Além disso, os rios sofreram e ainda sofrerão muitas mudanças, como assoreamento, mudanças em seus cursos, diminuição da profundidade e soterramento de nascentes (SANTOS, 2015). Segundo o biólogo e professor do departamento de oceanografia da UFES, Ângelo Fraga Bernardino em entrevista para BBC Brasil, o rejeito de minério de ferro tem pelo menos três impactos ambientais na foz, sendo que a parte mais densa soterra o fundo e prejudica a vida dos organismos que vivem ali e a parcela mais fina, diminui a penetração de luz, afetando assim o processo de fotossíntese do plâncton, ao mesmo tempo em que altera as condições químicas da água (MOTA, 2017).

Há também efeitos na vida marinha na região do litoral do Espírito Santo, onde biólogos temem efeitos nos recifes de corais (SANTOS, 2015). Após dois anos do rompimento, ainda não é possível determinar exatamente a dimensão dos impactos da lama na natureza, sendo que boa parte dessa lama ainda permanece nas margens e no fundo dos rios e o rejeito que chega no oceano ainda é carregado pelas correntes marinhas e pode atingir ecossistemas frágeis como os corais (MOTA, 2017).

De acordo com o pesquisador Marcos Freitas, do Instituto Virtual Internacional de Mudanças Globais e participante do Grupo de Recomposição da Bacia do Rio Doce, em entrevista para o jornal O Globo, serão necessários anos para recuperação da bacia do Rio Doce (BRANCO e PONSO, 2016).

3.2 Causas

Mas, o que causou a ruptura da barragem? O Observatório Sismológico da Universidade de Brasília registrou dois tremores de baixa magnitude próximos ao local da barragem, mas não se sabe ainda se fora um evento natural ou desencadeado pelos reservatórios (D'AGOSTINO, 2015). No entanto, o inquérito da Polícia Federal registrou que as investigações realizadas na barragem mostraram dezenas de situações irregulares. Dentre as de maior importância, afirmaram que na fase de construção foram usados materiais diferentes do projeto inicial. No projeto inicial seriam usados brita e rocha, mas a obra foi realizada com restos de minério (MACHADO, 2016). Uma observação importante é que a barragem não tinha um responsável técnico junto ao CREA desde 2012.

O delegado Roger Lima de Moura afirmou em entrevista para o Portal G1 que a barragem apresentava problemas de drenagem e que fora realizado um remendo na barragem, sem um projeto adequado nem recomendações dos órgãos ambientais. Além disso, a Vale lançava rejeitos na barragem em quantidades maiores que as declaradas e os técnicos que fariam a Declaração de Estabilidade não foram informados que a Vale faria descarte de rejeitos na barragem. Essa alteração no material da estrutura da barragem e adição de outros materiais pela Vale contribuíram para que o rejeito de lama se aproximasse de rejeito arenoso, sendo uma das causas de liquefação, que foi apontada como a principal causa para o rompimento da barragem (MACHADO, 2016).

A liquefação acontece quando a camada arenosa externa, ao invés de expelir, retém a água, transformando a areia em lama e com isso ocorre uma variação brusca na pressão interna do depósito de rejeito, o que o torna incapaz de conter os rejeitos. A liquefação causou uma perda de estabilidade na barragem, e como consequência ocasionou a ruptura.

Segundo a Polícia Federal, foram verificadas várias situações irregulares na barragem que podem ter contribuído para seu rompimento. Pode-se listar algumas dessas situações (ARPINI, 2016):

- A Samarco em mais de uma ocasião foi alertada sobre os problemas na barragem de Fundão e não tomou os devidos cuidados e acertos sugeridos;
- Havia elevada taxa de alteamento anual da barragem, em função do grande volume de lama que era depositado nela: cerca de 20 metros por ano, em média, sendo que a recomendada é de no máximo 10 metros por ano;
- O assoreamento do dique 02 permitiu infiltração de água;

- Houve deficiência no sistema de drenagem interno da barragem;
- A Samarco avaliava documentos e locais antes para saber se eles poderiam ser periciados pela Polícia Federal, atrapalhando as investigações;
- O monitoramento da barragem era deficiente, com número de equipamentos instalados reduzido;
- Declarações do projetista da barragem, Joaquim Pimenta de Ávila, confirmam que a Samarco desconsiderou o que foi recomendado nas inspeções de setembro e de dezembro de 2014 quanto aos cálculos para avaliar liquefação na barragem;
- Aumento de investimento e orçamento na produção e redução de orçamento e de investimentos na área responsável pela manutenção e segurança das barragens;
- Troca de emails e mensagens deixam claro que a Diretoria presidente recebia todas as informações sobre os problemas que aconteciam em Fundão;
- Aumento da produção mineral sem o desenvolvimento simultâneo de um plano para lidar com os rejeitos de forma segura e política de redução de investimentos e custos na área de geotecnia;
- Escolha do tipo de barragem priorizando o custo ao invés da segurança.

Além disso, os equipamentos de monitoramento da barragem não estavam funcionando na hora do acidente, o Plano de Ações Emergenciais era sem eficácia e não houve alerta à população sobre o rompimento.

3.3 Responsabilidades

Como a Barragem de Fundão era utilizada para conter rejeitos da exploração de minério realizado pela empresa Samarco e que tal atividade era tida como uma geradora de riscos, entende-se que a responsabilidade pelos danos ambientais e sociais acarretados pelo rompimento da barragem é das empresas BHP Billiton Brasil Ltda. e Vale S.A., responsáveis pela Samarco, independente da existência de culpa direta da empresa ou do fato de a atividade por ela desenvolvida estar ou não de acordo com leis e regulamentações e permitida por agentes estatais (SOBREIRA *et al.*, 2016).

Após o ocorrido, a secretaria de Meio Ambiente de Minas (Semad) suspendeu a licença da Samarco para exercer as atividades de beneficiamento da unidade no município de Mariana (SEMAD, 2016) e a mineradora também se comprometeu a realizar o reassentamento das famílias e a apresentar um plano de ações sobre a reconstrução das comunidades atingidas pelos rejeitos.

Além disso, a Samarco criou a Fundação Renova, entidade sem fins lucrativos que assumiu em agosto de 2016 a responsabilidade de implementar ações de reparação para as destruições deixadas pela lama. A Fundação prevê a recuperação de nascentes, a recuperação dos rios e a restauração florestal. No entanto, segundo MOTA (2017), foram realizadas apenas ações emergenciais como a plantação de espécies com função de manter a terra mais firme e assim evitar que a lama atinja os rios e a dragagem nos primeiros metros do reservatório de Candonga, com a remoção e estabilização dos rejeitos.

Foi acordado pela Samarco, juntamente com os órgãos ambientais responsáveis, o Plano de Manejo de Rejeito, que hoje responde pelas ações de neutralização de impactos do rejeito sobre a qualidade da água. O plano estabelece um conjunto de ações que serão aplicadas a toda a extensão dos rios atingidos, de acordo com a situação de cada trecho, sendo que considera fatores como quantidade e distribuição da lama, questões ambientais, sociais e econômicas (FUNDAÇÃO RENOVA, 2017).

Além disso, a fundação se compromete a realizar a limpeza da cidade de Barra Longa, localizado à margem do rio do Carmo, e a reforma de casas, prédios e equipamentos públicos. Sobre os três povoados atingidos com maior impacto: Bento Rodrigues, Paracatu de Baixo e parte de Gesteira, distrito do município de Barra Longa, a fundação garante que fará a reconstrução em outras áreas das construções perdidas como casas, escolas, igrejas, prédios administrativos e comerciais (FUNDAÇÃO RENOVA, 2017).

3.4 Indenizações

Sobre o acidente na Barragem de Fundão, a principal hipótese é o descumprimento de normas de seguranças exigidas pelos órgãos ambientais, principalmente em relação às obras de elevação da barragem, no entanto, não há como apontar um único responsável pelo acidente, sendo que houve uma série de problemas, como projeto mal feito, falta de manutenção, fiscalização, ética e reponsabilidade, tanto da empresa quanto dos órgãos responsáveis (MARINHO, 2016). A Samarco, a Vale e a BHP Billiton e 21 diretores das três empresas são acusadas de homicídio com dolo eventual (quando se assume o risco de matar), inundação, desabamento, lesões corporais graves e crimes ambientais em decorrência da tragédia. A VogBR, empresa de consultoria e projetos em recursos hídricos e geotécnica contratada pela Samarco, e o engenheiro responsável pelo laudo que garantiu a estabilidade da barragem de Fundão, respondem pelo crime de apresentação de laudo ambiental falso (ZUBA, 2017).

Inicialmente, o Ministério Público estipulou o pagamento de indenização mensal de um salário mínimo para cada família atingida pelo acidente e o Ibama multou a Samarco em R\$ 250 milhões e a empresa teve que pagar indenizações à União e aos estados de Minas Gerais e Espírito Santo (BRANCO E PONSO, 2016). Somente o Ibama aplicou 24 autos de infração ambiental à mineradora, que também foi multada pelo Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio) e por órgãos ambientais dos governos de Minas Gerais e do Espírito Santo. (BRANCO E PONSO, 2016). Ao todo, 68 penalidades foram impostas à empresa Samarco, totalizando quase 552 milhões de reais em multas e infrações. No entanto, segundo BEDINELLI (2017), 67 das 68 penalidades estão em fase de recurso e apenas uma, parcelada em 59 vezes, começou a ser quitada: o valor corresponde a 1% do total.

3.5 Considerações Finais

Os rejeitos do beneficiamento do minério dispostos na barragem de Fundão foram despejados e arrastados pelos rios, comprometendo a qualidade e o regime dos recursos hídricos do Rio Gualaxo do Norte e Rio Doce, além de atingir o oceano no litoral do Espírito Santo. Em razão do rompimento das barragens, sérios danos à saúde e à vida humana e ao meio ambiente foram observados, além de ter comprometido todas as propriedades do distrito de Bento Rodrigues e parte das propriedades de Paracatu de Baixo, o que exigiu retirada dos moradores e sobreviventes da área atingida. No caso de acidentes como em Mariana, é preciso monitoramento constante para de fato recuperar as características ambientais originais, pois a lama pode afetar as características químicas das águas e dos solos.

Em mineradoras que possuem barragens de rejeito, especialmente as próximas a áreas urbanas, é necessário um maior cuidado com os rejeitos e a maneira de disposição destes. Em entrevista para o jornal O Popular em novembro de 2015, O professor de Geociências da Universidade Federal de Goiás, Luis Cherem, avalia que o risco de uma barragem em área urbana pode permanecer baixo se todas as medidas de segurança forem adotadas e as fiscalizações forem devidamente realizadas. Neste contexto, a participação do poder público no sentido de legislar e fiscalizar acerca do cumprimento de normas técnicas de segurança a serem aplicadas na mineração faz-se de maneira fundamental para a diminuição do número e gravidades dos acidentes deste setor (SANTOS, 2012).

Compreender o acidente em Mariana e seus impactos ambientais serve como um alerta para a criação de medidas mais eficazes de segurança. Um ponto importante é a necessidade de

pesquisas com o objetivo de buscar formas de reaproveitar o rejeito de minério e de novas técnicas e tecnologias para o aproveitamento de minérios de granulometria mais fina e de baixo teor, o que seria importante para a diminuição da quantidade de rejeitos (CORDEIRO, 2015). O professor da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), Ricardo Fiorotti, por exemplo, estuda como transformar a lama em ferramenta de resgate social e ambiental. O objetivo é investigar possibilidades de reciclagem e reutilização do rejeito para produção de materiais de construção, como peças de concreto, tijolos e até tintas orgânicas (FREITAS, 2016).

Capítulo 4 – Conclusão

4.1 Conclusão

Sabe-se que a indústria mineradora é de vital importância para a sociedade, no entanto é uma atividade de grande impacto ambiental. É um setor que causa impactos sobre o solo, sobre a atmosfera, sobre a fauna e flora, sobre as águas subterrâneas e superficiais e, ainda, sobre a população, que sofre com a degradação e pode desenvolver diversas doenças, muitas delas causadas pelo efeito cumulativo de substâncias tóxicas e/ou radioativas no organismo.

Como em circunstâncias normais já há grande impacto, tal atividade deve ser realizada de maneira planejada e com devida fiscalização, promovendo medidas para o correto direcionamento do material descartado e a devida contenção de elementos químicos que possam ser prejudiciais ao meio ambiente e à sociedade evitando assim situações de risco e possíveis acidentes que causam situações de maior impacto. Além disso, é necessária a utilização sustentável dos recursos minerais, garantindo assim sua existência para as futuras gerações.

Todos os projetos de barragens de contenção de rejeitos devem possuir algum tipo de instrumentação que permita avaliar permanentemente a sua segurança em qualquer estágio de desenvolvimento, sendo fundamental o acompanhamento sistemático destas obras. A construção de barragens exige grande conhecimento técnico e criteriosas normas de segurança devem ser seguidas, sendo desde a elaboração do projeto à execução e manutenção das obras. Assim, é de fundamental importância a realização de manutenções e inspeções para prevenir acidentes, além de treinamentos de equipes especializadas para lidar com eventuais problemas que possam ocorrer, e que possam minimizar quaisquer riscos e danos. Como é uma obra de grande risco é necessário cautela com relação à escolha de profissionais, instalações, materiais e equipamentos a serem utilizados tanto na execução como manutenção da barragem.

Analisando-se casos já ocorridos de acidentes em barragens de rejeitos, verifica-se que o índice de acidentes nessa atividade ainda é alto. Por meio de estudos e análises desses casos históricos, é possível verificar quais medidas de segurança podem ser tomadas nas fases de projeto e de operação das barragens de rejeitos, evitando situações irregulares e com isso diminuindo o risco de acidentes nesses locais. No Brasil é necessária uma maior participação do poder público, principalmente se tratando de fiscalizações e indenizações para um devido cumprimento de normas técnicas de segurança nas barragens e minas. Cabe ao estado fazer um trabalho intensivo

nas empresas que possuem esse tipo de atividade, não com intuito de punir e ganhar recursos com multas, mas para fiscalizar o trabalho feito, protegendo assim o meio ambiente e a saúde pública.

O rompimento da barragem e a dispersão da lama no município de Mariana provocaram danos ambientais ecológicos graves, danos ao meio ambiente cultural e danos à saúde e bem-estar social, os quais, certamente, ainda serão suportados por gerações, dada a impossibilidade de restauração do status *quo ante*. Mas, às futuras gerações não interessará saber o motivo do dano ambiental ou quem foi o responsável pela sua ocorrência, mas sim o dano em si, o prejuízo causado ao meio ambiente, à qualidade e a saúde da população.

4.2 Sugestões para trabalhos futuros

Analisando-se as considerações apresentadas neste trabalho, abrem-se novas reflexões que podem ser trabalhadas futuramente, seja em relação à construção de novas barragens ou em relação aos métodos de reutilização dos rejeitos na indústria mineral.

A realização de parcerias entre universidades e indústrias voltadas ao desenvolvimento de tecnologias para gestão ambiental é um método ainda pouco utilizado. Trabalhos voltados ao desenvolvimento de novas metodologias de reaproveitamento de rejeitos e disposição de rejeitos e efluentes seriam bem aproveitados por indústrias do ramo de mineração.

Referências Bibliográficas

ABREU, L. **Métodos de Lavra**, 2010. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAATfwAF/metodos-lavra>>. Acesso em 01 out 2017.

ALESSI, G. **Mineração em Paracatu Contamina Cidade e Expõe População ao Arsênio**. El País, 26 mai 2015. Disponível em: <https://brasil.elpais.com/brasil/2015/05/25/politica/1432561404_705347.html>. Acesso em 09 out 2017.

ARAÚJO, C. B. **Contribuição ao Estudo do Comportamento de Barragens de Rejeito de Mineração de Ferro**. 2006. 143 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

ARPINI, N. **Polícia Federal lista falhas da Samarco com barragem rompida**. Portal G1, 22 jun 2016. Disponível em: <<http://g1.globo.com/espírito-santo/desastre-ambiental-no-rio-doce/noticia/2016/06/pf-lista-falhas-que-levaram-barragem-da-samarco-romper.html>>. Acesso em 20 out 2017.

BARRETO, M. L. **Mineração e Desenvolvimento Sustentável: Desafios para o Brasil**, 2001. 3 ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2001. 215 p.

BEDINELLI, T. **Samarco pagou só 1% do valor de multas ambientais por tragédia de Mariana**. El País, 09 ago 2017. Disponível em: <https://brasil.elpais.com/brasil/2017/08/08/politica/1502229456_738687.html>. Acesso em 10 nov 2017.

BRANCO M.; PONSO F. **Maior desastre ambiental do Brasil, tragédia de Mariana deixou 19 mortos**. O Globo, 17 out 2016. Disponível em: <<http://acervo.oglobo.globo.com/em-destaque/maior-desastre-ambiental-do-brasil-tragedia-de-mariana-deixou-19-mortos-20208009>>. Acesso em 01 out 2017.

BRASIL. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR- 6459/1984 – Solo – Determinação do Limite de Liquidez**. Disponível em: <<http://files.ilcoribeiro.webnode.com.br/200000083-3c9663d904/NBR%206459.pdf>>. Acesso em: 22 out 2017.

BRASIL. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR- 7180/1984 – Solo – Determinação do Limite de Plasticidade**. Disponível em: <<http://files.ilcoribeiro.webnode.com.br/200000085-5d2195d9d7/NBR%207180.pdf>>. Acesso em: 22 out 2017.

BRASIL. Decreto-lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010. **Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais, cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens e altera a redação do art. 35 da Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, e do art. 4º da Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000**. Coletânea de legislação: edição federal, Brasília, 2010. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2010/Lei/L12334.htm>. Acesso em: 22 out 2017.

BRASIL. **Informativo Rio Doce**. Vistoria das Estações Automáticas de Monitoramento da Qualidade das Águas no Rio Doce, ed. 4, 2017, 12 p.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. **NR-22 – Segurança e Saúde Ocupacional na Mineração**. Disponível em: <<http://trabalho.gov.br/seguranca-e-saude-no-trabalho/normatizacao/normas-regulamentadoras/norma-regulamentadora-n-22-seguranca-e-saude-ocupacional-na-mineracao>>. Acesso em: 22 out 2017.

CATALÁN, N. **Avalanche de lama em Minas Gerais**. El País, 06 nov 2015. Disponível em: <https://brasil.elpais.com/brasil/2015/11/06/media/1446833927_065504.html>. Acesso em 09 out 2017.

CORDEIRO, L. C. B. **Estudo da Influência do Tamanho de Bolhas na Flotação**. 2015. 48 f. Dissertação (Graduação em Engenharia Química) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2015.

COSTA, J. M. R.; SILVA, I. A.; FERREIRA, H. S.; MENEZES, R. R.; NEVES, G. A.; FERREIRA, H. C. Obtenção de argilas organofílicas purificadas através de tensoativos iônicos e não iônicos visando uso em fluidos de perfuração base óleo. **Revista Cerâmica**, São Paulo, v. 58, n. 348, 2012.

D'AGOSTINO R. **Rompimento de barragem em Mariana: perguntas e respostas**. Portal G1, 13 nov 2015. Disponível em: <<http://g1.globo.com/ciencia-e-saude/noticia/2015/11/rompimento-de-barragens-em-mariana-perguntas-e-respostas.html>>. Acesso em 06 out 2017.

DUARTE, A. P. **Classificação das Barragens de Contenção de Rejeitos de Mineração e de Resíduos Industriais no Estado de Minas Gerais em Relação ao Potencial de Risco**. 2008. 130 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

EXAME. **Liquefação causou rompimento de barragem da Samarco**. 29 ago 2016. Disponível em: <<https://exame.abril.com.br/brasil/liquefacao-causou-rompimento-de-barragem-da-samarco/>>. Acesso em 20 out 2017.

FARIAS, C. E. G. **Mineração e Meio Ambiente no Brasil**. Brasília: CGEE, 2002. 42 p.

FERREIRA, V. M. Análise Referente Ao Rompimento Da Barragem De Rejeito De Fundão - Mariana-Mg. In: SIMPÓSIO DE CIÊNCIAS APLICADAS DA FAIP, 7, 2016, Marília. **Anais...** Marília: FAIF, 2016, v. 01. p. 175-185.

FREITAS, E. de. **Principais Minérios Brasileiros**. Brasil Escola. Disponível em <<http://brasilecola.uol.com.br/brasil/principais-minerios-brasileiros.htm>>. Acesso em 15 jun 2017.

FREITAS, R.; **1 ano após o mar de lama – e agora?** Portal G1, 05 nov 2016. Disponível em: <<http://especiais.g1.globo.com/minas-gerais/minas-gerais/desastre-ambiental-em-mariana/2016/1-ano-apos-o-mar-de-lama--e-agora/>>. Acesso em 01 out 2017.

FUNDAÇÃO RENOVA. **Manejo de Rejeitos**. 2017. Disponível em: <<http://www.fundacaorenova.org/manejo-de-rejeitos/>>. Acesso em 06 out 2017.

GERMANI, D. J. **A mineração no Brasil**. Relatório Final, 2002. p. 1-48. Disponível em: <<ftp.mct.gov.br>>. Acesso em 01 abr 2017.

GRUPO VISION. **Beneficiamento de Minério de Ferro**. Disponível em: <<http://www.grupovision.com.br/areas-de-atuacao/mineracao/extracao-do-minerio-de-ferro/beneficiamento-de-minerio-de-ferro/>>. Acesso em 08 jun 2017.

HUMMES, R. A. **Compressibilidade e Resistência ao Cisalhamento de Rejeitos de Beneficiamento de Carvão Mineral em Equipamentos de Grandes Dimensões**. 2007. 211 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

IBRAM, **Informações Sobre a Economia Mineral Brasileira 2015**. Brasília: Instituto Brasileiro de Mineração, 2015, 26 p.

IBRAM. 2017. Instituto Brasileiro de Mineração. Disponível em: <<http://www.ibram.org.br/sites/1300/1382/00006386.pdf>>. Acesso em 05 jun 2017

IBRAM. **Impactos da Mineração na Economia Brasileira**. 2013. Disponível em: <http://www.ibram.org.br/150/15001002.asp?ttCD_CHAVE=183123>. Acesso em 10 jun 2017.

LOPES, M. **Métodos de Lavra a Céu Aberto**. Técnico em Mineração, 23 fev 2015. Disponível em: <<https://tecnicoemineracao.com.br/metodos-de-lavra-a-ceu-aberto/>>. Acesso em 15 jun 2017.

LOPES, M. **Mineração no Brasil Atual e sua Influência na Economia Nacional**. Técnico em Mineração, 10 jul 2014. Disponível em: <<http://tecnicoemineracao.com.br/mineracao-brasil-atual-e-sua-influencia-na-economia-nacional/>>. Acesso em 04 jun 2017.

LOPES, M. **O que é Mineração Afinal?** Técnico em Mineração, 25 abr 2014. Disponível em <<http://tecnicoemineracao.com.br/o-que-e-mineracao/>>. Acesso em 02 jun 2017.

LOZANO, F. A. E. **Seleção de Locais para Barragens de Rejeitos Usando o Método de Análise Hierárquica**. 2006. 142 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

LUZ, A. B. (Ed.); SAMPAIO, J. A. (Ed.); ALMEIDA, S. L. M. (Ed.). **Tratamento de Minérios**, 2010. 5 ed. Rio de janeiro: CETEM/MCT, 2010. 932p.

MACÊDO, A. J. B. de; BAZANTE, A. J.; BONATES, E. J. L. Seleção do método de lavra: arte e ciência. **Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, v. 54, n. 3, 2001.

MACHADO, V. **Samarco sabia dos riscos antes de desastre, diz delegado da PF**. Portal G1, 22 jun 2016. Disponível em: <<http://g1.globo.com/espírito-santo/desastre-ambiental-no-rio-doce/noticia/2016/06/samarco-sabia-dos-riscos-antes-de-desastre-diz-delegado-da-pf.html>>. Acesso em 20 out 2017.

MARIANI, R. Eficiência e Segurança para Barragens de Rejeitos. **Revista TecHoje**. Disponível em: <http://www.techoje.com.br/site/techoje/categoria/detalhe_artigo/1738>. Acesso em: 04 jun 2017.

MOTA, C. V. **Após dois anos, impacto ambiental do desastre em Mariana ainda não é totalmente conhecido**. BBC Brasil, 05 nov 2017. Disponível em: <<http://www.bbc.com/portuguese/brasil-41873660>>. Acesso em 10 nov 2017.

O ESTADO DE S. PAULO. **Mineiro Chileno Teria Previsto Acidente**. 20 out 2010. Disponível em: <<http://internacional.estadao.com.br/noticias/geral,mineiro-chileno-teria-previsto-acidente-imp-627164>>. Acesso em 25 out 2017.

OLIVEIRA, R.; ALMEIDA, L.; JOSÉ, O. P.; SILVA, A. P.; **Manual do Empreendedor Sobre Segurança de Barragens**. Guia Prático de Pequenas Barragens. Brasília: ANA, 2016, 126 p.

ORLANDI, L. **Samarco terá que pagar multa de R\$ 6 milhões por não cumprir acordo**. Metro Jornal, 15 mai 2017. Disponível em: <<https://www.metrojornal.com.br/foco/2017/05/15/samarco-tera-que-pagar-multa-r-6-milhoes-nao-cumprir-acordo.html>>. Acesso em 10 nov 2017.

PANIAGO, L. **Guia Completo de Legislação de Segurança de Barragens**. Belo Horizonte: Instituto Minere, 2016, 62 p.

PENA, R. F. A. **Impactos ambientais da Mineração**. Mundo Educação, ano. Disponível em: <<http://mundoeducacao.bol.uol.com.br/geografia/impactos-ambientais-mineracao.htm>>. Acesso em 12 jun 2017.

PINHEIRO, E. **Acidente em Catalão afetou três rios em 2004**. O Popular, 22 nov 2015. Disponível em: <<https://www.opopular.com.br/editorias/cidade/acidente-em-catal%C3%A3o-afetou-3-rios-em-2004-1.993094>>. Acesso em 01 out 2017.

PINHEIRO, E. **Perigo potencial também em Goiás**. O Popular, 22 nov 2015. Disponível em: <<https://www.opopular.com.br/editorias/cidade/perigo-potencial-tamb%C3%A9m-em-goi%C3%A1s-1.993089>>. Acesso em 08 out 2017.

PORTAL G1. **Justiça determina desbloqueio de cerca de R\$ 10 milhões da Samarco**. 29 nov 2016. Disponível em: <<http://g1.globo.com/minas-gerais/desastre-ambiental-em-mariana/noticia/2016/11/justica-determina-desbloqueio-de-cerca-de-r-10-milhoes-da-samarco.html>>. Acesso em 10 nov 2017.

POSSATO, V. **Desastre ambiental em Minas Gerais completa um ano**. Jornal Hoje, 04 nov 2016. Disponível em: <<http://g1.globo.com/jornal-hoje/noticia/2016/11/desastre-ambiental-em-minas-gerais-completa-um-ano.html>>. Acesso em 06 out 2017.

RODRIGUES, L. F. **Análise Comparativa de Metodologias Utilizadas no Despacho de Caminhões em Minas a Céu Aberto**. 2006. 103 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

ROMEIRO, J. C. P.; SOARES, A. C. P. Controle do Minério de Espodumênio em Pegmatitos da Mina da Cachoeira, Araçuaí, MG. **GEONOMOS**, Belo Horizonte, n. 13, p. 75-81, 2005.

SAMARCO. **Rompimento da Barragem de Fundão**. 2016. Disponível em: <<http://www.samarco.com/rompimento-da-barragem-de-fundao/>>. Acesso em 07 out 2017.

SAMARCO. **Um ano do rompimento de Fundão**. 2016. Disponível em: <http://samarco.com/wp-content/uploads/2017/01/Book-Samarco_final_baixa.pdf>. Acesso em 09 out 2017.

SÁNCHEZ, L. E. Gerenciamento Ambiental e a Indústria de Mineração. **Revista de Administração**, São Paulo, v. 29, n. 1, p. 67-75, 1994.

SANTOS, V. S. **Acidente em Mariana (MG) e seus impactos ambientais**. 2015. Disponível em: <<http://mundoeducacao.bol.uol.com.br/biologia/acidente-mariana-mg-seus-impactos-ambientais.htm>>. Acesso em 01 out 2017.

SANTOS, Y. C. S. **Segurança e Saúde Ocupacional na Indústria da Mineração: Aspectos Técnicos das Legislações e Estatísticas de Acidentes**. 2012. 71 f. Dissertação (Especialização em Engenharia de Segurança do Trabalho) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2012.

SEMAD. **Desastre Ambiental em Mariana e Recuperação do Rio Doce**. 2016. Disponível em: <<http://www.meioambiente.mg.gov.br/component/content/article/13-informativo/2879-desastre-ambiental-em-mariana-e-recuperacao-da-bacia-do-rio-doce>>. Acesso em 01 out 2017.

SEU HISTORY. **Trinta e Três Mineiros Soterrados são Resgatados após 69 Dias Soterrados**, 13 out 2010. Disponível em: <<https://seuhistory.com/hoje-na-historia/trinta-e-tres-mineiros-soterrados-sao-resgatados-apos-69-dias-soterrados>>. Acesso em 25 out 2017.

SOARES, L. Barragem de Rejeitos. In: CETEM/MCT. **Tratamento de Minérios**. 5 ed., Rio de Janeiro: Luz, A. B.; Sampaio, J. A.; França, S. C. A., 2010. p. 831-896.

SOBREIRA, P. A.; FERREIRA, R. M.; CAMPOS, F. I. Responsabilidade Socioambiental das Barragens de Rejeitos do Estado de Goiás. **Revista Republicana**, Colombia, n. 21, p. 21-41, 2016.

SOUZA, M. J.; FILHO N. G. S. **Barragens de Rejeitos**. 2015. Disponível em: <<http://www.faculdadeatenas.edu.br/arquivos/NucleoIniciacaoCiencia/REVISTAJURI2015/5%20BARRAGENS%20DE%20REJEITO.PDF>>. Acesso em 04 jun 2017.

TEIXEIRA, S. H. C. Curso de Capacitação em Estruturas de Barragens: Terra, Enrocamento e Rejeitos. **Tratamento de Fundações de Barragens em Rocha e Solos**. Curitiba, 24 mar 2017. 10 p.

VALE. **Entenda o que são Barragens de Rejeito**, 18 fev 2016. Disponível em:

<<http://www.vale.com/samarco/PT/Paginas/entenda-barragens-rejeito.aspx>>. Acesso em 02 jun 2017.

VICK, S.G. Siting and Design of Tailings Impoundments. **Mining Engineering**, 1981. v.33, n. 6, p.653-657.

VIEIRA, C.; ALVES H. **Revista Curinga**, Mariana, v. 1, p. 10-44, 2016.

VIEIRA, F. **Liberção de Arsênio de Mineradora de Paracatu, MG, é Tema de Audiência**. Portal G1, 29 abr 2015. Disponível em: <<http://g1.globo.com/minas-gerais/triangulo-mineiro/noticia/2015/04/liberacao-de-arsenio-de-mineradora-de-paracatu-mg-e-tema-de-audiencia.html>>. Acesso em 09 out 2017.

ZUBA, F. **Ibama nega em definitivo recursos da Samarco contra multas que somam R\$ 150 milhões**. Portal G1, 17 ago 2017. Disponível em: <<https://g1.globo.com/minas-gerais/desastre-ambiental-em-mariana/noticia/ibama-nega-em-definitivo-recursos-da-samarco-contras-multas-que-somam-r-150-milhoes.ghtml>>. Acesso em 09 out 2017.