



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
FACULDADE DE GEOLOGIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO LATO SENSO À DISTÂNCIA**

Luís Fernando Martins

**BARRAGENS DE REJEITO DE MINERAÇÃO NO BRASIL:
PRINCIPAIS TIPOS DE BARRAGENS, INSTRUMENTAÇÃO E
MONITORAMENTO**

**BELÉM-PA
2016**

Luís Fernando Martins

**BARRAGENS DE REJEITO DE MINERAÇÃO NO BRASIL:
PRINCIPAIS TIPOS DE BARRAGENS, INSTRUMENTAÇÃO E
MONITORAMENTO**

Monografia apresentada ao Programa de Pós-Graduação Lato Sensu à distancia do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará – UFPA, em cumprimento às exigências para obtenção do grau de Especialista em Geologia de Minas e Técnica de Lavras a Céu Aberto.

Área de concentração: Engenharia mineral

Orientadora: Gisele Ribeiro de Barros Yamanouth

BELÉM-PA
2016

Luis Fernando Martins

Barragens de rejeito de mineração no Brasil: principais tipos de barragens, instrumentação e monitoramento

Monografia apresentada ao Programa de Pós-Graduação Lato Sensu à distancia do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará – UFPA, em cumprimento às exigências para obtenção do grau de Especialista em Geologia de Minas e Técnica de Lavras a Céu Aberto.

Área de concentração: Engenharia mineral

Orientadora: Gisele Ribeiro de Barros Yamanouth

Data de aprovação: 12/09/2016
Conceito: Excelente

Banca examinadora:

Prof.^a MSc. Gisele Ribeiro de Barros Yamanouth

Prof. DSc. Raimundo Nonato do Espirito Santo dos santos

Prof. DSc. Carlos Marcello Dias Fernandes

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me conceder a oportunidade de dar mais esse passo na minha vida.

Ao meu pai Júlio que sempre foi fonte de inspiração.

À minha mãe Conceição pelo apoio e compreensão.

À minha namorada Maria pelo apoio incondicional.

A toda minha família.

À professora Gisele Yamanouth pela solicitude em todos os momentos.

RESUMO

O Brasil é um país com dimensões continentais e apresenta grandes reservas minerais de nióbio, níquel, manganês, alumínio e ferro tornando o país muito atrativo para a mineração. Com a expansão das commodities minerais nos anos 2000 e a crescente demanda por minerais, em virtude do aumento da população mundial e também do consumo a extração mineral se intensificou, com isso a quantidade de rejeitos gerada também aumentou. Sendo necessária uma grande área para a disposição destes rejeitos, que normalmente é realizada em barragens. As barragens de rejeitos tem seu volume aumentado através de alteamentos, no Brasil o alteamento à montante é o mais utilizado pelas empresas mineradoras, principalmente pelo seu baixo custo e simplicidade de execução. Este estudo verificou que atualmente no Brasil existem 662 barragens de rejeito cadastradas no DNPM e a grande maioria destas barragens estão localizadas no estado de Minas Gerais (aproximadamente 48%) seguido pelo estado de São Paulo (11%) e pelo Pará (10%). Além disso, observou-se que o rejeito de minério de ferro é a principal substância armazenada nestas barragens. A maior parte das barragens brasileiras (78%) possui até trinta metros de altura e conforme a classificação da categoria de riscos aproximadamente 80% apresenta baixo risco de rompimento. Em relação às falhas em barragens de rejeito, que podem ocasionar danos ambientais, afetar as comunidades e causar vítimas fatais, este trabalho apurou que a principal causa associada aos incidentes foi à ocorrência de eventos climáticos incomuns. Esta pesquisa constatou que grande parte destes incidentes pode ser evitada através de tecnologias disponíveis na atualidade e que o monitoramento e instrumentação destas barragens é uma forma de minimizar estes acidentes. Para isso é necessário um perfeito funcionamento da instrumentação com a elaboração de um plano de instrumentação, correta seleção dos instrumentos, verificação de sua precisão e sua confiabilidade, assim como a análise precisa dos dados fornecidos pela instrumentação.

Palavras-chave: Barragens de rejeitos no Brasil. Mineração no Brasil. Monitoramento. Instrumentação.

ABSTRACT

Brazil is a country with continental dimensions and great diversity of subsoil, providing large mineral reserves of niobium, nickel, manganese, aluminum, iron and others, that makes it very attractive to mining. With the expansion of mineral commodities in the 2000s and the increased demands for minerals, because of world population growth and consumption, mining intensified. Thereby, the volume of tailings being generated increased dramatically and larger areas for the disposal was necessary. Usually, this disposal is made in containment dams, whose volume is increased by heightening. In Brazil, the upstream method is the mostly used by mining companies, mainly for its low cost and simplicity of execution. The present study verified that currently has 662 tailings dams in Brazil DNPM and the most of them are Minas Gerais (almost 48%), follow by São Paulo (11%) and Pará (10%). Furthermore, was observed that iron ore tailing is the main content in this dams. 78% of Brazilian dams have until height 30 meters and approximately 80% have a low risk of failure. In relation to tailing dams failures, which may affected communities and environment and causes deaths, this work observed that the principal causes of failure was associated to unusual weather events. Was also observed that the most of these accidents can be avoided by available technologies and the monitoring and instrumentation of dams are a way to minimize these accidents. For this, it is necessary a good operation of the instrumentation with the elaboration of an instrumentation plan, correct selection of the instruments, verification of its precision and its reliability, as well as the precise analysis of the data provided by the instrumentation.

Keywords: Tailings dams in Brazil. Mining in Brazil. Monitoring. Instrumentation.

Sumário

1- INTRODUÇÃO	10
2- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	13
2.1- Minerais e rochas	13
2.2- Pesquisa mineral, recurso mineral, reserva mineral e prospecção mineral	13
2.3- Lavra e mina	14
2.3.1- Classificação dos minérios.....	14
2.4- A mineração na economia brasileira	17
3- BARRAGENS DE REJEITO	21
3.1- Beneficiamento do minério	21
3.1.1- Fragmentação	21
3.1.2- Classificação	22
3.1.3- Concentração.....	22
3.2- Rejeito de mineração	24
3.3- Transporte e descarga de rejeitos	27
3.4- Barragens de rejeito.....	31
3.4.1- Métodos de alteamentos	33
3.4.1.1- Alteamento a montante	33
3.4.1.2- Vantagens e desvantagens do alteamento a montante	34
3.4.2- Alteamento a jusante.....	34
3.4.2.1- Vantagens e desvantagens do alteamento a jusante.....	35
3.4.3- Alteamento a linha de centro.....	36
3.4.3.1- Vantagens e desvantagens do alteamento a linha de centro.....	36
3.5- Principais mecanismos de falhas em barragens de rejeito.....	37
3.5.1- Instabilidade de taludes.....	38
3.5.2- Falha por galgamento	40
3.5.3- Falhas na fundação.....	41
3.5.4- Falhas por piping.....	42

3.5.5- Falha por liquefação.....	45
3.5.6- Análise dos mecanismos de falhas	46
3.6- Acidentes com barragens de rejeito no Brasil	49
3.6.1- Acidente com a barragem de Fernandinho em Itabirito em 1986.....	50
3.6.2- Acidente com a barragem de Macacos em 2001	51
3.6.3- Acidente com a barragem de São Francisco em Mirai nos anos de 2006 e 2007	51
3.6.4- Acidente com a barragem de Herculano em Itabirito em 2014	53
3.6.5- Acidente com a barragem de Fundão em Mariana em 2015	54
3.7- Barragens de rejeito no Brasil e a Política Nacional de Segurança de Barragens.....	57
3.7.1- Política Nacional de Segurança das Barragens	62
3.7.2- Critérios gerais para a classificação das barragens	63
3.7.2.1- Classificação em relação à categoria de risco	63
3.7.2.2- Classificação quanto ao dano potencial associado	68
3.7.2.3- Classificação quanto ao risco e dano potencial associado	71
3.7.3- Classificação de risco e dano associado do estado de Minas Gerais	73
3.8- Monitoramento e instrumentação de barragens de rejeitos	75
3.8.1- Inspeções visuais.....	78
3.9- Instrumentação	79
3.9.1- Medidores de vazão	79
3.9.2- Piezômetros	81
3.9.2.1- Piezômetro de Casagrande ou de tubo aberto (Stand pipe)	81
3.9.2.2- Piezômetro Pneumático	82
3.9.2.3- Piezômetro hidráulico de tubo duplo ou aberto	82
3.9.2.4- Piezômetro elétrico.....	83
3.9.2.5- Piezômetro de Corda Vibrante	83
3.9.3- Inclinômetros.....	84
3.9.4- Medidores de recalque.....	85
3.9.5- Estações meteorológica	85
3.10- Limitações da Instrumentação.....	86

4- CONCLUSÃO	87
5- REFERÊNCIAS	89

1- INTRODUÇÃO

A mineração é uma das atividades mais antigas exercidas pelo homem. Na antiguidade os nossos ancestrais exploraram e utilizavam os minerais de forma rudimentar, essencialmente para sua sobrevivência. As técnicas de mineração vêm sendo constantemente aprimoradas, principalmente nos últimos sessenta anos, com o advento de uma grande quantidade de pesquisas na área e, mais recentemente, com o auxílio da informática e a utilização de softwares.

O Brasil apresenta um enorme potencial para a mineração, podendo ainda apresentar um crescimento significativo no setor mineral. Visto que, a demanda mundial é crescente, principalmente pelo crescimento da população global, e pelo fato do Brasil ser detentor de grandes reservas minerais. Atualmente, a produção nacional é principalmente de minério de ferro, nióbio, alumínio, níquel e ouro (DNPM 2014).

O beneficiamento e concentração destes minérios visa remover os minerais de ganga (conjunto de minerais não aproveitáveis de um minério) dos minerais de minério (minerais valiosos, passíveis de serem explorados economicamente). Neste processo a produção de rejeitos é inevitável.

Cavalcante (2004) ressalta que se deve levar em consideração o aprimoramento das técnicas de lavra, de beneficiamento e os esforços para redução dos custos de produção que ocorreu nas últimas décadas. Estas mudanças fez com que as mineradoras aproveitem minérios com teores cada vez menores e aumentassem o porte dos empreendimentos gerando, com isto, mais rejeitos. A Tabela 1 mostra a as razões médias minério/rejeito de alguns minerais.

Tabela 1 - Razões médias minério/rejeito de alguns minerais

	MINÉRIO	REJEITO
Ferro	2	1
Carvão	1	3
Fosfato	1	5
Cobre	1	30
Ouro	1	10000

Fonte: Abrão (1987)

Tendo em vista a quantidade de rejeito gerado pelo beneficiamento dos minérios, torna-se imprescindível à utilização de um processo sistemático de disposição. A proteção ao meio ambiente, contra as consequências adversas da disposição de rejeitos nos alteamentos de barragens, é um importante problema da atualidade e envolve questões fundamentais relacionadas à engenharia geotécnica (CAVALCANTE, 2004).

Costa e Melo (1987) apresentam como os principais problemas da atividade extrativa mineral sobre o meio ambiente, quando não perfeitamente controlada, a ocupação física desordenada de rejeitos e estéreis em extensas áreas, o aumento da acidez do solo, a inibição do crescimento de diversas espécies vegetais, o favorecimento da aridez do solo, a poluição das águas superficiais e/ou subterrâneas, os acidentes ecológicos decorrentes de rupturas das barragens, de construção precária e sem estudos geológicos/geotécnicos e os acidentes ecológicos decorrentes do escorregamento de pilhas de produtos, de estéril ou de rejeito, construídas empiricamente e sem controle.

A garantia de estabilidade das barragens de rejeito também é uma das preocupações da engenharia geotécnica, uma vez que os materiais que constituem os rejeitos possuem grande variabilidade de características mineralógicas, físicas e químicas, fato que confere distinção em relação aos materiais de disposição natural. Além disso, são estruturas de contenção de grande volume e sujeitas à ruptura, podendo provocar graves acidentes.

Os diversos acidentes ocorridos em barragens de rejeitos com graves consequências ambientais e perdas financeiras significativas para o empreendedor, sinalizaram para importância de um monitoramento planejado através do desenvolvimento de um bom projeto de instrumentação para as barragens de rejeito (MACHADO, 2007).

Nas últimas décadas, tem crescido o interesse pelos sistemas de controle de obras de barragens buscando oferecer segurança em seu período de operação. A instrumentação é um dos métodos utilizados para acompanhar o comportamento de uma barragem e de sua fundação, podendo alertar para o desenvolvimento de condições inseguras (CRUZ, 2004).

Esta monografia buscou apresentar uma elucidação acerca dos recursos minerais presentes no Brasil, assim como as reservas minerais brasileiras, importações, exportações e as características da mineração nacional. Detalhando o processo de beneficiamento mineral dando ênfase, dentro deste processo, para o rejeito produzido pela mineração e suas formas de disposição nas barragens de rejeito. Demonstrando também o sistema construtivo destas barragens enfatizando a forma de execução dos alteamentos a montante, a jusante e de linha de centro.

Este trabalho procurou expor uma revisão bibliográfica sobre as falhas mais recorrentes nas barragens de rejeitos, assim como uma análise destas falhas, relacionando estas imperfeições com a altura das barragens e também com os métodos de alteamento. Realizando conjuntamente uma breve revisão a respeito dos principais acidentes com barragem de rejeito ocorridos no Brasil até o ano de 2015.

Esta pesquisa também buscou exibir uma explanação acerca da Política Nacional de Segurança das Barragens, elaborando gráficos e destacando a quantidade de barragens que pertencem a esta política, suas classificações quanto à categoria de risco e ao dano potencial associado. Em relação ao monitoramento das barragens de rejeito este trabalho procurou realizar uma pesquisa bibliográfica sobre as formas de monitoramento para estas barragens, dando maior ênfase para o monitoramento realizado através de instrumentação com auxílio de equipamentos como: medidores de vazão, piezômetros, inclinômetros, medidores de recalque e estações meteorológicas.

2- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1- Minerais e rochas

Os minerais e as rochas sempre estiveram presentes na vida do homem. Desde a antiguidade os nossos ancestrais já utilizavam os minerais para construções, caça, batalhas, guerras e para sua sobrevivência.

Os nomes utilizados na escala de tempo da pré-história do homem demonstram a importância dos minerais e das rochas no desenvolvimento, conhecimento e evolução da civilização. A divisão na escala de tempo ficou conhecida como o Sistema de Três Idades que consiste na divisão da pré-história em três períodos de tempo consecutivos, de acordo com o método de manufatura das ferramentas da época, essa nomenclatura é utilizada na arqueologia e antropologia e são conhecidas como: Idade da Pedra, Idade do Bronze e Idade do Ferro.

2.2- Pesquisa mineral, recurso mineral, reserva mineral e prospecção mineral

Grossi (1993) define recurso mineral como sendo uma mineralização estimada por pesquisa e que fatores variados farão com que o conjunto, ou uma parcela deste recurso mineral, possa se tornar uma reserva mineral.

A pesquisa de um indício mineral visa fornecer a localização de uma ocorrência mineral e se a presença das substâncias de interesse são economicamente aproveitáveis nas condições atuais. Ou então resultar na descoberta de uma reserva mineral (TUIHEF, 2014).

O segundo Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM) (2002) a reserva mineral é uma concentração ou depósito na crosta da Terra, de material natural, sólido, com características geológicas próprias, tais como: espessura, atitude, tonelagem ou volume, qualidade e/ou teor entre outros tais que, uma vez pesquisado, exibe parâmetros mostrando, de modo razoável, que seu aproveitamento pode ser viável na atualidade ou no futuro.

Os recursos minerais podem ser classificados em: indefinido, indicado e medido. As reservas minerais também são classificadas, porém apenas em reservas indicadas e medidas.

O grau de concentração de uma substância na reserva mineral é dado pelo teor e a atividade que visa identificar o grau de concentração mineral é denominada de prospecção mineral (MARANHÃO, 1986).

A prospecção mineral e a pesquisa são um conjunto de técnicas, ferramentas e principalmente conhecimentos em: mineralogia, petrografia (ígnea, metamórfica e sedimentar), geologia estrutural, cartografia, depósitos minerais (ou geologia econômica), foto-geologia, informática aplicada, estatística aplicada (ou geoestatística), geotectônica entre outros. Com o objetivo da descoberta e estudo das reservas minerais (NETO; ROCHA, 2010).

2.3- Lavra e mina

Constatada a viabilidade técnica, econômica e de logística tem-se então o início do conjunto de operações coordenadas para aproveitamento do material presente na reserva mineral que é denominado de lavra. A mina, por sua vez, é denominada como sendo uma reserva mineral em lavra. A mina pode ser a céu aberto, subterrânea ou mista (TUIHEF, 2014).

2.3.1- Classificação dos minérios

O minério, como uma rocha, tem dois tipos de materiais associados: o mineral de interesse, denominado mineral de minério ou mineral minério e o mineral de ganga ou ganga, que não tem valor econômico (PARKER, 1989). De acordo com a natureza das substâncias, os minérios podem ser classificados como: metálicos, não metálicos e energéticos.

Segundo Leinz e Campos (1989) os minérios metálicos são Fontes de elementos metálicos, podendo ser divididos em ferrosos e não ferrosos. Os minérios não ferrosos podem ser divididos em básicos (cobre, chumbo, zinco e estanho), leves (alumínio, magnésio e titânio) e preciosos (ouro, prata, platina e paládio).

A Figura1 expõe alguns elementos químicos e seus respectivos minerais metálicos.

Figura 1- Quadro contendo alguns elementos químicos e seus respectivos minerais metálicos

Elementos e respectivos símbolos químicos	Minerais mais comuns e respectivas composições químicas	Elementos e respectivos símbolos químicos	Minerais mais comuns e respectivas composições químicas	Elementos e respectivos símbolos químicos	Minerais mais comuns e respectivas composições químicas	Elementos e respectivos símbolos químicos	Minerais mais comuns e respectivas composições químicas
Alumínio, Al	Bauxita, mistura de hidróxidos de alumínio e minerais argilosos	Manganês, Mn	Pirolusita, MnO_2	Cromo, Cr	Cromita, (Fe, Mg) Cr_2O_4	Estanho, Sn	Cassiterite, SnO_2 Estannite, Cu_2FeSnS_4
Antimônio, Sb	Estibinita (antimoni-te), Sb_2S_3 Jamesoni-te, $Pb_4FeSb_6S_{14}$	Mercúrio, Hg	Cinábrio, HgS	Cobalto, Co	Cobaltita, $CoAsS$	Titânio, Ti	Rutilo, TiO_2 Ilmenita, $FeTiO_3$
Arsênio, As	Arsenopirita, $FeAsS$	Molibdênio, Mo	Molibdenite, MoS_2	Cobre, Cu	Cobre nativo, Cu Cuprita, Cu_2O Calcopirita, $CuFeS_2$ Calcosita, Cu_2S Malaquita, $Cu_2[(OH)_2CO_3]$ Azurita, $Cu_3[OHCO_3]_2$ Covelita, CuS	Tungstênio, W	Volframita, (Fe, Mn) WO_4 Schelita, $CaWO_4$
Berílio, Be	Berilo, $Be_3Al_2Si_5O_{18}$	Níquel, Ni	Pentlandita, (Ni, Fe) S_5 Niquelina, $NiAs$ Cloantita, (Ni, Co) As_3 Garnierita, (Ni, Mg) $_d[(OH)_5Si_4O_{10}]$	Ferro, Fe	Magnetita, Fe_3O_4 Hematita, Fe_2O_3 Limonita, $FeOOH \cdot nH_2O$ Siderita, $FeCO_3$ Pirite, FeS_2	Urânio, U	Uraninita, UO_2 Torbernita, $Cu(UO_2)_2P_2O_8 \cdot 12H_2O$ Autunita, $Ca(UO_2)_2P_2O_8 \cdot 8H_2O$
Bismuto, Bi	Bismuto nativo, Bi Bismutinite, Bi_2S_3 Bismite, Bi_2O_3	Ouro, Au	Ouro nativo, Au Silvanite, $AgAuTe_4$ Calaverite, $AuTe_2$	Chumbo, Pb	Galena, PbS Anglesite, $PbSO_4$ Cerussite, $PbCO_3$	Vanádio, V	Descloizita, $Pb(Zn, Cu)[OHVO_4]$ Vanadinita, $Pb_3[Cl(VO_4)_3]$
Cádmio, Cd	Greenoc-kita, CdS	Prata, Ag	Prata nativa, Ag Argentita, Ag_2S Silvanita, $AgAuTe_4$ Estefanita, Ag_5SbS_4	Magnésio, Mg	Magnesita, $MgCO_3$	Zinco, Zn	Zincita, ZnO Esfalerita (blenda), ZnS Smithsonita, $ZnCO_3$

Fonte: Neto; Rocha (2010)

O grupo dos minérios não metálicos conhecidos como MRI (minerais e rochas industriais) é composto por uma classe muito abrangente, incluindo materiais de construção (areia, cascalho, brita e rochas ornamentais), materiais para indústria química (enxofre, fluorita e pirita), fertilizantes (NPK - nitrato, fosfato e potássio),

cimento (calcário), cerâmica (argilas, feldspatos e sílica), refratários (cromita e magnesita), abrasivos (córindon, diamante e alumina), isolantes (amianto e mica), fundentes (carbonato e fluorita), pigmentos (titânio e ocre), gemas (diamante, esmeralda, água-marinha, rubi, safira e turmalina) e águas minerais (SUMÁRIO MINERAL, 2010). A Figura 2 apresenta a relação de alguns minerais não metálicos.

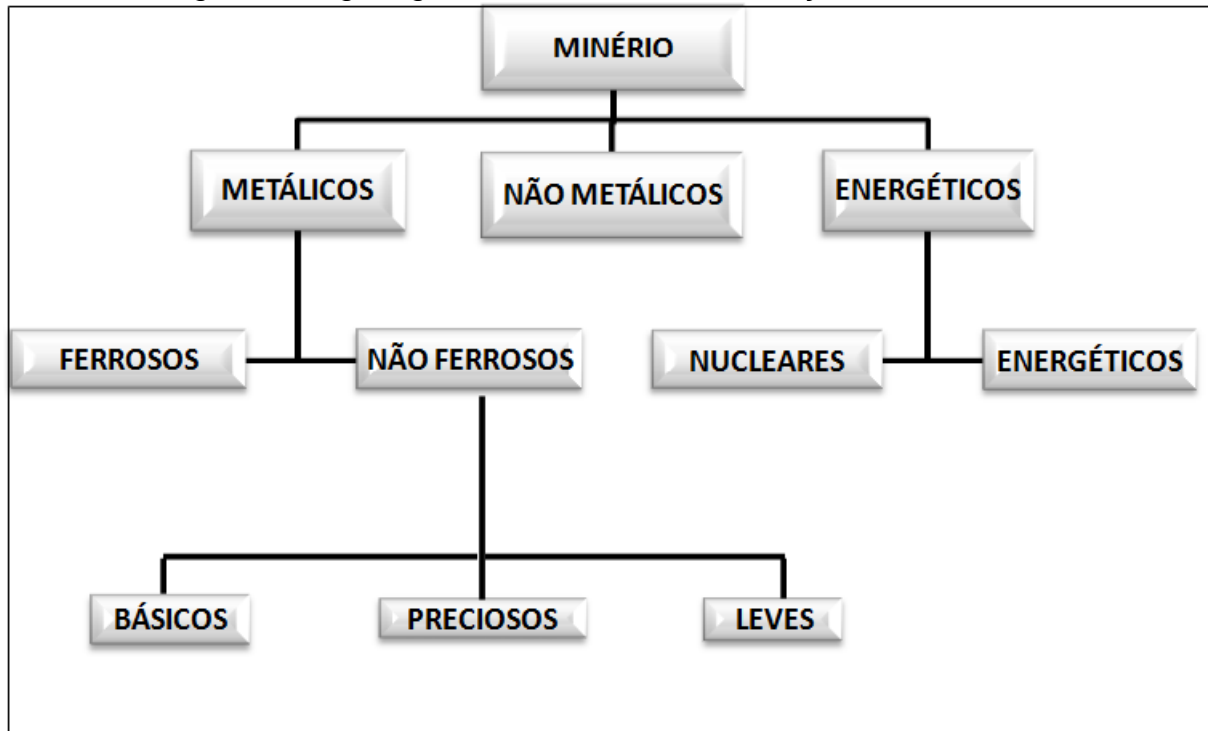
Figura 2- Relação de alguns minerais classificados como industriais

Alumina/Bauxita	Diamante	Mica	Sílica/Quartzo
Amianto	Diatomita	Olivina	Ardósia
Argilas plásticas/ "Ball Clay"	Dolomita	Perlita	Vermiculita
Barita	Feldspato/ Nefelina-Sienito	Potássio	Talco
Bentonita/ Atapulgita/ Sepiolita	Fluorita	Pirofilita	Sal
Minerais de Berílio	Grafita	Fosfatos/ Apatita	Gesso
Carbonato de Cálcio	Óxido de Ferro	Minerais de Titânio	Caulim/ Haloisita
Calcário/Cal	Minerais de Lítio		

Fonte: Neto e Rocha (2010)

Os minérios energéticos são substâncias que podem ser usadas como fonte de energia e englobam os materiais nucleares e os combustíveis fósseis. Conforme Maia (2010) Os materiais nucleares são minerais que contêm elementos radioativos como urânio e tório. Já os combustíveis fósseis têm origem na acumulação de microrganismos em sedimentos, estes são transformados posteriormente em rochas sedimentares por processos diagenéticos, sendo divididos em sólidos, líquidos e gasosos. A Figura 3 retrata um organograma referente à classificação dos minérios.

Figura 3- Organograma referente à classificação dos minérios



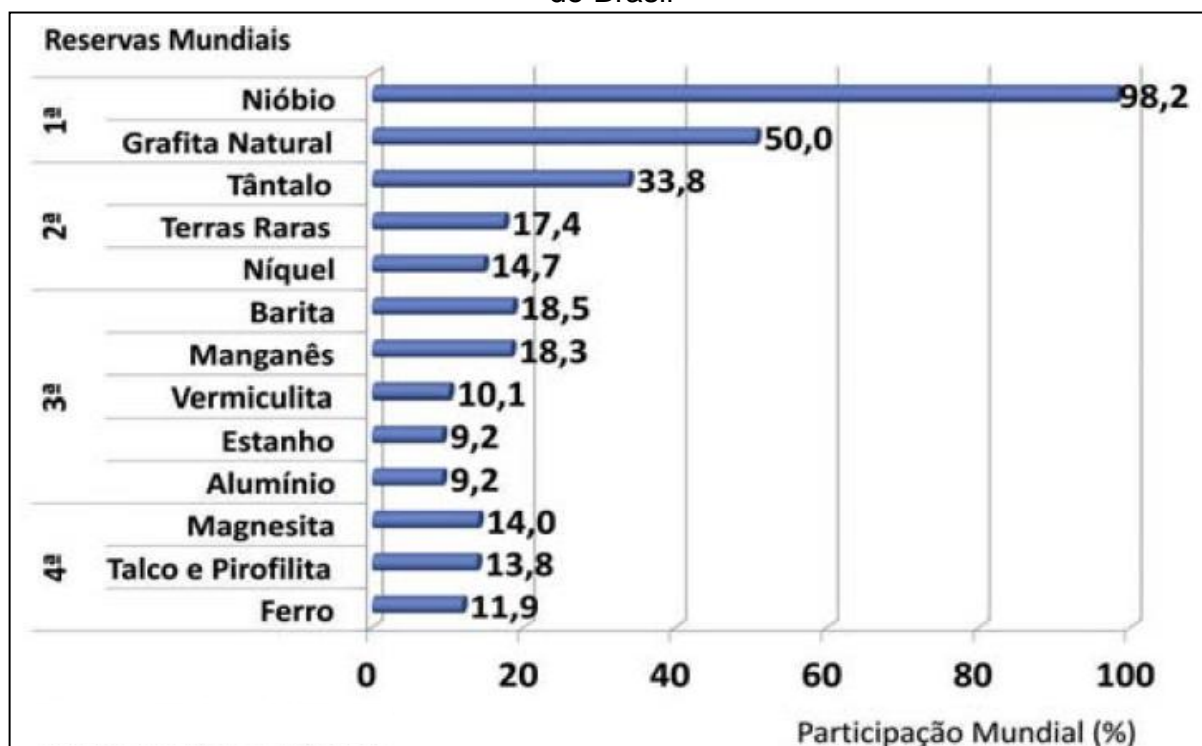
Fonte: O autor

2.4- A mineração na economia brasileira

A mineração é um amparo financeiro e econômico para o Brasil. A atividade de mineração é uma grande fonte de renda e equilibra os índices de crescimento do país. Este cenário favorável se deve principalmente as características do solo brasileiro, que se apresenta em configurações bem atípicas e ricas (TUIHEF, 2014).

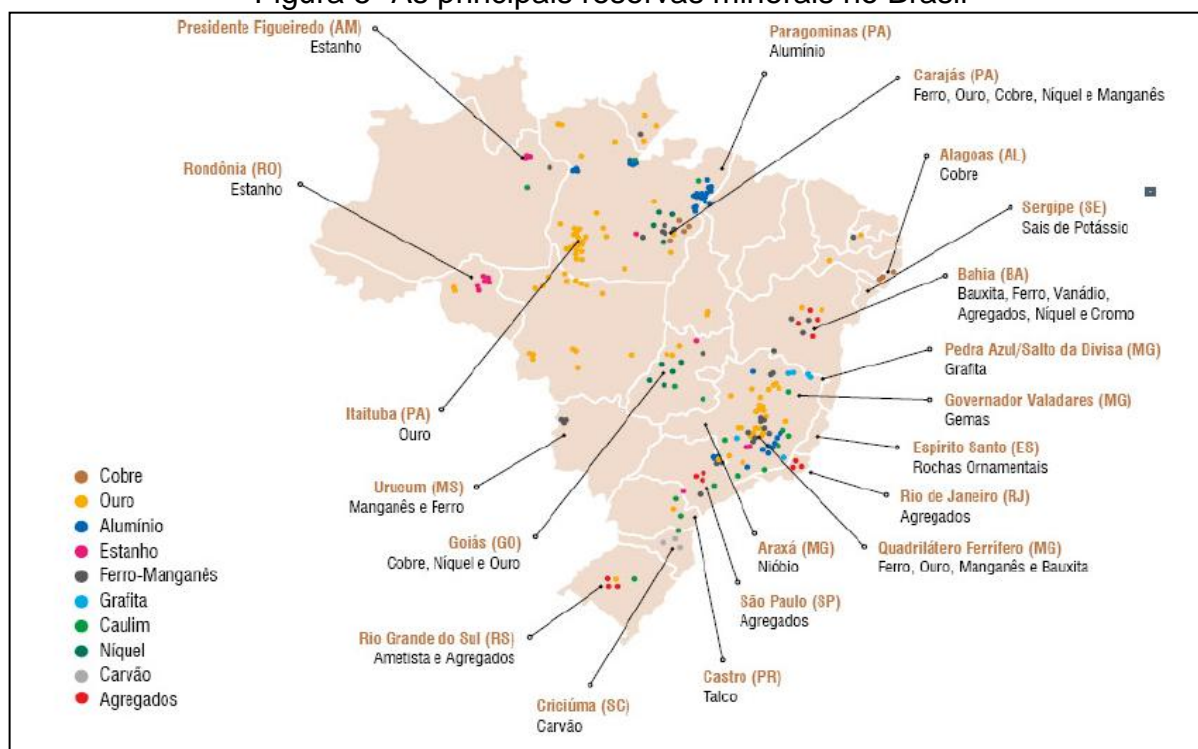
As estatísticas oficiais situam o Brasil no quadro internacional como grande detentor de reservas minerais, o Brasil possui as maiores reservas de nióbio, barita e grafita natural em relação ao resto do mundo. Ocupa a segunda posição nas reservas de tântalo e terras raras. Os minérios de níquel, estanho e ferro também apresentaram participação significativa de reserva a nível mundial. Além disso, o nível de conhecimento geológico sugere a existência de um grande potencial para ouro, diamante, titânio, zircônio e muitos outros minerais de interesse econômico (TUIHEF 2014). A Figura 4 demonstra participação das reservas minerais brasileiras no cenário mundial e a Figura 5 apresenta as principais reservas minerais, o mineral encontrado e a sua localização no território brasileiro.

Figura 4- Participação e posição no ranking mundial das principais reservas minerais do Brasil



Fonte: United States Geological Survey e DNPM/DIPLAN (2014)

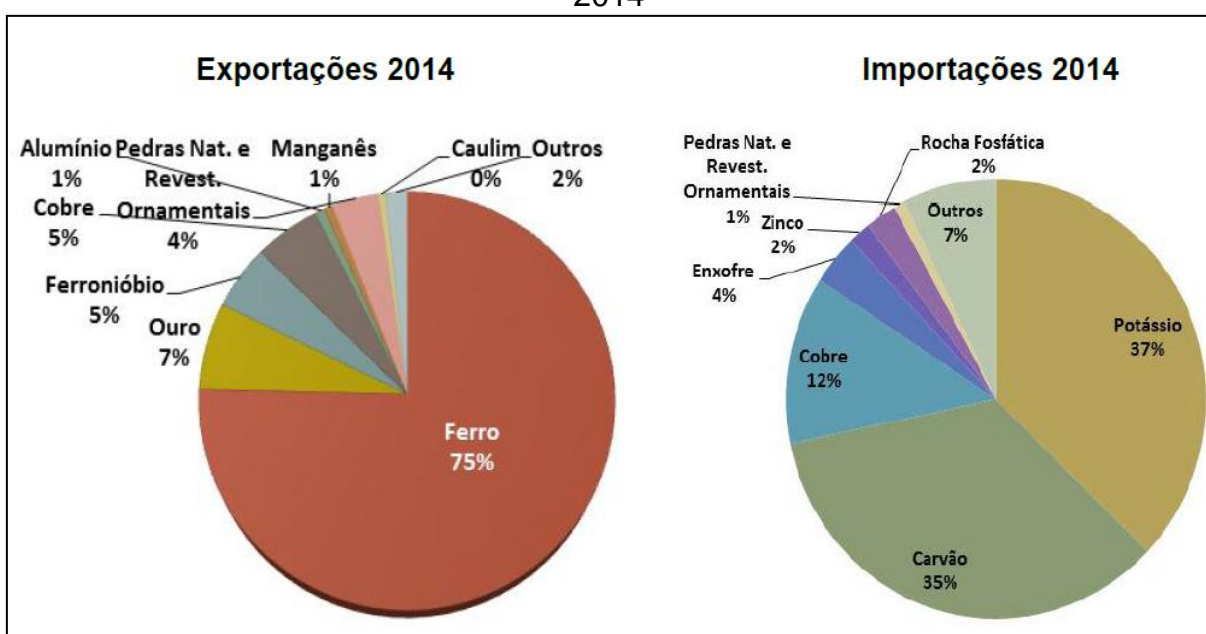
Figura 5- As principais reservas minerais no Brasil



Fonte: IBRAM (2014)

Atualmente, a mineração no Brasil atrai muitas empresas que produzem, comercializam e exportam. São aproximadamente 72 (setenta e dois) minerais, sendo 23 (vinte e três) tipos de metais, 4 (quatro) tipos de combustíveis e 45 (quarenta e cinco) tipos de minerais industriais. Apesar desta produção o Brasil precisa importar minerais, principalmente para o setor agropecuário (SUMÁRIO MINERAL, 2014). A Figura 6 mostra o percentual de exportações e importações de minérios realizados pelo Brasil no ano de 2014.

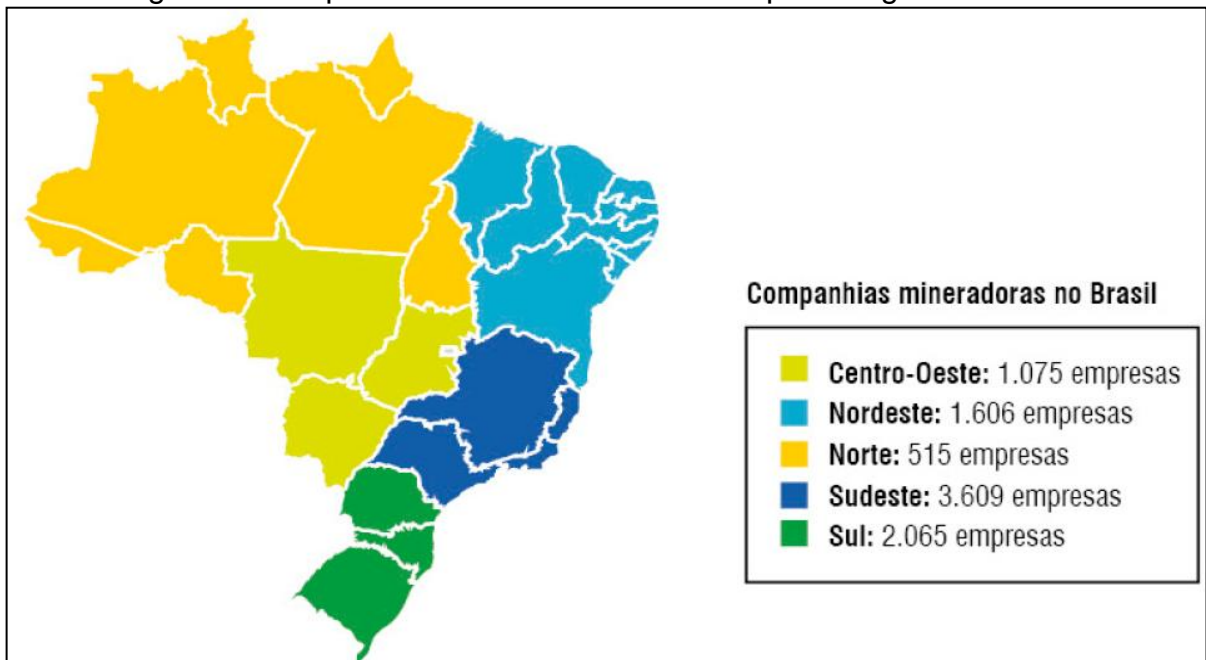
Figura 6- Importações e Exportações de minerais realizadas pelo Brasil no ano de 2014



Fonte: IBRAM (2015)

O número de empresas mineradoras no país, apurado pelo DNPM em 2013, é de 8.870. A Figura 7 mostra a distribuição destas empresas no território brasileiro.

Figura 7- Companhias mineradoras divididas pelas regiões do Brasil



Fonte: IBRAM (2015)

A indústria da mineração no Brasil é predominantemente formada por micro e pequenas empresas, no ano de 2015, segundo o DNPM (2015), existiam no Brasil um total de 8.400 minas sendo:

- 236 Grandes empreendimentos com produção maior que 1 (um) milhão de toneladas por ano. Representando 2,9% do total.
- 1.233 Médias com produção entre 100 mil a 1 (um) milhão de toneladas por ano. Representando 14,7% do total.
- 2.815 Pequenas minas com produção entre 10 mil a 100 mil toneladas por ano. Representando 33,5% do total.
- 4.116 microempreendimentos com produção menor que 10 mil toneladas por ano. Representando 48,9% do total.

Tuihef (2014) conclui que o potencial do Brasil para mineração fica muito evidente e que o avanço e a diversificação elevam os investimentos, a geração de empregos e contribuem para os índices econômicos do país. A indústria da mineração no Brasil atrai muitos investimentos e atualmente, é responsável por quase 5% do PIB nacional. Pensando em todo esse potencial a mineração pode conferir uma maior autonomia e um grande crescimento econômico para o Brasil.

3- BARRAGENS DE REJEITO

3.1- Beneficiamento do minério

O beneficiamento de minérios é o tratamento industrial que prepara granulometricamente, purifica ou enriquece minérios por métodos físicos ou químicos, sem alteração da constituição química dos minerais. O beneficiamento divide o mineral bruto em concentrado e rejeito (ARAÚJO, 2006).

No beneficiamento de minérios, existem os processos físicos e os processos químicos, também chamado de hidrometalúrgicos. No beneficiamento físico se obtêm os concentrados minerais e no beneficiamento químico, se obtêm o elemento de interesse na forma sólida e este é solubilizado. A solução produzida é purificada, gerando um concentrado do elemento de interesse (MORAES et al., 2010).

O beneficiamento físico de minérios busca adequar os diferentes tipos de minérios às exigências de mercado. As operações envolvidas no beneficiamento físico são: fragmentação, classificação, concentração e o desaguamento (BALTAR, 2008).

3.1.1- Fragmentação

Após a lavra do minério, a operação inicial usada no tratamento de minérios é a fragmentação. A britagem é o primeiro estágio dessa etapa e atua na faixa granulométrica de tamanhos maiores (do metro ao centímetro). A fragmentação geralmente é constituída de britagem primária, britagem secundária e quando a fragmentação visa atingir tamanhos bem menores (0,074 milímetros), dá-se o nome de moagem (ARAÚJO et al., 2006).

Conforme o DNPM (NRM-18) a fragmentação ou redução de tamanho é uma técnica de vital importância no processamento mineral. Um minério deve ser fragmentado até que os minerais úteis contidos sejam fisicamente liberados dos minerais indesejáveis. Às vezes, a redução de tamanho visa apenas à adequação às especificações granulométricas estabelecidas pelo mercado. Em todos os casos, a fragmentação é uma operação que envolve elevado consumo energético e baixa eficiência operacional, representando, normalmente, o maior custo no tratamento de minérios.

3.1.2- Classificação

A classificação, de uma forma geral, consiste na separação de partículas com base nas dimensões físicas das mesmas. Os processos de classificação são divididos em peneiramento e classificação propriamente dita. Os equipamentos de classificação mais comuns são: peneiras, classificadores mecânicos e ciclones (BERALDO, 1983).

3.1.3- Concentração

A concentração de minérios ocorre quando é preciso separar os minerais de interesse dos que não o são. Para que essa separação ocorra, é preciso que os minerais de interesse não estejam fisicamente agregados aos que não são necessários (DNPM (NRM-18)).

Na fase de concentração, ocorre a separação dos minerais valiosos dos minerais de ganga presentes no minério. A concentração é realizada em sistemas dinâmicos em que uma resultante de forças confere diferentes caminhos aos minerais com diferentes propriedades, acarretando a separação destes. Para isso, explora-se determinada propriedade dos minerais como brilho, cor, peso específico, condução de cargas, susceptibilidade magnética e propriedades de superfície (naturais ou induzidas). Conforme a propriedade explorada, esses métodos de separação dividem-se em gravíticos, elétricos, magnéticos, flotação, manual, entre outros (PERES et al., 2007).

A técnica de flotação é o principal processo utilizado pela indústria mineral, tanto em quantidade de minérios processados quanto em diversidade de aplicações. Permite a obtenção de concentrados com elevados teores e expressivas recuperações. É aplicado no beneficiamento de minérios com baixo teor e granulometria fina. Atualmente, estima-se que cerca de dois bilhões de toneladas de minérios no mundo são processados a cada ano por flotação. No Brasil, essa técnica desempenhou um papel fundamental para o crescimento do setor mineral, principalmente para as indústrias de minério de ferro e de fosfato (PERES et al., 2007).

O processo de concentração de minérios por flotação baseia-se em induzir diferenças no comportamento de umectação (molhabilidade) em partículas de certos minerais que se deseja separar de outros, por meio da adição de agentes químicos com funções específicas. A máquina de flotação separa os minerais hidrofóbicos,

coletados na espuma, dos minerais hidrofílicos, que afundam (AQUINO et al., 2004; FINCH; DOBBY, 1990).

A água desempenha um papel expressivo no tratamento de minérios. No entanto, em uma determinada etapa do processo se faz necessária sua retirada para se obter produtos com baixa umidade. As operações unitárias destinadas à retirada da água constituem o desaguamento.

Na maioria das vezes, as operações de concentração são realizadas a úmido, antes de se ter um produto para ser transportado, ou mesmo adequado para a indústria, é necessário eliminar parte da água do concentrado. Várias operações podem ser utilizadas na separação sólido líquido como: sedimentação (espessamento e clarificação), filtração, centrifugação, peneiramento, secagem, flotação e separação magnética (SCHNELRATH et al., 2001).

A sedimentação pode ser definida como a técnica de desaguamento obtida através da concentração de partículas sólidas em suspensão num líquido por ação exclusiva da força da gravidade. As operações são divididas em 2 (duas) classes: espessamento e clarificação. O espessamento visa uma concentração efetiva de sólidos e a clarificação visa à remoção das partículas sólidas presentes em uma suspensão diluída (WEISS, 1985).

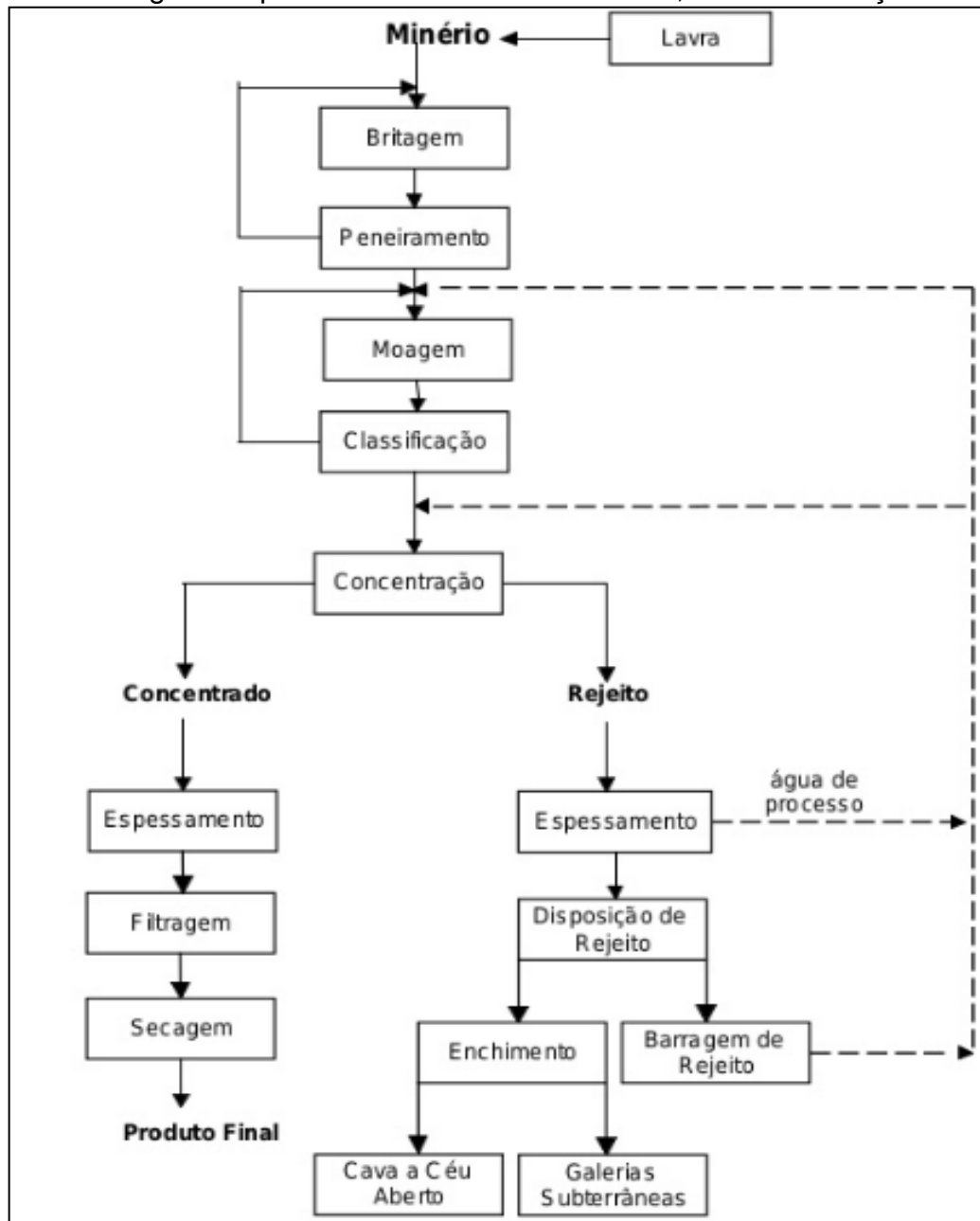
A filtração é o método de desaguamento obtido pela passagem forçada de uma suspensão aquosa através de um elemento filtrante que retém as partículas sólidas na sua superfície. O processo pode ser conduzido de forma contínua ou intermitente, sob a ação de vácuo ou pressão induzida (WEISS, 1985).

A centrifugação é a técnica de desaguamento que se utiliza de um dispositivo rotativo que induz uma sedimentação forçada sob a ação de uma aceleração significativamente elevada (DONALD, 1994).

A secagem consiste na retirada da água contida num produto sólido particulado através da evaporação da mesma por ação do calor. É utilizada quando se requer um nível de umidade bem baixo (WEISS, 1985).

A Figura 8 mostra um fluxograma típico de tratamento de minérios, com recirculação de água. O minério bruto (geralmente chamado de ROM, "run-of-mine") vindo da lavra de uma mina passa por diversas operações, acima citadas, até a obtenção do produto final, de interesse econômico, juntamente com a parcela de rejeito.

Figura 8- Fluxograma típico de tratamento de minérios, com recirculação de água.



Fonte: LUZ; SAMPAIO; ALMEIDA (2004).

3.2- Rejeito de mineração

Os rejeitos são produtos inevitáveis dos processos de tratamento a que são submetidos os minérios, sendo gerados, paralelamente, ao material de interesse. Nas operações mineiras, os rejeitos são todos os materiais desmontados e não utilizados comercialmente. Incluem os estéreis de lavra (materiais que não sofreram beneficiamento) e os minerais que são descartados do processo de beneficiamento,

por não possuírem teor ou granulometria adequados que são caracterizados como rejeitos (LIMA, 2006).

A extração do minério bruto e seu beneficiamento nas unidades mineiras geram uma grande quantidade de rejeitos, a qual é crescente dado o incremento da produção, em função da alta demanda mundial e devido à exaustão de jazidas de maior teor. Conseqüentemente entram em operação as jazidas de baixo teor (MENDES, 2007; GUIMARÃES, 2011). Em função da exaustão de minério de alto teor e da crescente lavra de minérios cada vez mais pobres, a geração de rejeitos é cada vez maior (PORTES, 2013).

A quantidade de estéreis e rejeitos gerados numa mineração está relacionada ao método de lavra empregado, seja a céu aberto ou subterrâneo, e ao teor do mineral de minério presente na rocha de interesse. De uma maneira geral, estes materiais são gerados em menor escala em minas subterrâneas, uma vez que, normalmente, os teores do minério se apresentam mais elevados e a tonelagem de material lavrado é menor (FIGUEIREDO, 2007).

Os rejeitos podem ser descartados da unidade de beneficiamento sob a forma sólida (pasta, torta ou granel) ou líquida (polpa de água com sólidos ou lama). Gomes (2004) apresenta a seguinte classificação geral para os rejeitos de mineração:

- Rejeitos em polpa (slurry) – São os rejeitos com baixos teores de sólidos que apresentam pequena resistência ou nenhuma resistência ao transporte por gravidade ou por bombeamento;
- Rejeitos espessados ou polpas de elevada densidade (thickened tailings) – São os rejeitos parcialmente desaguados, mas que apresentam ainda a consistência de uma polpa, sendo passíveis de bombeamento;
- Rejeitos em pasta (paste tailings) – São os rejeitos espessados que apresentam consistência típica de pasta (normalmente, mediante a incorporação de algum tipo de aditivo químico, como cimento Portland, por exemplo), resultando em um material não susceptível a fluir facilmente, quando não confinado, e nem a liberar quantidades significativas de água durante a sua disposição final;

- Rejeitos filtrados úmidos (wet cake tailings) – São os rejeitos na forma de uma massa saturada ou quase saturada, não mais passível de bombeamento;
- Rejeitos filtrados secos (dry cake tailings) – são os rejeitos na forma de uma massa não saturada (grau de saturação tipicamente entre 70% e 85%), não passível de bombeamento.

Embora os rejeitos não possuam valor econômico, seu destino é relevante para a extração mineral, pois apresentam alto potencial de riscos e danos ambientais. Os rejeitos ocupam grandes áreas para sua disposição, suprimem a vegetação e podem gerar impactos ambientais negativos decorrentes de sua disposição inadequada, risco de contaminação de lençóis freáticos, além de rompimento de estruturas de contenção.

A extração mineral deve estar em concordância com os preceitos do desenvolvimento sustentável para que sejam garantidas a qualidade de vida das presentes e futuras gerações e por esse motivo, combater o impacto ambiental é um desafio que precisa ser assumido pelas mineradoras (FERNANDES; SANTOS, 2008).

Alguns métodos de descarte de rejeito nocivos ao meio ambiente foram utilizados nos períodos iniciais da extração mineral. Inicialmente ocorria a descarga direta dos rejeitos nos rios, córregos e cursos de água ou despejo aleatório diretamente na superfície (materiais de diâmetros maiores). Tais métodos foram abandonados em decorrência da crescente demanda pela redução dos impactos ambientais e mudanças nas práticas da mineração (AMORIM, 2007).

Atualmente, a disposição dos rejeitos pode ser realizada a céu aberto, subterrânea e subaquática. A disposição a céu aberto é a que ocorre com maior frequência e o rejeito pode ser disposto em pilhas controladas ou em estruturas de contenção (barragens) localizadas em bacias ou vales. A disposição subterrânea é feita em câmaras remanescentes do processo de extração do minério e geralmente os rejeitos são bombeados e depositados de forma a preencher essas câmaras. A disposição subaquática não é muito utilizada, uma vez que pode gerar problemas ambientais como impacto negativo no ecossistema aquático (LOZANO, 2006).

A forma de disposição dos rejeitos está relacionada diretamente ao tipo de minério e ao tipo de processo empregado para o seu beneficiamento. Ou seja, a princípio, seu estado de disposição (pasta, granel ou polpa) está condicionado às

etapas do processo e às características da planta, e podem, posteriormente, ser alterado conforme a metodologia proposta para a sua disposição final (FIGUEIREDO, 2007).

Entretanto, a alteração do estado do rejeito para atendimento à metodologia de disposição compreende, única e exclusivamente, mudança no seu estado de concentração e não de suas características intrínsecas físico-químicas e mineralógicas. Além disso, as diversas metodologias existentes e os procedimentos de disposição de rejeitos resultam em depósitos com propriedades de engenharia substancialmente diferentes (FIGUEIREDO, 2007).

As características dos rejeitos variam de acordo com o tipo de mineral e de seu tratamento. Podem ser finos, compostos de siltes e argilas, depositados na forma de lama, ou formados por materiais não plásticos (areias), que apresentam granulometria mais grossa e são denominados rejeitos granulares. Os rejeitos granulares são altamente permeáveis e contam com uma boa resistência ao cisalhamento, enquanto os rejeitos de granulometria fina, abaixo de 0.074 mm (lamas), apresentam alta plasticidade, alta compressibilidade e são de difícil sedimentação (ESPÓSITO, 2000).

De acordo com Chammas (1989) o rejeito em forma de polpa apresenta basicamente três tipos de comportamento: líquido sobrenadante, com tendência à floculação das partículas de menor tamanho; rejeito em processo de sedimentação apresentando comportamento semilíquido a semiviscoso; e rejeito em processo de adensamento comportando-se como um material particulado.

No Brasil, é comum a disposição dos rejeitos no estado de polpa, que geralmente são depositados em sistemas de armazenamento como: diques, cavas e barragens, cujo perfeito funcionamento é fundamental para o prosseguimento das atividades de mineração.

3.3- Transporte e descarga de rejeitos

Rotineiramente o transporte dos rejeitos na forma líquida é feito por meio de canaletas ou tubulações utilizando-se da ação da gravidade. Em situações de desnível desfavorável é efetuado o bombeamento. Existem técnicas de transporte a seco por meio de caminhões ou correias transportadoras, porém são pouco econômicas e somente se justificam no caso de volumes relativamente reduzidos (LIMA, 2009).

O sistema de tubulação, também conhecido como rejeitoduto, é dimensionado com base na velocidade mínima de fluxo necessária para evitar que as partículas no estado sólido do rejeito se sedimentem e obstruam a tubulação. Esta velocidade depende tanto da densidade da polpa, como do tamanho das partículas, variando aproximadamente entre 1.5 a 3.0 m/s. Atualmente, se usam tubulações de polietileno de alta densidade (HDPE).

Rejeitos com 40 a 50% de sólidos apresentam características de fluidos e, desta forma, por meio de tubulações, podem ser bombeados ou levados pela ação da gravidade até às barragens de rejeitos. Os rejeitos podem ser distribuídos a partir de diferentes métodos de descarga, sendo que a escolha desses métodos pode afetar decisivamente a forma como o depósito de rejeitos se estabelece dentro do represamento (ICME, 2008). São quatro os métodos de disposição mais comuns utilizados em barragens de rejeitos:

-Descarga de único ponto: Geralmente a descarga é feita na extremidade oposta da tubulação que vem da usina de concentração. É bastante empregado quando a descarga de rejeitos é feita de montante para a jusante, ou seja, não é feita a partir da crista. Esse método não é recomendado quando a intenção é manter a linha freática e/ou a fração fina do rejeito longe do barramento (USEPA, 1994). Figura 9.

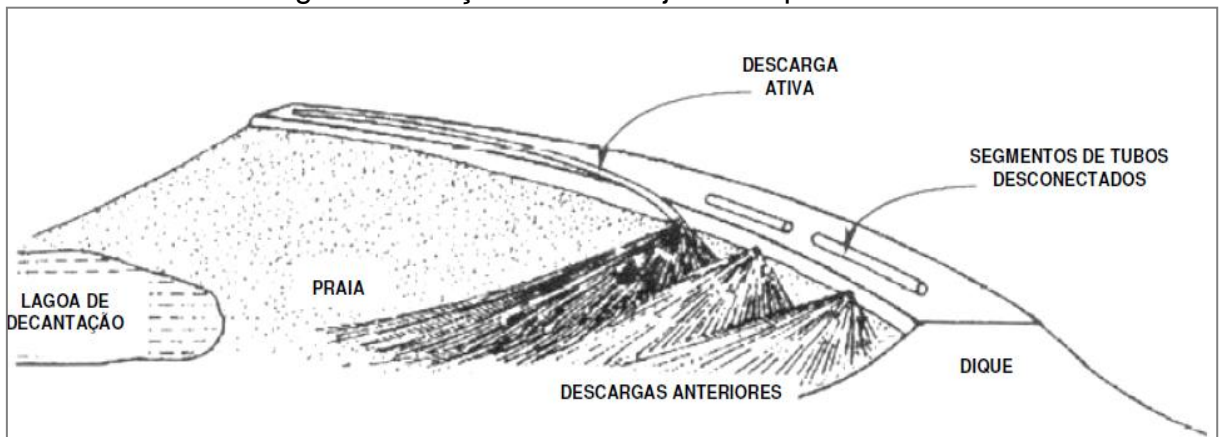
Descarga em vários pontos por espigotes: Técnica que consiste na utilização de várias tubulações de menor diâmetro ligadas à tubulação principal de rejeitos e espaçadas de forma regular, com a finalidade de se obter uma vazão constante ao longo da crista da barragem e criar uma praia mais uniforme. Na maioria dos casos, a utilização desta técnica faz com que a fração mais grossa do rejeito se instale perto do ponto de descarga e a fração mais fina seja progressivamente depositada ao longo da barragem, fazendo com que a permeabilidade, a resistência ao cisalhamento e a densidade dos sólidos depositados diminuam com o aumento da distância em relação ao ponto de descarga. Essa medida ajuda a manter a superfície freática afastada da barragem (VICK, 1983). Figura 10.

Descarga com barras aspersoras tipo “spray bars”: Nesta técnica, tubulações com pequenos furos distribuídos em toda a sua extensão são dispostas longitudinalmente ao longo da praia, com o objetivo de reduzir a pressão de lançamento do rejeito na barragem e, desta forma, diminuir o arraste de partículas e melhorar a segregação hidráulica dos rejeitos;

Descarga com ciclonagem: A ciclonagem é um método utilizado para a separação da fração grossa do rejeito. Os hidrociclones são dispositivos mecânicos simples que utilizam a força centrífuga para extrair a fração grossa do rejeito. Essa técnica é bastante atrativa para as mineradoras, pois o rejeito grosso pode ser usado como material de construção nos sucessivos alteamentos da barragem e com isso o custo referente à exploração de áreas de empréstimo é bastante reduzido. Outra vantagem que esta prática proporciona é a redução do volume dos rejeitos a serem depositados, uma vez que a fração grossa será utilizada no próprio corpo da barragem (USEPA, 1994). Figura 11.

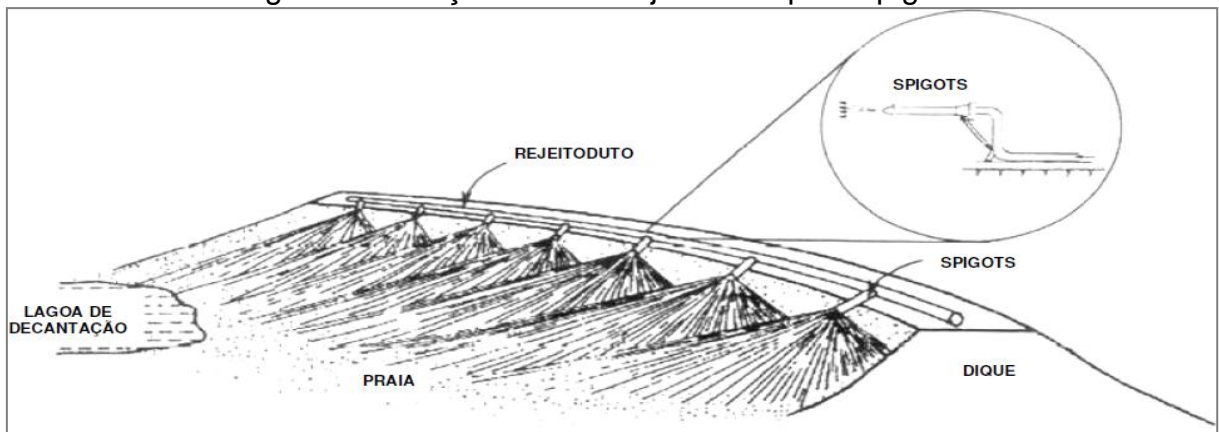
Os hidrociclones são equipamentos que executam a separação das partículas por tamanho. A separação com uso do hidrociclone tem como resultado uma areia com 10 a 20% de partículas passando na peneira #200. O seu funcionamento inicia-se com a injeção de poupa sob pressão (com porcentagem de sólidos preestabelecida) a poupa segue uma trajetória helicoidal, onde as partículas mais grossas se direcionam para as paredes do hidrociclone devido à força centrípeta, e os finos se acumulam no centro do equipamento. O material mais grosseiro sai por baixo do equipamento, porção chamada de *underflow*, com pouca quantidade de água. As partículas finas transbordam do equipamento. Essa porção é chamada de *overflow* (ARAÚJO, 2006).

Figura 9- Lançamento de rejeito em ponto único



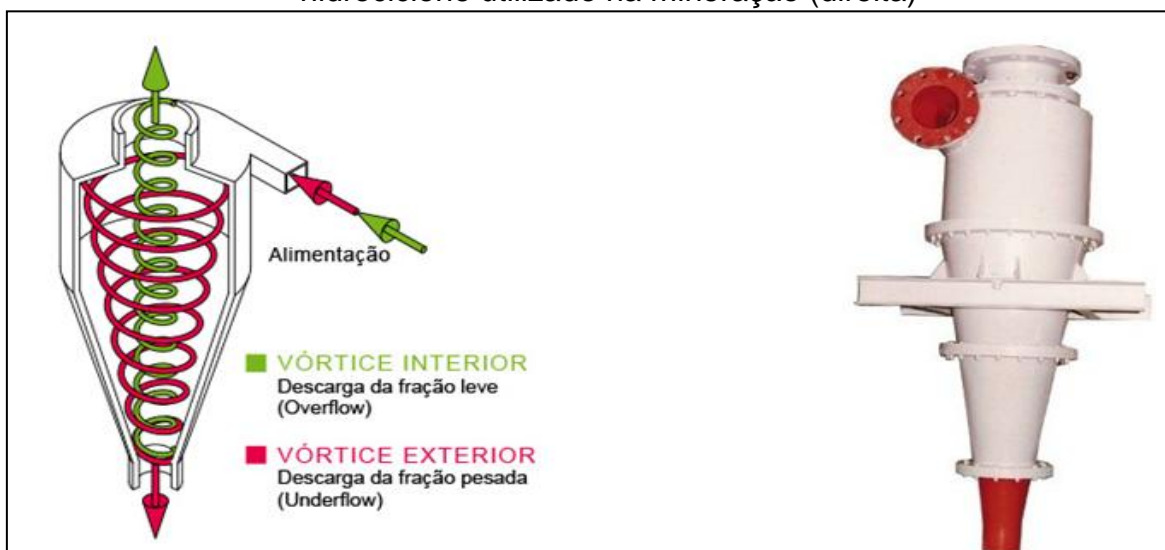
Fonte: Pereira (2005)

Figura 10- Lançamento de rejeito feito por espigotes



Fonte: Pereira (2005)

Figura 11- Esquema de funcionamento de um hidrociclone (esquerda) e o hidrociclone utilizado na mineração (direita)



Fonte: AWK(esquerda) VLC(direita) fabricantes/revendedores.

3.4- Barragens de rejeito

Barragem de rejeito é uma estrutura construída com a finalidade de armazenar os resíduos de mineração (CRUZ, 2004). No Brasil, a frequente disposição de rejeito na forma de polpa, faz com que a construção adequada e a segurança das barragens sejam indispensáveis para armazenar corretamente os rejeitos e reduzir os riscos ambientais.

A Política Nacional de Segurança das Barragens (PNSB), instituída em 20 de setembro de 2010 pela Lei Federal n.º 12.334, estabelece que a segurança das barragens deve ser considerada em todas as etapas, desde o planejamento, projeto, construção, enchimento, operação até a desativação e usos futuros, sendo o empreendedor responsável legal pela segurança da barragem.

Durante as fases de planejamento e projeto devem ser realizados ensaios em campo e em laboratório a fim de verificar as propriedades físicas e mecânicas das fundações, rochas e materiais de empréstimo. Além disso, devem ser avaliadas as características das águas subterrâneas, sua localização e composição (LOZANO, 2006).

Segundo Machado (2007), no processo de escolha do local é necessário analisar a topografia da região para determinar a geometria da barragem, sendo possível a utilização de vales existentes na construção das barragens. É importante que o solo do local escolhido apresente capacidade de suporte suficiente para que não ocorram deslizamentos ou grandes acomodações durante a operação da barragem.

Para o dimensionamento das barragens deve ser considerado o volume e as diferentes características do rejeito. Em situações nas quais o rejeito seja de textura argilosa, este dimensionamento dependerá da previsão da consolidação deste material. Com o tempo, a consolidação liberará espaço útil na barragem, para novos lançamentos de rejeito (LIMA, 2009).

De forma geral, as barragens de rejeito são construídas em etapas e alteadas de acordo com as necessidades da mina. O alteamento pode ser realizado com materiais de empréstimo, material compactado proveniente de áreas próximas, ou com material do próprio rejeito (CRUZ, 2004).

O uso de rejeito, nos alteamentos, é bastante frequente devido ao baixo custo, a fácil execução e a grande disponibilidade de material. Para a utilização de

rejeito na construção da barragem é necessário que suas frações sejam separadas, pois as partículas finas são impróprias para o uso, devido a sua baixa resistência ao cisalhamento e sua alta compressibilidade. A ciclonagem dos rejeitos é comumente utilizada para obter a separação dos componentes de maiores diâmetros (LIMA, 2009).

Para as construções das barragens é utilizada a técnica de hidromecanização, na qual ocorre o transporte e disposição do rejeito com auxílio da água. As barragens resultantes deste procedimento apresentam comportamento de aterro hidráulico, estrutura construída pelo transporte e deposição de solo em meio aquoso (PEREIRA, 2005).

O lançamento hidráulico de rejeitos provoca segregação hidráulica, afetando diretamente a distribuição granulométrica e as condições de fluxo ao longo da praia. Além disso, pode haver aumento do risco de ruptura, devido à formação de potenciais focos de liquefação (PEREIRA, 2005).

A liquefação é um fenômeno no qual ocorre redução da resistência ao cisalhamento de solos granulares, fofos e saturados em resposta a um carregamento não drenado. Estes focos podem ser causados por vibrações no terreno provenientes de desmonte com explosivos próximo das barragens, alteamentos muito rápidos, entre outros (PEREIRA, 2005).

A etapa inicial da construção consiste na execução de um dique de partida de pequena altura (normalmente, em torno de 5 metros), constituído de material de empréstimo, seguido pelo lançamento do rejeito em sua crista, formando uma praia que irá se adensar e atuar como fundação. Este lançamento é realizado por meio de hidrociclones, por uma série de barras aspersoras (spray bars) ou por espigotes. Todas com o objetivo de obter a formação uniforme da praia (LUZ; LINS 2010).

Os espigotes apresentam uma forma mais simples de instalação e mais complexa de funcionamento, pois existe a possibilidade da não uniformidade nos pontos de lançamento, formação de poças de lama/água entre os pontos de lançamento e grande variabilidade das características geotécnicas dos rejeitos (PEIXOTO, 2012).

As barras aspersoras (spray bars) tendem a uniformizar o processo de disposição e, assim, melhorar o processo de segregação hidráulica dos rejeitos. A utilização de hidrociclones permite a separação granulométrica dos rejeitos totais na sua fração mais grosseira (*underflow*) e na mais fina (*overflow*), sendo a primeira

utilizada na construção da própria barragem, enquanto a fração fina é lançada no reservatório da barragem (PEIXOTO, 2012).

3.4.1- Métodos de alteamentos

Os alteamentos devem acompanhar o nível de rejeitos no reservatório, com manutenção de borda livre que possibilita o armazenamento de água para reaproveitamento no beneficiamento e minimizar os efeitos de inundações (PORTES, 2013; SOARES, 2010).

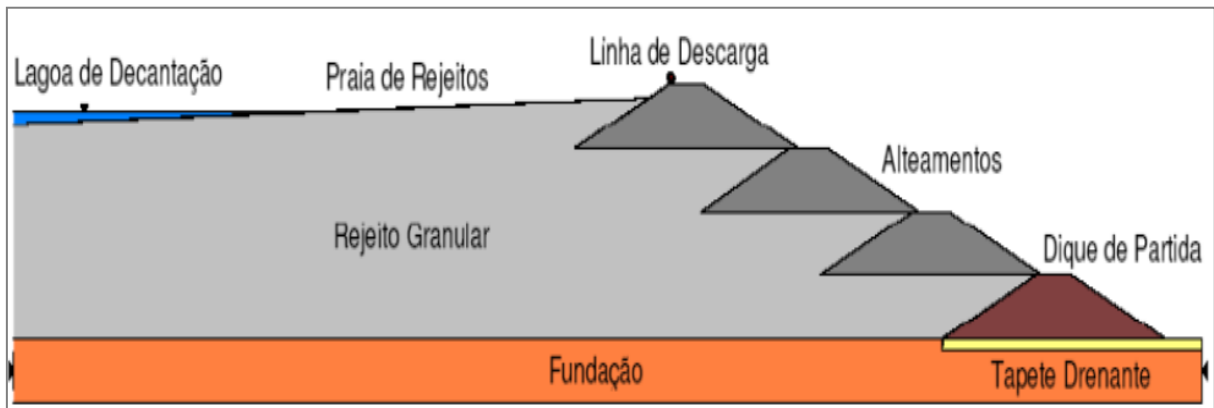
Nas etapas de alteamento os métodos utilizados mais comuns são: a jusante, a montante e de linha de centro. Estas denominações resultam do deslocamento que o eixo da barragem desenvolve durante seu alteamento. A escolha do método deve ser fundamentada nas combinações das variáveis condicionantes dos projetos de topografia, hidrologia, geologia, tipos e propriedades do subsolo, granulometria e concentração dos rejeitos, velocidade de deposição, variação da capacidade de armazenamento do reservatório com o aumento da altura, disponibilidade de equipamentos de terraplanagem, compactação e equipes de controle (SOARES, 2010).

3.4.1.1- Alteamento a montante

O alteamento a linha de montante é o mais antigo e por ser simples e econômico é bastante utilizado (ESPÓSITO, 2000). Neste método, que se encontra ilustrado na Figura 12, o eixo da barragem se desloca para montante e os rejeitos depositados são utilizados como parte da estrutura de contenção. Durante o lançamento dos rejeitos, ocorre segregação granulométrica, ficando a fração mais grossa depositada próxima ao maciço (VICK, 1993).

A sedimentação das partículas dá-se em função do seu tamanho e densidade, isto é, as partículas mais finas e leves ficam em suspensão e transportam-se para o centro da barragem, e as partículas mais grossas e pesadas sedimentam-se rapidamente mais próximo do dique. Para que o material lançado sirva de base para um novo alteamento, exige-se que os rejeitos contenham de 40 a 60% de areia e baixa densidade de polpa, favorecendo a segregação granulométrica (VICK 1993 apud LORENZO, 2006).

FIGURA 12- Método de alteamento a montante



Fonte: Albuquerque Filho (2004)

3.4.1.2- Vantagens e desvantagens do alteamento a montante

Dentre as vantagens oferecidas pelo método de montante estão: menor custo em comparação com os demais, maior velocidade de alteamento; uso de menor volume de rejeitos durante o alteamento e necessidade de pouco uso de equipamentos de terraplenagem.

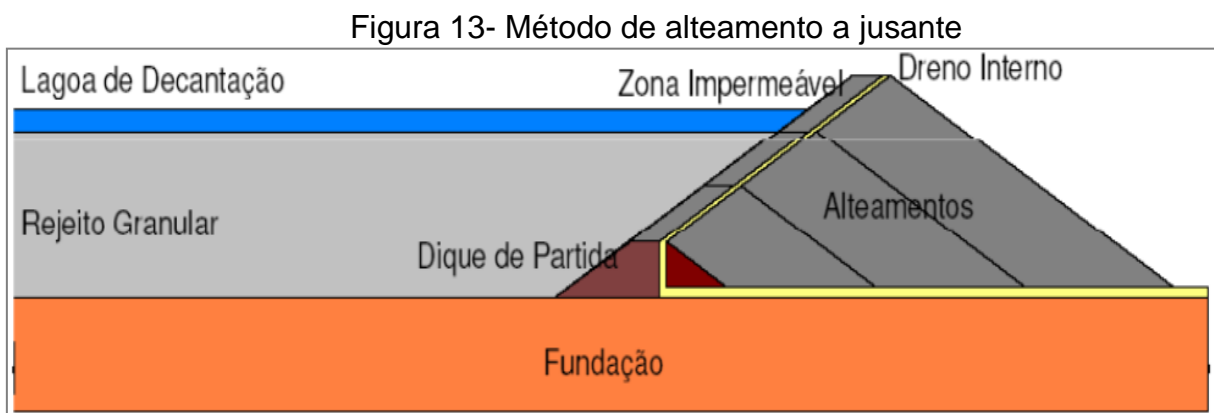
Por outro lado, o alteamento a montante, o mais utilizado no Brasil, apresenta como desvantagens seu menor coeficiente de segurança, pois em geral a linha freática se situa muito próxima ao talude de jusante, a superfície crítica de ruptura passa pelos rejeitos sedimentados que não são devidamente compactados, existe a possibilidade de ocorrer entubamento ou “piping” (fenômeno de erosão interna da barragem), resultando no surgimento de água na superfície do talude de jusante, principalmente quando ocorre concentração de fluxo entre dois diques compactados. Existe ainda o 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).

3.4.2- Alteamento a jusante

O método de alteamento a jusante, Figura 13, tem como finalidade a redução dos riscos de colapsos comuns no método da linha de montante. Durante os processos de alteamentos, o eixo da barragem irá se deslocar a jusante. O dique inicial deve ser construído de material impermeável, normalmente material argiloso compactado e deve ser obrigatoriamente dotado de drenagem interna, composto por filtro vertical e tapete drenante. O talude de montante precisa ser impermeável,

podendo ser utilizadas argila compactada ou mantas plásticas específicas para esta finalidade. (SOARES, 2010; ESPÓSITO, 1995).

No processo de alteamento do método de jusante, apenas rejeitos grossos são utilizados e apenas o underflow é lançado no talude de jusante sob compactação e controle construtivo. Neste método a barragem pode ser projetada para grandes alturas, desde que sempre sejam incorporados o sistema de impermeabilização e drenagem adequados (SOARES, 2010; LIMA, 2009; ESPÓSITO, 1995).



Fonte: Albuquerque Filho (2004)

3.4.2.1- Vantagens e desvantagens do alteamento a jusante

O método de jusante apresenta como vantagem a maior segurança, uma vez que o alteamento é controlado; menor probabilidade piping e de rupturas horizontais, uma vez que o uso do underflow resulta em 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 (Soares, 2010).

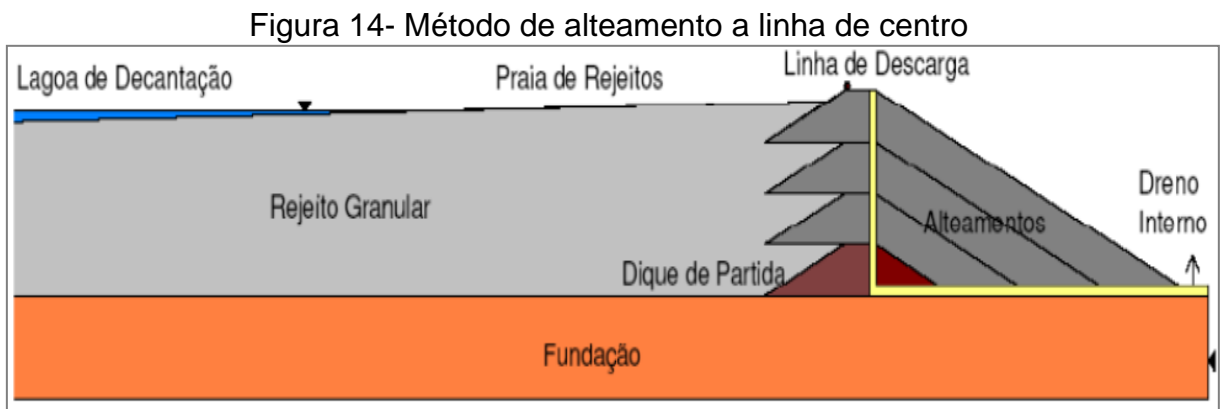
Apesar das vantagens citadas, o método de jusante apresenta custo mais elevado e necessidade de movimentar e compactar maior volume de material. Além disso, este tipo de alteamento é realizado de forma mais lenta; não possibilita a proteção com cobertura vegetal e a drenagem superficial durante a fase construtiva, devido à superposição dos rejeitos no talude de jusante.

Para sua construção é necessário o emprego de hidrociclones e a construção de enrocamento (blocos de rocha) estrutura de pé para conter o avanço do

underflow. Para estas construções é necessário que se utilizem métodos eficiente de drenagem a fim de evitar colmatção e, em áreas de alta precipitação, é necessário esperar períodos de pouca precipitação para operar equipamentos sobre os rejeitos, uma vez que pode ocorrer compactação inadequada, fora da umidade ótima (LIMA e SILVA, 2016; SOARES, 2010; LIMA, 2009).

3.4.3- Alçamento a linha de centro

O método de alçamento a linha de centro, Figura 14, é intermediário aos anteriores, inclusive em termos de custo e apresenta comportamento estrutural mais próximo ao método de jusante. Após a construção do dique, os rejeitos são lançados periféricamente a montante do mesmo, formando uma praia. Para o alçamento subsequente é realizado lançando-se os rejeitos sobre a praia e sobre o talude de jusante do dique de partida, de forma que ocorra coincidência entre o eixo da crista do dique inicial e dos diques resultantes dos sucessivos alçamentos.



Fonte: Albuquerque Filho (2004)

3.4.3.1- Vantagens e desvantagens do alçamento a linha de centro

As vantagens do método de linha de centro são a facilidade construtiva, a possibilidade de uso de material de empréstimo, estéril ou rejeitos do underflow dos hidrociclones para a construção do alçamento e a possibilidade de controle da linha freática no talude de jusante.

Entretanto, são desvantagens deste método a possibilidade de escorregamentos da área a montante, a necessidade do uso de hidrociclones e também a necessidade de enrocamento de pé para conter o avanço do underflow. Não é possível realizar tratamentos da superfície do talude de jusante, alto investimento e é necessário um sistema de drenagem eficiente. De forma geral, este

método mescla as vantagens dos métodos de montante e jusante, enquanto reduz suas desvantagens (LIMA e SILVA, 2016; SOARES, 2010; LIMA, 2009; LOSANO, 2006)

Lima e Silva (2016) realizaram um estudo sobre o potencial de liquefação das barragens de rejeito e avaliaram positivamente os métodos de alteamento a jusante e a linha de centro, devido ao uso de drenagem interna, núcleo impermeável e compactação dos materiais na utilização destes métodos de alteamento. Entretanto, estes autores reafirmam a atratividade econômica do método a montante, que necessita de maiores cuidados e controle nos aspectos referentes à segurança. A fim de reduzir os riscos associados ao alteamento a montante é preciso realizar o controle da linha freática, requisito fundamental no que diz respeito ao potencial de liquefação.

3.5- Principais mecanismos de falhas em barragens de rejeito

As falhas em barragens de rejeito podem ocasionar o rompimento e conseqüentemente a liberação do conteúdo represado. Quando este tipo de barragem se rompe, ocorrem conseqüências econômicas, ambientais e, no caso de grandes catástrofes, também há impacto na saúde pública e perda de vidas humanas (ZAM, 2010).

Dentre as conseqüências na área econômica estão os custos de reparação ou reconstrução da barragem e represamentos, as perdas econômicas devido ao período inoperante da mina, além dos custos associados à recuperação ambiental. Além disso, a liberação dos rejeitos pode causar poluição de rios, com prejuízo ao ecossistema, dispersão de poeira, contaminação das águas subterrâneas, deslizamento de terra e instabilidade dos solos (ICOLD, 2001).

Segundo o ICOLD (2001), a maior parte das falhas em barragens está relacionada com a falta ou ineficiência do controle hidrológico. O crescente aumento da carga sobre os drenos abaixo da barragem, principalmente quando são realizados os alteamentos, pode prejudicar a drenagem adequada. Além disso, as barragens nem sempre são capazes de acomodar eventos hidrológicos extremos e os barramentos mais antigos podem apresentar sistemas de drenagem inadequados.

Muitos dos casos de falhas em barragens ocorrem em consequência da falta de cuidado e em diversas vezes a falhas é relacionada à inobservância dos mecanismos que resultam em falhas. Considerando o custo que falhas geram aos proprietários das minas, deveria haver maior preocupação com a segurança das barragens de rejeito (ICOLD, 2001).

São mecanismos comuns de falhas em barragens de rejeito: A instabilidade do talude, o galgamento, as falhas na fundação, o piping e a liquefação (AZAM, 2010; RICO, 2008; USEPA, 1994).

3.5.1- Instabilidade de taludes

Para que um talude seja considerado estável, as forças de cisalhamento que resistem ao deslizamento em uma potencial superfície de falha deve ser superior ou igual às forças que induzem ao movimento (USEPA, 1994).

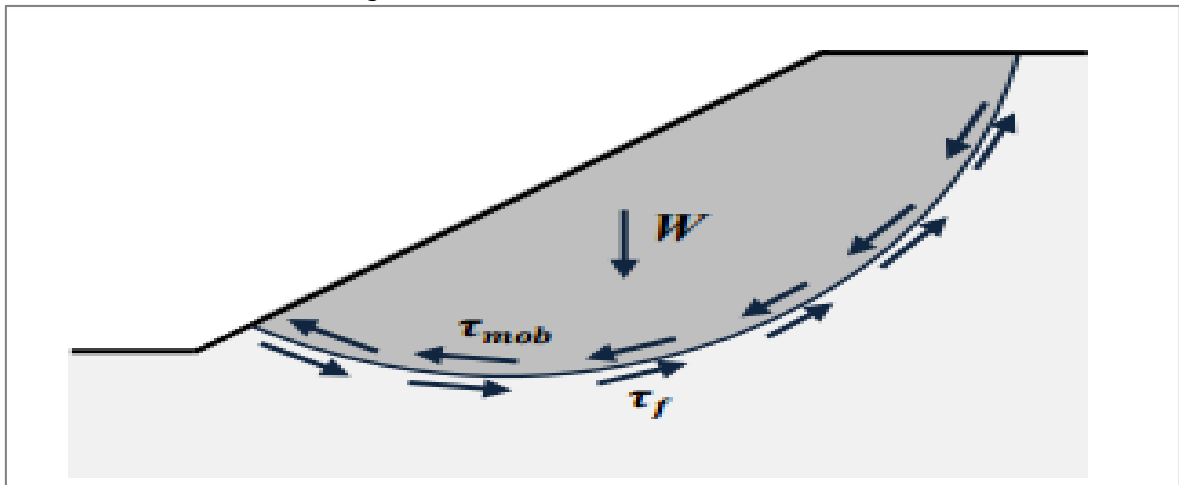
A instabilidade ocorre quando as forças que induzem o deslizamento são maiores que a força de resistência. Tal instabilidade pode ser resultante da elevação e aproximação da superfície freática do talude de jusante e de controle inadequado da poropressão (OLDECOP & RODRÍGUES, 2006).

O acréscimo de poropressões, capaz de tornar o talude instável, pode ser decorrente de carregamento estático, como no alteamento da barragem e disposição de rejeitos sem o devido controle da taxa de disposição, bem como de carregamento dinâmico, devido ao trânsito de maquinário pesado, vibrações causadas por detonações e terremotos (OLDECOP e RODRÍGUES, 2006).

A instabilidade do talude pode resultar em um deslizamento translacional, rotacional ou em um deslizamento combinado.

O deslizamento rotacional resulta em uma superfície de falha com geometria semelhante a um arco de círculo, quando realizada uma análise bidimensional. Existem diversos arcos de ruptura possíveis e a falha irá ocorrer na região que apresenta menor coeficiente de segurança. Este tipo de falha ocorre com frequência devido a alterações na superfície freática, permeabilidade do solo que constitui o talude, acomodação da fundação, vibração ou talude íngreme (USEPA, 1994). A Figura 15 mostrar a forma de um deslizamento rotacional.

Figura 15- Deslizamento rotacional

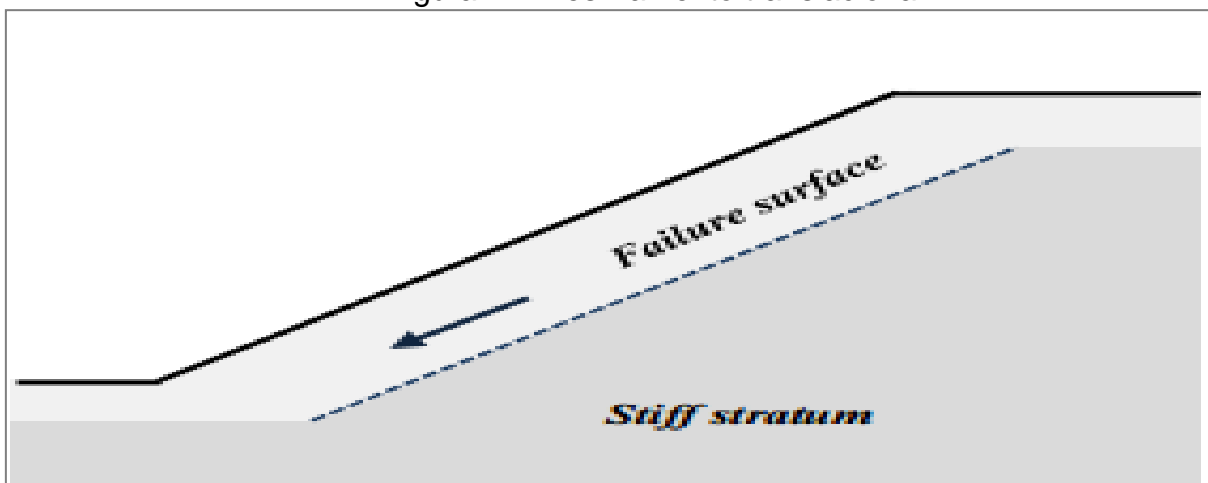


Fonte: Knight (2015)

No deslizamento translacional a superfície resultante apresenta-se mais reta do que arqueada. Neste mecanismo, existem duas camadas distintas de solo e uma camada de solo menos resistente sobrepõe-se a uma camada maciça (mais resistente), fazendo com que o solo mais fragilizado deslize para baixo (SIVAKUGAN, 2007).

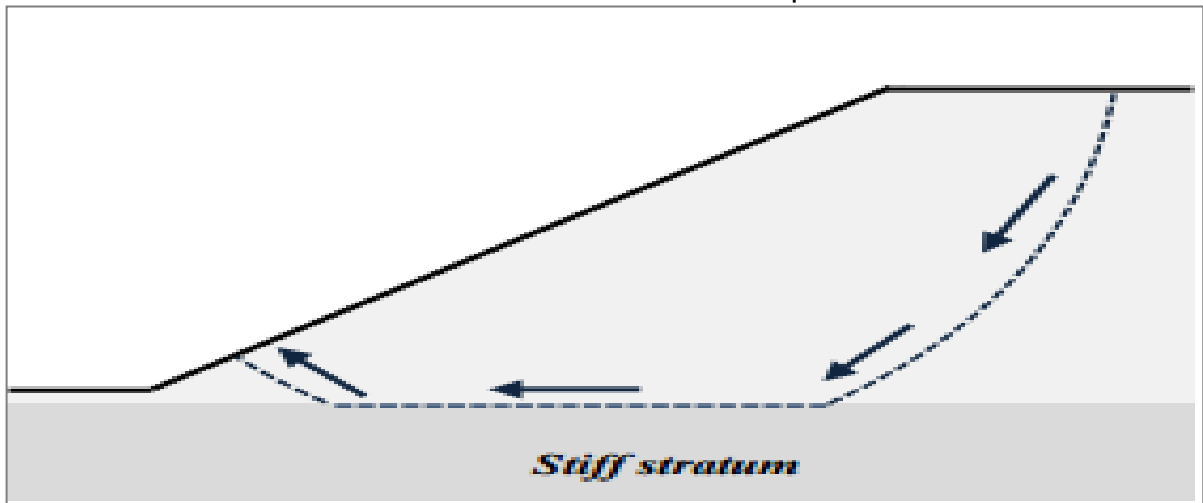
Pode ocorrer também o deslizamento composto (deslizamento rotacional mais deslizamento translacional), este tipo de instabilidade ocorre quando a superfície de deslizamento é circular, porém esta superfície é interceptada por uma camada maciça. Causando, desta forma, uma superfície de ruptura em linha reta ao longo da interface entre os diferentes estratos (SIVAKUGAN, 2007). A Figura 16 expõe um deslizamento translacional e a Figura 17 mostra um deslizamento composto.

Figura 14- Deslizamento translacional



Fonte: Knight (2015)

FIGURA 15- Deslizamento composto



Fonte: Knight (2015)

3.5.2- Falha por galgamento

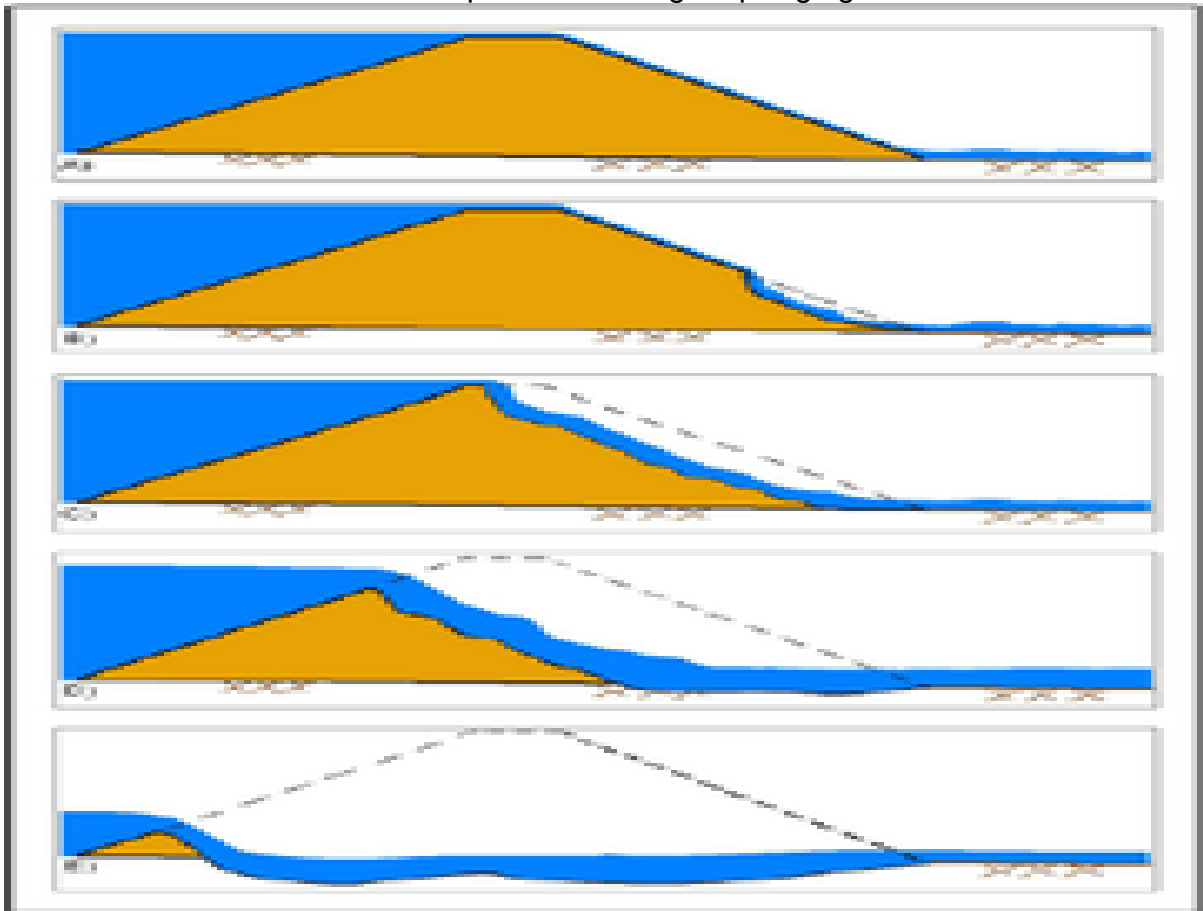
A ruptura por galgamento ocorre devido à elevação do nível d'água no reservatório além da crista da barragem. Isto pode ocorrer devido ao desvio inadequado de águas superficiais, fluxo de água pluvial excessivo, extravasor insuficiente ou obstruído e redução do volume de laminação. Estas situações fazem o volume represado ser superior ao volume para o qual a barragem foi projetada (US EPA, 1995).

Normalmente, as rupturas por galgamento ocorrem devido a chuvas muito intensas, que produzem cheias nos cursos fluviais superiores à capacidade do vertedouro. Outra causa de ruptura por galgamento pode ser a ruptura a montante de outra barragem, de tal modo que a barragem de jusante é incapaz de laminar e verter todo volume advindo da barragem de montante, elevando-se o nível acima da cota da crista e provocando uma ruptura em cascata. No caso da ruptura por galgamento de uma barragem, ocasionada por chuvas intensas, as chuvas e, conseqüentemente as vazões resultantes, podem ser muito diferentes, mas a associação de todas as vazões geradas concorre para elevar o nível acima da crista da barragem (ANA, 2012).

O galgamento pode ser até considerado em projetos de barragens de concreto. Diferentemente das barragens construídas com rejeito que são altamente susceptíveis a erosão, uma vez que são produzidas a partir de material de baixa

coesão. Sendo assim, o galgamento deve ser evitado em barragens elaboradas com rejeitos, para que não resulte em ruptura global da barragem e a liberação do material represado. Como medida preventiva, deve ser realizado um planejamento capaz de suportar grandes inundações (SMITH, 1979). Figura 18 ilustra uma falha por galgamento.

FIGURA 16- Ruptura de barragem por galgamento.



Fonte: USACE (2014)

3.5.3- Falhas na fundação

As características da fundação são importantes no planejamento e construção das barragens. Grande parte das falhas envolvendo problemas de fundação, ocorrem com barragens construídas sobre camadas superficiais de argila, solos aluvionares ou rochas de pouca resistência. Tais solos, combinados com as altas tensões de depósito, alteamentos e o fluxo de água pela fundação, resultam em uma elevação da poropressão, diminuindo a resistência ao cisalhamento, o que pode ocasionar a ruptura do solo de fundação (ICOLD, 2001).

Em uma barragem de rejeitos a interface entre o barramento e a fundação é uma região com potencial para falhas. Em condições nas quais a resistência ao cisalhamento dos solos de fundação é inferior a resistência do aterro, a integridade dos taludes depende da fundação, enquanto que em situações nas quais a resistência da barragem é menor ou igual à resistência da fundação, a integridade da barragem dependerá da resistência de seus taludes.

As falhas relacionadas à fundação de uma barragem de rejeitos podem ocorrer durante o processo de construção. O barramento existente é utilizado como fundação para os taludes que serão erguidos posteriormente. À medida que a barragem é alteada, o peso adicionado na estrutura aumenta a poropressão no talude existente. Com o passar do tempo o excesso de poropressão se dissipa e a barragem se torna mais segura (DUNCAN; WRIGHT, 2005).

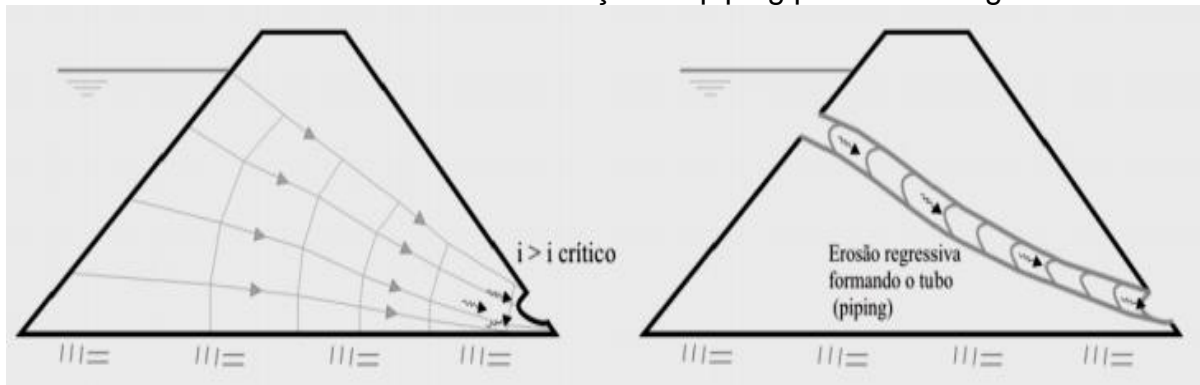
A fundação existente pode ser insuficiente para manter a estabilidade durante o alteamento. Antes da construção de um novo talude, é preciso que a barragem existente tenha tempo suficiente para adquirir estabilidade (KNIGHT, 2015).

3.5.4- Falhas por piping

O piping, também chamado de erosão regressiva, ocorre nas áreas onde o gradiente hidráulico alcança valores elevados provocando o arraste de partículas do solo de forma contínua e progressiva. Ocasionalmente o rompimento da estrutura (TERZAGHI e PECH (1948) apud SANDRONI (2012)).

O desenvolvimento do piping ocorre de jusante para montante. O pé de jusante é o local mais crítico para a ocorrência do piping, pois nesta região os gradientes hidráulicos são elevados e os níveis de tensão confinantes são baixos. O potencial para o surgimento do piping diminui progressivamente em direção a montante, seguindo caminhos preferenciais como: contatos de solos diferentes ao longo de tubulações enterradas e juntas de estratificação. A Figura 19 mostra como é o mecanismo da formação de piping por erosão regressiva (FOSTER et al, 2000 apud PERINI, 2009).

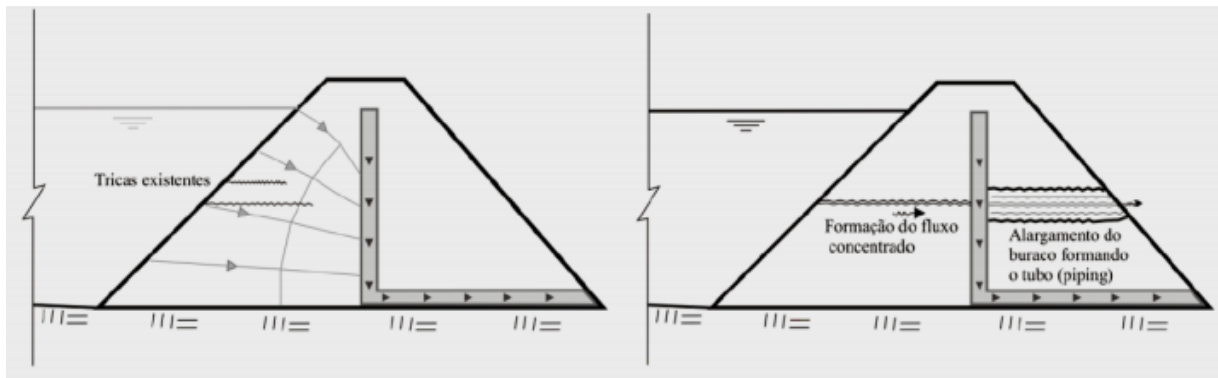
FIGURA 19- Mecanismo da formação de piping por erosão regressiva



Fonte: Perini (2009)

O piping pode ocorrer por erosão em torno de trincas existentes na barragem. Essas rachaduras ou fissuras permitem a formação de um fluxo concentrado, que tem origem direta no reservatório e vai até um ponto de saída, o qual passa a erodir o solo, causando o alargamento deste caminho de água, formando o tubo (FOSTER et al, 2000 apud PERINI, 2009). A Figura 20 demonstra este fenômeno.

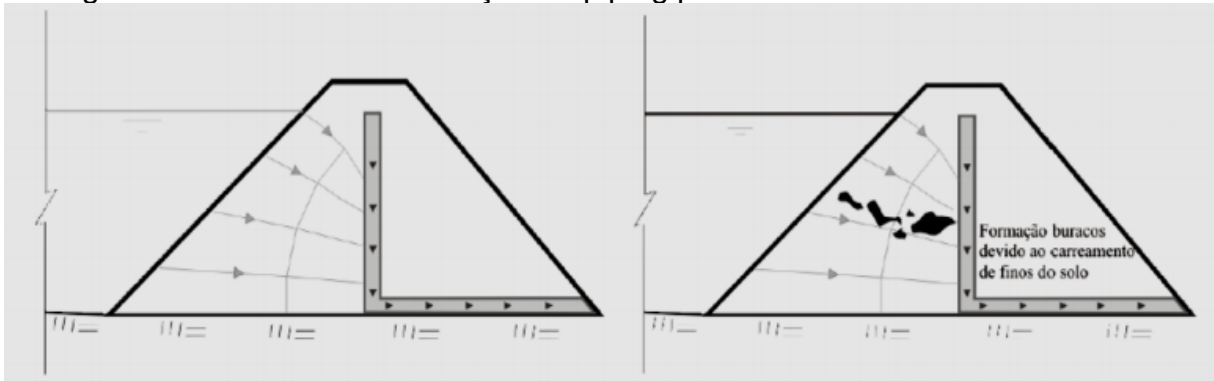
Figura 20- Processo de formação de piping por meio de alargamento das paredes das trincas



Fonte: Perini (2009)

O piping também pode ocorrer devido ao carreamento de finos. Este processo acontece geralmente quando os materiais utilizados são mal graduados, permitindo que solos finos escapem por uma matriz granular. Este carreamento de finos pode desestabilizar internamente o maciço de solo e permitir a formação do tubo (FOSTER et al, 2000 apud PERINI, 2009). A Figura 21 expõe o piping formado pelo carreamento de finos

Figura 21- Processo de formação de piping por meio de carreamento de finos



Fonte: Perini (2009)

O movimento de água através do solo é realizado pelas forças de gravidade e de capilaridade, esse movimento através dos grandes poros, em solo saturado, é realizado fundamentalmente pela ação da gravidade, enquanto em um solo não saturado ocorre principalmente pela capilaridade (BERTONI; LOMBARDI NETO, 1993).

A remoção continuada de material desenvolve discretos canais ou tubos na estrutura. Quando estes canais se conectam com a água livre do reservatório, podem se desenvolver grande fluxos ao longo destes tubos com possível rompimento da barragem. Em barragens de rejeito, as áreas pouco compactas e com falhas são as regiões de maior probabilidade de ocorrência de piping (KLOHN, 1979). A FIGURA 22 exhibe os fatores que influenciam na probabilidade de falha por piping.

Figura 22- Fatores que influenciam na probabilidade de falha por piping

Fator	Fatores que influenciam na probabilidade de falha por piping				
	Muito mais provável	Mais provável	Neutro	Menos provável	Muito menos provável
Tipo de fundação	Fundação de solo	-	Rocha com fraturas preenchidas de argila ou rocha erodível	Rocha de melhor qualidade	Rocha não erodível e com fraturas fechadas
Geologia do solo de fundação	Solos dispersivos; cinzas vulcânicas	Solos residuais	Solos aluvionares: eólicos, coluvionares, lacustres ou marinhos.	Solos aluviais	Solos glaciais
Geologia da rocha de fundação	Calcário; dolomito; gipsita; basalto.	Tufo; riolito; mármore; quartzito.	-	Arenito; folhelho; siltito; argilito; lamito	Conglomerado; andesito; gabro; granito; gnaisse; xisto; ardósia; filito
Aspecto da água infiltrada	Vazamento lamacento e com aumentos súbitos	Vazamento aumentando gradualmente, limpo, sink-holes, areia movediça	Vazamento estável, limpo, ou não observado	Pequeno vazamento	Nenhum vazamento ou muito pequeno.
Poropressão	Aumento repentino nas pressões	Aumento gradual das pressões na fundação	Altas pressões na fundação	-	Baixa poropressão na fundação

Fonte: FOSTER et al, (2000) apud VALERIUS (2014)

3.5.5- Falha por liquefação

A liquefação é um fenômeno que ocorre em solos granulares saturados quando submetidos a carregamentos suficientemente rápidos para produzir um grande acréscimo das poropressões com a consequente redução das tensões efetivas e da resistência ao cisalhamento (FREIRE NETO, 2009).

A falha por liquefação ocorre devido à falta de drenagem e causa a redução da resistência ao cisalhamento. Essas falhas podem ser desencadeadas por abalos sísmicos ou outras vibrações, dispersão da fundação, ou alguma forma de colapso do talude. Estes episódios ocorrem instantaneamente sem sinais prévios. (SMITH,1979).

Diferentes formas de carregamento podem ser responsáveis por causar liquefação, este carregamento determina se a falha será estática ou dinâmica. A liquefação estática tem sua origem em carregamentos estáticos são exemplos deste

carregamento sobrecarga, aumento repentino da superfície freática e elevada precipitação pluviométrica. As causas da liquefação dinâmica são eventos dinâmicos, como terremotos e tráfego de equipamentos pesados (PENNA, 2010).

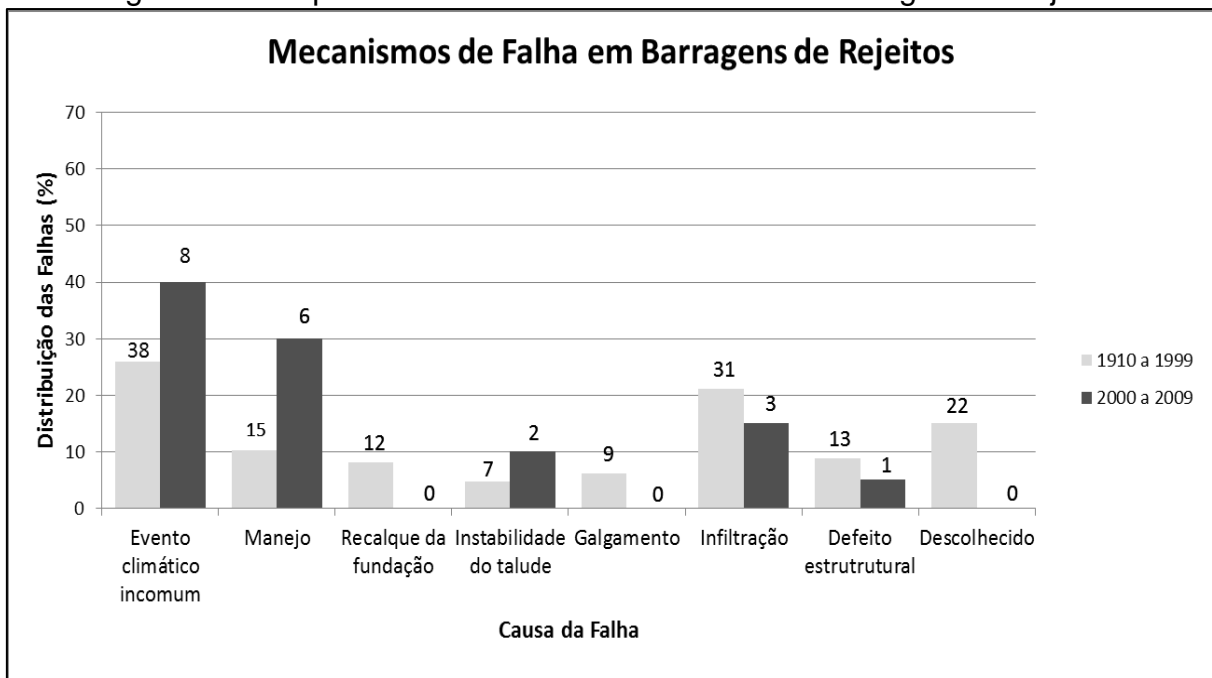
Apesar das diferenças existentes no tipo de carregamento, os fundamentos básicos que envolvem a liquefação estática e a liquefação dinâmica são muito semelhantes (FREIRE NETO, 2009).

Os métodos de deposição hidráulica utilizados na construção de barragens de rejeito resultam em alto índice de vazios e na condição saturada, o que os torna susceptíveis à liquefação. Dentre os métodos utilizados para alteamento, o método de alteamento a montante é particularmente mais susceptível a esta falha (FREIRE NETO, 2009).

3.5.6- Análise dos mecanismos de falhas

Os diferentes mecanismos de falhas foram estudados, em âmbito mundial, por Azam (2010), que analisou 147 casos anteriores ao ano de 2000 e 20 eventos ocorridos após essa data. A frequência de ocorrência das falhas pode ser vista na Figura 23.

Figura 23- Frequência da ocorrência de falhas nas barragens de rejeito



Fonte: traduzido e adaptado de Azam (2010)

A comparação entre os grupos estudados demonstrou que as falhas relacionadas a chuvas intensas aumentaram de 25% para 40%. Segundo o autor, esse resultado pode ser atribuído às mudanças climáticas, principalmente para minas próximas ao mar ou em regiões equatoriais que tem recebido altas precipitações.

As falhas relacionadas à gestão inadequada também apresentaram grande aumento de 10 para 30%, Azam (2010) afirma que este aumento é resultado da exploração mineral sem a garantia da manutenção de um padrão adequado de engenharia.

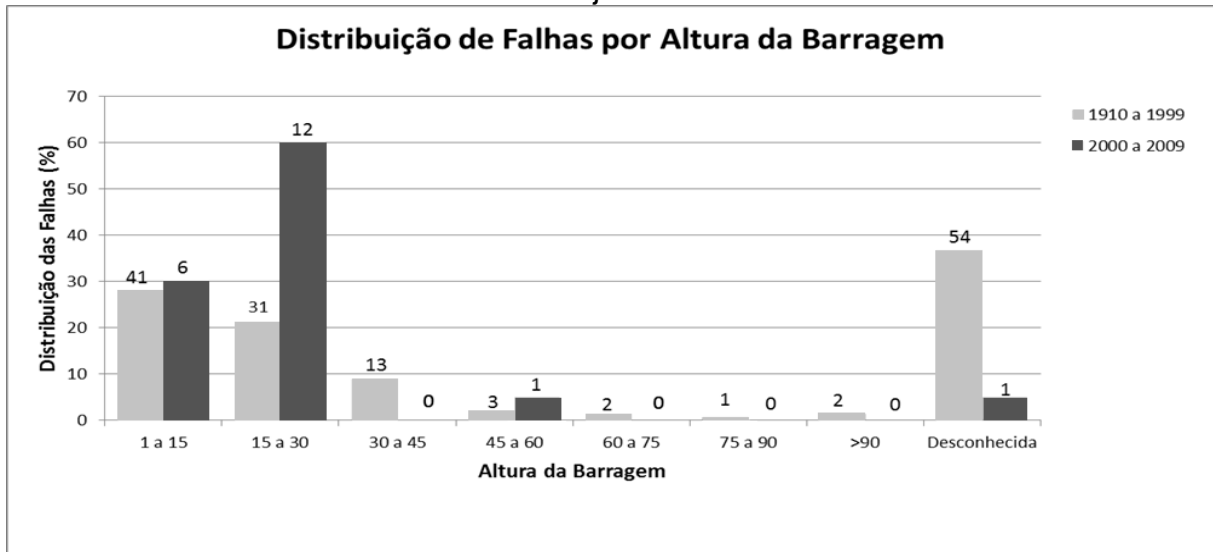
Estima-se que cerca da metade das falhas de barragens que ocorrem poderiam ser evitadas com o planejamento, construção e gestão adequados das barragens de rejeito durante seu funcionamento (RICO, 2007).

Azam (2010) realizou também um trabalho em que estabelece as falhas ocorridas em relação à altura das barragens, este estudo verificou que a maioria das falhas ocorrem em barragens de até 30 metros.

Segundo Azam (2010) estas falhas podem ser atribuídas à combinação de alteamentos rápidos e pobre monitoramento. O monitoramento e instrumentação utilizados para as barragens pequenas e medias são tratados com menos zelo se comparados as grandes barragens.

Azam (2010) resalta ainda que outra causa possível para este resultado esta relacionada aos materiais não consolidados devido a alta poropressão. Barragens relativamente baixas (possivelmente em seus estágios iniciais de desenvolvimento) necessitam de um período de tempo para desenvolver resistência adequada ao cisalhamento, capaz de suportar os esforços solicitantes. Este é um caso específico para as barragens construídas com alteamento a montante. A Figura 24 mostra os dados deste estudo.

Figura 24- Relação entre a distribuição de falhas e a altura das barragens de rejeito



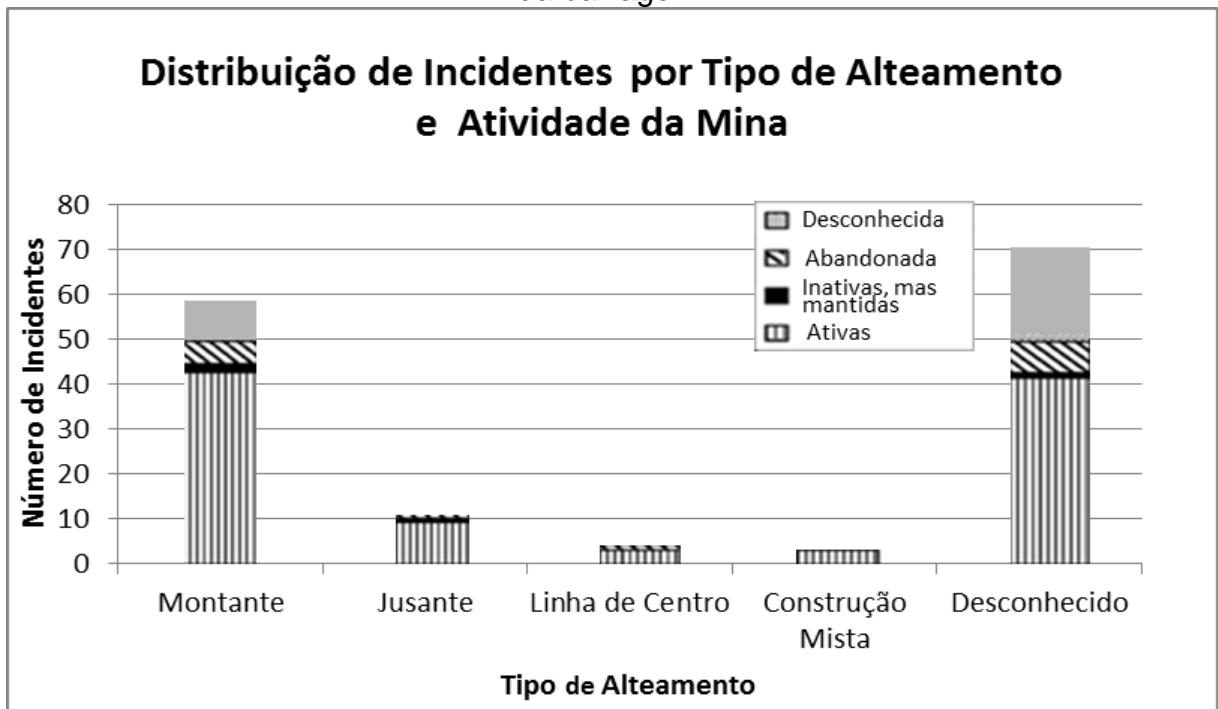
Fonte: traduzido e adaptado de Azam (2010).

Em uma pesquisa realizada por Rico (2007), que utilizou dados de 147 casos de falhas de barragens, observou-se que 83% das falhas ocorreram em barragens que estavam ativas, 15% em barragens abandonadas e apenas em 2% em minas inativas, mas mantidas.

Em barragens ativas as causas mais frequentes de falhas estão relacionadas a desastres naturais (liquefação sísmica ou chuvas intensas) seguidas pelo manejo operacional e falhas estruturais. As falhas relacionadas a manejos operacionais e instabilidade do talude foram observadas apenas em barragens ativas (RICO, 2007).

Em relação aos métodos de alteamento utilizados, 74% das falhas estão relacionadas ao método de montante. No entanto, se analisadas apenas as barragens europeias existe uma porcentagem similar de falhas nos métodos de montante e jusante, 47 e 40%, respectivamente. Essa semelhança pode ser explicada pelo fato do método de alteamento a jusante ser mais utilizado na Europa do que em qualquer outro lugar do mundo. Além disso, não ocorrem incidentes relacionados à liquefação sísmica, que afeta especialmente as barragens alteadas a montante (RICO, 2007). A Figura 25 relaciona números de incidentes com os métodos de alteamento e com a situação da barragem.

Figura 25- Incidentes relacionando os métodos de alteamento com a situação da barragem



Fonte: traduzido e adaptado de Rico (2007).

Rico (2007) conclui que atualmente as pesquisas relacionadas às falhas e rompimento de barragens de rejeito são limitadas pela escassez de informações relacionadas aos incidentes. Outro fator limitante é o fato de que nem todos os incidentes ocorridos são relatados, principalmente em países subdesenvolvidos cujas legislações ambientais não são rigorosas. De forma geral, informações como altura e capacidade de barragens de rejeito são difíceis de serem obtidas mesmo em barragens que não se romperam.

3.6- Acidentes com barragens de rejeito no Brasil

Por um longo período, a construção de barragens de rejeitos no Brasil foi realizada com o uso de técnicas empíricas, as quais foram desenvolvidas a partir da década de 30, sem a utilização de conhecimentos da engenharia de barragens. Para a construção dessas estruturas, empregavam-se equipamentos de lavra, com orientação técnica dos engenheiros de minas, e o material estéril era lançado transversalmente aos vales para a construção dos aterros (PIMENTA DE ÁVILA, 2011).

Apesar de rudimentares, estas barragens não ocasionavam acidentes graves, uma vez que se resumiam a estruturas de alturas baixas e de pequenos volumes de represamento de rejeitos. Entretanto, devido ao aumento na escala de operações e o progresso das atividades de mineração, houve aumento significativo no volume de rejeitos armazenados e problemas relacionados à estrutura das barragens passaram a oferecer riscos de falhas e rupturas significativas começaram a ocorrer (PIMENTA DE ÁVILA, 2011).

A expansão da extração mineral que ocorreu nos últimos anos, impulsionada pela valorização das commodities, pode estar relacionadas com o aumento do risco de rupturas de barragens, uma vez que esta expansão resulta em no crescimento dos volumes de rejeitos produzidos; no aumento da altura das barragens e aumento do volume do reservatório, esses fatores resultam em um maior risco de ruptura e em maior potencial de dano.

Os principais incidentes com barragens de rejeitos no Brasil ocorreram em Itabirito, no ano de 1986; em Macacos, no ano de 2001; em Miraí, nos anos de 2006 e 2007; em Itabirito, 2014 e mais recentemente em Mariana 2015, sendo este o incidente de maior impacto sócio ambiental da história brasileira.

3.6.1- Acidente com a barragem de Fernandinho em Itabirito em 1986

A barragem de Fernandinho, que se rompeu em 1986, possuía como finalidade o armazenamento de rejeitos de minério de ferro e possuía altura de 40 metros. Seu rompimento ocorreu de forma repentina e a falha foi atribuída à falta de estabilidade do talude de jusante, pois este era muito íngreme e havia elevada poropressão.

Durante o episódio, um caminhão que estava sobre a crista da barragem ficou preso à lama e no momento em que outros dois caminhões se deslocaram para auxiliar na remoção, iniciou-se um deslizamento. A partir de então, movimentos rotacionais do talude permitiram o galgamento e o rejeito liquefeito desceu pelos vales varrendo a vegetação. Neste acidente houve sete vítimas fatais (ICOLD, 2001).

3.6.2- Acidente com a barragem de Macacos em 2001

Em 2001 houve o incidente com a barragem da empresa Mineração Rio Verde, localizada em São Sebastião das Águas Claras, distrito de Nova Lima, popularmente conhecido como Macacos.

Esta estrutura fazia a contenção de rejeito de minério de ferro e rompeu devido ao deslizamento do talude. Inicialmente, a disposição deste material ocupava uma antiga cava da mineração, que posteriormente foi alteada por mais de 20 metros (BERTACHINI, 2001)

Esta ruptura causou a morte de cinco pessoas e devastou 79 hectares de Mata Atlântica. Além disso, cerca de 600 mil m³ de rejeitos atingiram o córrego Taquaras e 30 hectares de uma área de proteção ambiental na região.

Segundo Espósito (2010), a dimensão do impacto ambiental resultante deste acontecimento auxiliou o desenvolvimento de políticas ambientais relacionadas ao setor mineral brasileiro, especialmente em relação às normas regulamentadoras de barragens.

A partir deste momento iniciou-se a discussão de uma legislação específica para a gestão de segurança de barragens. Esses debates deram origem à Deliberação Normativa do Conselho Estadual de Políticas Ambientais (Copam): DN 62, de 2002, posteriormente alterada pela DN, 87, de 2005, que dispõe sobre critérios de classificação de barragens de contenção de rejeitos, de resíduos e de reservatório de água em empreendimentos industriais e de mineração no Estado de Minas Gerais (ESPÓSITO, 2010).

3.6.3- Acidente com a barragem de São Francisco em Miráí nos anos de 2006 e 2007

Os incidentes em Miráí, na barragem de São Francisco, sob operação da Mineradora Rio Pomba. Esta barragem possuía 34 metros de altura, 90 metros de comprimento, capacidade de 3,8 milhões de metros cúbicos e largura de crista de 9 metros e foi construída com aterro compactado de solo argilo arenoso, com a finalidade de represar rejeitos oriundos da lavagem da bauxita. Desta forma tratava-se de uma barragem de terra para armazenamento de rejeitos.

Segundo a FEAM (2006), na primeira falha, ocorrida em março de 2006, houve vazamento de rejeito pelo vertedouro da barragem, devido ao deslocamento

das placas. Houve a abertura de uma fenda de 5 centímetros de largura e 96 centímetros de comprimento, entre as placas do vertedouro, proporcionando o vazamento de 135.000 m³ de lama no córrego Bom Jardim.

Esta falha resultou em impactos ambientais de grandes proporções nas áreas de jusante, como: Inundação de áreas agriculturáveis, aumento de turbidez das águas do córrego Bom Jardim, Ribeirão Fubá e Rio Muriáe, eliminação de ecossistemas ribeirinhos, Interferência na biota aquática, mortandade de peixes, interferência no consumo de água das cidades de jusante como: Lage de Muriáe e distritos de Retiro e Comendador Venâncio, em Itaperuna, no Estado do Rio de Janeiro (PIMENTA DE ÁVILA 2011 apud Rocha 2001).

Após este primeiro incidente, a Mineradora Rio Pomba, atualmente denominada Bauminas Mineração, e o ministério publico estadual acordaram o estabelecimento de medidas corretivas. Entretanto, em um intervalo inferior a um ano ocorreu um segundo acidente.

Em Janeiro de 2007, ocorreu o segundo acidente. A causa provável deste rompimento foi o desnível da crista da barragem, junto à ombreira direita, na qual havia uma estrada de acesso ao local. O vertedouro de emergência nesta ombreira não possuía um revestimento adequado à passagem do fluxo de água e a parede lateral de terra, próxima à estrada, não resistiu às precipitações (FEAM, 2007).

Segundo a empresa, o rompimento da barragem São Francisco foi causado pelos elevados índices de chuva que caíram na região nos dias anteriores ao acidente. Como consequência deste segundo acidente houve turbidez da água e alagamento das cidades banhadas pelo rio Muriáe nos estados de Minas Gerais e Rio de Janeiro. Neste incidente, mais de 6 mil moradores das cidades de Miraí e Patrocínio do Muriáe ficaram desalojados e o município fluminense de Laje do Muriáe também foi significativamente atingido.

A Prefeitura de Laje do Muriáe decretou “estado de emergência”, devido à chegada da mancha de sedimentos na área urbana. Outras consequências deste incidente foram: A escassez de água potável, mortandade de peixes e a deposição de argila no leito dos rios que contribuiu para intensificar o processo de assoreamento dos cursos d’água, favorecendo a ocorrência de inundações (ROCHA, 2010).

3.6.4- Acidente com a barragem de Herculano em Itabirito em 2014

Em 2014, o município de Itabirito vivenciou novamente um incidente relacionado à falha em estrutura de contenção de rejeitos. O Incidente ocorreu em uma barragem da empresa Herculano Mineração, que explorava a Mina do Retiro do Sapecado.

O minério de ferro encontrado nesta jazida é Itabirítico, com grande percentual de hematitas e magnetitas. O teor médio de ferro retirado é de 40 a 58% e 30% de sílica, gerando volumes extremamente elevados de rejeitos (LAJE, 2010).

A mineradora em questão utilizava quatro barramentos denominados B1, B2, B3 e B4 para permitir a extração mineral. A barragem B1, que realizava a contenção de rejeitos de minério de ferro, apresentava altura de 61.50 metros segundo o DNPM e foi construída antes de 1996 com alteamento a montante e espigotamento a partir da crista.

As Barragens B2 e B3 foram construídas em um curso d'água do córrego do Silva com a finalidade de acumular recurso hídrico e eventual contenção de finos provenientes do barramento B1. Em 2010 o barramento B1 atingiu a sua capacidade máxima e a empresa iniciou a construção da barragem B4. Entretanto, no ano de 2014, a barragem B4 apresentou problemas e por isso, a mineradora voltou a depositar os rejeitos na barragem B1. Com isso em setembro de 2014 parte da barragem B1 se rompeu.

O lançamento do rejeito na barragem B1 estava ocorrendo em baías de decantação construídas dentro do lago de deposição de rejeitos da barragem. Quando ocorreu a ruptura, havia quatro baías e uma quinta estava sendo construída.

O deslizamento resultou no óbito de três trabalhadores que estavam próximos ao local e causou assoreamento do córrego a montante e jusante da B3, causando mortandade de peixes e interrupção do abastecimento de água.

Após o rompimento da barragem B1, o barramento B2 recebeu a maior parte do fluxo de rejeitos e foi completamente danificada, enquanto a barragem B3 recebeu considerável volume de material foi parcialmente danificada e galgada (GEMG, 2014).

Em relação à causa do rompimento, o Instituto de Criminalística da Polícia Civil apresentou um laudo técnico, concluindo que o rompimento da barragem B1

ocorreu devido à saturação de água. A perícia constatou deficiência na drenagem da estrutura, o que resultou na movimentação no nível freático em seu interior e na consequente ruptura.

A polícia civil também informou que funcionários da empresa alertaram sobre a falha na drenagem da barragem, porém a mineradora não adotou nenhuma providência, assumindo o risco do resultado e caracterizando o crime doloso (VILELA, 2015).

3.6.5- Acidente com a barragem de Fundão em Mariana em 2015

Dentre as principais falhas em barragens de rejeito ocorridas no Brasil, o incidente mais recente ocorreu em novembro de 2015, na Barragem de Fundão, operada pela Samarco Mineração S.A. e localizada no município de Mariana. Esta barragem armazenava rejeitos da extração do minério de ferro e possuía altura de 130 metros segundo o DNPM.

Após a ruptura, os rejeitos atingiram a barragem de Santarém a jusante de Fundão, causando galgamento, porém sem rompimento. A lama se direcionou a 55 quilômetros no rio Gualaxo do Norte até desaguar no rio do Carmo e percorreu 22 quilômetros até o rio Doce.

Foram liberados no meio ambiente 34 milhões de metros cúbicos de rejeitos e 16 milhões metros cúbicos restantes continuaram sendo carregados, aos poucos, para jusante e atingiram o mar. Este desastre resultou em 19 vítimas fatais, entre trabalhadores da empresa e moradores das comunidades afetadas e deixou 725 pessoas desalojadas. Este rompimento causou também a extinção do município de Bento Rodrigues, a destruição de áreas agrícolas e pastos; a interrupção da geração de energia elétrica pelas hidrelétricas atingidas (Candongá, Aimorés e Mascarenhas); a destruição de áreas de preservação permanente e vegetação nativa de Mata Atlântica. Outras consequências desta tragédia foram: A mortandade de biodiversidade aquática e fauna terrestre; o assoreamento de cursos d'água; a interrupção do abastecimento de água; a interrupção da pesca por tempo indeterminado; a interrupção do turismo; e alteração dos padrões de qualidade da água (Lopes, 2016).

Em fevereiro de 2016 a polícia civil concluiu o primeiro inquérito policial referente ao rompimento da Barragem de Fundão. Esse inquérito concluiu que a

causa do rompimento desta estrutura foi a liquefação, que inicialmente ocorreu junto aos rejeitos arenosos que suportavam os alteamentos realizados na região esquerda da barragem, local no qual foi realizado um recuo no eixo da barragem. A polícia civil considerou que diversos fatores influenciaram no processo de liquefação, tais como:

- Elevada saturação dos rejeitos arenosos depositados na barragem.
- Falhas no monitoramento contínuo do nível de água e das poropressões junto aos rejeitos arenosos depositados no interior da barragem e junto aos rejeitos constituintes dos diques de alteamento.
- Defeitos em diversos equipamentos de monitoramento
- Reduzido número de equipamentos instalados na barragem, com regiões descobertas dos alteamentos realizados.
- Nos últimos dois anos, houve uma taxa de alteamento de cerca de 20 metros de altura por ano. Esta taxa foi muito superior à recomendada na literatura técnica, que é de no máximo 10 metros de altura por ano.
- Assoreamento do dique 02, permitindo a infiltração de água de forma generalizada para a área abrangida pelos rejeitos arenosos, no lado direito da bacia de deposição de rejeitos.
- Deficiência junto ao sistema de drenagem interno da barragem.

O Ministério Público de Minas Gerais (MPMG) utilizou estudos de geomecânica e do Norwegian Geotechnical Institute para a elaboração de um relatório, que corroborou com o resultado obtido pela polícia civil, em que o rompimento da barragem teve origem no chamado “recuo”, na região próxima à “ombreira” esquerda. O rompimento ocorreu de forma abrupta, sem qualquer sinalização, e rapidamente se expandiu para todo o corpo da barragem.

Segundo o MPMG, o eixo da barragem foi recuado a partir da sua região central em direção à ombreira esquerda. A mudança no eixo e a criação do “recuo” resultaram em uma nova seção da barragem, que passou a ter como fundação rejeitos de menor resistência e menos permeáveis do que o esperado. Para que a ruptura ocorresse de forma abrupta, os rejeitos na fundação da barragem precisariam não apenas ser de baixa resistência e menos permeáveis, mas, principalmente, suscetíveis à liquefação estática.

Segundo o relatório, a ruptura da barragem de Fundão aconteceu devido à falta da drenagem adequada, em decorrência de pelo menos uma camada de baixa permeabilidade e baixa resistência em ao menos uma seção da barragem, contendo resíduos altamente heterogêneos na fundação. No dia da ruptura da barragem houve onze abalos sísmicos na região, porém o MPMG considerou que esses acontecimentos não influenciaram no rompimento da barragem, pois os eventos teriam magnitude desprezível (MPMG, 2016).

As mineradoras Vale, BHP Billiton e Samarco contrataram a auditoria internacional da Cleary Gottlieb Steen & Hamilton LLP para verificar as causas da ruptura da barragem de Fundão. Os resultados indicaram que a presença de lama no ponto de ruptura da barragem, no qual deveria haver somente areia, foi uma das causas do colapso da estrutura. Este estudo também reforça as causas citadas anteriormente como o recuo da ombreira esquerda, problemas de drenagem e a liquefação dos rejeitos arenosos.

Segundo o engenheiro geotécnico Norbert Morgenstern (2016), responsável pela auditoria, o rompimento foi o resultado de combinações de eventos e condições. Ocorreu um fluxo na ombreira esquerda devido ao fato do recuo ter sido construído sobre uma mistura de areia e lama e não apenas areia. Para este especialista, três pequenos abalos sísmicos, que foram registrados poucas horas antes do rompimento provavelmente aceleraram o processo de rompimento que estava bastante avançado, iniciando o fluxo de rejeitos (FREITAS, 2016).

Esta análise concluiu que várias alterações realizadas na barragem causaram a entrada de lama em áreas da ombreira esquerda da barragem. Também foram citados problemas nas galerias de drenagem e o descumprimento da largura necessária da praia, que tem por objetivo separar a areia da lama, e por vezes era inferior à necessária. Por fim, o estudo verificou que havia lama abaixo do maciço da barragem e à medida que a barragem foi alterada, iniciou-se um mecanismo de extrusão das lamas e da separação das areias (FREITAS, 2016).

3.7- Barragens de rejeito no Brasil e a Política Nacional de Segurança de Barragens

Atualmente, no Brasil existe um total de 662 barragens de rejeito cadastradas no Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM, 2014), este órgão é responsável por promover o planejamento, o fomento da exploração mineral e o aproveitamento dos recursos minerais, além de monitorar, controlar e fiscalizar as atividades de mineração em todo o território nacional (DNPM, 2014).

Segundo o cadastro do DNPM são consideradas barragens de mineração: barragens, barramentos, diques, reservatórios, cavas exauridas, localizados no interior da área concedida ou área de servidão, utilizados para fins de contenção, acumulação ou decantação de rejeito de mineração, descarga de sedimentos provenientes de atividades em mineração, com ou sem captação de água associada, compreendendo a estrutura do barramento e suas estruturas associadas (BRASIL, 2012).

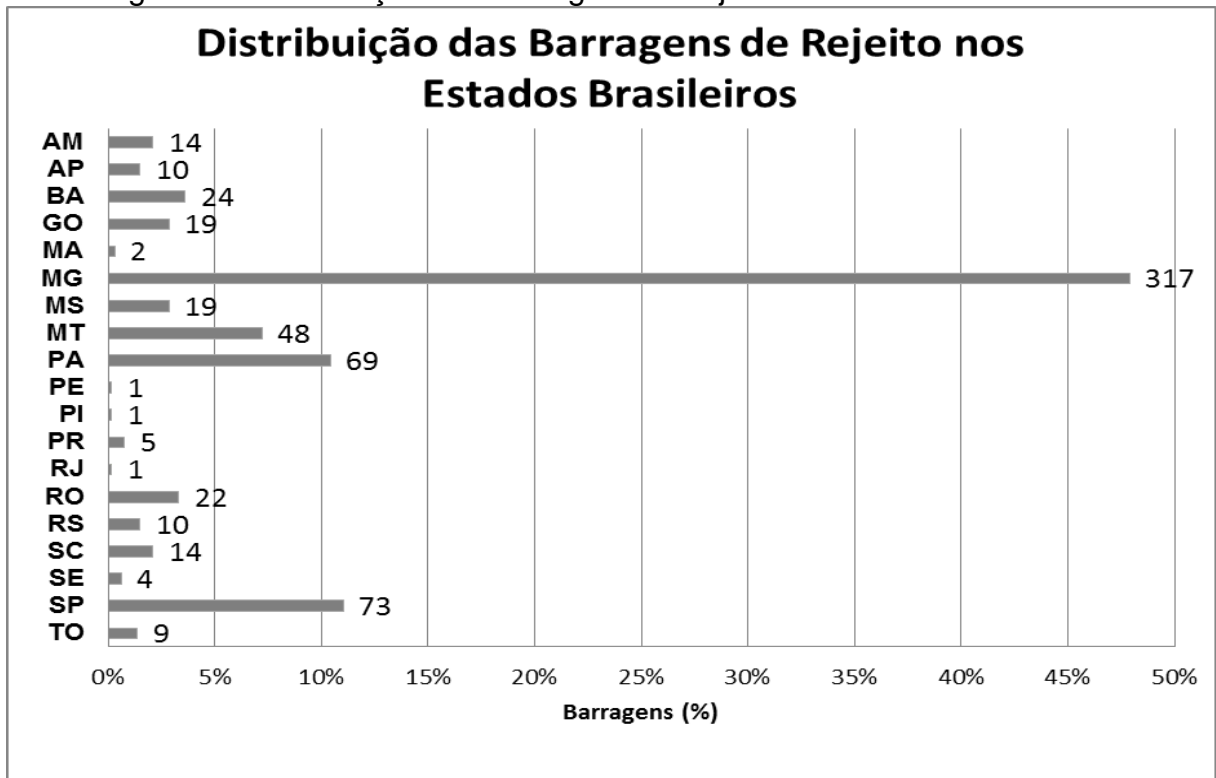
O cadastro nacional permite obter um panorama das barragens brasileiras e contém informações tais como: o nome do empreendedor, a altura do barramento absoluto, volume total do reservatório absoluto, substância principal, estado em que a barragem se localiza, município, risco associado, potencial de danos, entre outros (BRASIL, 2012).

No presente estudo, os dados deste cadastro foram transferidos para uma planilha no Excel e posteriormente foram elaborados gráficos e uma tabela. Desta forma, foi possível observar mais detalhadamente algumas das informações disponíveis sobre as barragens de rejeitos do Brasil.

A Figura 26 fornece informações sobre a distribuição de barragens de rejeitos por estados. Nesta figura é possível observar a alta concentração de barragens em Minas Gerais, estado no qual se localizam 317 das 662 barragens cadastradas.

Minas Gerais tem aproximadamente 48% do total de barragens. Demonstrando assim, a sua importância para o setor mineral brasileiro. Os estados de São Paulo e Pará são os seguintes em concentração de barragens. São Paulo possui 73 barragens representando aproximadamente 11% do total e o Pará possui 69 barramentos, cerca de 10.40% do total.

Figura 26- Distribuição das barragens de rejeito nos estados brasileiros

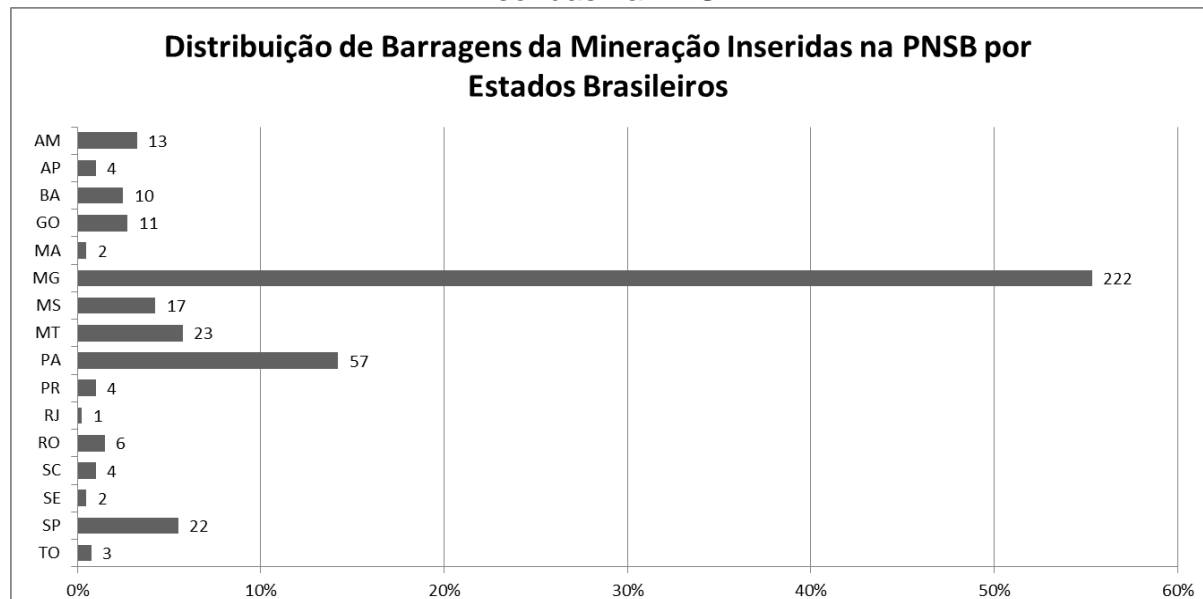


Fonte: gráfico construído pelo autor utilizando dados do cadastro nacional de barragens da mineração (DNPM, 2014).

A Figura 27 fornece informações sobre a distribuição por estado das barragens de rejeitos inseridas na Política nacional de Segurança das Barragens (PNSB). A análise dos dados do cadastro nacional demonstrou que 222 estão localizadas em Minas Gerais, valor que responde por 55% do total. Este estado é seguido pelo Pará, com 57 barragens, correspondendo a 14%, Mato Grosso, com 23 e São Paulo com 22 barragens ambos com aproximadamente 6% do total.

Embora, em números absolutos, São Paulo tenha um maior número de barragens que o Pará, em relação à PNSB sua representatividade é menor, o que indica maior presença de barragens de baixo volume, menor altura e menores riscos de dano associado no estado de São Paulo, ficando estas barragens excluídas da PNSB.

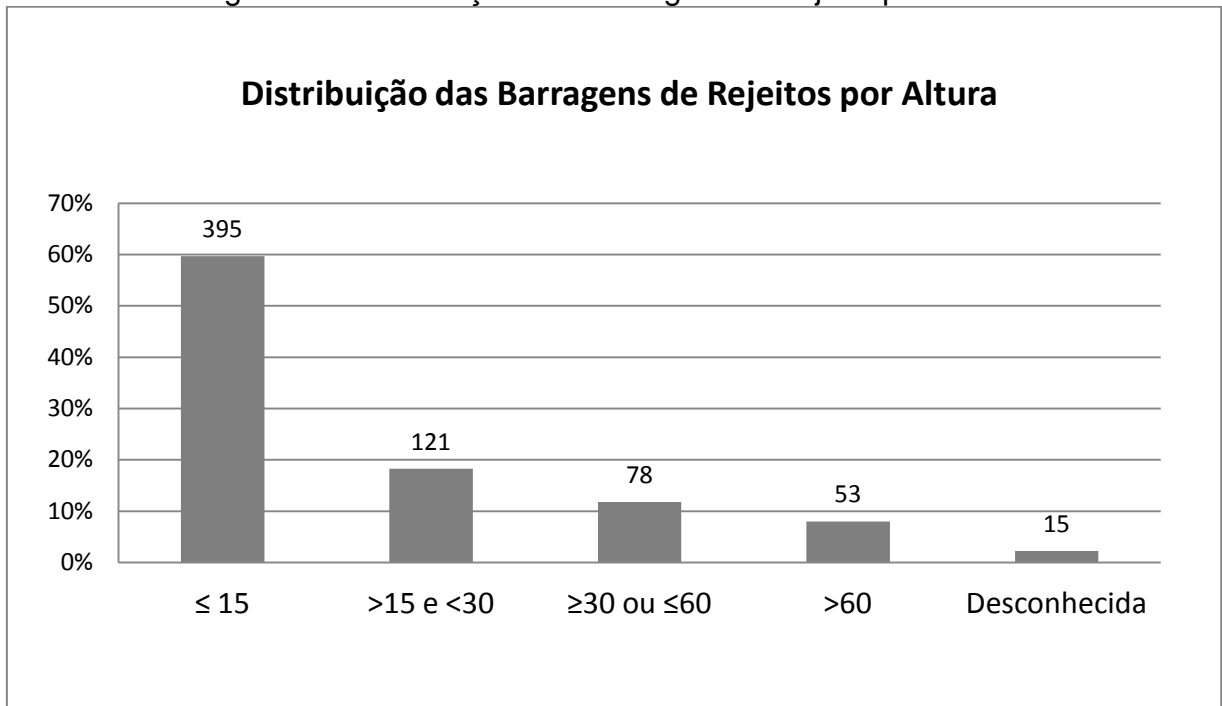
Figura 27- Distribuição das barragens de rejeito nos estados brasileiros inseridas na PNSB



Fonte: gráfico construído pelo autor utilizando dados do cadastro nacional de barragens da mineração (DNPM, 2014).

A Figura 28 apresenta a distribuição das barragens cadastradas de acordo com sua respectiva altura. Cerca de 60% das barragens apresentam altura de até 15 metros e 78% das barragens apresentam altura de até 30 metros. Conforme visto anteriormente está é a faixa de altura que ocorre a maior parte das falhas em barragens de rejeitos. O restante do perfil, em relação à altura das barragens brasileiras, é composto por 12% de barragens entre 30 e 60 metros e 8% acima de 60 metros. Em 2% das barragens cadastradas este dado não estava disponível.

Figura 28- Distribuição das barragens de rejeito por altura



Fonte: gráfico construído pelo autor utilizando dados do cadastro nacional de barragens da mineração (DNPM, 2014).

Em relação à principal substância armazenada nestas estruturas, os dados fornecidos pelo DNPM (2014) são incompletos e em 257 das barragens cadastradas não está disponível a informação da substância principal. A análise do presente estudo verificou que a principal substância informada é o rejeito de minério de ferro, em 141 barragens, seguido pelo rejeito da exploração do ouro (42 barragens) e areia em 33 barragens. Estes dados podem ser observados na Tabela 2.

Tabela 2- Tipo do rejeito e seu respectivo número de barragens no cadastro nacional de barragens da mineração.

SUBSTÂNCIA/REJEITO	BARRAGENS
FERRO/MINÉRIO DE FERRO	141
MINÉRIO DE OURO	43
AREIA	33
AREIA DE FUNDIÇÃO	25
BAUXITA	17
ESTANHO	14
CAULIM, MINÉRIO DE NÍQUEL	12
MANGANÊS	10
CARVÃO/CARVÃO MINERAL; FOSFATO	8
APATITA; CASSITERITA	6
ARGILA; COBRE; GRAFITA; GRANITO P/ BRITA	5
ALUMÍNIO; CALCÁRIO; NIÓBIO;	4
DOLOMITO; MINÉRIO DE ESTANHO; MINÉRIO e ZINCO/ZINCO;	3
TURFA	
CALCÁRIO DOLOMÍTICO; CASCALHO; FELDSPATO; FLUORITA;	2
SILVINHA; TANTALITA	
ALEXANDRITA; AREIA INDUSTRIAL; AREIA QUARTZOSA; FERRO	1
MANGANÊS; GNAISSE INDUSTRIAL; GRANITO; MÁRMORES;	
MICAXISTO; MINÉRIO DE COBRE; OCRE; QUARTZITO; QUARTZO;	
SAIBREIRA; TOPÁZIO IMPERIAL	
DESCONHECIDOS	257
TOTAL	662

Fonte: tabela construída pelo autor utilizando dados do cadastro nacional de barragens da mineração (DNPM, 2014).

O número elevado de barragens que contém resíduos da mineração de minério de ferro reflete a importância das reservas deste mineral para o país. Dentre as atividades da mineração nacional, a mineração do minério de ferro é a mais relevante, pois grandes volumes de recursos financeiros estão envolvidos nas diversas fases, desde a prospecção até a comercialização dos produtos do minério (DNPM ANUÁRIO 2006).

O comércio exterior do minério de ferro gera divisas importantes e fomenta a logística de transporte rodoviário, ferroviário e marítimo. Como consequência da atividade mineira, ocorre o desenvolvimento das comunidades das regiões adjacente às minas e o favorecimento ao desenvolvimento de outras atividades ao longo das vias de escoamento do minério.

3.7.1- Política Nacional de Segurança das Barragens

A lei 12.334, de 20 de setembro de 2010, estabelece a Política Nacional de Segurança das Barragens. Esta política se aplica as barragens que se enquadram em pelo menos uma das seguintes categorias: Altura do maciço maior ou igual a 15 metros; Volume total superior ou igual a 3.000.000 m³; resíduos perigosos e dano potencial associado médio ou alto. Dentre as 662 barragens de rejeitos cadastradas no DNPM, 401 barragens fazem parte da Política Nacional de Segurança das Barragens (BRASIL, 2012).

A Política de Segurança das Barragens considera como fundamental a necessidade de a segurança de uma barragem seja considerada em todas as etapas do planejamento até a desativação e usos futuros.

De acordo com esta lei, o empreendedor é o responsável legal pela segurança da barragem, cabendo-lhe o desenvolvimento de ações para garanti-la e obriga-se a prover os recursos necessários à garantia da segurança da barragem; providenciar, para novos empreendimentos a elaboração do projeto final como construído.

Além destas questões, também são funções do empreendedor organizar e manter em bom estado de conservação as informações e a documentação referentes ao projeto, à construção, à operação, à manutenção, à segurança e, quando couber, à desativação da barragem e informar ao respectivo órgão fiscalizador qualquer alteração que possa acarretar redução da capacidade de descarga da barragem ou que possa comprometer a sua segurança.

Entre as diversas responsabilidades das empresas também estão: manter serviço especializado em segurança de barragem; permitir o acesso irrestrito do órgão fiscalizador ao local da barragem e à sua documentação de segurança; providenciar a elaboração e a atualização do Plano de Segurança da Barragem, observadas as recomendações das inspeções e as revisões periódicas de

segurança; realizar as inspeções de segurança; elaborar as revisões periódicas de segurança; elaborar o Programa de Ação de Emergência, quando exigido; manter registros dos níveis dos reservatórios e das características químicas e físicas do fluido armazenado e manter registros dos níveis de contaminação do solo e do lençol freático. Por fim, o empreendedor é responsável pelo cadastro e atualização das informações relativas à barragem no Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (BRASIL, 2012).

3.7.2- Critérios gerais para a classificação das barragens

No território nacional o Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH) por meio da resolução 143/2012 define os critérios gerais para a classificação de barragens. Nesta resolução estão os critérios para a classificação quanto à categoria de risco e dano potencial associado.

3.7.2.1- Classificação em relação à categoria de risco

Em relação à categoria de risco, as barragens são classificadas considerando os aspectos que possam influenciar na possibilidade de ocorrência de acidente. São considerados: características técnicas, estado de conservação e plano de segurança da barragem.

São características técnicas: altura do barramento; comprimento do coroamento da barragem; tipo de barragem quanto ao material de construção; tipo de fundação da barragem; idade da barragem e tempo de recorrência da vazão de projeto do vertedouro. A Figura 29 mostra a classificação quanto as características técnicas.

Figura29- Quadro de classificação quanto à categoria de risco (resíduos e rejeitos) características técnicas (CT)

Altura (a)	Comprimento (b)	Vazão de Projeto (c)
Altura \leq 15m (0)	Comprimento \leq 50m (0)	CMP (Cheia Máxima Provável) ou Decamilenar (0)
15m < Altura < 30m (1)	50m < Comprimento < 200m (1)	Milenar (2)
30m \leq Altura \leq 60m (4)	200 \leq Comprimento \leq 600m (2)	TR = 500 anos (5)
Altura > 60m (7)	Comprimento > 600m (3)	TR Inferior a 500 anos ou Desconhecida/ Estudo não confiável (10)
CT = \sum (a até c)		

Fonte: Resolução CNRH Nº 143 (2012)

O estado de conservação da barragem se refere aos seguintes itens: confiabilidade das estruturas extravasoras; confiabilidade das estruturas de captação; eclusa; percolação; deformações e recalques; deterioração dos taludes. A Figura 30 exibe a classificação quanto ao estado de conservação da barragem.

Figura 30- Quadro de classificação quanto à categoria de risco (resíduos e rejeitos) estado de conservação (EC)

Confiabilidade das Estruturas Extravasoras (d)	Percolação (e)	Deformações e Recalques (f)	Deterioração dos Taludes / Paramentos (g)
Estruturas civis bem mantidas e em operação normal /barragem sem necessidade de estruturas extravasoras (0)	Percolação totalmente controlada pelo sistema de drenagem (0)	Não existem deformações e recalques com potencial de comprometimento da segurança da estrutura (0)	Não existe deterioração de taludes e paramentos (0)
Estruturas com problemas identificados e medidas corretivas em implantação (3)	Umidade ou surgência nas áreas de jusante, paramentos, taludes e ombreiras estáveis e monitorados (3)	Existência de trincas e abatimentos com medidas corretivas em implantação (2)	Falhas na proteção dos taludes e paramentos, presença de vegetação arbustiva (2)
Estruturas com problemas identificados e sem implantação das medidas corretivas necessárias (6)	Umidade ou surgência nas áreas de jusante, paramentos, taludes ou ombreiras sem implantação das medidas corretivas necessárias (6)	Existência de trincas e abatimentos sem implantação das medidas corretivas necessárias (6)	Erosões superficiais, ferragem exposta, presença de vegetação arbórea, sem implantação das medidas corretivas necessárias. (6)
Estruturas com problemas identificados, com redução de capacidade vertente e sem medidas corretivas (10)	Surgência nas áreas de jusante com carreamento de material ou com vazão crescente ou infiltração do material contido, com potencial de comprometimento da segurança da estrutura (10)	Existência de trincas, abatimentos ou escorregamentos, com potencial de comprometimento da segurança da estrutura (10)	Depressões acentuadas nos taludes, escorregamentos, sulcos profundos de erosão, com potencial de comprometimento da segurança da estrutura. (10)
EC = \sum (d até g)			

Fonte: Resolução CNRH N° 143 (2012).

Em relação ao plano de segurança da barragem, são considerados existência de documentação de projeto; estrutura organizacional e qualificação dos profissionais da equipe técnica de segurança da barragem; procedimentos de inspeções de segurança e de monitoramento; regra operacional dos dispositivos de descarga da barragem; e relatórios de inspeção de segurança com análise e interpretação. A Figura 31 expõe a classificação quanto à categoria de risco da barragem

Figura 31- Quadro de classificação quanto à categoria de risco (resíduos e rejeitos) plano de segurança da barragem (PS)

Documentação de Projeto (h)	Estrutura Organizacional e Qualificação dos Profissionais na Equipe de Segurança da Barragem (i)	Manuais de Procedimentos para Inspeções de Segurança e Monitoramento (j)	Plano de Ação Emergencial - PAE (quando exigido pelo órgão fiscalizador) (k)	Relatórios de inspeção e monitoramento da instrumentação e de Análise de Segurança (l)
Projeto executivo e "como construído" (0)	Possui unidade administrativa com profissional técnico qualificado responsável pela segurança da barragem (0)	Possui manuais de procedimentos para inspeção, monitoramento e operação (0)	Possui PAE (0)	Emite regularmente relatórios de inspeção e monitoramento com base na instrumentação e de Análise de Segurança (0)
Projeto executivo ou "como construído" (2)	Possui profissional técnico qualificado (próprio ou contratado) responsável pela segurança da barragem (1)	Possui apenas manual de procedimentos de monitoramento (2)	Não possui PAE (não é exigido pelo órgão fiscalizador) (2)	Emite regularmente apenas relatórios de Análise de Segurança (2)
Projeto básico (5)	Possui unidade administrativa sem profissional técnico qualificado responsável pela segurança da barragem (3)	Possui apenas manual de procedimentos de inspeção (4)	PAE em elaboração (4)	Emite regularmente apenas relatórios de inspeção e monitoramento (4)
Projeto conceitual (8)	Não possui unidade administrativa e responsável técnico qualificado pela segurança da barragem (6)	Não possui manuais ou procedimentos formais para monitoramento e inspeções (8)	Não possui PAE (quando for exigido pelo órgão fiscalizador) (8)	Emite regularmente apenas relatórios de inspeção visual (6)
Não há documentação de projeto (10)	-	-	-	Não emite regularmente relatórios de inspeção e monitoramento e de Análise de Segurança (8)

$$PS = \sum (h \text{ até } l)$$

Fonte: Resolução CNRH Nº 143 (2012)

A classificação é realizada fazendo o somatório da pontuação total (CRI). Composto por Característica Técnica (CT), estado de conservação (EC) plano de segurança da barragem (PS). E com auxílio do quadro disponível na Figura 32, a barragem é classificada por categoria de risco em: Alto, médio ou baixo.

Figura 32- Quadro para classificação de barragens para disposição de resíduos e rejeitos

L1 - CATEGORIA DE RISCO:		Pontos
1	Características Técnicas (CT)	
2	Estado de Conservação (EC)	
3	Plano de Segurança de Barragens (PS)	
PONTUAÇÃO TOTAL (CRI) = CT + EC + PS		0
	CATEGORIA DE RISCO	CRI
Faixas de Classificação	ALTO	> = 60 ou EC*=10 (*)
	MÉDIO	35 a 60
	BAIXO	< = 35
(*) Pontuação (10) em qualquer coluna de Estado de Conservação (EC) implica automaticamente CATEGORIA DE RISCO ALTA e necessidade de providencias imediatas pelo responsável da barragem.		

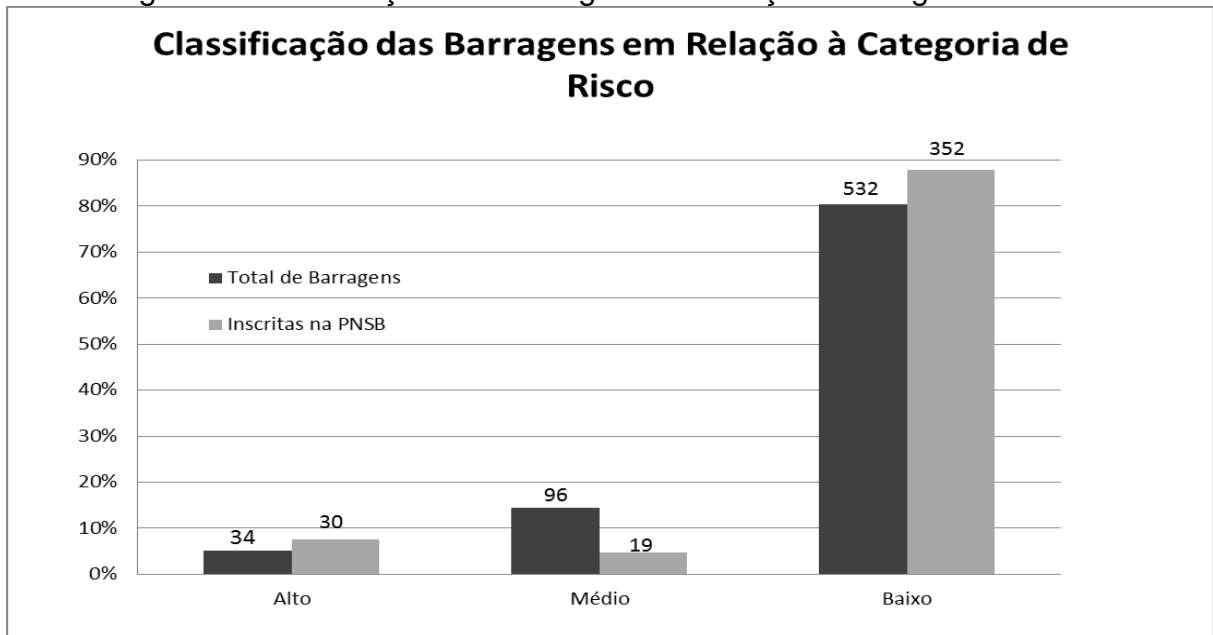
Fonte: Resolução CNRH Nº 143 (2012)

Considerando esta classificação referente ao Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH) por meio da resolução 143/2012 é possível verificar a classificação das barragens de rejeitos no Brasil em relação à categoria de risco.

Em relação aos dados do cadastro nacional, ano base 2014, 5% das barragens apresentam alto risco, 15% médio risco e 80% baixo risco. Em relação às barragens pertencentes à PNSB, aproximadamente 8% apresentam alto risco, 5% médio risco e 88% baixo risco.

Entre as 34 (trinta e quatro) barragens avaliadas como de alto risco, 4 (quatro) delas não estão inscritas na PNSB, e entre aquelas avaliadas como risco médio, 77 (setenta e sete) não estão inclusas nessa política. Considerando que a maioria dos dados para essa classificação são fornecidos pelos responsáveis pela empresa mineradora, informações incorretas ou falseadas podem produzir classificações inadequadas. Estes dados podem ser observados na Figura 33.

Figura 33- Distribuição das barragens em relação à categoria de risco



Fonte: gráfico construído pelo autor utilizando dados do cadastro nacional de barragens da mineração (DNPM, 2014).

3.7.2.2- Classificação quanto ao dano potencial associado

Para a classificação quanto ao dano potencial associado, os critérios a ser considerados são: existência de população a jusante com potencial de perda de vidas humanas; existência de unidades habitacionais ou equipamentos urbanos ou comunitários; existência de infraestrutura ou serviços; existência de equipamentos de serviços públicos essenciais; existência de áreas protegidas definidas em legislação; natureza dos rejeitos ou resíduos armazenados e volume.

A Figura 34 mostra a matriz de classificação dos dados quanto ao dano potencial associado. Realizando somatório dos valores encontrados, através do uso do quadro da Figura 35, é possível classificar as barragens de rejeito, em relação ao dano potencial associado em: Alto, médio e baixo.

Figura 34- Quadro de classificação quanto ao dano potencial associado - DPA (resíduos e rejeitos)

Volume Total do Reservatório (a)	Existência de população a jusante (b)	Impacto ambiental (c)	Impacto sócio-econômico (d)
Muito Pequeno < = 500 mil m ³ (1)	INEXISTENTE (não existem pessoas permanentes/residentes ou temporárias/transitando na área afetada a jusante da barragem) (0)	INSIGNIFICANTE (área afetada a jusante da barragem encontra-se totalmente descaracterizada de suas condições naturais e a estrutura armazena apenas resíduos Classe II B - Inertes, segundo a NBR 10.004 da ABNT) (0)	INEXISTENTE (não existem quaisquer instalações na área afetada a jusante da barragem) (0)
Pequeno 500 mil a 5 milhões m ³ (2)	POUCO FREQUENTE (não existem pessoas ocupando permanentemente a área afetada a jusante da barragem, mas existe estrada vicinal de uso local) (3)	POUCO SIGNIFICATIVO (área afetada a jusante da barragem não apresenta área de interesse ambiental relevante ou áreas protegidas em legislação específica, excluídas APPs, e armazena apenas resíduos Classe II B - Inertes , segundo a NBR 10.004 da ABNT) (2)	BAIXO (existe pequena concentração de instalações residenciais, agrícolas, industriais ou de infra-estrutura de relevância sócio-econômico-cultural na área afetada a jusante da barragem) (1)
Médio 5 milhões a 25 milhões m ³ (3)	FREQUENTE (não existem pessoas ocupando permanentemente a área afetada a jusante da barragem, mas existe rodovia municipal ou estadual ou federal ou outro local e/ou empreendimento de permanência eventual de pessoas que poderão ser atingidas) (5)	SIGNIFICATIVO (área afetada a jusante da barragem apresenta área de interesse ambiental relevante ou áreas protegidas em legislação específica, excluídas APPs,e armazena apenas resíduos Classe II B - Inertes , segundo a NBR 10.004 da ABNT) (6)	MÉDIO (existe moderada concentração de instalações residenciais, agrícolas, industriais ou de infra-estrutura de relevância sócio-econômico-cultural na área afetada a jusante da barragem) (3)
Grande 25 milhões a 50 milhões m ³ (4)	EXISTENTE (existem pessoas ocupando permanentemente a área afetada a jusante da barragem, portanto, vidas humanas poderão ser atingidas) (10)	MUITO SIGNIFICATIVO (barragem armazena rejeitos ou resíduos sólidos classificados na Classe II A - Não Inertes, segundo a NBR 10004 da ABNT) (8)	ALTO (existe alta concentração de instalações residenciais, agrícolas, industriais ou de infra-estrutura de relevância sócio-econômico-cultural na área afetada a jusante da barragem) (5)
Muito Grande > = 50 milhões m ³ (5)	-	MUITO SIGNIFICATIVO AGRAVADO (barragem armazena rejeitos ou resíduos sólidos classificados na Classe I- Perigosos segundo a NBR 10004 da ABNT) (10)	-

$$DPA = \sum (a \text{ até } d)$$

Fonte: Resolução CNRH N° 143 (2012).

Figura 35- Faixas de classificação referente ao dano potencial associado

I.2 - DANO POTENCIAL ASSOCIADO:		Pontos
	DANO POTENCIAL ASSOCIADO (DPA)	
Faixas de Classificação	DANO POTENCIAL ASSOCIADO	DPA
	ALTO	≥ 13
	MÉDIO	$7 < DPA < 13$
	BAIXO	≤ 7

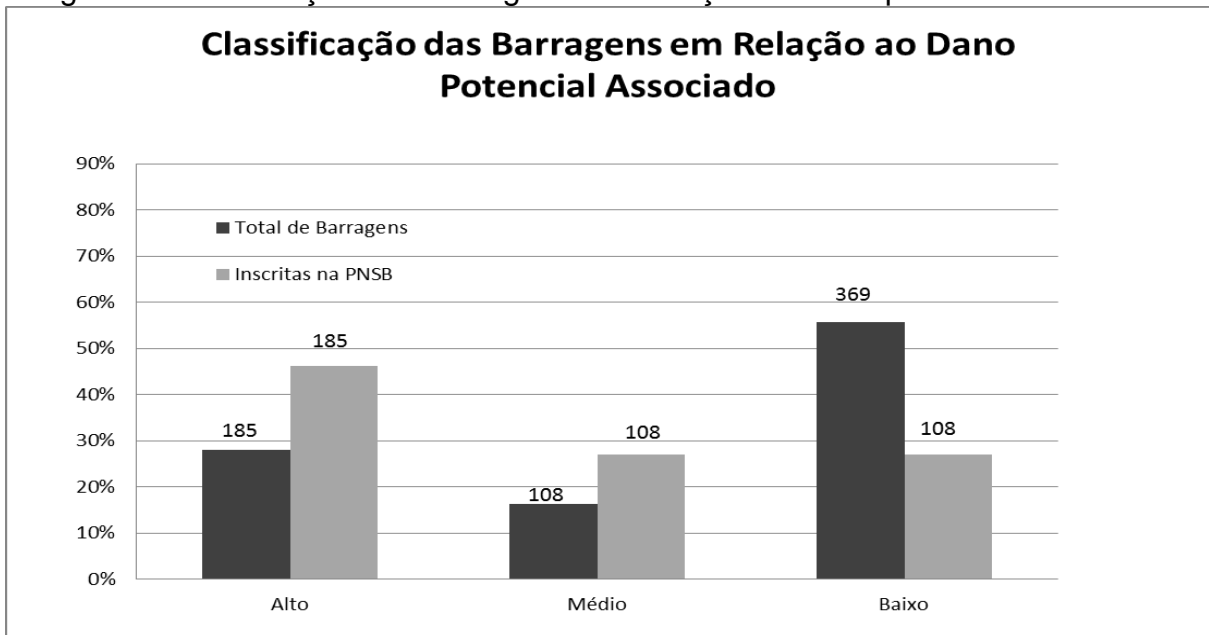
Fonte: Resolução CNRH Nº 143 (2012).

Considerando esta classificação referente ao Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH) por meio da resolução 143/2012 é possível classificar as barragens de rejeitos no Brasil no que se refere ao dano potencial associado.

Em relação ao dano potencial associado, 28% das barragens cadastradas pelo DNPM são classificadas como alto potencial, 16% médio potencial e 56% baixo potencial.

Em relação às barragens pertencentes à PNSB, 46 % apresentam alto dano potencial associado, 27% apresentam médio e baixo dano potencial associado. Todas as barragens que apresentam dano potencial associado alto e médio pertencem à PNSB, uma vez que essas classificações são critérios de inclusão. Além dessas barragens, fazem parte da PNSB 108 barragens de baixo dano potencial associado, que foram incluídas devido altura do maciço, volume total ou por conter resíduos perigosos. A Figura 36 exibe estes dados.

Figura 36- Distribuição das Barragens em Relação ao dano potencial Associado.



Fonte: gráfico construído pelo autor utilizando dados do cadastro nacional de barragens da mineração (DNPM, 2014)

3.7.2.3- Classificação quanto ao risco e dano potencial associado

A Resolução nº 91/2012, emitida pela Agência Nacional de Águas (ANA) estabelece a periodicidade de atualização, a qualificação do responsável técnico, o conteúdo mínimo e o nível de detalhamento do Plano de Segurança da Barragem (PSB) e da sua revisão periódica de segurança.

Em especial, o conteúdo mínimo do PSB e a periodicidade mínima da revisão periódica foram estabelecidos como função da combinação das classificações em categoria de risco e dano potencial associado. A Figura 37 exibe a matriz de categoria de risco e dano potencial associado.

Figura 37- Matriz de Categoria de Risco e Dano Potencial Associado

CATEGORIA DE RISCO	DANO POTENCIAL ASSOCIADO		
	ALTO	MÉDIO	BAIXO
ALTO	A	B	C
MÉDIO	A	C	D
BAIXO	A	D	E

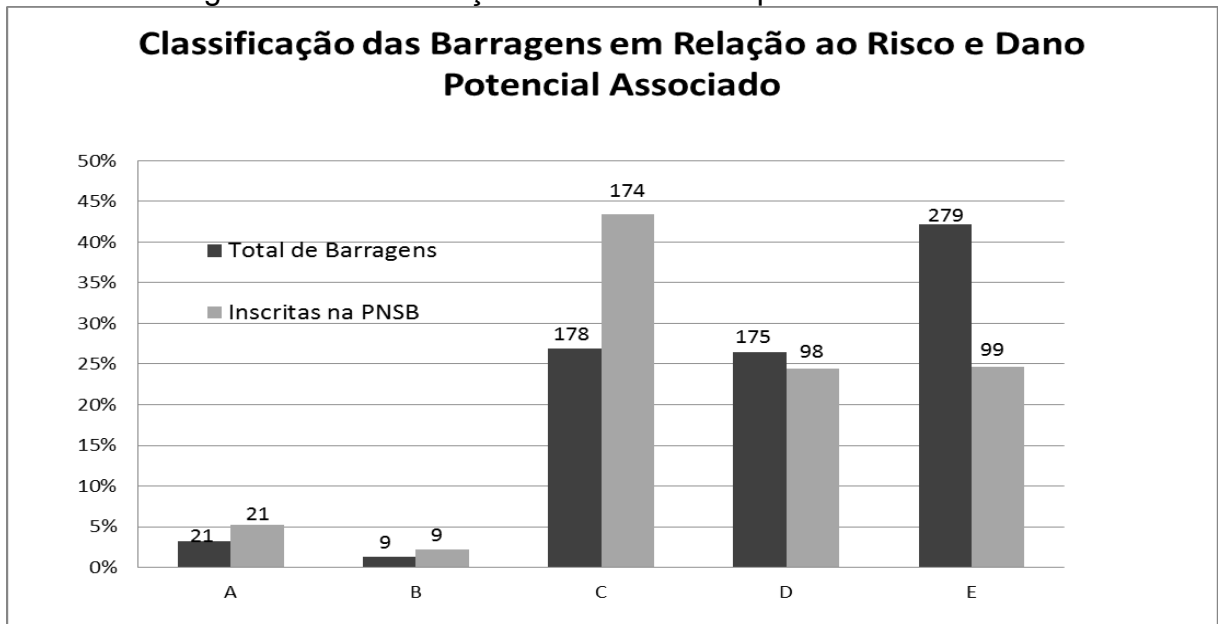
Fonte: Resolução ANA 91/2012 (2012)

A revisão periódica deve ocorrer a cada cinco anos para barragens nas classes A e B; a cada sete anos para as barragens classe C e a cada dez anos para as barragens nas classes D e E. Além disso, o empreendedor ficará obrigado a executar nova revisão periódica de segurança de barragem sempre que ocorrerem modificações estruturais, como alteamentos ou modificações na classificação dos rejeitos depositados na barragem.

Levando esta classificação em consideração é possível observar que as barragens classificadas como A e B, não ultrapassam 5% em ambas as análises. Entre as barragens classificadas em C, apenas 4 barragens não fazem parte da PNSB. Esta classificação (C) possui o maior número de barragens classificadas na PNSB, cerca de 43%. As demais classificações, D e E, possui, aproximadamente, 25% do total destas barragens.

Em relação ao cadastro total de barragens, as classificações C e D são responsáveis por aproximadamente 27% e a classificação E por cerca de 42%. A Figura 38 demonstra estes dados.

Figura 38- Classificação de risco e dano potencial associado



Fonte: gráfico construído pelo autor utilizando dados do cadastro nacional de barragens da mineração (DNPM, 2014)

3.7.3- Classificação de risco e dano associado do estado de Minas Gerais

Em Minas Gerais, existe classificação própria em relação à categoria de risco e dano potencial associado. A Deliberação Normativa COPAM nº 62, de 2002, alterada pela Deliberação Normativa 87 de 2005, dispõe sobre critérios de classificação de barragens de contenção de rejeitos, de resíduos e de reservatório de água em empreendimentos industriais e de mineração no estado de Minas Gerais.

A Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM) é responsável pelo trabalho de cadastramento e classificação das barragens seguindo os parâmetros desta deliberação. Na Figura 39 estão dispostos os critérios para definição do porte da barragem e do porte do reservatório. E na Figura 40 estão presentes os critérios para a classificação das barragens.

Figura 39- Critérios para definição do porte da barragem

Porte da Barragem	Altura da Barragem H (m)	Porte do Reservatório	Volume do Reservatório Vr (m³)
Pequeno	$H < 15$	Pequeno	$V_r < 500.000$
Médio	$15 \leq H \leq 30$	Médio	$500.000 \leq V_r \leq 5.000.000$
Grande	$H > 30$	Grande	$V_r > 5.000.000$

Fonte: COPAM nº 87 (2005)

Figura 40- Critérios para a classificação das barragens

Altura da barragem H (m)	Volume do Reservatório (x10⁶ m³)	Ocupação humana a jusante	Interesse ambiental a jusante	Instalações na área de jusante
$H < 15$ V=0	$V_r < 0,5$ V=0	Inexistente V=0	Pouco significativo V=0	Inexistente V=0
$15 \leq H \leq 30$ V=1	$0,5 \leq V_r \leq 5$ V=1	Eventual V=2	Significativo V=1	Baixa concentração V=1
$H > 30$ V=2	$V_r > 5$ V=2	Existente V=3	Elevado V=3	Alta concentração V=2
-	-	Grande V=4	-	-

Fonte: COPAM nº 87 (2005)

A partir destes critérios, as barragens são classificadas em três categorias, considerando-se o somatório dos valores (V).

I. Baixo potencial de dano ambiental - Classe I: quando o somatório dos valores for menor ou igual a dois ($V \leq 2$);

II. Médio potencial de dano ambiental - Classe II: quando o somatório dos valores for maior que dois e for menor ou igual a cinco ($2 < V \leq 5$);

III. Alto potencial de dano ambiental - Classe III: quando o somatório dos valores for maior que cinco ($V > 5$).

Os cadastros de barragens são um importante avanço para garantir a segurança e o monitoramento das barragens de rejeito no Brasil. Porém, a qualidade dos dados é indispensável para garantir a efetividade dessas atividades. Atualmente, a comparação entre os dados disponíveis em ambos os cadastros, realizados pelo DNPM e pela FEAM, evidenciam a necessidade de se obter uma melhor acurácia em relação às informações fornecidas pelas empresas da mineração. No cadastro da FEAM existe um total de 442 barragens da mineração no estado de Minas Gerais, enquanto no cadastro nacional existe um total de 317.

A imprecisão dos dados pode ser verificada em relação aos dados da barragem de Fundão, que se rompeu em 2015. Enquanto constava no cadastro da FEAM que a barragem comportava 2,65 milhões de metros cúbicos de areia, lama e detritos de minério. O volume real era 20 vezes maior, acima de 50 milhões de metros cúbicos (E.M, 2015).

Em relação à altura das barragens, os dados também estão incompletos e os que existem são confusos. Em 2013, a altura de Fundão registrada no cadastro estadual era de 80 metros, enquanto técnicos do Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM) aferiram 130 metros em vistoria ao local.

Em 2009, a barragem de Santarém, passou de 29 metros para 53 metros, mas voltou a apresentar 29 metros em 2012 e depois subiu para 32 metros em 2013, sem registros referentes à redução do barramento ou de desabamentos.

3.8- Monitoramento e instrumentação de barragens de rejeitos

As barragens de rejeitos de mineração surgiram com a finalidade de reduzir o impacto ambiental oriundo do descarte direto de resíduos na natureza. Entretanto, a ocorrência de falhas nestas barragens produziu impactos significativos impulsionando assim, o desenvolvimento de tecnologias mais seguras e o conhecimento das causas das falhas (PIMENTA DE ÁVILA, 2011).

A segurança das barragens de rejeitos é muitas vezes negligenciada, pois ao contrário das barragens convencionais, que são vistas como um recurso, as barragens de contenção de rejeitos são consideradas por muitos proprietários como estruturas improdutivas. Enquanto as barragens de hidroelétricas recebem um alto padrão de cuidado e atenção em sua construção, o gerenciamento dos rejeitos é

tratado com menos zelo se comparado a outros processos do beneficiamento mineral (REZENDE, 2013).

A construção de barragens de rejeito é dinâmica, tanto na execução quanto na operação. A construção destas estruturas é contínua e pode haver variação nas dimensões e capacidade do reservatório, conforme a produção da mina. Desta forma, a segurança para esta categoria de barragens deve necessariamente considerar estas variações, a fim de evitar que riscos associados a esta dinâmica sejam negligenciados (BLIGHT, 1998).

Muitos mecanismos de falhas em barragens de rejeitos são precedidos por sinais de alerta que podem ser identificados com um programa de monitoramento adequado (MARTIN, 2002).

As alterações são o aparecimento de trincas ou de descargas de águas turvas ou contendo sedimentos. Os sinais podem ocorrer em um intervalo de tempo variado, de forma que sua exteriorização pode durar anos ou ocorrer poucas horas antes da falha (MAC, 2011).

Neste cenário, o monitoramento das barragens durante sua construção, operação, desativação e fechamento permite que estes sinais sejam identificados no comportamento da barragem. A partir desta identificação, as medidas corretivas e mitigadoras de risco devem ser adotadas para evitar a ocorrência de consequências indesejáveis. As estratégias de monitoramento devem ser pensadas desde a fase de projeto da estrutura de contenção (MARTIN, 2002).

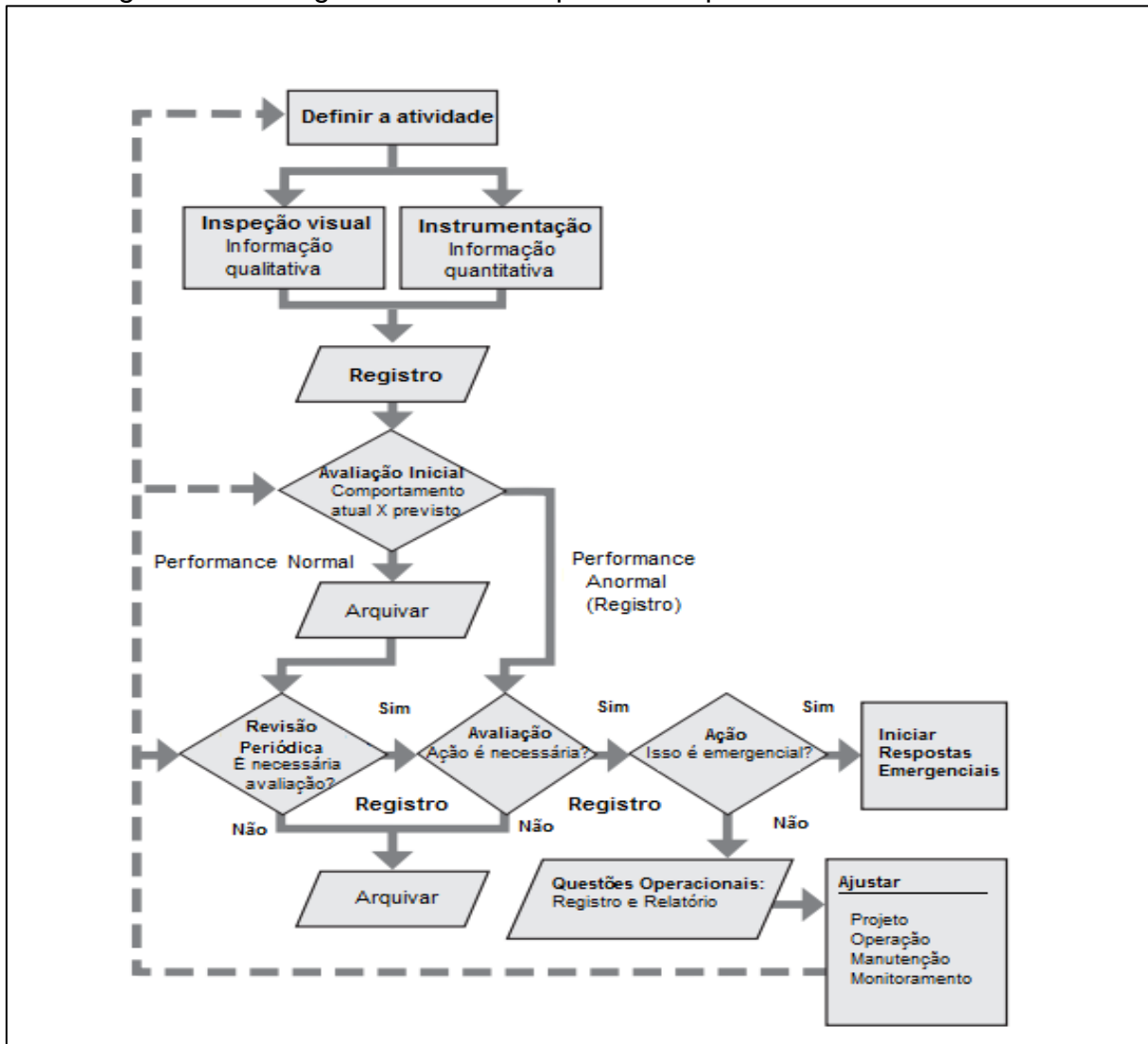
O ICOLD (2001) considera que o monitoramento deve incluir: inspeções visuais das barragens e instalações, inspeção de todos os registros de medição (verificando irregularidades), registro e notificação de irregularidades, organização de ações corretivas e relação de proximidade com os projetistas e autoridades de controle.

O monitoramento permite a avaliação do comportamento da barragem durante as fases de construção e de operação, se baseando na inspeção e acompanhamento da operação, da integridade estrutural e da segurança da barragem (MAC, 2011).

Devem ser identificados os principais parâmetros que possibilitem controlar o funcionamento, integridade estrutural, segurança e desempenho ambiental. Adicionalmente, todos os envolvidos na operação devem estar conscientes da necessidade de denunciar e agir quando forem observados desvios do

comportamento esperado (MAC, 2011). A FIGURA 41 exibe um fluxograma representando as etapas de um processo de monitoramento.

Figura 41- Fluxograma com as etapas de um processo de monitoramento



Fonte: MAC (2011)

A comparação entre o comportamento real da barragem e o comportamento esperado pode ser realizada qualitativamente, através das inspeções visuais e quantitativamente, através da instrumentação (MAC, 2011). Esta comparação deve considerar a possibilidade de ocorrência de carga incomum (particularmente, em eventos meteorológicos) que devem ser suportados pela estrutura (ICOLD, 2001).

3.8.1- Inspeções visuais

Alguns parâmetros frequentemente utilizados para a inspeção visual são: observações da superfície, com o objetivo de verificar a vegetação, presença de rachaduras, abaulamento, depressões, e orifícios, presença de erosão no talude, níveis de água, áreas de infiltração ou mudanças nas áreas de infiltração e superfície da praia (MAC, 2011).

Dentre os parâmetros escolhidos para a fiscalização, devem ser selecionados os parâmetros cujos trabalhadores locais podem avaliar. Alguns exemplos de possíveis parâmetros são o aparecimento ou alterações em fissuras, depressões, infiltração e vegetações nos rejeitos. O reconhecimento destas alterações pode sugerir a necessidade de inspeção específica no local (MAC, 2011).

Para que a inspeção visual possa ser empregada corretamente, devem ser classificadas as observações consistentes com o comportamento esperado e as observações que não são esperadas. De forma geral, é difícil realizar a definição dos níveis de alarme de forma clara e objetiva (BERGHE et al., 2011).

Os operadores que identificam as anomalias, frequentemente não possuem um conhecimento profundo sobre a estrutura, que permita a avaliação da gravidade e dos riscos associados. Portanto, é necessário estabelecer um excelente sistema de comunicação que garanta que a informação seja transmitida aos profissionais capacitados para avaliar os riscos e tomar as medidas necessárias (BERGHE et al., 2011).

A determinação da frequência necessária de inspeção deve considerar as variáveis locais baseadas na altura do barramento, no tipo de rejeito e tipo de estrutura da barragem (BERGHE et al., 2011).

As condições como a suspensão do funcionamento ou encerramento da barragem devem ser conhecidas, pois podem alterar a frequência das inspeções de rotina. Além disso, precisam ser definidos os critérios que desencadeiam inspeções adicionais. Tais eventos incluem, tipicamente, o primeiro enchimento, terremoto, precipitação extrema, inundação ou transtornos operacionais (MAC, 2011).

3.9- Instrumentação

O processo de instrumentação inclui a execução de várias atividades como a seleção dos tipos de instrumentos que serão utilizados, sua instalação, controle de seu funcionamento e a documentação ou transmissão dos dados analisados (BERGHE et al., 2011).

Para que a instrumentação seja realizada de maneira adequada, devem ser exigidas as seguintes informações: identificação e localização do instrumento, registro e data da instalação, posição pesquisada, profundidade do furo de teste, elevação do topo do buraco, detalhes do aterro, tipo do instrumento, profundidade, número de série, data da coleta e validação dos procedimentos, frequência de monitoramento, dados de interpretação, calibrações e dados de manejo e armazenamento. Devem ser especificados os critérios para a triagem inicial de leituras de instrumentação no campo e identificados os valores de base para a reverificação de leituras anômalas (MAC, 2011).

A determinação do número de instrumentos necessários depende do comprimento da barragem, da altura máxima, de características geológicas da fundação, de características dos materiais utilizados no corpo da barragem e das etapas construtivas (DUNNICLIFF, 1988 apud MACHADO, 2007).

Dentre os parâmetros comumente empregados no monitoramento por instrumentação estão deslocamento do talude, poropressão, atividades sísmica, qualidade da água, clima, vazão e pressão nas tubulações e níveis de água (MAC, 2011).

Alguns dos recursos frequentemente utilizados na instrumentação de barragens são medidor de vazão, piezômetros, inclinômetros, medidores de recalque e estações meteorológicas.

3.9.1- Medidores de vazão

Os equipamentos que medem as vazões de drenagem e das infiltrações pelo corpo da barragem permitem monitorar sua segurança estrutural. Esses equipamentos podem ser úteis na observação da quantidade de materiais sólidos carregados, permitir a análise visual da cor da água e coleta de amostras para análise laboratorial dos sólidos contidos. Teor de sólidos com valor superior ou da mesma

ordem de grandeza do reservatório pode indicar erosão interna no barramento (SILVEIRA, 2006).

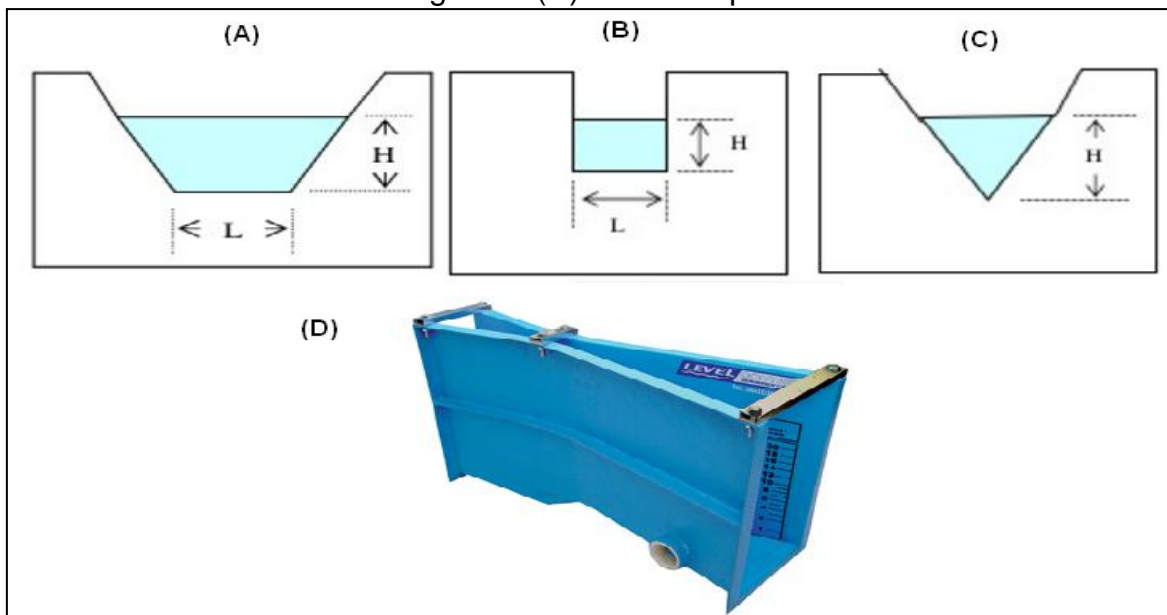
Em barragens de rejeitos de pequeno e médio porte e alteadas a montante, poderão ser realizados métodos expeditos de medição de vazões.

Nos métodos expeditos, realiza-se a coleta da água em recipiente graduado de 200 ml (mililitros) ou 1 litro, em intervalo de tempo mensurado por cronômetro. A vazão (Q) é calculada e por meio da fórmula $Q = V/T$, em que V corresponde ao volume coletado em litros e T ao intervalo de tempo em minutos. Este cálculo pode ser realizado com a instalação, de drenos sub-horizontais na face do talude de jusante (SILVEIRA, 2006).

Para grandes vazões, em que o método expedito não pode ser empregado, podem ser adotados o medidor triangular, retangular e trapezoidal de vazão ou ainda a calha tipo Parshall (SILVEIRA, 2006).

Medidores triangulares de vazão são recomendados para faixa de 0 l/min a 600 l/min, podendo atingir o máximo de 8.000 l/min e os medidores retangulares podem operar com vazão de até 40.000 l/min. A Figura 42 mostra o esquema de medição de vazão nos medidores trapezoidal, retangular, triangular e a calha Parshall (SILVEIRA, 2006).

Figura 42- Medidores de vazão: (A) medidor trapezoidal (B) medidor retangular (C) medidor triangular e (D) medidor tipo calha Parshall



Fonte: (A), (B) e (C) Pereira; Melo (2010). (D) SanecomFibras (revendedor)

3.9.2- Piezômetros

Os piezômetros permitem realizar a medida dos níveis piezométricos no contato maciço/fundação, permitindo avaliar os critérios de subpressão presentes no projeto. As variações que ocorrem nos registros podem indicar o aumento da vazão de percolação, elevação do nível d'água de montante e jusante, aumento da permeabilidade de materiais a montante do piezômetro e redução da permeabilidade de materiais a jusante do piezômetro (MACHADO, 2007).

Conforme Machado (2007) os piezômetros podem ser instalados em diferentes profundidades a jusante da barragem, mas não devem ser instalados em locais onde o maciço rochoso seja pouco fraturado, ou onde o ensaio de perda d'água sob pressão não indique perda d'água. Para as regiões rochosas recomenda-se a instalação de piezômetros em cotas diferentes.

Os piezômetros devem ser montados, instalados e operados por profissionais experientes e especializado e a instalação deve ser planejada para não interferir em outras atividades de construção ou operação da barragem, evitando, desta forma, causar danos em outros instrumentos (MACHADO, 2007).

3.9.2.1- Piezômetro de Casagrande ou de tubo aberto (Stand pipe)

O piezômetro de tubo aberto mensura a poropressão a partir de um tubo conectado a um bulbo de areia que é instalado no local em que se deseja obter a medida. A leitura é realizada através de um medidor de nível de água, que indica a coluna de água sobre o bulbo. A pressão é obtida pela altura da coluna de água no interior do tubo e as variações ocorrem pelo volume de água que entra ou sai do tubo. O tempo necessário para que isto ocorra depende da permeabilidade do solo e do diâmetro do tubo (SILVA, 2014).

Como vantagens, este piezômetro apresenta boa confiabilidade, durabilidade e sensibilidade, além de permitir a estimativa do coeficiente de permeabilidade do solo próximo ao instrumento. Outras características positivas são o baixo custo, o fato de não necessitar de calibração, a simplicidade da leitura e a confiabilidade em longo prazo (MACHADO, 2007).

Como desvantagens do piezômetro de tubo aberto podemos citar que o equipamento é susceptível a danos causados por interferência na área do empreendimento, não é adequado para determinar poropressão no período

construtivo, apresenta dificuldade de instalação a montante da barragem devido ao reservatório, apresenta tempo de resposta elevado em solos de baixa permeabilidade, dependência da habilidade do operador para obter precisão da leitura e não é possível a aquisição remota de leituras (MACHADO, 2007).

3.9.2.2- Piezômetro Pneumático

O princípio de funcionamento deste piezômetro baseia-se no equilíbrio de pressões atuantes em um diafragma flexível. Em um dos lados do diafragma atua a pressão de água a ser mensurada, enquanto no outro lado há um gás sob pressão, pressão esta que é variável e conhecida através de um manômetro (MACHADO, 2007).

Como vantagens do piezômetro pneumático podemos citar que o equipamento não sofre interferência na área do empreendimento, pois os recalques aos quais o instrumento é submetido e a pressão atmosférica não influenciam a leitura. Sua leitura é centralizada, simples e rápida e não há limitação quanto localização do instrumento. Porém, este piezômetro necessita de calibração periódica dos manômetros e recarga das ampolas de gás comprimido, geralmente nitrogênio. Podem ocorrer deformação do diafragma flexível e menor confiabilidade para medida de poropressão negativa (MACHADO, 2007).

3.9.2.3- Piezômetro hidráulico de tubo duplo ou aberto

O piezômetro hidráulico é indicado normalmente para monitoramento durante a fase de operação da barragem e é projetado para ter vida útil longa. A água contida nos vazios do solo fica em contato direto com a água contida no instrumento. Este sistema possui um elemento de filtro poroso que é conectado a dois tubos flexíveis que possuem manômetro na sua extremidade oposta (MACHADO, 2007).

A base do funcionamento é o equilíbrio de pressões atuantes em um diafragma flexível. De um lado atua a água cuja pressão se deseja medir, do outro atua água do equipamento, de forma similar ao funcionamento do piezômetro pneumático (FUZARO, 2007).

Sua técnica e construção são simples e o instrumento permite avaliação de poropressão negativa com custo médio e alta durabilidade, além de permite a realização de ensaio de permeabilidade. Entretanto, o piezômetro hidráulico não é indicado para cotas de instalação muito superiores a do terminal de leitura. Seu

tempo de resposta é longo quando instalado em solos de baixa permeabilidade. Além disso, está sujeito a eventuais influências de recalques nas leituras dos instrumentos (MACHADO, 2007).

Para realizar a manutenção deste equipamento é necessário manter os manômetros calibrados e checar as conexões. Os erros de leitura mais frequentes consistem na aplicação de fórmulas ou constantes de calibração incorretas, desrespeito ao tempo de estabilização para realizar leituras, vazamento nas conexões, presença de bolhas de ar na tubulação e cadastramento incorreto da cota de instalação da célula (FUZARO, 2007).

3.9.2.4- Piezômetro elétrico

No piezômetro elétrico a pressão da água é monitorada por um transdutor elétrico. É utilizado com a finalidade de obter as pressões neutras e subpressões em maciços de terra, taludes e fundações (MACHADO, 2007).

O piezômetro funciona por meio de um dispositivo cilíndrico metálico dotado de pedra porosa e diafragma, instrumentado com extensômetros elétricos de resistência.

O piezômetro elétrico é capaz de realizar medidas dinâmicas de poropressão com registro contínuo, característica relevante para o monitoramento de barragens em regiões de sismicidade significativa. Permite ainda a automação de leituras e monitoramento remoto das medidas de poropressão negativa (MACHADO, 2007).

Alguns erros frequentes na instalação e na leitura destes equipamentos são a má compactação das valetas de passagem dos cabos, uso de fórmulas ou constantes de calibração incorretas, aterramento das células e caixa terminal deficiente (FUZARO, 2007).

3.9.2.5- Piezômetro de Corda Vibrante

Estes instrumentos são projetados objetivando fornecer precisão e confiabilidade em longo prazo em condições geotécnicas severas. O princípio de operação deste sensor é o cálculo de um parâmetro físico através da mensuração da variação da frequência de uma corda vibrante, estendida no corpo de uma estrutura que se deforma de acordo com os valores da pressão neutra (Machado, 2007).

Em seu funcionamento ocorre a conversão da pressão de água em sinal de frequência. Nesses instrumentos, a pressão exercida no diafragma altera a tensão de um fio no interior da célula, que por sua vez altera a frequência de resposta ao pulso elétrico emitido (Fusaro, 2007).

Estes piezômetros apresentam alta resolução e precisão com resposta rápida. Além disso, existe a possibilidade de automação das leituras, facilidade de instalação e leitura com sinais que podem ser transmitidos à longa distância (SILVA, 2014). Apesar destas vantagens este tipo de piezômetro pode ser danificado por descarga elétrica e possui custo de aquisição elevado. (MACHADO, 2007).

3.9.3- Inclinômetros

Os inclinômetros são instrumentos capazes de avaliar os deslocamentos horizontais, superficiais e em subsuperfície e podem detectar regiões com concentração de deformações estes são locais de potencial ruptura.

Os movimentos são causados pela compressibilidade dos materiais do aterro da barragem e podem gerar fissuras transversais e erosão interna, que induz a superfícies potenciais de ruptura. Desta forma, esses equipamentos possibilitam avaliar a estabilidade de taludes em barragens.

Quando são avaliadas barragens em vales simétricos, geralmente os deslocamentos verticais atingem os maiores valores na seção central da barragem, devido ao aumento da tensão horizontal de compressão. Em contrapartidas, esses deslocamentos são praticamente nulos à medida que se aproxima das ombreiras da barragem, região em que aumentam os deslocamentos horizontais, pois a tensão de compressão se anula e existe tensão de tração (MACHADO, 2007).

O inclinômetro é constituído por tubo inclinométrico, torpedo e unidade de leitura. O torpedo possui sensores pendulares axiais ou biaxiais que registram as inclinações. Durante a leitura, o deslocamento representa a diferença da posição do tubo e é calculado através da subtração entre o desvio inicial e o desvio atual. Para a leitura deve ser utilizada sempre a mesma altura de referência (MACHADO, 2007).

Existem dois tipos, o inclinômetro vertical, que mede deslocamentos profundos horizontais, e o inclinômetro horizontal, que mede os assentamentos que possam ocorrer. Estes instrumentos podem ser instalados em furos verticais ou

inclinados. Entretanto a leitura e cálculo são relativamente demorados (ROCHA, 2014).

3.9.4- Medidores de recalque

Os medidores de recalque permitem acompanhar o desenvolvimento da obra, demonstrando diretamente os recalques em tempo real (SILVEIRA, 2006). Alguns dos instrumentos utilizados na avaliação de recalque são os marcos superficiais (MS) e medidor de recalque KM.

Os marcos superficiais permitem o acompanhamento de deslocamentos horizontais e verticais em regiões onde há grande sobrecarga. Estes instrumentos são constituídos de pinos metálicos instalados em blocos de concreto de pequenas dimensões inseridos no terreno. As leituras são feitas através de controle topográfico, com nível óptico e estações totais (SILVA, 2014).

As principais vantagens deste sistema de monitoramento são o baixo custo, e a facilidade de instalação e manutenção. Como desvantagens podemos citar a necessidade de equipe de topografia no empreendimento, a impossibilidade de acompanhamento em tempo real, a imprecisão das leituras em dias ensolarados, a impossibilidade do monitoramento em dias chuvosos e a facilidade de danos, por acidentes ou vandalismo, uma vez que o instrumento fica exposto. Este inconveniente pode ser minimizado com a utilização de tampas de proteção (SILVEIRA, 2006).

3.9.5- Estações meteorológica

Segundo Machado (2007) os fatores meteorológicos podem prejudicar a segurança das barragens, principalmente em situações extremas. Um exemplo destes fatores é a alta precipitação, uma vez que os períodos de chuvas intensas estão entre as principais causas de falhas em barragens de rejeitos (U.S. E.P.A, 1995).

As estações meteorológicas podem fornecer medidas pluviométricas, permitem determinar as vazões de escoamento superficial, as taxas de infiltração e a necessidade de implantação dos dispositivos de drenagem superficial (Machado, 2007).

3.10- Limitações da Instrumentação

A instrumentação possuiu algumas limitações como a cobertura incompleta da barragem, a possibilidade de ser danificada, falhar ou funcionar parcialmente (devido ao envelhecimento), fornecimento de dados imprecisos e incapazes de detectar anomalias por baixa sensibilidade ou instalação inadequada. Além disso, fenômenos inesperados, não previstos na fase de projeto, dificilmente são detectados pela instrumentação (DUNNICLIFF, 1988).

4- CONCLUSÃO

O Brasil possui uma grande riqueza em seu subsolo com grandes reservas de vários minerais principalmente de nióbio, entretanto o mineral mais exportado pelo país é o minério de ferro responsável por aproximadamente 75% das exportações. O Brasil possui um total de 662 barragens de rejeito (Dados DNPM, 2014). A grande maioria destas barragens se localiza no estado de Minas Gerais que concentra 317 barragens (aproximadamente 48%). O segundo estado com maior número de barragens é São Paulo com 73 barragens (aproximadamente 11%) e o terceiro estado é o Pará com 69 barragens (aproximadamente 10%). A maior parte destas barragens é destinada a armazenar os rejeitos da extração do minério de ferro, ouro, areia, bauxita, estanho, níquel e manganês.

No que diz respeito aos alteamentos o método de alteamento a montante é o mais utilizado nas barragens de rejeitos brasileiras. Este método é escolhido, principalmente, pelo menor custo, simplicidade de execução, maior velocidade de alteamento e não necessita de grandes equipamentos de terraplenagem, embora seja um método que possui um coeficiente de segurança abaixo dos demais, o alteamento a montante quando bem executado e controlado por técnicos capacitados apresenta bons resultados.

No que se refere aos rompimentos das barragens, este trabalho constatou que o Brasil ainda apresenta um grande número de acidentes e em quase todos os casos estes acidentes estão relacionados a mais de uma falha, geralmente a um conjunto de falhas durante a execução ou durante a operação da barragem. Sendo que a causa da grande maioria destes acidentes, é influenciada direta ou indiretamente por eventos climáticos incomuns ou até mesmo pelo manuseio da água presente no próprio depósito de rejeitos. Em relação à altura, a maior parte dos acidentes, acontece com barragens de até trinta metros, pois as barragens de pequeno e médio porte não recebem os devidos cuidados em relação ao monitoramento, instrumentação e segurança se comparadas com as grandes barragens.

As pesquisas que dizem respeito às falhas e rompimentos de barragens de rejeito são limitadas pela escassez de informações relacionadas aos incidentes. Outro fator limitante é a constatação que nem todos os incidentes ocorridos são relatados. De forma geral, informações como altura e a capacidade de armazenamento das barragens de rejeito são difíceis de serem obtidas mesmo em barragens que não se romperam.

A Política Nacional de Segurança das Barragens representa um avanço no controle da segurança das barragens de rejeitos brasileiras, porém os dois últimos grandes incidentes (Itabirito 2014 e Fundão 2015) ocorreram após sua implantação, evidenciando a necessidade de seu aperfeiçoamento e principalmente da realização de uma fiscalização mais efetiva, uma vez que a maioria das causas de rompimentos em barragens pode ser resolvida com o conhecimento e a tecnologia disponíveis atualmente. Em relação aos dados fornecidos pelo DNPM e pela FEAM a qualidade é indispensável para assegurar a efetividade das atividades de fiscalização. Atualmente, a comparação entre os dados disponíveis em ambos os cadastros evidenciam a necessidade de se obter uma melhor acurácia em relação às informações fornecidas pelas empresas de mineração.

O sistema de monitoramento e instrumentação é fundamental para garantir a segurança das barragens. Para isso é necessário que se tenha um sistema de instrumentação e monitoramento eficientes e adequados ao tipo de barragem, dando a mesma relevância para pequenas, médias e grandes barragens. Para o preciso funcionamento da instrumentação é de grande importância que seja elaborado um plano de instrumentação com a correta seleção dos instrumentos, verificação de sua precisão e sua confiabilidade, assim como a análise precisa dos dados fornecidos pela instrumentação. O custo da instrumentação de uma barragem é relativamente baixo, aproximadamente 3% do valor do empreendimento, e fundamental para a imagem setor mineral e principalmente para a prevenção de acidentes.

5- REFERÊNCIAS

ABNT. *Mineração - Elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reserva de água. NBR 13028.* São Paulo: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2006.

Agência Minas. *Polícia Civil primeiro inquérito referente ao rompimento da Barragem de Fundão.* Agencia Minas, Brasil, 2016.

ALBUQUERQUE FILHO, L.H. *Avaliação do comportamento geotécnico de barragem de rejeitos de minério de ferro através de ensaios de Piezocone.* 2004. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, 2004.

ARAUJO, A.C.; PERES, A.E.C.; VIANA, P.R.M. *Pesquisa e desenvolvimento em flotação.* In: CHAVES, A.P. *Teoria e prática do tratamento de minérios - flotação o estado da arte no Brasil.* São Paulo: Signus, 2006.

ARAUJO, C. B. *Contribuição ao estudo do comportamento de barragens de rejeito de mineração de ferro.* (Dissertação de Mestrado). Rio de Janeiro: COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2006.

AZAM, S.; LI, Q. *Tailings Dam Failures: A Review of the Last One Hundred Years,* Geotechnical News. Canadian, 2010.

BALTAR, C.A.M. *Flotação no Tratamento de Minérios.* Recife: Departamento de Engenharia de Minas Universidade Federal de Pernambuco, 2008.

BERALDO, J.L. *Concentração por flotação,* Apostila, Escola Politécnica da USP, São Paulo, 1983.

BERTACHINI, A. C. *Boletim Informativo da Associação Brasileira de Águas Subterrâneas Julho/2001 - Nº 116.* Água e mineração, Brasil, 2001.

BERTONI, J. E LOMBARDI NETO, F. *Conservação do Solo.* 3ª edição, Ícone Editora, São Paulo, 1993.

BERTONI, J.; LOMBARDI, N. F. *Conservação do Solo.* Piracicaba, SP: Editora Livrocere, 1985.

BLIGHT, G. E. *Insights into Tailings Dam Failure - Technical and Management Factors.* International Workshop on Managing the Risks of Tailings Disposal, May 22-23, 1997, Stockholm, Sweden, 1988.

BRASIL. *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.* Diário Oficial [da República Federativa do Brasil], Brasília, DF, 2010.

BRASIL, *Ministério de Minas e Energia Plano Nacional de Mineração 2030*, Brasília, 2011.

BRASIL. *Portaria nº 416, de 03 de setembro de 2012 cria o cadastro nacional de barragens de mineração e dispõe sobre o plano de segurança, revisão periódica de segurança e inspeções regulares e especiais de segurança das barragens de mineração conforme a lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, que dispõe sobre a política nacional de segurança de barragens.* Brasília, DF, 2012.

BRASIL, *Resolução nº 143, de 10 de junho de 2012. Estabelece critérios gerais de classificação de barragens por categoria de risco, dano potencial associado e pelo seu volume, em atendimento ao art. 7º da Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010.* Conselho Nacional dos Recursos Hídricos, Ministério do Meio Ambiente, Brasília, DF, 2012.

CAVALCANTE, A.L.B. *Modelagem e Simulação do Transporte por Arraste de Sedimentos Heterogêneos Acoplado ao Mecanismo de Tensão-Deformação-Propressão Aplicado a Barragens de Rejeitos.* Tese de Doutorado, Publicação G.TD-019/04, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2004.

CHAVES, A.P. *Máquinas de flotação. In: Flotação: o estado da arte no Brasil, vol.4,* Editor Arthur Pinto Chaves, São Paulo, Signus Editora, 2006.

CHAVES, A.P.; *Teoria e Prática do Tratamento de Minérios - Vol. 4 - A Flotação no Brasil - 3ª Ed.,* 2013.

COPAM. Conselho De Proteção Ambiental *Deliberação Normativa N° 87. Altera e complementa a Deliberação Normativa COPAM nº 62, de 17/12/2002.* Lex: Diário do Executivo - Minas Gerais, 2005

COSTA, F.S.F. & MELO, L.J.A.; *Normas regulamentares para disposição de estéril, rejeitos e produtos de mineração. I Simpósio sobre Barragens de Rejeito e Disposição de Resíduos Industriais e de Mineração, REGEO'87, ABMS/ABGE/CBGB/CE, Rio de Janeiro, 1987.*

CRUZ, P. T. *100 Barragens Brasileiras.* 2ª edição. Oficina de Textos, São Paulo 2004.

DONALD, D.C. – *Industrial Minerals and Rocks. Society for Mining, Metallurgy and Exploration,* 1994.

DNPM. *Anuário Mineral Brasileiro 2010*. Relatório, Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), Ministério de Minas e Energia, Brasília, DF.

DNPM- Departamento Nacional de Produção Mineral. *Classificação das Barragens de Mineração inseridas na PNSB -Brasil*, 2014.

DUNCAN J.M. and WRIGHT S.G. *Soil strength and slope stability*, John Wiley & Sons Inc, 2005.

DUTRA, R. *Beneficiamento de minerais industriais*. Anais do II Encontro de Engenharia e Tecnologia dos Campos Gerais, 2006.

EPA. *Desing and evaluation of tailings dams. Technical report*, U.S. Environmental Protection Agency (EPA), Washington, USA, 1994.

ESPÓSITO, T.J. *Controle Geotécnico da Construção de Barragens de Rejeito - Análise da Estabilidade de Taludes e Estudos de Percolação*. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 1995.

ESPOSITO, T. J.; DUARTE, A. P. *Classificação de barragens de contenção de rejeitos de mineração e de resíduos industriais em relação a fatores de risco*. Revista Escola de Minas, v.63, n.2. Ouro Preto, 2010.

ESPÓSITO, T. J. *Metodologia probabilística e observacional aplicada a barragens de rejeito construídas por aterro hidráulico*. Tese de doutorado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2000.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL (DNPM) *PORTARIA Nº 237, DE 18 DE OUTUBRO DE 2001*.

E.M. Barragem que se rompeu em Mariana tinha 20 vezes o volume registrado pela FEAM. Minas Gerais, 2010.

FEAM. Estadual do Meio Ambiente. Minas Gerais, Brasil, 2007.

FEAM Fundação Estadual do Meio Ambiente. *Inventário de barragem do estado de minas gerais ano 2014*. Belo Horizonte. Minas Gerais, 2014.

FEAM - FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE. *Parecer técnico Análise da defesa tempestiva do Auto de Infração RESUMO Este relatório refere-se à análise técnica da defesa tempestiva apresentada pela Rio Pomba Empresa de Mineração Ltda., protocolada na FEAM em 22.03.06. Protocolo: F021863/2006*. Minas Gerais, Brasil, 2006.

FERNANDES, E. A.; SANTOS, H. I. *Análise da operação da barragem de rejeitos da Mineração Serra Grande S.A., Município de Crixás, Goiás*. Goiânia, 2008.

FIGUEIREDO, M. M., *Estudo de metodologias alternativas de disposição de rejeitos para a Mineração Casa de Pedra – Congonhas/MG*. Ouro Preto: Programa de Pós-Graduação em Geotecnia (Dissertação de Mestrado), Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, 2007.

FOSTER, M; FELL, R; SPANNAGLE, M. *The Statistics of Embankment Dam Failures and accidents*. Canadian Geotechnical Journal, 2000.

FREIRE NETO, J.P. *Estudo da liquefação estática em rejeitos e aplicação de metodologia de análise de estabilidade*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. NUGEO, Ouro Preto-MG, 2009.

FREITAS, R.; PAES. *Acúmulo de lama é uma das causas da ruptura de barragem, diz auditoria*. Portal G1 Minas Gerais. Brasil, 2016.

FURSTENAU, E. *Dicionário de Termos Técnicos (Inglês – português)*. Editora Globo. Porto Alegre, 1978.

FUSARO, T.C. *Estabelecimento estatístico de valores de controle para a instrumentação de barragens de terra: Estudo de caso das barragens de Emborcação e Piau*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2007.

GEMG. Regularização Ambiental Central Metropolitan parecer único nº 212/2014 revalidação da licença de operação Herculano Mineração. Superintendência Regional de Regularização Ambiental Central Metropolitana GOVERNO DO ESTADO DE MINAS GERAIS Secretaria de Estado de Meio Ambiente e desenvolvimento. Brasil, 2014.

GOMES, M. A. *Caracterização tecnológica no aproveitamento de rejeito de minérios de ferro*. Ouro Preto: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral (Dissertação de Mestrado), Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, 2009.

GROSSI, S.J.H VALENTE, J., *Guia Prático para Cálculo de Recursos e Reservas Minerais*, Brasil, 1993.

GROSSI, S.J.H., *Fundamentos sobre a variabilidade dos depósitos minerais*, ed. DNPM/CPRM/GEOSOL, Brasília (DF), Brasil, 1986.

GUIMARAES, N. C. *Filtragem de rejeitos de minérios de ferro visando a sua disposição em pilhas*. Belo Horizonte: Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgicas e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, (Dissertação de Mestrado) 2011.

IBRAM. *Evolução da produção mineral brasileira (PMB)*. Instituto brasileiro de mineração. Brasil, 2016.

IBRAM. INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. *Gestão para a sustentabilidade na mineração: 20 anos de história*. DIAS, Cláudia Franco de Salles; MANCIN, Rinaldo César; PIOLI, Maria Sulema M. de Budin. Brasília: IBRAM, 2013.

ICOLD *Tailings dams: risk of dangerous occurrences, lessons learnt from practical experiences*. Bulletin 121, International Commission on Large Dams (ICOLD), France, 144. (2001).

ICME. *An Introduction to Tailings. Case Studies on Tailings Management*. International Council on Metals and the Environment (ICME), Ottawa, Canada, 2008.

KAWA. *L A atuação das empresas mineradoras*. Artigo 2014

KLOHN, E.J. *Seepage Control for Tailings Dams*. Proceedings of 1st International Mine Drainage Symposium, Denver, Colorado, 1979.

KNIGHT, Z. *Slope stability analysis of tailings dam embankments*. Trabalho de conclusão do curso de Graduação em Engenharia Civil da CHARLES DARWIN UNIVERSITY, Austrália, 2015.

LAGE, E. A. *Separadores magnéticos: experiência em minério de ferro na Herculano Mineração*. Pós-Graduação em Engenharia Mineral. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Minas Gerais, 2015.

LEINZ, V. CAMPOS, J. E. S. *Guia para determinação de minerais*. 8. ed. São Paulo, 1979.

LIMA E SILVA, A. R. *Avaliação do potencial de liquefação em barragens de rejeito através de ensaios de campo*. Trabalho de conclusão do curso de Graduação em Engenharia Civil da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

LIMA, V.A. *Uso das técnicas HCT e TRD no monitoramento do processo de consolidação em reservatórios de barragem de rejeitos*. Dissertação de mestrado, São Paulo, 2009.

LOPES, L. M. N. *The rupture of the Mariana dam and its social-environmental impacts*. Sinapse Múltipla, Brasil, 2016.

LOZANO, F. A. E. *Seleção de locais para barragens de rejeitos usando o método de análise hierárquica*. Dissertação de mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP. (2006).

LUZ, A.B., LINS.F.A.F., *Introdução ao Tratamento de Minérios*- Rio de Janeiro, 2010.

LUZ, A.D., SAMPAIO,J.A., ALMEIDA. S.L.M- *Tratamento de minérios 4º edição revisada e ampliada*- Rio de Janeiro, 2004.

MAC - Mining Association of Canada. *A Guide to the Management of Tailings Facilities Second Edition*, Street Ottawa, Ontario, 2011.

MACHADO, W.G.F., *Monitoramento de barragens de contenção de rejeitos da mineração*- Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo. São Paulo, 2007.

MAIA, M., *Mineralogia- Conceitos Gerais*, 2010.

MARANHÃO, R. J. L., *Introdução à pesquisa mineral*. 4. ed. Fortaleza: Imprensa Universitária, 1989. 733p.

MARQUES. R P. *O desenvolvimento local gerado pela mineração* (Artigo), 2011.

MARTIN, T.E.; DAVIES, M.P. *Development and Review of Surveillance Programs for Tailings Dams*. Tailings Dams 2000 Proceedings. Association of State Dam Safety Officials. Las Vegas, 2000.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA *departamento nacional de produção mineral norma brasileira para classificação de recursos e reservas minerais*.

MME - MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. *Estudos para elaboração do plano duodecenal (2010 - 2030) de geologia, mineração e transformação mineral*. Brasil, 2009.

MPMG. *Relatório do MPMG constata que barragem de Fundão não teria rompido com drenagem adequada*. Ministério Público de Minas Gerais Superintendência de Comunicação Integrada. Brasil, 2016.

NEVES, P.C *A importância da mineração na sociedade moderna*. Artigo 2014.

NETO, M.T.O.C e ROCHA, A.M.R. *Noções de prospecção e pesquisa para técnicas de geologia e mineração*. Editora do IFRN, Natal Rio grande do Norte, 2010.

OLDECOP, L., RODRÍGUEZ, R. *Stability and security of mineral deposits (Eds.)*, Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, España, (2006).

PARKER, Sybil P. (Ed). *McGraw-Hill dictionary of scientific and technical terms*. 4. ed. New York: McGraw-Hill Book, 1989.

PEIXOTO, C.L.P. *Proposta de nova metodologia de desagamento de rejeito em poupa*. Dissertação de mestrado profissional. Universidade Federal de Ouro Preto. Minas Gerais, 2012.

PENNA, L. R. *Liquefação estática em depósitos de rejeitos de mineração*. Cobramseg 2010: engenharia geotécnica para o desenvolvimento, inovação e sustentabilidade Brasil, 2010.

PEREIRA, E. L. *Estudo Do Potencial De Liquefação De Rejeitos De Minério De Ferro Sob Carregamento Estático*. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto. Minas Gerais, 2005

PERES, A. E. C.; ARAUJO, A. C. *A flotação como operação unitária no tratamento de minérios*. In: *Flotação: o estado da arte no Brasil*, vol.4, Editor Arthur Pinto Chaves, São Paulo, Signus Editora, 2006.

PERINI, D. S. *Estudos dos processos envolvidos na análise de riscos de barragens de terra*. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília DF, 2009.

PIMENTA DE ÁVILA, J. *As Barragens de Rejeitos no Brasil: Sua evolução nos últimos anos*. IN CBDB. *A História das Barragens no Brasil, Séculos XIX, XX e XXI : cinquenta anos do Comitê Brasileiro de Barragens*. Rio de Janeiro, 2011.

PORTES, A. M. C. *Avaliação da disposição de rejeitos de minério de ferro nas consistências polpa e torta*. Belo Horizonte: Curso de Mestrado em Geotecnia e Transportes, Universidade Federal de Minas Gerais, 2013, 154 p. (Dissertação de Mestrado).

QUISPE, L. M. C. *Consolidação de um rejeito de mineração de areia e modelação do enchimento de um reservatório para sua disposição*. São Carlos: Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2011. (Dissertação de Mestrado).

Recursos minerais da plataforma continental brasileira e regiões oceânicas adjacentes do Atlântico Sul e Equatorial Aspectos socioeconômicos.

REZENDE, D. A. *Análise probabilística de estabilidade de taludes em barragens de rejeitos*. Trabalho de Conclusão em Engenharia Civil. Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

RICO, M. BENITO; G. SALGUEIRO; A. R. DIEZ-HERRERO A; PEREIRA H. G. *Reported Tailings Dam Failures: A Review of the European Incidents in the Worldwide Context*. Elsevier, Netherlands, 2007.

ROCHA, F. F. *Retroanálise da ruptura da barragem São Francisco – Miraí, Minas Gerais, Brasil*. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

ROCHA, S. A. M. *Instrumentação e Monitoramento de estruturas geotécnicas na rede ferroviária nacional – Estudo de caso do talude de aterro entre os Km's 236+450 e 236+720 da Linha do Sul*. (Dissertação de Mestrado). INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA, Lisboa, 2014.

SAMPAIO, J. A. e ALMEIDA, S. L. M. *Tratamento de Minérios*. 4a ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2004.

SANDRONI, S., 2012, “*Notas de aula da disciplina de Barragens de Terra e Enrocamento*”. Curso de Mestrado da COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.

PEREIRA, E. L. *Estudo do potencial de liquefação de rejeitos de minério de ferro sob carregamento estático*. Dissertação de Mestrado. Escola de Minas. Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Ouro Preto, 2005.

PEREIRA, J.M e MELO, C.R. *Notas de aula- aula prática 6 de hidrometria*. Universidade Federal de Lavras, Minas Gerais, 2010.

SCHNELRATH, J; CORREIA, J.C.G; GUIMARÃES, R.C.; TEIXEIRA, S.H.A. *Serrana/Mina Araxá. In: Usinas de Beneficiamento de Minérios do Brasil*, Editores João A. Sampaio, Adão Benvindo da Luz e Fernando F. Lins, p. 345-357, CETEM/2001.

Serviço Geológico do Estado do Rio de Janeiro Departamento de Recursos Minerais do Estado do Rio de Janeiro (2014).

SILVA, J. P. S. *Avaliação da influência do regime de fluxo no comportamento geotécnico de uma barragem de rejeito alteada pelo método de montante*. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2014.

SILVEIRA, J.F.A. *Instrumentação e segurança de barragens de terra e enrocamento*. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

TUIHEF, P.C- *A mineração como fator preponderante na economia brasileira* (Dissertação de mestrado). Juiz de Fora, Minas Gerais, 2014.

SMITH, E.S., AND CONNELL, D.H. *The role of water in the failure of tailings dams*. Mine drainage: San Francisco, Miller Freeman Publications, 1979.

USACE – U. S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. Hydrologic Engineering Center. Training Documents – Using HEC-RAS for Dam Break Studies. TD-39, 2014.

USEPA. *Desing and evaluation of tailings dams*. Technical report, U.S. Environmental Protection Agency (EPA), Washington, USA, 1994.

VALADÃO, G.E.S.; ARAUJO, A.C. *Introdução ao tratamento de minérios*. Belo Horizonte: Ed. UFMG, 2007.

VALERIUS, M. B. *Cadastro e análise do potencial de risco das barragens de rejeitos de mineração do estado de Goiás*. Dissertação de mestrado. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2014.

VANDEN BERGHE, J.; BALLARD, J.; WINTGENS, J.; LIST, B. *Geotechnical risks related to tailings dam operations*. Proceedings Tailings and Mine Waste, Vancouver, Canadá, 2011.

VENKATRAMAN, P.; Knoll, F. S. e Lawver, J.E. *Magnetic and electrostatic separation. In: Principles of Mineral Processing*, Eds. Fursteneau, SME Editors, 2006.

VICK, S. G. *Planning, Design and Analysis of Tailings Dams*. Wiley Int., New York, USA 1983.

VILLELA, M. *Sócios da Herculano Mineração são indiciados por homicídio doloso por tragédia em Itabirito*. Brasil, 2015.

WEISS, N.L. – *Mineral Processing Handbook*. Society of Mining Engineers, 1985.

