



**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS  
UNIDADE ARAXÁ**

**LAURA URSINO PEREIRA VINAUD**

**BARRAGENS DE REJEITO DE MINERAÇÃO EM MINAS GERAIS:  
LISTAS DE VERIFICAÇÃO DE ASPECTOS TÉCNICOS, LEGAIS E  
AMBIENTAIS.**

**ARAXÁ/MG**

**2019**

**LAURA URSINO PEREIRA VINAUD**

**BARRAGENS DE REJEITO DE MINERAÇÃO EM MINAS GERAIS:  
LISTAS DE VERIFICAÇÃO DE ASPECTOS TÉCNICOS, LEGAIS E  
AMBIENTAIS.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Minas, do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Minas.

Orientador: Prof. Dr. Hildor José Seer  
Coorientador: Prof. Dr. Felipe de Moraes Russo

**ARAXÁ/MG**

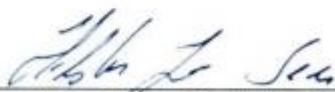
**2019**

LAURA URSINO PEREIRA VINAUD

**BARRAGENS DE REJEITO DE MINERAÇÃO EM MINAS GERAIS: LISTAS DE VERIFICAÇÃO DE ASPECTOS TÉCNICOS, LEGAIS E AMBIENTAIS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Minas do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG como requisito parcial para a obtenção de grau de bacharel em Engenharia de Minas.

Araxá, 05 de dezembro de 2019



\_\_\_\_\_  
**Presidente e Orientador: Prof. Dr. Hildor José Seer**  
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Unidade Araxá

\_\_\_\_\_  
**Membro Titular e Coorientador: Prof. Dr. Felipe de Moraes Russo**  
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Unidade Araxá



\_\_\_\_\_  
**Membro Titular: Prof. Me. Allan Erlichman Medeiros Santos**  
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Unidade Araxá



\_\_\_\_\_  
**Membro Titular: Prof. Me. Fernando Brandão Rodrigues da Silva**  
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG – Unidade Araxá

À minha família,  
Rosa, Lázaro, Ítala, Karla,  
Cecília, Melissa e Augusto.

E ao meu namorado,  
Gabriel.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por me permitir esta oportunidade e por não me faltar nos momentos mais difíceis.

À minha linda e amada família: Rosa, minha mãe e melhor amiga, obrigada pelo apoio, preocupação, carinho e dedicação que nunca me faltaram; Lázaro, meu pai e minha maior saudade, obrigada por ter me ensinado a humildade e a perseverança, toda a minha vida é e sempre será dedicada a você; minhas irmãs Ítala e Karla, obrigada pelo constante carinho, incentivo e ajuda; aos meus amados sobrinhos, Cecília, Melissa e Augusto, obrigada por sempre me trazerem a paz, o amor e a felicidade. Eu amo muito vocês!

Ao meu namorado Gabriel, que esteve ao meu lado em todos os momentos, com muito carinho, parceria, apoio e dedicação, obrigada por tudo!

Ao prof. Hildor José Seer, minha imensa gratidão por toda a atenção e compreensão dispensadas ao longo de todo o curso;

Ao prof. Felipe de Moraes Russo, agradeço a disposição e atenção;

Aos professores do curso de Engenharia de Minas do CEFET Araxá, muito obrigada pelos ensinamentos para me formarem Engenheira de Minas.

## RESUMO

A produção minerária é associada ao grande volume de rejeitos produzidos durante o tratamento de minérios que, atualmente, são dispostos em barragens de aterro hidráulico. Estas estruturas possuem peculiaridades técnicas, legais e ambientais que influenciam de forma integrada à eficiente gestão de sua segurança. O presente trabalho buscou uma análise criteriosa de referências bibliográficas para levantamento geral destas peculiaridades, estruturando os principais pontos acerca destas na forma de Listas de Verificação, podendo servir como consulta para profissionais e pesquisadores da área. Em relação aos aspectos técnicos, observou-se que os rejeitos são transportados da usina por tubulações e classificados através do uso de hidrociclones antes de sua descarga na barragem. Podem ter o maciço com seção homogênea, heterogênea ou mista, sendo construído via método de montante, jusante ou linha de centro. Vários são os documentos que devem ser disponibilizados acerca de seu processo construtivo ou procedimento operacional. O monitoramento e inspeção dos componentes da barragem como a crista, taludes, extravasor, tubulações, área de praia e reservatório deve ser qualitativo e quantitativo, gerando informações que contribuem significativamente para a investigação da situação de segurança dos barramentos. Os principais fenômenos que geralmente conduzem ao rompimento de barragens de rejeito são a percolação descontrolada de água pelo maciço, ocorrência de deslocamentos e deformações na estrutura, erosão superficial, liquefação e galgamento. A responsabilidade da gestão e fiscalização de barragens, de forma a manter sua segurança, é compartilhada pelo empreendedor, por órgãos federais (ANM, IBAMA, ANA, CNRH) e, em Minas Gerais, por órgãos estaduais (COPAM, CERH, FEAM, IGAM), utilizando de instrumentos como o PSB, Auditoria Técnica Extraordinária de Segurança, Adequação das Condições de Estabilidade, Licenciamento Ambiental, CTF/APP e CTF/AIDA.

**Palavras chave: Barragens de rejeito. Segurança. Gestão.**

## **ABSTRACT**

Mining production is directly associated with large volume of tailings, which are produced during ore treatment and are currently disposed of in hydraulic landfill dams. These structures have technical, legal and environmental peculiarities that influence the efficient management of their safety in an integrated way. This paper sought a careful survey of bibliographical references for these peculiarities, structuring their main points in Checklists, which can be a way of research for professionals in the area. Regarding technical aspects, it was observed that tailings are transported from the plant by pipelines and classified using hydrocyclones before their discharge into the dam. Its section can be homogeneous, heterogeneous or mixed constructed by upstream, downstream or centerline methods. Several documents should be available regarding its construction process or operating procedure. Monitoring and inspection of dam's components such as ridge, slopes, overflow, pipes, beach area and pond must be qualitative and quantitative, producing information that highly contributes to investigate its safety status. The main phenomena that usually lead to tailings dam's disruption are the uncontrolled percolation through its section, the occurrence of dislocations and deformations in the structure, surface erosion, liquefaction and overtopping. The responsibility of dam management and supervision, in order to maintain its safety, is shared by its owner, federal agencies (ANM, IBAMA, ANA, CNRH) and, in Minas Gerais, state agencies (COPAM, CERH, FEAM, IGAM), using instruments such as PSB, Extraordinary Technical Security Audit, Adequacy of Stability Conditions, Environmental Licensing, CTF/APP and CTF/AIDA.

**Keywords: Tailings dams. Safety. Management.**

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Fluxograma típico do beneficiamento de minérios.....	17
Figura 2. Produção Mineral Brasileira, exceto petróleo e gás, no período 1994-2017. ....	20
Figura 3. Quantidade final de trabalhadores do período por último dia de cada ano-base. ....	21
Figura 4. Classificação das minas brasileiras por produção ROM.....	21
Figura 5. Participação percentual das substâncias minerais em exportações brasileiras no ano de 2017. ....	23
Figura 6. Contribuição de atividades econômicas na economia mineira, em porcentagem. ....	24
Figura 7. Localização de bens minerais no estado de Minas Gerais, por mesorregião. ....	24
Figura 8. Participação nas exportações dos bens minerais para o estado de Minas Gerais em 2017. ....	25
Figura 9. Esquema geral do processo de beneficiamento do minério bruto.....	26
Figura 10. Constituintes gerais de uma barragem de rejeito. ....	28
Figura 11. Esquema básico de um hidrociclone. ....	29
Figura 12. Técnicas de descarga de rejeitos em barragens. (a) Por ponto único; (b) Em linha. ....	30
Figura 13. Seção típica de barragem homogênea. ....	31
Figura 14. Seção típica de barragem heterogênea. ....	31
Figura 15. Seção típica de barragem mista. ....	32
Figura 16. Barragem de rejeito via método de montante. ....	32
Figura 17. Barragem de rejeito via método de jusante. ....	34
Figura 18. Barragem de rejeito via método da linha de centro.....	35
Figura 19. Anomalias observadas por inspeções nos taludes de barragens.....	38
Figura 20. Anomalias observadas por inspeções em cristas de barragens. ....	39
Figura 21. Linha de fluxo em barragem de rejeito com ausência de drenagem interna. ....	41
Figura 22. Progressão de uma ruptura por piping em barragem. ....	41
Figura 23. Etapas da formação de erosão regressiva tubular. ....	42
Figura 24. Etapas da formação de erosão regressiva global.....	42
Figura 25. <i>Cut off</i> em barragem heterogênea. ....	43
Figura 26. Tipos de filtros e drenos utilizados em barragens de aterro.....	44
Figura 27. Poços de alívio para controle de fluxo em barragem. ....	44

Figura 28. Rachadura provocada por deslocamento vertical.....	46
Figura 29. Uso de <i>rip-rap</i> em talude de montante de barragem de rejeitos. ....	48
Figura 30. Camadas de <i>rip-rap</i> .....	48
Figura 31. Liquefação em barragens de rejeito. ....	50
Figura 32. Exemplo de análise de estabilidade de talude via SLOPE/W, indicando FS para cada superfície de ruptura e FS global. ....	53
Figura 33. Relação de órgãos fiscalizadores de barragens brasileiras.....	55
Figura 34. Estrutura dos órgãos fiscalizadores na PNSB. ....	57
Figura 35. Sequência das etapas para obtenção das Listas de Verificação. ....	69

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Quantidade de autorizações para pesquisa mineral, concessão de lavra e permissão para lavra garimpeira por região brasileira. ....	14
Tabela 2. Quantidade de autorizações para pesquisa mineral, concessão de lavra e permissão para lavra garimpeira por substância. ....	15
Tabela 3. Bens minerais produzidos no Brasil. ....	22
Tabela 4. FS mínimos aceitáveis para barragens de rejeito de mineração. ....	53
Tabela 5. Documentos técnicos compilados no PSB. ....	60
Tabela 6. Etapas necessárias para requisição de Licença Ambiental em Minas Gerais. ....	67
Tabela 7. Conteúdo das Listas de Verificações. ....	69
Tabela 8. Lista de verificação de aspectos construtivos e operacionais de barragens de rejeito .....	70
Tabela 9. Lista de verificação para monitoramento e inspeção de barragens de rejeito. ....	72
Tabela 10. Lista de verificação de condicionantes ao rompimento de barragens de rejeito. ...	73
Tabela 11. Lista de verificação de responsabilidades atribuídas à gestão de barragens de rejeito no Brasil e em Minas Gerais. ....	74
Tabela 12. Lista de verificação do conteúdo dos instrumentos legais e ambientais aplicáveis à gestão de barragens de rejeito no Brasil e em Minas Gerais. ....	75

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	12
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	13
2.1 Mineração .....	13
2.1.1 Etapas .....	14
2.1.2 Panorama Brasileiro.....	19
2.1.3 Panorama no estado de Minas Gerais .....	23
2.2 Barragens de Rejeito .....	25
2.2.1 Considerações técnicas.....	28
2.2.1.1 Construção e operação.....	28
2.2.1.2 Monitoramento e inspeção.....	36
2.2.1.3 Condicionantes ao rompimento.....	40
2.2.2 Considerações legais e ambientais .....	54
2.2.2.1 Órgãos responsáveis.....	54
2.2.2.2 Política Nacional de Segurança de Barragens .....	58
2.2.2.3 Resolução nº 2.372/16 .....	61
2.2.2.4 Projeto de Lei nº 3.913/19 .....	62
2.2.2.5 Licenciamento ambiental .....	63
<b>3. METODOLOGIA</b> .....	68
<b>4. RESULTADOS</b> .....	70
4.1 Lista de verificação de aspectos construtivos e operacionais de barragens de rejeito .....	70
4.2 Lista de verificação para monitoramento e inspeção de barragens de rejeito .....	72
4.3 Lista de verificação de condicionantes ao rompimento de barragens de rejeito.....	73
4.4 Lista de verificação de responsabilidades atribuídas à gestão de barragens de rejeito no Brasil e em Minas Gerais .....	74
4.5 Listas de verificação de instrumentos legais e ambientais aplicáveis à gestão de barragens de rejeito no Brasil e em Minas Gerais .....	75
<b>5. CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	76
<b>6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	78

## 1. INTRODUÇÃO

A elaboração de projetos eficientes e seguros para barragens de rejeito construídas via método do aterro hidráulico é uma tarefa imprescindível e complicada (RUSSO, 2007) e depende da correta gestão integrada de aspectos técnicos, legais e ambientais para comprovação de segurança.

Vários são os autores que estudaram estes aspectos de maneira específica, como será demonstrado ao longo deste trabalho e levantaram grande quantidade de informações sobre métodos construtivos de barragens de rejeito, sua operação, formas de monitoramento, inspeção e fatores que condicionam à sua ruptura. No Brasil e no estado de Minas Gerais, estas estruturas são geridas e fiscalizadas por vários órgãos federais e estaduais responsáveis, com legislações específicas e, para que estas sejam devidamente aplicáveis aos barramentos, existem vários instrumentos que devem ser adotados por seus gestores para garantia de sua segurança.

Frente à crescente pressão dos órgãos ambientais e da sociedade em geral, principalmente graças aos recentes desastres brasileiros envolvendo barragens, como os casos de Mariana (MG) e Brumadinho (MG), a busca pela disposição segura de rejeitos minerários, visando à redução de impactos ambientais, sociais e riscos, à saúde e qualidade de vida em geral, têm sido cada vez maior.

Portanto, o objetivo geral deste trabalho é realizar uma revisão bibliográfica para levantamento geral dos principais aspectos técnicos, legais e ambientais relacionados às barragens de rejeito no Brasil e no estado de Minas Gerais. Para isso, serão estudadas referências em relação à construção, operação, monitoramento, inspeção e condicionantes ao rompimento de barragens de rejeito de mineração. Além destas, serão levantadas informações gerais sobre os principais órgãos brasileiros e mineiros relacionados à gestão de barragens de rejeito de mineração, sua legislação aplicada e instrumentos para sua implementação tais como a Política Nacional de Segurança de Barragens, a Resolução nº 2.372/16, o Projeto de Lei nº 3.913/19 e o Licenciamento Ambiental.

No Capítulo 2 deste trabalho será apresentada a revisão bibliográfica realizada sobre a mineração e suas etapas, o panorama da mineração no Brasil e no estado de Minas Gerais, considerações técnicas sobre a construção, operação, monitoramento, inspeção, fatores condicionantes ao rompimento de barragens de rejeito, órgãos federais e estaduais responsáveis pela gestão destes barramentos, assim como a legislação e seus instrumentos aplicáveis à estas estruturas, com foco na Política Nacional de Segurança de Barragens, Resolução nº 2.372/16, Projeto de Lei nº 3.913/19 e no Licenciamento Ambiental.

O Capítulo 3 apresentará a metodologia utilizada para realização da revisão bibliográfica e obtenção das Listas de Verificação, o Capítulo 4 apresentará as Listas de Verificações obtidas, o Capítulo 5 descreverá as considerações finais deste trabalho e o Capítulo 6 demonstrará as referências bibliográficas utilizadas por este estudo.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1. Mineração**

Dentre as atividades antrópicas mais modificadoras do meio ambiente, a mineração é destaque nos cenários nacional e internacional, no entanto, é imprescindível como fornecedora de matérias primas para diversos setores de produção. Segundo Farias (2002), durante a conferência “Rio+10”, a mineração foi considerada atividade crucial para o desenvolvimento econômico e social de vários países, já que produz substâncias minerais consideradas essenciais para manter o modelo da vida moderna.

No documento final produzido por esta conferência, nomeado “O futuro que queremos”, a importância da mineração no mundo moderno pode ser resumida nos seguintes pontos (IBRAM, 2016):

- A importância dos minerais e dos metais para a economia mundial e para as sociedades modernas, particularmente para os países detentores de recursos minerais e os em desenvolvimento;
- O direito soberano dos países na exploração e no aproveitamento desses seus recursos de acordo com suas prioridades nacionais;
- A responsabilidade que têm de conduzir essas atividades maximizando os benefícios sociais e econômicos, bem como de enfrentar os impactos ambientais e sociais negativos que delas possam decorrer;
- A forte demanda aos Governos quanto à capacidade para desenvolver, administrar e regular as indústrias de mineração de seus países no interesse do desenvolvimento sustentável;
- A importância de estruturas legais e regulatórias, de políticas e práticas sólidas e efetivas para a mineração que tragam benefícios econômicos e sociais e incluam salvaguardas que reduzam os impactos ambientais, bem como conservem a biodiversidade e os ecossistemas, inclusive no pós-fechamento das minas.

A aplicação do uso dos minerais é bastante ampla, sendo utilizados como matérias-primas pela indústria automotiva, na produção de equipamentos eletrônicos, tintas, abrasivos,

lâmpadas, pigmentos, fertilizantes, isolantes térmicos, plástico, dentre vários outros usos (BRANCO, 2008). Para a confecção dos produtos provenientes da mineração, os minérios brutos passam por uma série etapas operacionais, desde a saída da mina até sua comercialização.

### 2.1.1. Etapas

A mineração abrange as atividades de pesquisa, desenvolvimento da mina, lavra, beneficiamento, comercialização dos concentrados minerais, condicionamento e/ou aproveitamento de rejeitos e estéreis e fechamento da mina (BRASIL, 2018).

A etapa de pesquisa mineral envolve atividades de levantamentos geológicos, estudos de afloramento, levantamentos geoquímicos e geofísicos, sondagens, amostragens e análises físico-químicas, todas com o objetivo de se conseguir definir a jazida e avaliar a viabilidade econômica do seu aproveitamento.

Segundo o Anuário Mineral Brasileiro (DNPM, 2017), foram concedidas 3.138 autorizações para pesquisa mineral no Brasil no ano de 2017 e, em Minas Gerais, as autorizações chegaram a 361 para este mesmo ano.

A Tabela 1 demonstra a quantidade de autorizações para pesquisa mineral, concessão de lavra e permissão para lavra garimpeira por região brasileira. Já a Tabela 2 indica estas autorizações por tipo de substância explorada.

Tabela 1. Quantidade de autorizações para pesquisa mineral, concessão de lavra e permissão para lavra garimpeira por região brasileira.

<b>Região / UF</b>	<b>Autorização de pesquisa</b>	<b>Concessão de lavra</b>	<b>Permissão de lavra garimpeira</b>
Brasil	3.138	23	2.111
Centro-Oeste	979	8	88
Nordeste	1.089	5	1
Norte	551	6	121
Sudeste	435	2	1
<b>Minas Gerais</b>	<b>361</b>	<b>2</b>	<b>1</b>
Sul	84	2	0

Fonte: Adaptado do DNPM, 2017.

Tabela 2. Quantidade de autorizações para pesquisa mineral, concessão de lavra e permissão para lavra garimpeira por substância.

<b>Substância</b>	<b>Autorização de pesquisa</b>	<b>Concessão de lavra</b>	<b>Permissão de lavra garimpeira</b>
<b>Total</b>	<b>3.138</b>	<b>23</b>	<b>211</b>
Alumínio	42	0	0
Cobre	413	0	0
Cromo	2	1	0
Estanho	99	0	7
Ferro	371	4	0
Manganês	160	3	0
Nióbio	39	1	1
Níquel	195	0	0
Ouro	1.423	14	203
Vanádio	6	0	0
Zinco	388	0	0

Fonte: Adaptado do DNPM, 2017.

É possível notar que quase 83% das autorizações de pesquisa cedidas em 2017 para a região sudeste são oriundas do estado de Minas Gerais e, dentre as substâncias mais pesquisadas, o ouro é destaque, representando pouco mais de 45% do total no país.

Outra importante etapa da mineração, o chamado desenvolvimento de mina, compreende as atividades de infraestrutura e possibilita a lavra de uma jazida mineral, através da abertura de acessos, galerias, rampas, áreas de deposição controlada de estéril, lagoas de rejeito, dentre outros (FERREIRA, 2013).

Sánchez (2012) afirma que, apesar do desenvolvimento de mina ser considerado etapa anterior à de lavra, esta divisão não é clara cronologicamente, mas é realizada graças a motivos administrativos e tecnológicos. O investimento para execução das atividades de desenvolvimento é alto, portanto, deve estar de acordo com o método de lavra escolhido.

Já na etapa de lavra, o minério é extraído da superfície, no caso da lavra a céu aberto ou, por meio de aberturas subterrâneas, no caso da lavra subterrânea. Para isso, são executados trabalhos de perfuração e desmonte de rochas, carregamento e transporte do minério bruto para a usina de beneficiamento (CARLI, 2013).

O método de lavra é um dos principais fatores a se analisar sobre a viabilidade econômica de uma mina, e consiste na técnica de extração do material, por meio de atividades de planejamento, dimensionamento, execução harmônica e lógica de tarefas, seja para mina a céu aberto ou para a subterrânea. Vários são os fatores que influenciam na escolha do método de lavra, dentre eles, estão a geometria, mergulho, profundidade e espessura do depósito; características do minério; presença de água superficial ou subterrânea; além de parâmetros geotécnicos, ambientais, econômicos (MACÊDO et al, 2001).

Segundo o mesmo autor, os principais métodos de lavra são aqueles realizados na forma fluida, por lixiviação e dissolução e os realizados na forma sólida, englobando:

- Lavra por bancadas: O minério é escavado na forma de bancos, utilizado em depósitos mais regulares e é responsável por mais de 60% da lavra a céu aberto;
- Lavra por tiras: Muito utilizado para corpos de minério dispostos horizontalmente, com maiores larguras e menores espessuras;
- Lavra aluvionar: Utilizado para mineração em corpos d'água, através de dragagem do minério.

Na mineração subterrânea, os métodos de lavra mais utilizados são as auto-suportadas, artificialmente suportadas, desabamento controlado de teto e métodos mistos (IBRAM, 2008).

Outra etapa importante da indústria minerária é o beneficiamento ou, como também é chamado, tratamento de minérios, que tem o objetivo de adequar a granulometria e efetuar a concentração dos minérios, sem alteração da composição química dos minerais, para um produto final com maior teor em mineral-minério. No tratamento de minérios, o minério-bruto, proveniente da lavra da mina, caminha por uma sequência de operações unitárias que, geralmente, englobam (LUZ E LINS, 2010):

- Cominuição: Busca a redução granulométrica do material, sendo composta por etapas de britagem e moagem;
- Peneiramento e Classificação: Utilizado para a classificação do material em faixas granulométricas específicas;
- Concentração: Tem o objetivo de separar o mineral-minério e a ganga, obtendo, portanto, maior teor de elemento útil no produto final;
- Desaguamento: É utilizado para a remoção de grande quantidade de água que é incorporada durante as outras operações, compreende as etapas de espessamento e filtragem;
- Secagem: Visa à adequação da umidade final do produto de interesse;

• Disposição de rejeitos: No caso de lavra a céu aberto, esta disposição é geralmente realizada em barragens e para as minas subterrâneas, pode ocorrer em cavas ou galerias. A Figura 1 ilustra as etapas subsequentes típicas do tratamento de minérios.

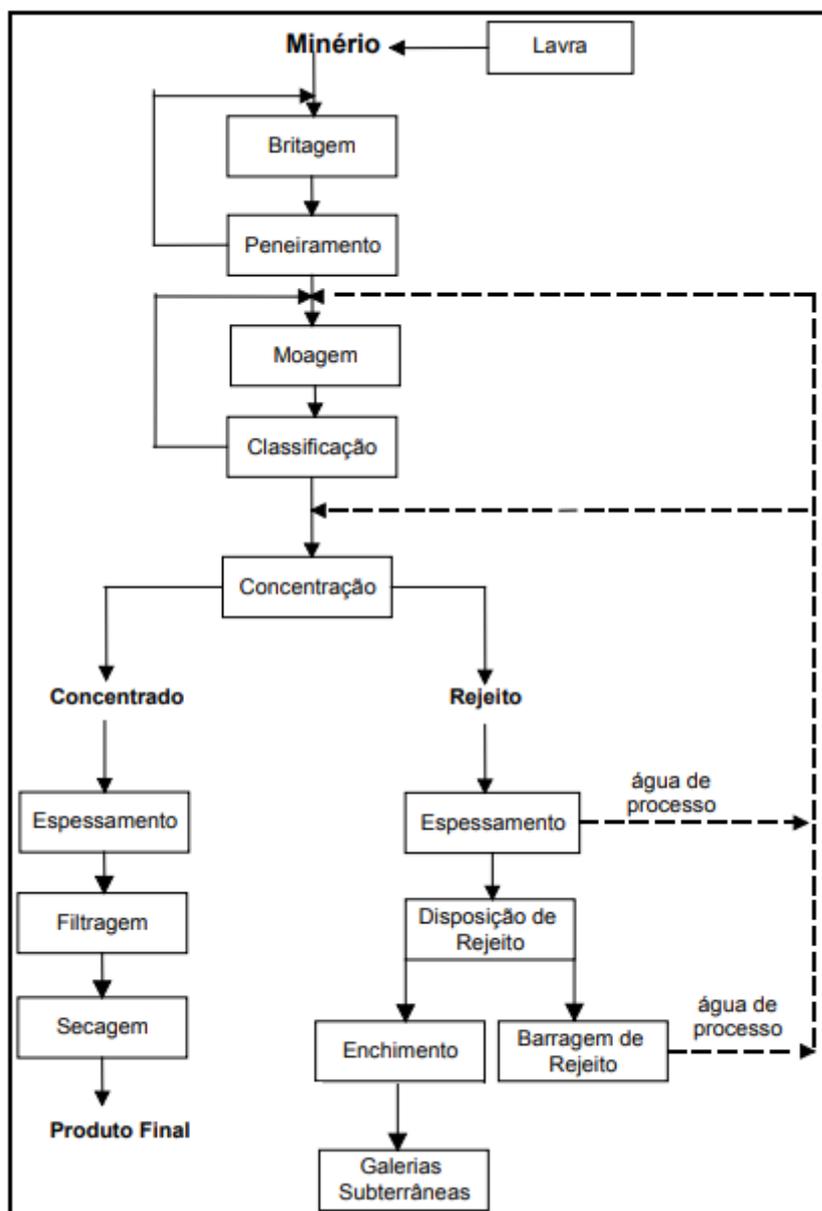


Figura 1. Fluxograma típico do beneficiamento de minérios.

Fonte: LUZ E LINS, 2010.

Após o beneficiamento o produto final segue para a comercialização ou para etapas subsequentes, como tratamento em indústrias químicas e siderúrgicas, enquanto os rejeitos são reaproveitados ou dispostos adequadamente. No Brasil, a comercialização de produtos minerais depende de políticas públicas, que são competências da União e da Agência Nacional de

Mineração (ANM). Desta forma, as empresas que forem titulares de direitos minerários, são obrigadas a apresentarem à ANM informações sobre (BRASIL, 2018):

- O volume da produção e as características qualitativas dos produtos;
- As condições técnicas e econômicas da execução dos serviços ou da exploração das atividades, as análises químicas e os laudos técnicos;
- Os mercados e os preços de venda;
- A quantidade e as condições técnicas e econômicas do consumo de produtos minerais.

Segundo dados da Agência Nacional de Mineração (ANM), em 2015, o país comercializou R\$ 67.5 bilhões em bens minerais, incluindo alumínio, cobre, estanho, ferro, manganês, nióbio e níquel, sendo que as substâncias da classe dos minerais metálicos representaram cerca de 76% deste valor (DNPM, 2018).

Aqueles materiais não comercializados, os rejeitos e estéreis, gerados nas variadas etapas da indústria minerária são estimulados ao reaproveitamento pelo Ministério de Minas e Energia (MME) e pela ANM, inclusive através de aditamento ao título por meio de processo simplificado.

Os rejeitos são efluentes líquidos da mineração e, segundo Feng et al. (2004), geralmente possuem aspecto turvo, contém partículas de pequeno tamanho, dispersas e com baixa capacidade de sedimentação, conferindo elevada turbidez ao líquido e causando necessidade de tratamento para reuso no processo industrial ou lançamento em corpos d'água.

O método comumente empregado para o tratamento de rejeitos líquidos dos setores mineiro e metalúrgico é a decantação em bacias de rejeitos (LUZ et al., 2010), sendo este um conjunto de sistemas múltiplos de disposição de rejeitos, captação, recirculação de água e tratamento de efluentes. Nas barragens, o principal objetivo é decantar os sólidos suspensos do líquido, visando à separação de fases, para que o líquido possa ser reutilizado como água de recirculação no processo ou adequado para que possua a qualidade necessária para lançamento nos corpos d'água (ANA, IBRAM, 2006).

Outro tipo de material gerado nas etapas da mineração são os estéreis que, segundo Aragão (2008), são agregados naturais, compostos por um ou mais minerais, não possuem expressivo valor econômico para venda e são retirados da mina durante a lavra do minério.

Antigamente, no Brasil, este material era descartado de maneira desordenada e, a partir dos anos 80, os depósitos de estéreis passaram a ser planejados. A partir de 2016, no estado de

Minas Gerais, foram definidos novos critérios para o reaproveitamento destes, segundo a quantidade de material a ser retirada, em toneladas/ano (COPAM, 2018).

A última etapa da mineração é o fechamento da mina, que pode incluir, dentre outros, as etapas de (BRASIL, 2018):

- Recuperação ambiental da área degradada;
- Desmobilização das instalações e dos equipamentos que compõem a infraestrutura do empreendimento;
- Aptidão e o propósito para o uso futuro da área;
- Monitoramento e o acompanhamento dos sistemas de disposição de rejeitos e estéreis, da estabilidade geotécnica das áreas mineradas e das áreas de servidão, do comportamento do aquífero e da drenagem das águas.

O Instituto Brasileiro de Mineração recomenda boas práticas relacionadas ao planejamento para fechamento de uma mina (IBRAM, 2013), sendo que suas principais diretrizes são:

- O plano de fechamento deve iniciar desde a concepção da mina;
- O fechamento da mina é de responsabilidade da empresa, que deve planejá-lo ainda em atividade;
- Devem ser envolvidas no plano de fechamento as partes interessadas tanto internas quanto externas;
- Todos os resultados de planejamento devem ser registrados;
- A empresa deve estimar os custos relacionados ao fechamento;
- A empresa deve acompanhar localmente o desenvolvimento socioeconômico;
- O plano de fechamento deve ser sempre revisto, atualizando o projeto de fechamento sempre que houver modificações nas condições de entorno.

### 2.1.2. Panorama Brasileiro

No Brasil, a atividade de mineração remonta à época colonial e, a partir do século XVIII, aconteceu seu primeiro grande crescimento no país, consolidando-se no decorrer dos anos e chegando ao século XXI com grande expressividade no setor produtivo brasileiro (BRASIL, 2001).

Segundo o Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM, 2018), o crescimento da produção mineral brasileira entre os anos de 2000 e 2008 foi de aproximadamente U\$ 20 bilhões

de dólares, o que representa um crescimento de 250%, reflexo do elevado índice de crescimento mundial, que resultou em uma maior procura por bens minerais. Em 2009 houve um declínio no setor, fruto da crise mundial, mas no ano seguinte, a mineração já se recuperou, atingindo cerca de US 39 bilhões de dólares.

Em 2016, a produção mineral brasileira apurada pelo IBRAM foi de US\$ 24 bilhões, sendo esta queda fruto da variação do preço internacional das principais commodities. Em 2017, houve uma boa recuperação do setor, atingindo os R\$32 bilhões. A Figura 2 demonstra esta produção ao longo dos anos.

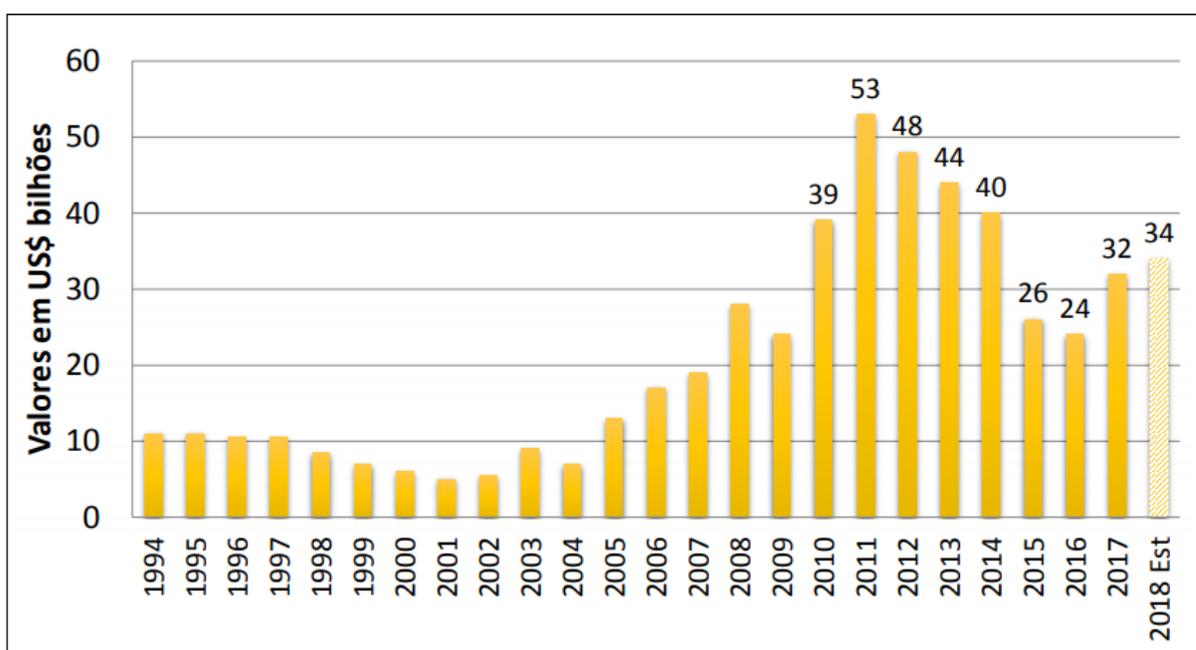


Figura 2. Produção Mineral Brasileira, exceto petróleo e gás, no período 1994-2017.

Fonte: IBRAM, 2018.

Atualmente, a Indústria Mineral Extrativa, considerando petróleo e gás, representa cerca de 4% do PIB brasileiro, atuando em 9,4% do total de exportações nacionais. Em 2014, a mineração atingiu mais de US\$ 34 bilhões em exportações de minérios, fato que refletiu o intenso investimento na área de produção de bens minerais.

Este setor é responsável por elevada oferta de empregos diretos e indiretos no Brasil. Em 2018, a mineração empregou mais de 180 mil funcionários diretamente no país (IBRAM, 2019), conforme demonstra a Figura 3.

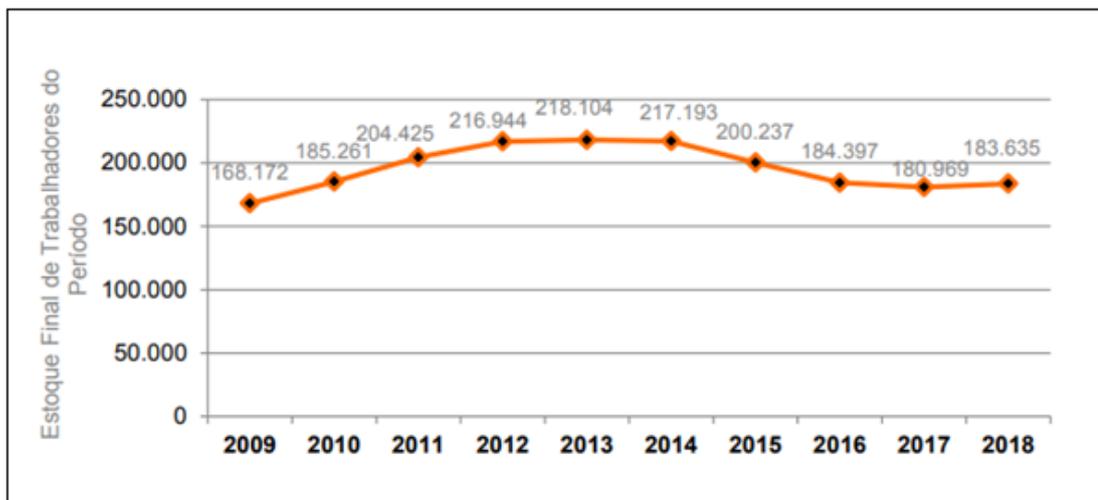


Figura 3. Quantidade final de trabalhadores do período por último dia de cada ano-base.

Fonte: IBRAM, 2019.

No país, existem 9.415 minas em operação e, segundo sua produção bruta (“ROM”), 154 minas produzem mais de 1 milhão de ton/ano, sendo classificadas como de grande porte; 1.037 produzem entre 1 milhão e 100 mil ton/ ano, classificadas como de médio porte; 2.809 geram entre 100 mil e 10 mil ton/ ano, sendo estas de pequeno porte e a maior porcentagem das minas brasileiras, 57%, produzem menos de 10 mil ton/ano e são consideradas de micro porte. A Figura 4 expressa esta classificação.

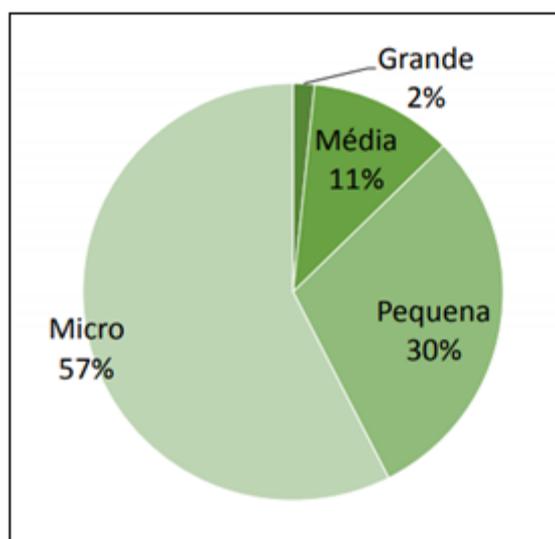


Figura 4. Classificação das minas brasileiras por produção ROM.

Fonte: IBRAM, 2018.

A maior quantidade de bens minerais produzidos pelo Brasil é de minério de ferro que, em 2017, atingiu 430 milhões de toneladas, seguido pelos agregados da construção civil, bauxita, fosfato, manganês, alumínio primário, potássio concentrado, zinco concentrado, cobre, liga de nióbio, níquel contido e ouro (IBRAM, 2018). Além destes, a produção de água mineral é bastante expressiva atingindo, para o mesmo ano, 10 bilhões de litros. A Tabela 3 expressa a produção mineral brasileira, em quilotoneladas, nos anos de 2015 a 2017.

Tabela 3. Bens minerais produzidos no Brasil.

<b>Bens minerais</b>	<b>Valores em kton 2017</b>	<b>Valores em kton 2016</b>	<b>Valores em kton 2015</b>
Água mineral (em L)	10.000.000	9.500.000	9.500.000
Agregados da construção civil	420.000	452.000	519.000
Minério de ferro	430.000	400.000	400.000
Bauxita	35.000	32.000	32.000
Fosfato	6.800	6.800	6.800
Manganês	2.400	2.400	2.400
Alumínio primário	1.000	962	962
Potássio concentrado	460	460	460
Cobre contido	335	300	250
Zinco concentrado	240	230	250
Liga de nióbio	90	90	90
Níquel contido	79	60	80
Ouro	0,095	0,093	0,082

FONTE: Adaptado de IBRAM, 2018.

Em relação ao comércio externo, o Brasil exportou mais de R\$29 bilhões de reais em 2018, sendo que ferro foi a substância mineral de maior expressividade nas exportações deste ano, seguido pelo ouro e cobre (IBRAM, 2019). A Figura 5 demonstra a participação das substâncias minerais nas exportações do país.

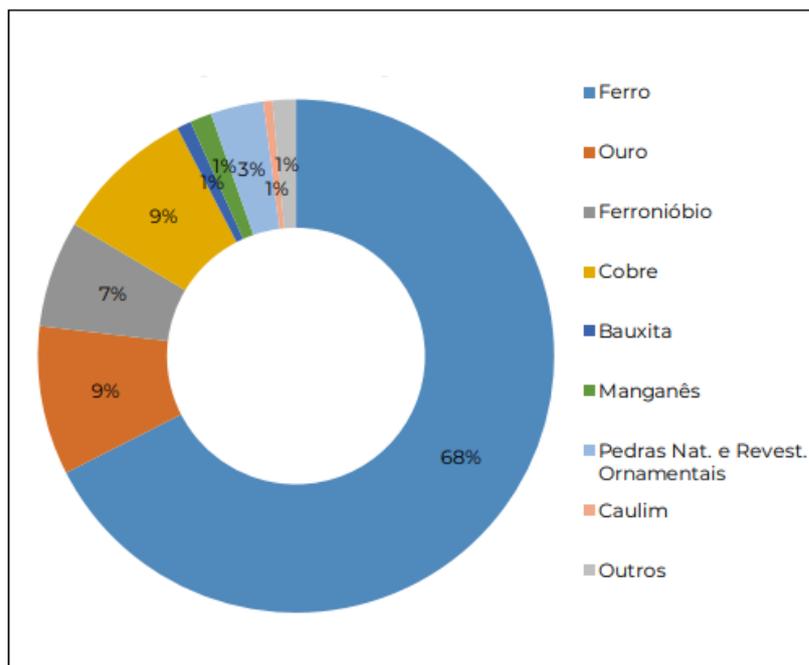


Figura 5. Participação percentual das substâncias minerais em exportações brasileiras no ano de 2017.

Fonte: IBRAM, 2018.

Atualmente, segundo o último levantamento realizado pela Agência Nacional de Mineração (ANM, 2019), o país possui 769 barragens de mineração cadastradas. Porém, destas, 344 ainda não estão inseridas na Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), ou seja, mais de 44% do total.

### 2.1.3. Panorama do estado de Minas Gerais

O início da história da mineração brasileira se confunde com o início desta no estado de Minas Gerais. A partir de 1690, ainda no período colonial, havia centenas de minerações de ouro de aluviões na região central de Minas (ALVES, 2008). Entre os anos de 1700 e 1800, a população mineira cresceu de 30 mil para 433 mil habitantes, principalmente como resultado da expressividade econômica da mineração.

Durante a Primeira República, o minério de ferro ganhou destaque e, com a Segunda Guerra Mundial, o Brasil se consolidou como fornecedor de matérias-primas, abastecendo as aciarias aliadas (ALVES, 2008).

Atualmente, a indústria extrativista minerária é consolidada no estado e engloba as atividades econômicas de extração de minerais metálicos e não metálicos, contribuindo com 8% na economia estadual (IBRAM et al., 2016), conforme indica a Figura 6.

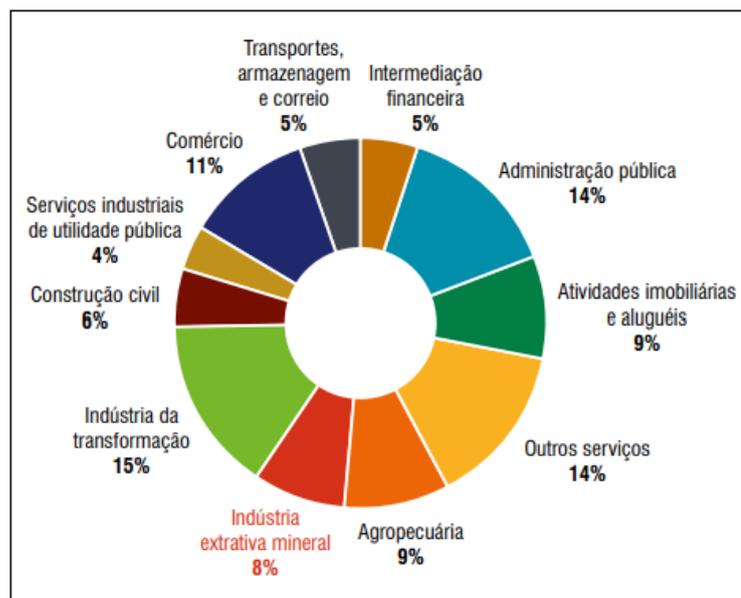


Figura 6. Contribuição de atividades econômicas na economia mineira, em porcentagem.

Fonte: IBRAM et al., 2016.

Vários são os bens minerais produzidos no estado de Minas, dentre eles estão o ferro, nióbio, ouro, diamante e fosfato (IBRAM, 2014). A Figura 7 ilustra a localização, por mesorregião, de alguns bens minerais produzidos no estado de Minas Gerais.

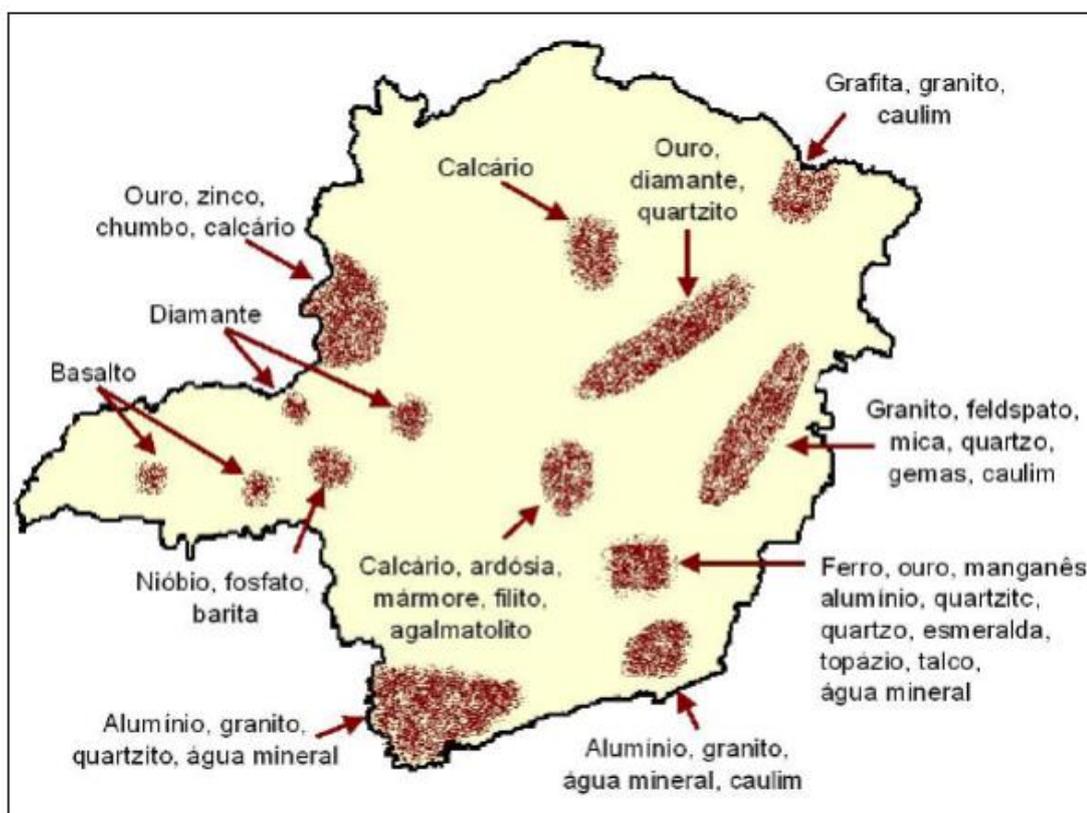


Figura 7. Localização de bens minerais no estado de Minas Gerais, por mesorregião.

Fonte: IBRAM et al., 2016.

Dentre estes bens, o ferro é o maior contribuinte nas exportações mineiras, participando em 71% do total, chegando a quase 8,7 bilhões de toneladas em 2017, seguido pelo ferronióbio, com cerca de 1,3 bilhões de toneladas no mesmo ano (IBRAM, 2018). A Figura 8 ilustra a participação das substâncias minerais das exportações do estado.

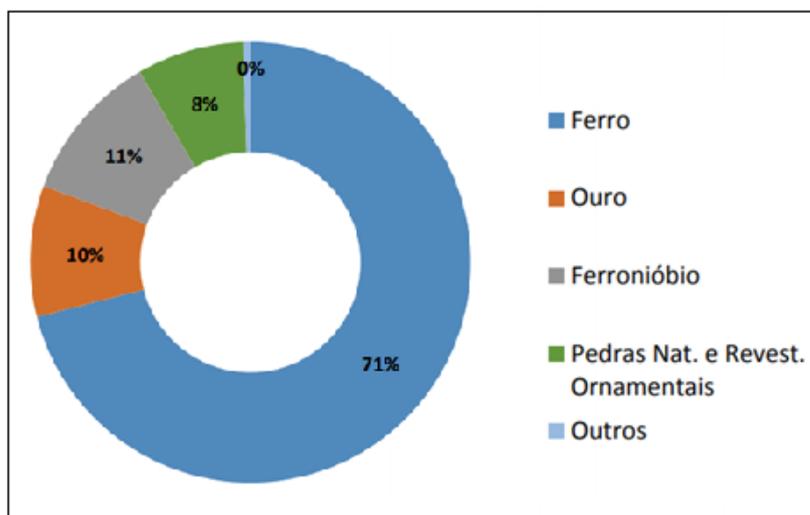


Figura 8. Participação nas exportações dos bens minerais para o estado de Minas Gerais em 2017.

Fonte: IBRAM, 2018.

Para sustentar a elevada produção minerária, grande volume de água é requerido em diversos setores da produção e suas atividades auxiliares. Segundo o Plano Estadual de Recursos Hídricos de Minas Gerais (2017), elaborado pelo IGAM, a vazão total captada de água para a mineração no estado foi de, aproximadamente, 90 m<sup>3</sup>/s, representando cerca de 20% do consumo. Após o uso nas etapas da mineração, sua qualidade é alterada, vindo a compor os rejeitos que, no estado, são armazenados em 428 barragens.

## 2.2. Barragens de rejeito

De acordo com a Resolução Conjunta SEMAD/FEAM nº 2.784, de 21 de março de 2019, as barragens são classificadas como “qualquer estrutura em um curso permanente ou temporário de água para fins de contenção ou acumulação de substâncias líquidas ou de misturas de líquidos e sólidos, compreendendo o barramento e as estruturas associadas”.

No caso específico das barragens de rejeito de mineração, a Portaria 70.389 de 17 de maio de 2017 as define como:

Barragens, barramentos, diques, cavas com barramentos construídos, associados às desenvolvidas com base em direito minerário, construídos em cota superior à da topografia original do terreno, utilizados em caráter temporário ou definitivo para fins de contenção, acumulação, decantação ou descarga de rejeitos de mineração ou de sedimentos provenientes de atividades de mineração com ou sem captação de água associada, compreendendo a estrutura do barramento e suas estruturas associadas, excluindo-se deste conceito as barragens de contenção de resíduos industriais.

Os rejeitos são gerados durante o processo de tratamento dos minérios, sendo encaminhados para as barragens para sua contenção. A Figura 9 exemplifica o processo de beneficiamento geral dos minérios, onde é possível visualizar as etapas até a produção final do rejeito e seu descarte nas barragens.

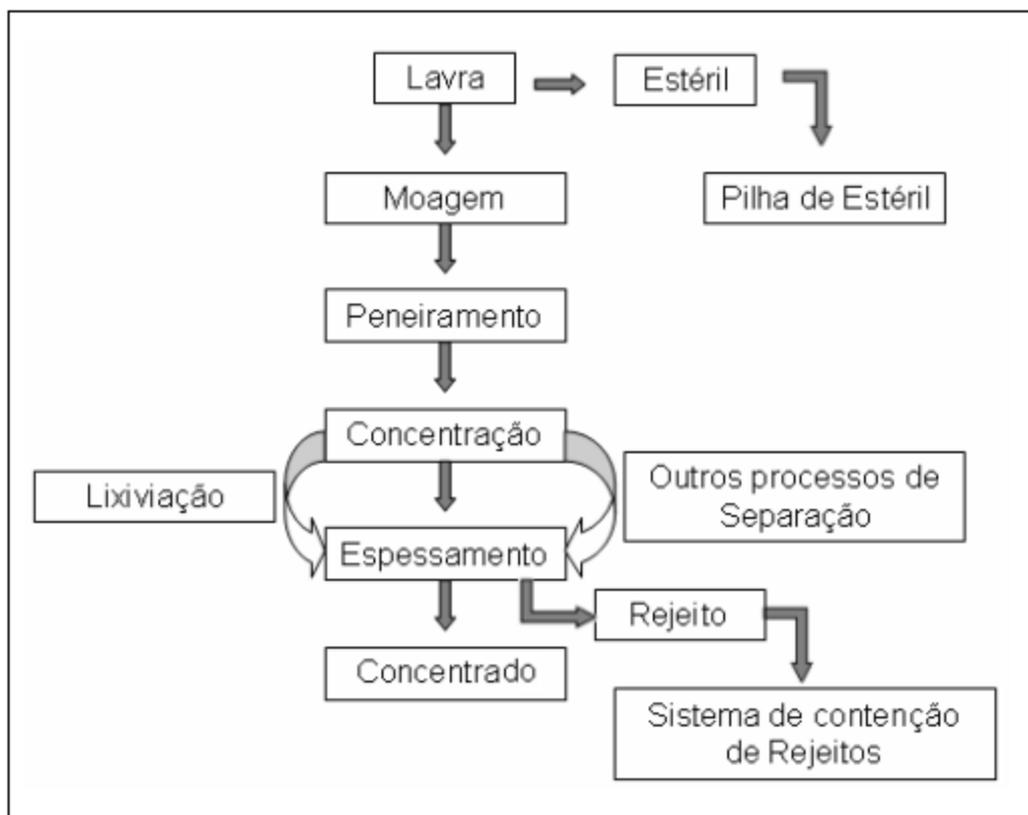


Figura 9. Esquema geral do processo de beneficiamento do minério bruto.

Fonte: RUSSO, 2007.

Segundo o IBAPE (2019), as principais diferenças entre as barragens convencionais e as barragens de rejeito são a natureza do material armazenado, a possibilidade, no caso das

barragens de rejeito, de se utilizar os próprios rejeitos e estéreis como materiais de construção e a possibilidade da ocorrência de alteamentos sucessivos, ou seja, do aumento de altura da barragem de rejeito em etapas.

Várias são as tipologias das barragens, mas, de uma maneira geral, sua estrutura possui os seguintes componentes (MI, 2012) e é ilustrada pela Figura 10:

- **Fundação:** Maciço de rocha e/ou solo, que gera a base de assentamento para uma barragem, responsável por suportar seu peso e transferir para o solo suas forças de carregamento;
- **Aterro, maciço ou dique:** É a própria estrutura da barragem e tem o objetivo de conter, juntamente com as ombreiras, o material dentro do reservatório. Pode ser confeccionado de solo compactado, blocos de rocha ou, até mesmo, de rejeitos;
  - **Crista:** Limite superior, plano e horizontal do maciço da barragem;
  - **Talude de montante:** Face do maciço em contato com o rejeito;
  - **Talude de jusante:** Face do maciço oposta ao rejeito;
  - **Espaldar:** Zona lateral do corpo do aterro que inclui os taludes e que pode ocasionalmente ter função de maciço estabilizador;
  - **Praia:** Região do reservatório onde se encontram os rejeitos adensados;
  - **Dreno de pé:** Sistema estrutural interno, constituído por materiais que conduzem o fluxo hídrico de maneira ordenada através do maciço;
  - **Vertedouro:** Estrutura hidráulica com a finalidade de descarga de água, principalmente no período de cheias, sendo responsável por manter a cota operacional de nível de rejeito no reservatório;
  - **Reservatório:** Área referente ao local de acumulação dos rejeitos, delimitado pela cota da barragem;
  - **Ombreiras:** Superfícies laterais da barragem, fazendo seu contato com vale onde a barragem é implantada.

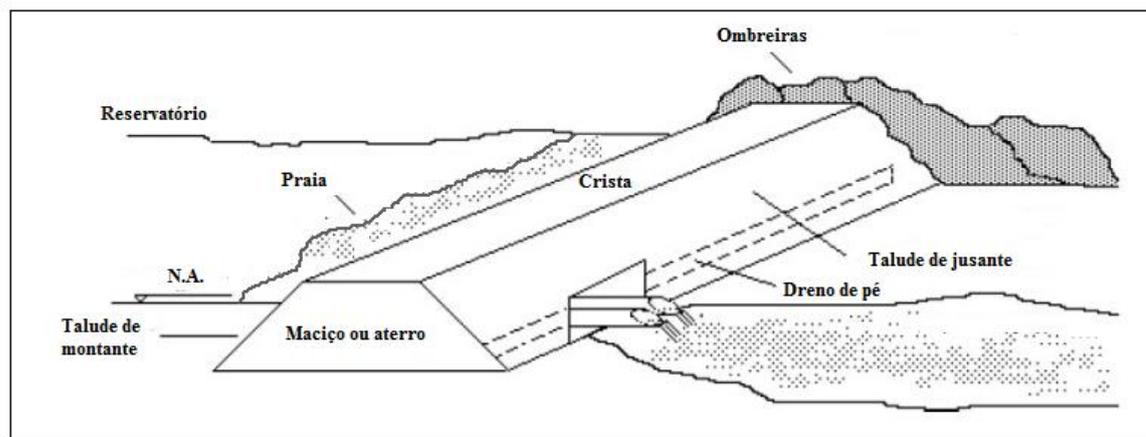


Figura 10. Constituintes gerais de uma barragem de rejeito.

Fonte: Adaptado de AESABESP, 2018.

### 2.2.1. Considerações técnicas

#### 2.2.1.1. Construção e operação

O método mais comumente utilizado na construção de barragens para a disposição de rejeitos pelas mineradoras é o aterro hidráulico (LUZ et al., 1998), que é um sistema múltiplo de disposição de rejeitos, captação e recirculação de água e tratamento de efluentes. Seu principal objetivo é decantar os sólidos suspensos, buscando a separação de fases, para que o sobrenadante possa ser reutilizado como água de reuso no processo e/ou adequado para lançamento nos recursos hídricos (ANA, IBRAM, 2017).

Contudo, a elaboração de projetos eficientes e seguros para a técnica de aterro hidráulico é tarefa imprescindível e complicada (RUSSO, 2007). Como as características geotécnicas dos rejeitos são variáveis de acordo com a jazida explorada, estes materiais, que são constituintes das barragens, são muito heterogêneos, necessitando minuciosa avaliação no seu comportamento quando é utilizado na estrutura da barragem, garantindo sua estabilidade.

A técnica do aterro hidráulico consiste no transporte do rejeito, na forma de polpa, através de tubulações que o trazem da usina até a área da barragem. Este material possui alta variabilidade granulométrica, de finos a granulares, portanto, ao sair da planta de beneficiamento, deve ser separado em duas parcelas, sendo uma de partículas mais finas e outra de partículas mais grossas, cada uma direcionada para sua respectiva área na barragem.

A fração grossa, composta preferencialmente por areias, é lançada hidráulicamente para compor a praia da barragem, enquanto a fração fina, por sedimentação, é depositada na área do reservatório (D'AGOSTINO, 2008).

Operacionalmente, esta separação das parcelas do rejeito é realizada por hidrociclones, equipamentos que separam a fração fina, chamada de *overflow* (OF), retirada pela porção superior do equipamento, da fração mais grossa, chamada de *underflow* (UF), retirada pela sua porção inferior, a partir da aplicação de forças centrífuga e de aceleração gravitacional no material alimentado. A Figura 11 exemplifica este equipamento.

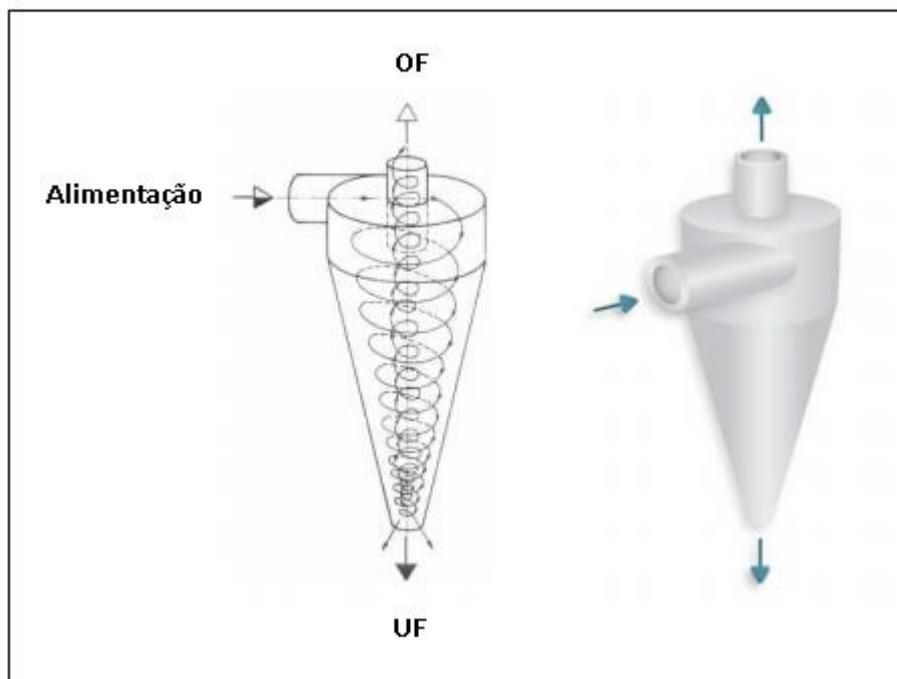


Figura 11. Esquema básico de um hidrociclone.

Fonte: Adaptado de Peixoto (2012)

Após a ciclonagem do rejeito bruto, a parcela fina, que apresenta grande volume de água, é direcionada para o reservatório, já que não apresenta boas características geotécnicas para ser utilizada na construção das barragens. A parcela mais grossa pode ser utilizada como material de construção desta estrutura, apesar de não poder ser considerada como areia, já que possui diferentes características geotécnicas e físico-químicas em relação a esta (RUSSO, 2007).

Esta separação das parcelas é eficiente no aumento do coeficiente de permeabilidade das barragens (RIBEIRO, 2000), e sua disposição nestas estruturas pode ser feita de duas maneiras: Por ponto único, onde o canhão injeta a descarga em um ponto isolado da barragem, conforme demonstra a Figura 12.a; ou em linha, onde o sistema de canhões é uniformemente espaçado e injeta a descarga ao longo de toda a crista da barragem, conforme demonstrado pela Figura 12.b.

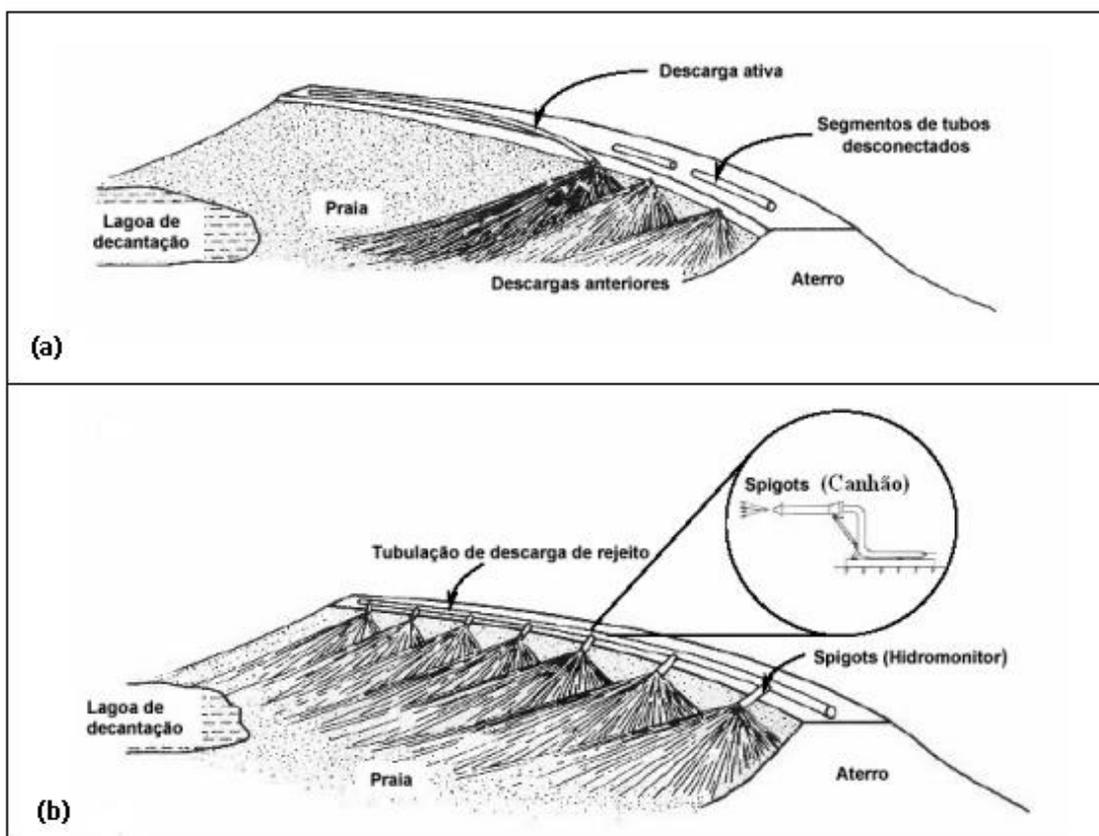


Figura 12. Técnicas de descarga de rejeitos em barragens. (a) Por ponto único; (b) Em linha.

Fonte: Adaptado de Russo (2007).

De acordo com Ribeiro (2000), as barragens de rejeito construídas pela técnica do aterro hidráulico podem ser classificadas de acordo com sua seção ou de acordo com seu método construtivo. De acordo com sua seção, elas são classificadas em:

- Barragens de seção homogênea, com materiais de coeficiente de uniformidade inferior a 2: É a mais comum nas mineradoras brasileiras para disposição de rejeitos granulares, já que não há restrição ao volume de material a ser utilizado. Nestas, a seção do aterro é composta por materiais com única granulometria e a água e o solo percolam livremente por ela, possuindo taludes abatidos e ausência de diques. Sua estrutura é exemplificada pela Figura 13.

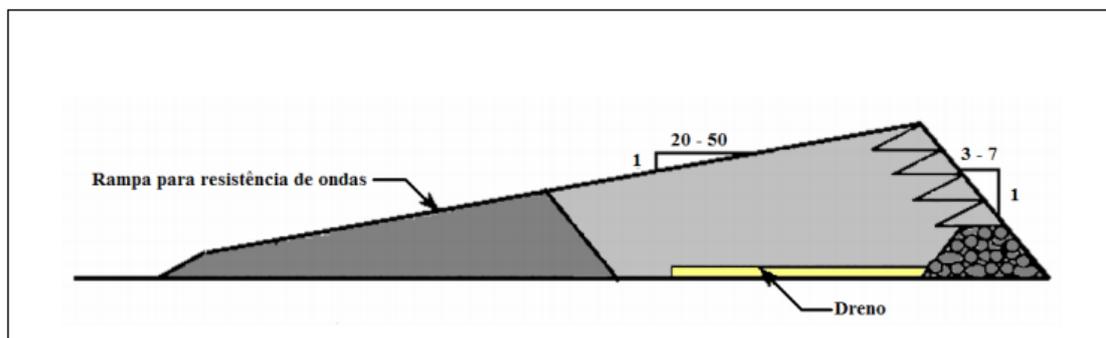


Figura 13. Seção típica de barragem homogênea.

Fonte: Russo (2007).

- Barragens de seção heterogênea, com núcleo central e espaldares de areia: Eram muito comuns na antiga União Soviética, possuem um núcleo com material menos permeável que os espaldares e apresentam problemas devido ao tempo e à qualidade dos materiais empregados, que necessitam ser condicionados ao adensamento do núcleo. Este tipo de barragem é demonstrado pela Figura 14.

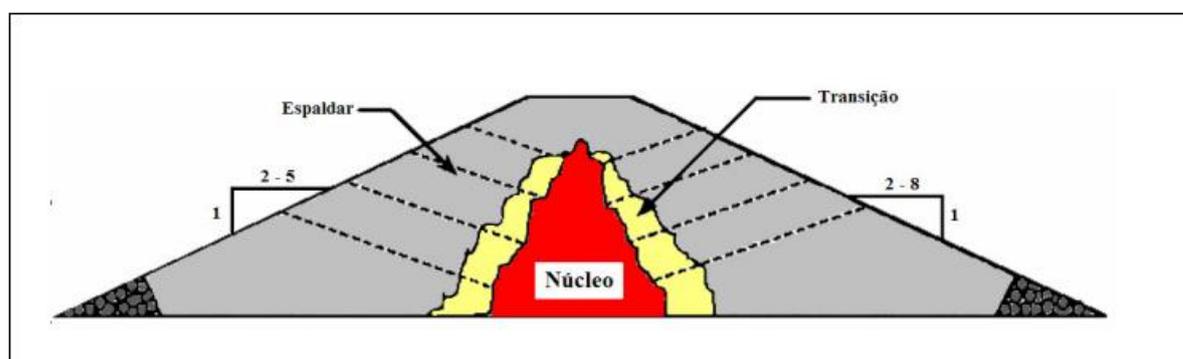


Figura 14. Seção típica de barragem heterogênea.

Fonte: Russo (2007).

- Barragens de seção mista, com espaldares compactados e centro preenchido com materiais lançados hidraulicamente: Sua construção soma as técnicas de construção tradicionais, na construção dos espaldares, com as técnicas de aterro hidráulico, para preenchimento do vão central. Assim, a largura da barragem é limitada, economizando material para sua construção, além de reduzir o risco de ruptura por abalo sísmico. Sua seção é exemplificada pela Figura 15.

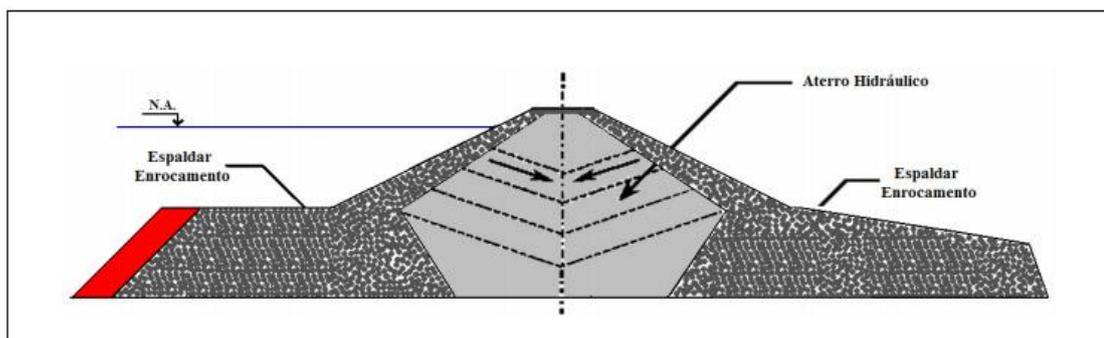


Figura 15. Seção típica de barragem mista.

Fonte: Russo (2007).

Considerando o método construtivo, as barragens de aterro hidráulico podem ser classificadas em (FILHO, 2004):

- Método de montante: Na etapa inicial deste tipo de barragens, é construído um dique de terra compactada drenante ou de enrocamento, a partir do qual ocorre o lançamento dos rejeitos a montante da periferia da crista por canhões ou hidrociclones, formando as praias da barragem. Este processo ocorre até que a cota final, prevista para cada projeto, seja atingida. A Figura 16 exemplifica uma barragem construída via método de montante.

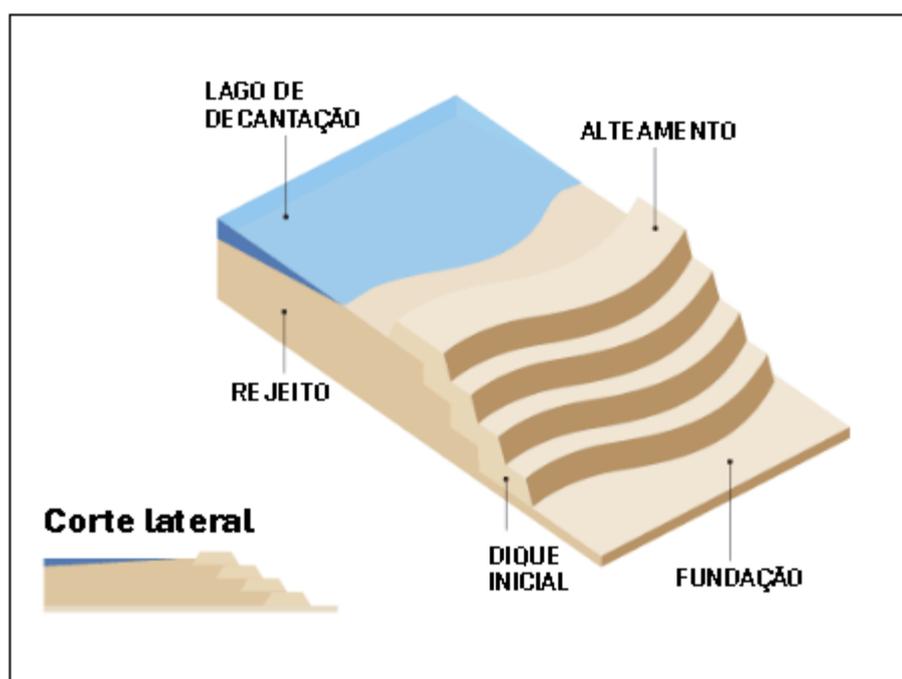


Figura 16. Barragem de rejeito via método de montante.

Fonte: Moraes (2019).

As barragens de montante possuem as vantagens de baixo custo, menor volume de materiais necessários para construção, rapidez e agilidade nos alteamentos, podendo ser realizados pela própria mineradora (VICK, 1983). Como principal desvantagem, destaca-se a possibilidade de liquefação quando submetida a carregamentos, uma vez que os alteamentos são realizados sobre o próprio rejeito que, graças ao curto tempo de residência, encontra-se em seu estado fofo, ou seja, pouco consolidado (RUSSO, 2007).

Além disso, existem complicações na construção de um eficiente sistema de drenagem, desestabilizando o maciço através da possibilidade de ocorrência de fraturas por cisalhamento, chamado *piping* e, adicionalmente, sua altura é limitada, já que os alteamentos sucessivos reduzem a resistência do sistema, diminuindo seu fator de segurança (OP. CIT.).

Porém, existem cuidados durante a fase de construção da estrutura que buscam diminuir os riscos associados, como a avaliação de sua estabilidade para as condições drenada e não-drenada durante todas as etapas do alteamento, a execução de uma altura limitada à não ocorrência de *piping*, a adoção de filtros para melhora da percolação e o uso dos ciclones para melhora das características geotécnicas dos materiais (FILHO, 2004). Entretanto, em regiões sujeitas a abalos sísmicos, sua construção não deve ser realizada, devido à alta probabilidade de ocorrência de liquefação na estrutura.

- Método de jusante: Buscando reduzir os riscos relacionados à construção de barragens via método de montante, principalmente aqueles relacionados à susceptibilidade a liquefação, foi desenvolvido o método de jusante (BITTAR, 2006). Desta forma, os alteamentos realizados na estrutura não são executados sobre rejeito pouco consolidado.

Neste método, a etapa inicial consiste na construção de um dique de partida, com rejeitos lançados e compactados a jusante deste, até a obtenção da cota de projeto. É possível controlar o nível freático através da construção de drenos internos, núcleos ou tapetes de argila na sua estrutura (OP. CIT.). A Figura 17 ilustra uma barragem construída via método de jusante.

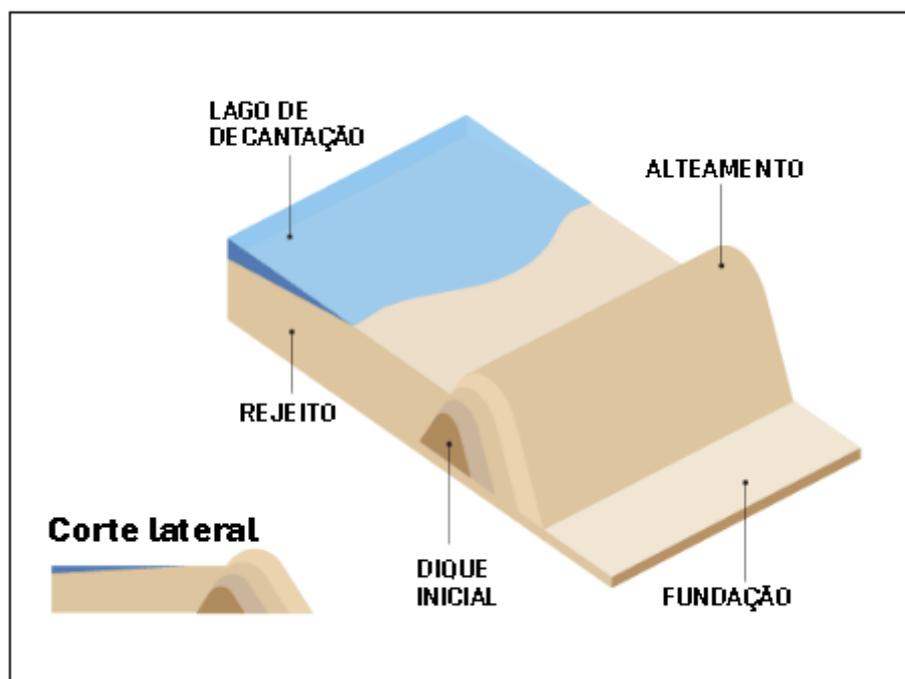


Figura 17. Barragem de rejeito via método de jusante.

Fonte: Moraes (2019).

As barragens alteadas para jusante garantem projetos de maior porte, com fatores de segurança mais satisfatórios (FILHO, 2004). Dentre as vantagens oferecidas neste método, segundo KLOHN (1982), destacam-se:

- Não é construída nenhuma estrutura sobre rejeito previamente depositado;
- Sua resistência às forças sísmicas é maior;
- O lançamento e compactação da barragem podem ser controlados via técnicas construtivas convencionais;
- É possível a construção de um sistema de drenagem interna durante a execução da estrutura do barramento, o que possibilita maior estabilidade, já que o controle de saturação é maior;
- Os alteamentos da barragem não interferem no lançamento de rejeitos nesta;
- Tecnicamente, a altura destes barramentos não é limitada;
- Pode haver escalonamento da sua construção, sem comprometer a estrutura.

Além disso, este tipo de barragem permite a acumulação de volumes muito maiores de água, quando comparada aos outros métodos construtivos, podendo ser interessante para a

recirculação de água de processo ou retenção de cheias (FERRAZ, 1993). Isto se deve à presença de uma zona impermeável no talude de montante.

Porém, a construção das barragens, segundo método de jusante, incorre da necessidade de grande volume de material compactado para sua construção, podendo gerar maiores custos na implantação de seu projeto. Também é necessário um planejamento dos materiais a serem lançados na barragem e a programação dos alteamentos, não permitindo que falte material grosseiro para a manutenção da crista acima do nível do reservatório (BITTAR, 2006), tal fato pode causar a necessidade de um dique de partida muito elevado.

- Método da linha de centro: Segundo o IBRAM (2016), a construção de barragens via método da linha de centro representa uma disposição intermediária entre os dois métodos anteriormente citados. Neste, o alteamento da crista é realizado verticalmente, sendo o eixo vertical dos alteamentos coincidente com o eixo do dique de partida (ESPÓSITO, 1995). A Figura 18 exemplifica este tipo de barramento.

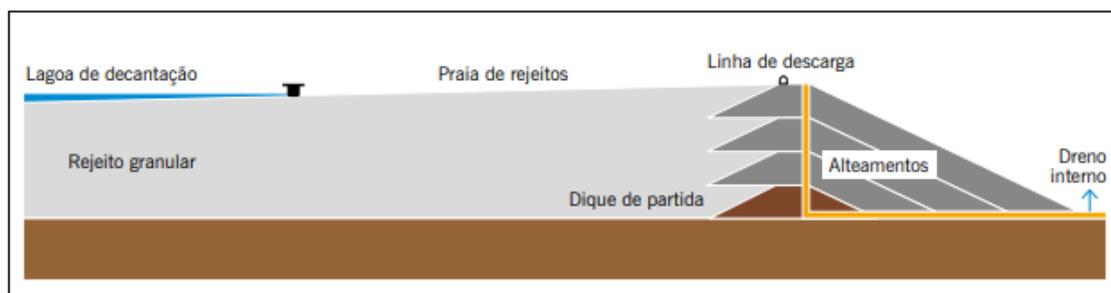


Figura 18. Barragem de rejeito via método da linha de centro.

Fonte: IBRAM, 2016.

É um método vantajoso em relação ao melhor controle da linha de saturação, dissipando poro pressões, graças à construção de zonas de drenagem interna em todas as fases do alteamento. Além disso, pode ser utilizado em áreas com ocorrência de abalos sísmicos. Apesar de agregar vantagens e desvantagens dos métodos a montante e a jusante, seu comportamento estrutural é mais similar ao das barragens construídas via método de jusante.

A escolha do método construtivo dependerá de uma série de fatores (IBRAM, 2016) como o tipo de beneficiamento mineral; características geotécnicas e vazão do rejeito produzido; necessidade de reservar água; grau de controle da percolação; sismicidade, topografia e hidrogeologia regionais e os custos envolvidos. O método de montante é, historicamente, o mais escolhido (OP. CIT.) por ser de mais fácil execução e economicamente

viável porém, desde a publicação da Resolução nº 13, em 8 de agosto de 2019, este método construtivo fica proibido para a construção de barragens de rejeito em todo o território brasileiro (ANM, 2019).

Informações referentes ao processo construtivo de uma barragem de rejeito devem ser disponibilizadas (OLIVEIRA, 2010), dentre elas, a data de início e fim da obra; Identificação dos engenheiros responsáveis pela construção, fiscalização da qualidade da obra e pelo seu registro de informações; Relação de documentos sobre os detalhes da obra, como limpezas e tratamento da fundação, implantação de desvios, termo de liberação da construção e materiais utilizados para tal.

Além destas, informações como os Relatórios do projeto executivo, que contemplem os estudos geotécnicos, hidrológicos e hidráulicos; Memórias de Cálculo; Relatórios da Construção e Fiscalização; Manuais dos dispositivos de monitoramento e demais equipamentos; Relatórios de Monitoramento (RM), sobre as batimetrias, qualidade da água, instrumentação; Registros de Incidentes (RI); Plano de Ações Emergenciais (PAE) e Plano de Fechamento da barragem (PF) também devem estar disponíveis.

Segundo Oliveira (2010), o principal instrumento para o sistema de gerenciamento operacional das barragens de rejeito é o Manual de Operação de Barragens de Rejeitos. Este deverá conter as informações sobre as operações de lançamento de rejeitos; Manutenção da praia; Manutenção do sistema extravasor; Manutenção do nível de água no lago; Bombeamento; Recuperação de água e transporte de rejeitos.

Neste Manual, é importante destacar a periodicidade de inspeções realizadas na barragem, das auditorias técnicas, avaliações de desempenho, leitura de instrumentos de medição, revisões de seu conteúdo e treinamentos. Devem ser claros e sistemáticos os procedimentos de emergência, caso haja ocorrência de falhas que possam causar danos à vida em geral (DITR, 2007).

#### 2.2.1.2. Monitoramento e inspeção

O monitoramento de uma barragem de rejeitos é o acompanhamento sistemático de seu comportamento, a fim de preservar sua estrutura e integridade física e a avaliação de parâmetros qualitativos e quantitativos relacionados aos componentes da barragem, permitindo a comparação entre o seu comportamento real e o previsto (OLIVEIRA, 2010).

Os parâmetros qualitativos são aspectos visuais que podem ser observados na estrutura e os quantitativos, aqueles oriundos de equipamentos de medição sendo que ambos os

parâmetros são obtidos através de inspeções. Para a inspeção qualitativa do maciço, fundação ou dos alteamentos, por exemplo, observa-se a existência de trincas, erosões, umidade ou do aspecto do efluente percolado. Sua respectiva inspeção quantitativa seria a ocorrência de deslocamentos em marcos superficiais, medida das dimensões das erosões, avaliação da poro pressão em vários pontos e a análise de turbidez do efluente percolado.

Outros componentes da barragem e seus acessórios necessitam de inspeções rotineiras. A infraestrutura operacional necessita ser inspecionada em relação à conformidade da documentação sobre o barramento, a existência de materiais para manutenção, acesso de veículos, cercas de proteção, placas de aviso e eficiência do acompanhamento pela gerência.

Já em relação à própria estrutura da barragem, no talude de montante, deve ser observada a ocorrência de erosões, rachaduras, deslizamentos, sumidouros, afundamentos, vegetação, tráfego de animais, formigueiros, *rip-rap* incompleto, destruído ou deslocado, presença de áreas molhadas e vazamentos. No talude de jusante também se observam a existência de áreas úmidas e defeitos no revestimento (MI, 2002). Quantitativamente, devem ser medidas as inclinações e as dimensões das erosões (OLIVEIRA, 2010). A Figura 19 demonstra anomalias encontradas durante inspeções nos taludes de barragens de rejeito.

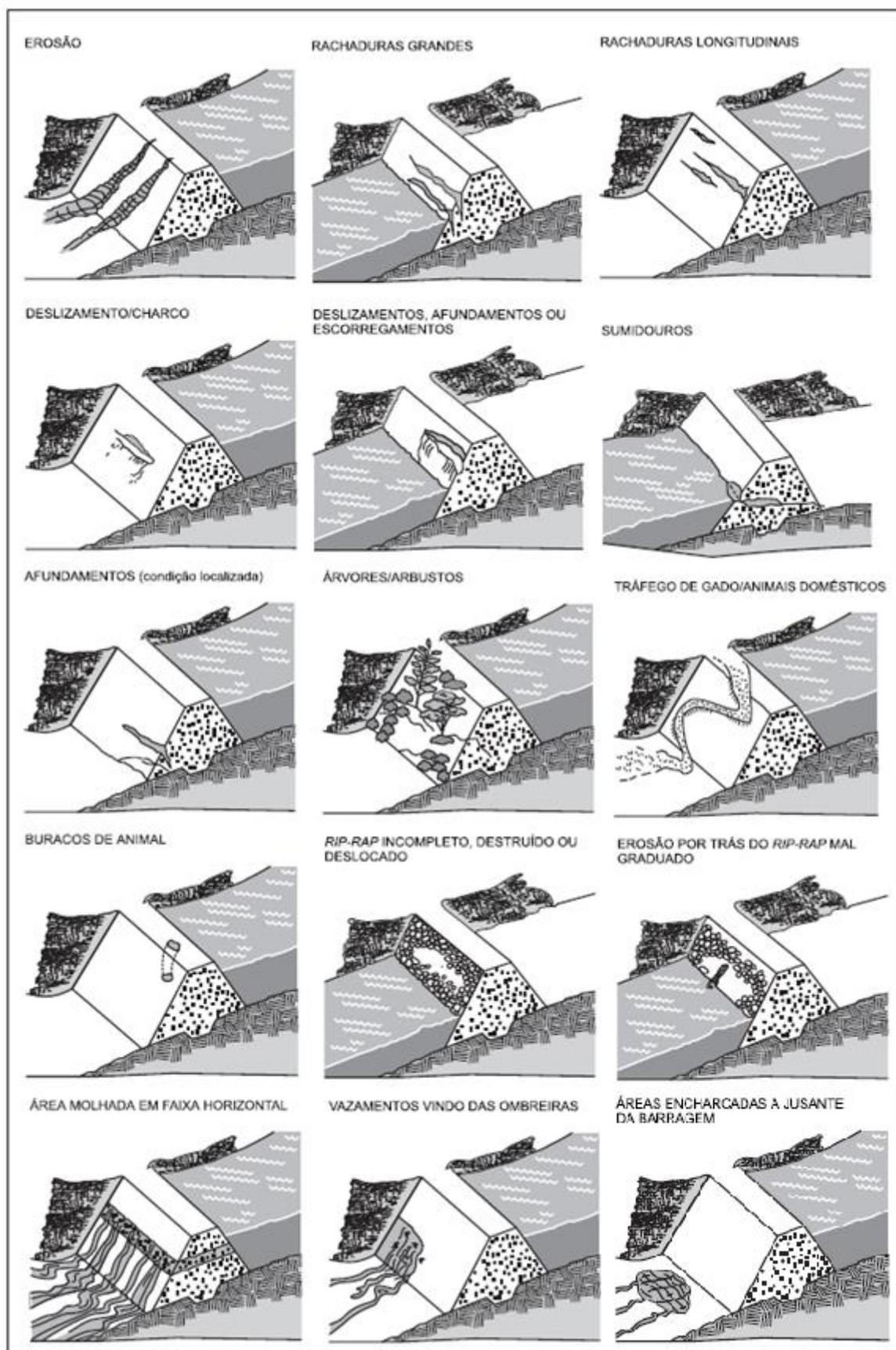


Figura 19. Anomalias observadas por inspeções nos taludes de barragens.

Fonte: Adaptado de MI, 2002.

Na crista, deve ser inspecionada a existência de erosões, rachaduras, buracos, vegetação, trilhas e afundamentos e realizadas medidas em relação ao deslocamento e erosões (MI, 2002). A Figura 20 ilustra anomalias em cristas de barragens.

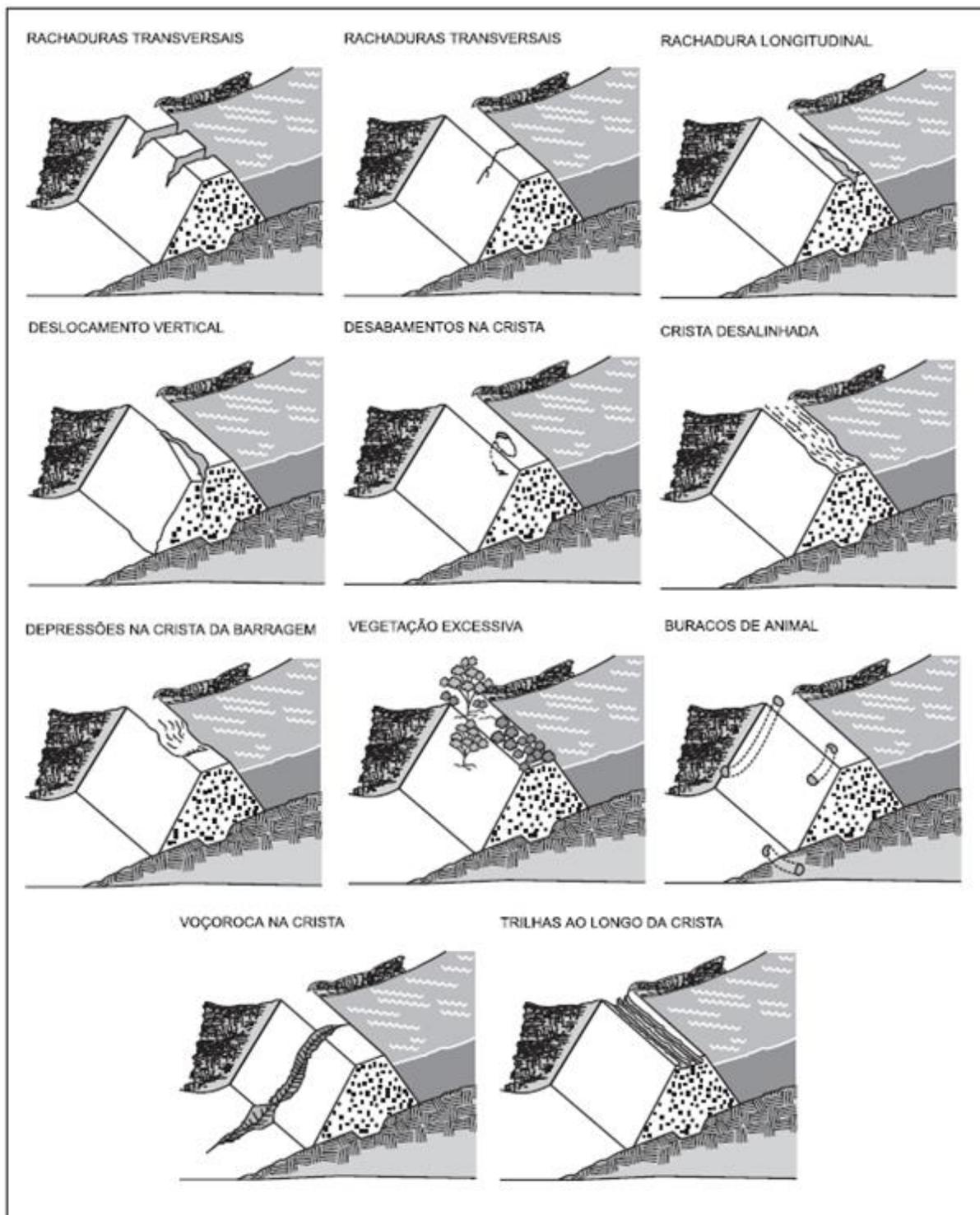


Figura 20. Anomalias observadas por inspeções em cristas de barragens.

Fonte: Adaptado de MI, 2002.

Para monitoramento da fundação, se observam deformações, trincas, erosões e subsidência no maciço, além da ocorrência de surgências com ou sem carreamento de sólidos. É importante realizar leituras de sismicidade regional, deslocamentos do maciço, dimensões de erosões e trincas, vazões em pontos de surgência, medidas de poro pressão e níveis em piezômetros de alerta.

Em relação ao reservatório, se observa o aspecto da água, seu nível e dos rejeitos, além das medidas de cota do NA, borda livre, capacidade, superfície batimétrica, parâmetros de estações meteorológicas e a qualidade da água descartada e do reservatório. No extravasor, verifica-se o aspecto do efluente descartado, qualidade das estruturas e sistemas de segurança, além de medidas de vazão, parâmetros de qualidade do efluente com ênfase na turbidez, seções e dimensões internas. Nas tubulações, devem ser observados os aspectos gerais do transporte de rejeitos e água, assim como análises das vazões, pressões e posições dos tubos (OLIVEIRA, 2010).

A inspeção dos rejeitos também é importante para o correto monitoramento da barragem e, desta forma, deve-se avaliar seu aspecto geral e análises granulométricas, porcentagem de sólidos, vazão e densidade de polpa, volumes lançados e depositados, análises químicas, permeabilidade e resistência ao cisalhamento. Na região da praia de rejeitos, analisa-se sua posição, inclinação, largura e posição dos ciclones ou espigotes.

Portanto, as inspeções podem identificar desvios no comportamento ideal de uma barragem e são fundamentais para sua gestão. Elas necessitam ser devidamente registradas e analisadas, gerando dados para observação de tendências ou anomalias comportamentais da barragem ao longo de seu período operacional (OLIVEIRA, 2010).

As inspeções nas barragens podem ser rotineiras, realizadas pela equipe de operação do barramento ou periódicas, realizadas por engenheiros especialistas. Em ambos os casos, sua frequência deve ser estipulada, sua metodologia deve ser padronizada, mantendo registro de fotos, vídeos, datas, históricos de eventos observados e providências tomadas em cada caso (OLIVEIRA, 2010).

#### 2.2.1.3. Condicionantes ao rompimento

De acordo com o Ministério da Integração Nacional (2002), os principais fatores que comprometem a segurança das barragens de aterro são:

- Percolação descontrolada pelo maciço e fundação;
- Fissuração;

- Erosão superficial;
- Liquefação;
- Galgamento.

As forças induzidas pela percolação descontrolada no maciço e na fundação podem favorecer o carreamento das partículas de solo, gerando um processo de erosão regressiva, denominado *piping* (ABNT, 2018). Neste fenômeno, a linha freática atinge o talude de jusante, conforme ilustra a Figura 21 e eleva as poro pressões no corpo da barragem, reduzindo a tensão efetiva e favorecendo a ruptura do maciço.

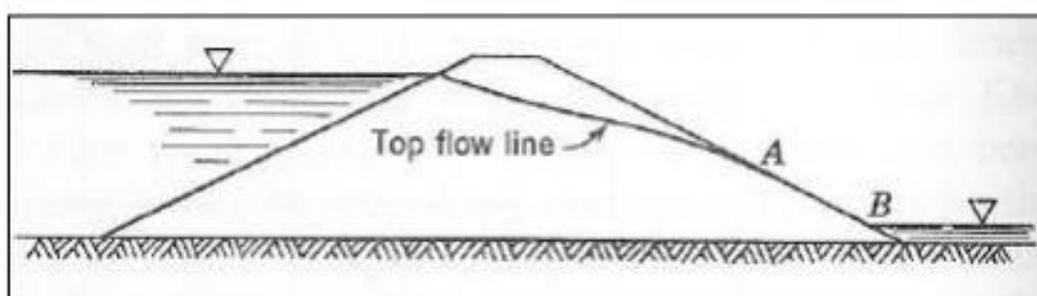


Figura 21. Linha de fluxo em barragem de rejeito com ausência de drenagem interna.

Fonte: MASSAD, 2003.

Em uma ruptura por *piping*, a erosão que evolui para montante forma uma espécie de tubo através do maciço ou da fundação e, geralmente, ocorre um desabamento do maciço sobrejacente, abrindo uma brecha na barragem. A Figura 22 demonstra uma ruptura por *piping* através da fundação.

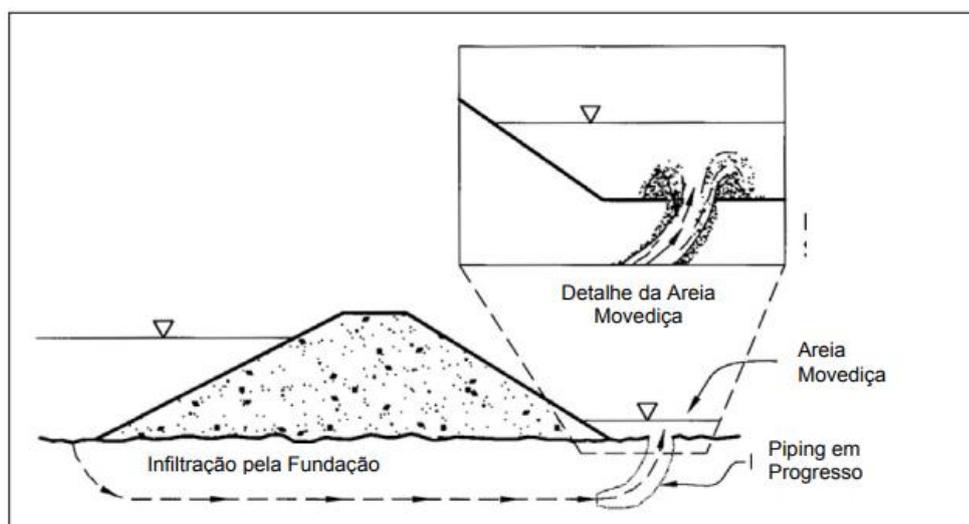


Figura 22. Progressão de uma ruptura por piping em barragem.

FONTE: MIRANDA, 2016.

Esta erosão regressiva pode ser tubular ou global. A tubular é caracterizada pela formação de uma percolação preferencial, na forma de “tubo”, através do maciço, iniciando na região próxima ao talude de montante e se encaminhando para o talude de jusante, favorecendo uma erosão que evolui de jusante para montante, conforme demonstra a Figura 23.

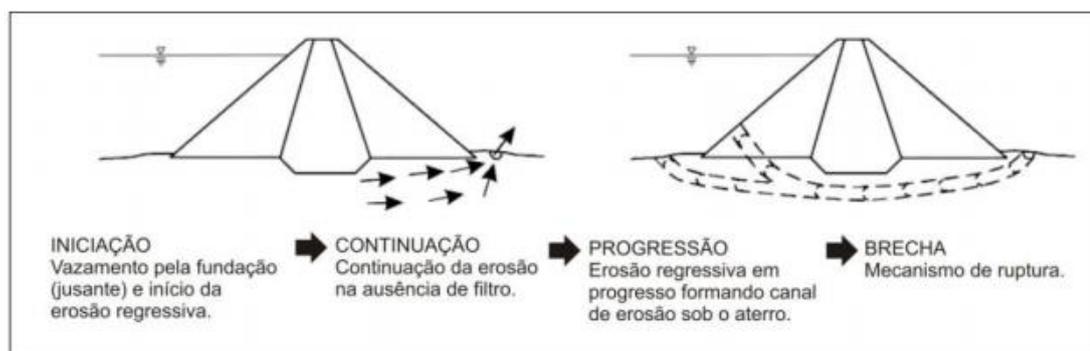


Figura 23. Etapas da formação de erosão regressiva tubular.

Fonte: BARBOZA et al, 2018.

Já a erosão regressiva global acontece quando há uma desagregação de partículas na região jusante ao núcleo do barramento, progredindo na formação de um “tubo” subvertical até a crista do maciço, denominado *sinkholes*. Este fenômeno ocorre quando o núcleo não é corretamente protegido por filtros ou zonas de transição, é estreito, razoavelmente largo ou parcialmente inclinado (BARBOZA et. al, 2018). A Figura 24 ilustra as etapas para ocorrência deste tipo de erosão.

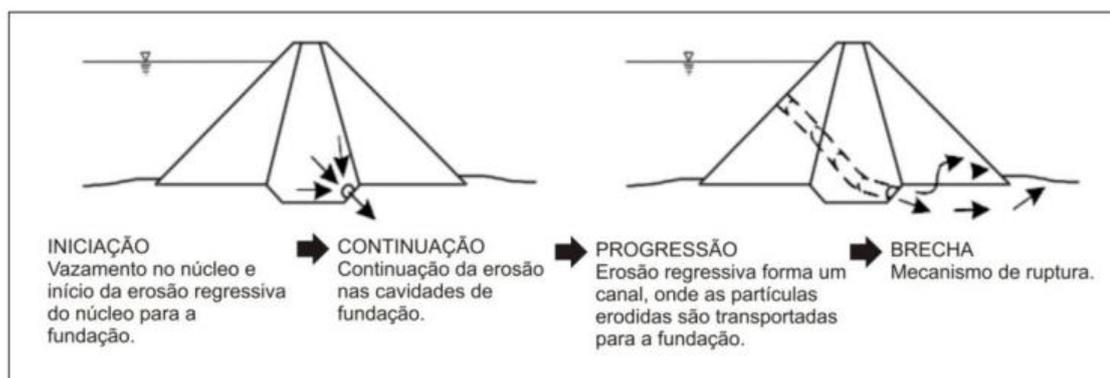


Figura 24. Etapas da formação de erosão regressiva global.

Fonte: BARBOZA et al, 2018.

O controle da percolação em barragens de aterro, de forma a se evitar o *piping*, é realizado através das seguintes técnicas:

- Trincheiras de vedação (*cut off*): É uma escavação realizada no solo da fundação e preenchida com solo compactado, com objetivo de prolongar o corpo da barragem, atuando

como uma cortina de vedação e impedindo o fluxo de água sob a fundação da barragem (MASSAD, 2010). A Figura 25 ilustra uma barragem de terra heterogênea com *cut off*.

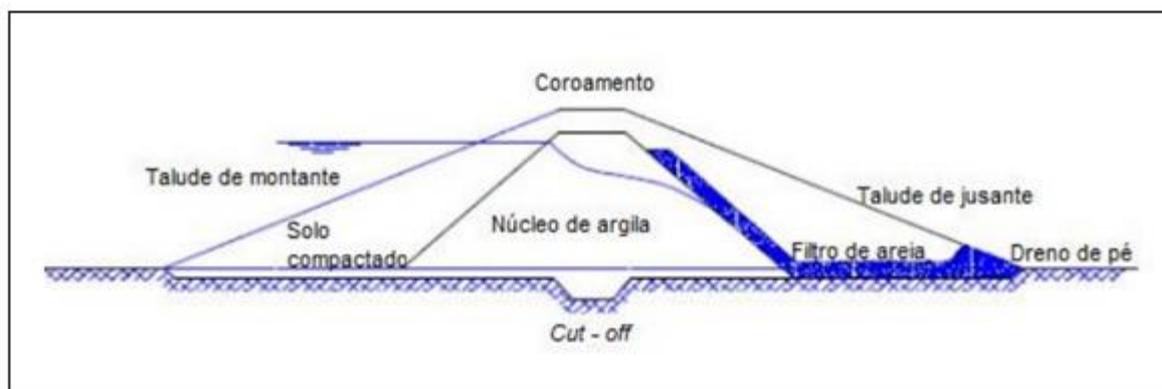


Figura 25. *Cut off* em barragem heterogênea.

Fonte: MIRANDA, 2016.

- Tapetes impermeáveis: É um aumento do corpo da barragem a partir da adição de material argiloso à montante, de forma a aumentar a distância da percolação, o que reduz o gradiente hidráulico e a pressão neutra à jusante (SARÉ, 2003).
- Filtros e drenos: Compõe o sistema de drenagem interna da barragem e são constituídos de material granular, visando reter a passagem de finos e garantir a percolação de água, evitando assim, o *piping*. (SOUZA, 2013). A Figura 26 ilustra alguns tipos de filtros e drenos geralmente utilizados em barragens, que podem ser do tipo: (b) e (c) tapete drenante ou drenos de pé, que são enrocamentos realizados no pé do talude de jusante; (d) verticais, do tipo chaminé; (e), (f), (g) inclinados para jusante ou montante.

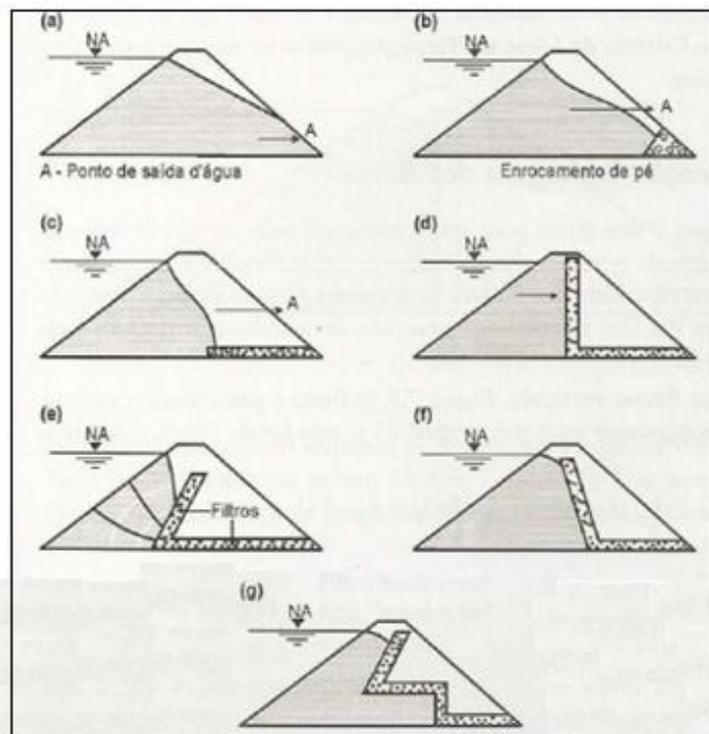


Figura 26. Tipos de filtros e drenos utilizados em barragens de aterro.

Fonte: SOUZA, 2013.

- Poços de alívio: São dispositivos instalados ao pé do talude de jusante com o objetivo de reduzir subpressões causadas pela infiltração de materiais permeáveis na fundação, que podem causar *piping* na fundação e instabilidade do maciço (MIRANDA, 2016). A Figura 27 ilustra uma linha de poços de alívio usados como interceptação e controle do fluxo na fundação.

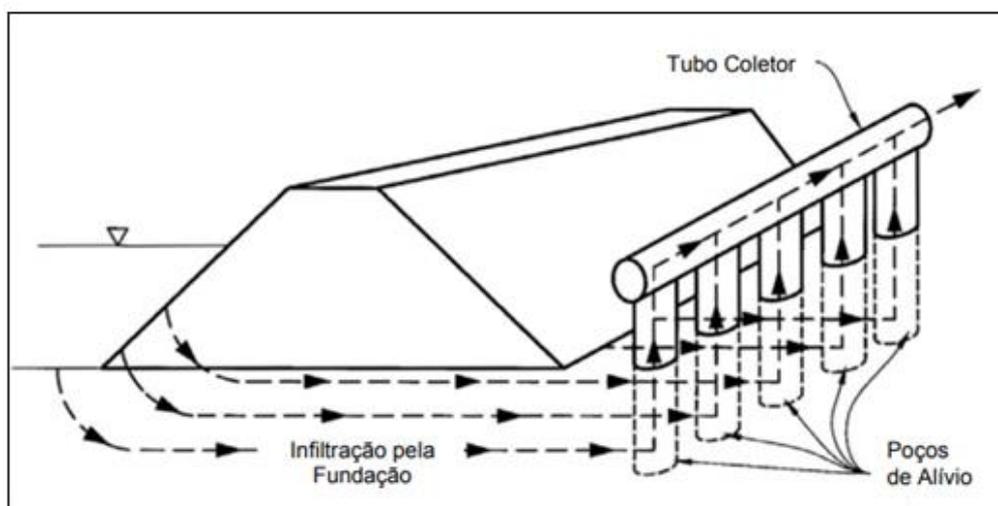


Figura 27. Poços de alívio para controle de fluxo em barragem.

Fonte: MIRANDA, 2016.

No projeto do barramento, deve-se evitar a erosão interna tanto no maciço quanto na fundação, observando os tipos de materiais empregados na sua construção, os gradientes hidráulicos, a condição da fundação e das ombreiras.

Devido a suas dimensões, natureza e ação de agentes externos e internos, as barragens sempre estão sujeitas a deslocamentos e deformações que induzem à fissuração. No caso das barragens de aterro hidráulico, como os materiais de construção são moles e compressíveis, as deformações e deslocamentos podem ocorrer ao longo do tempo e não imediatamente (MACHADO, 2007).

Os deslocamentos se referem às mudanças na geometria externa da barragem e as deformações, são referentes à mudanças ocorridas em sua geometria interna, sendo que ambos comprometem a segurança do barramento. Os deslocamentos podem ser horizontais, verticais ou uma combinação destes, alterando a forma e a geometria do maciço e sendo caracterizados pela ocorrência de assentamento e recalques nos taludes.

Os deslocamentos horizontais têm como característica a geração de um estreitamento da estrutura, a partir do assentamento dos espaldares em direção ao centro do maciço na sua metade superior, enquanto, na metade inferior desta, ocorre o oposto, causando uma abertura na base (OPT. CIT.).

Este tipo de deslocamento pode gerar rupturas profundas e causar a instabilidade de taludes (MI, 2002). Neste caso, deve-se inspecionar a área trincada para determinar a magnitude do evento e, ainda, na maioria dos casos, deve-se rebaixar o NA do reservatório para prevenir possíveis aberturas do maciço.

Os deslocamentos verticais ocorrem principalmente durante a construção do barramento, tanto no centro, quanto nos taludes de montante e jusante, devido ao estado de pressão confinada do material. Este deslocamento provoca uma queda de resistência no interior do maciço, causando instabilidade estrutural ou ruptura, além de permitir a entrada de água superficial e redução na seção transversal do maciço. A Figura 28 ilustra uma anomalia causada por deslocamento vertical.

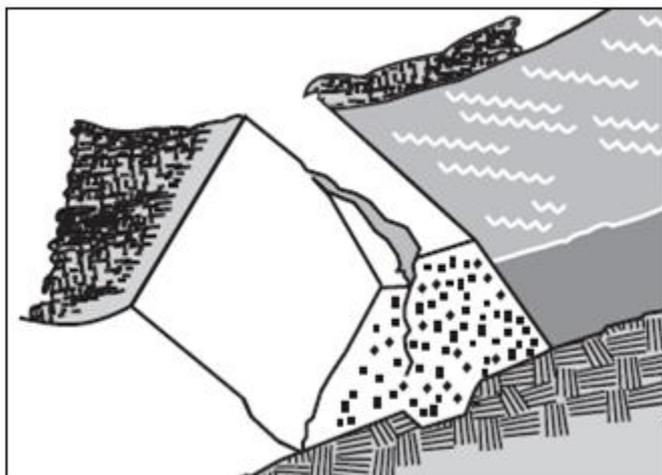


Figura 28. Rachadura provocada por deslocamento vertical.

Fonte: MI, 2002.

Não existem dados suficientes para garantir a segurança de uma barragem relacionando os deslocamentos horizontais e verticais à uma porcentagem de sua altura, largura, espessura ou alguma outra dimensão de referência. Porém, vários instrumentos controlam esta movimentação e permitem monitorar o comportamento da obra durante sua construção e operação (MACHADO, 2007).

A determinação de deslocamentos em barragens pode ser realizada por técnicas de GPS (Sistema de Posicionamento Global), triangulação ou nivelamento geométrico, contando com a instalação de marcos superficiais como pontos de referência. É importante que as coletas de dados sejam realizadas em períodos do dia com temperatura ambiente amena, como durante o amanhecer ou à noite, evitando distorções nas leituras.

O GPS irá fornecer dados, ao longo do tempo, que permitem verificar se há variação das coordenadas da barragem, indicando alterações planimétricas ou altimétricas e sendo efetuadas a partir de um distanciômetro eletrônico. Já a triangulação ocorre a partir de medidas angulares entre dois pontos, à jusante da barragem, com coordenadas conhecidas e outros dois pontos com coordenadas a se determinar, verificando se ocorre alguma mudança angular ao longo do tempo.

Para o nivelamento geométrico, instalam-se miras graduadas na crista da barragem e o levantamento topográfico permite verificar a ocorrência de desníveis determinados por visadas horizontais. A Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial (FIALHO, 2019), afirma que o uso de drones é útil para avaliar a segurança das barragens. As câmeras com alta

definição podem gerar imagens superiores às aquelas de satélites, sendo possível a confecção de mapas descrevendo a declividade, curvas de nível e volume de sólidos contidos.

Já as deformações não geram necessariamente uma mudança na geometria externa do maciço, mas sim mudanças na posição e/ou orientação dos elementos da barragem e são influenciadas por vários fatores (MACHADO, 2007), como as propriedades mecânicas do material matriz; Baixa resistência ao cisalhamento dos materiais que compõe a barragem; Espessura da camada compactada; Método de lançamento, direção do espalhamento e grau de compactação do rejeito; Altos índices de poropressão; Tipo de fundação; Declividade da superfície de fundação, ao longo do eixo longitudinal e seções transversais; Variação do NA do reservatório e sismicidade regional.

A erosão superficial é outro fator que compromete a segurança dos barramentos. Esta, causada principalmente pelo escoamento das águas superficiais, pode gerar sulcos nos taludes que, com o passar do tempo, podem se aprofundar, evoluindo para as ravinas (MIRANDA, 2016).

Um agravante que favorece o aparecimento das ravinas é o nivelamento e inclinação deficiente da crista da barragem, prejudicando o escoamento superficial, pois, desta forma, a água da chuva tende a se concentrar nos pontos baixos da borda da crista, transbordando talude abaixo (MIRANDA, 2016) e podendo causar redução da seção transversal da barragem.

O aparecimento de ravinas nos taludes pode provocar tanto aberturas de brechas na região da crista quanto reduzir o caminho de percolação da água pelo corpo da barragem, o que pode favorecer a ocorrência de *piping*. O principal dispositivo de controle da erosão superficial é o revestimento da crista, que pode ser feito em material de cascalho, asfalto, concreto ou, até mesmo, grama, para baixos escoamentos superficiais.

Para a proteção dos taludes de montante, utiliza-se o chamado *rip-rap*, que é uma proteção formada por duas camadas de materiais. A primeira é interna, em contato direto com o maciço, formada por areias e pedregulhos de granulometria mais fina promovendo uma transição granulométrica gradual do maciço até a segunda camada do *rip-rap*, mais externa, formada por pedregulhos com granulometria suficiente para não serem levados por ondas do reservatório (MARANGON, 2004).

A Figura 29 exemplifica o uso de *rip-rap* no talude de montante de uma barragem de rejeitos e a Figura 30 evidencia as duas camadas de um *rip-rap*.

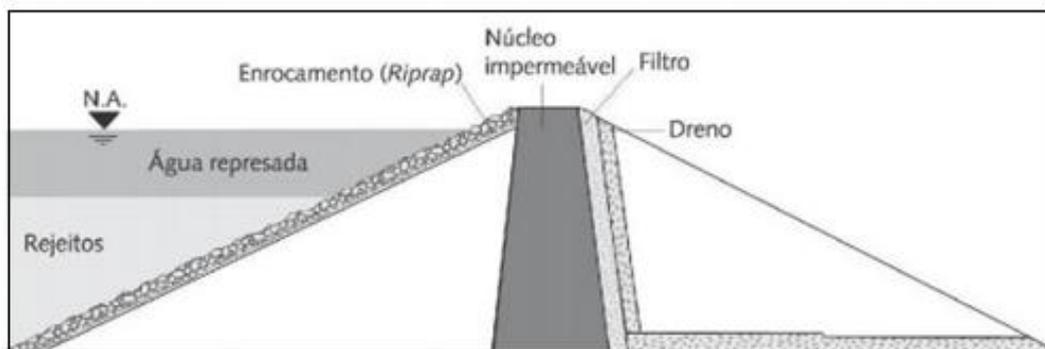


Figura 29. Uso de *rip-rap* em talude de montante de barragem de rejeitos.

Fonte: SILVA, 2016.

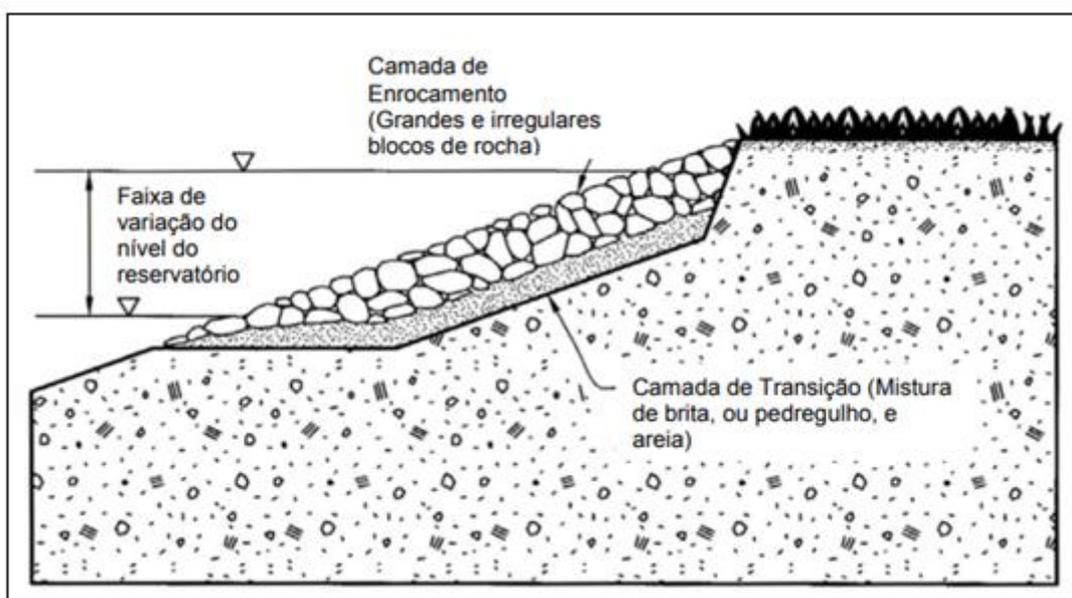


Figura 30. Camadas de *rip-rap*.

Fonte: MIRANDA, 2016.

Outro agravante para a segurança de barragens é a ocorrência do fenômeno da liquefação. De acordo com a Norma Brasileira 13.028, de 2017, a liquefação é uma queda substancial na resistência ao cisalhamento não drenado de materiais granulares e/ou finos com baixa coesão, fofos, saturados e com tendência a contração. Esta queda ocorre devido a solicitações ou carregamentos não drenados, causando aumento na poro pressão e redução na tensão efetiva. Portanto, a parcela sujeita à liquefação comporta-se temporariamente como um fluido (FILHO, 2004).

Como os rejeitos de mineração são, geralmente, materiais granulares e/ou finos, não plásticos e são dispostos hidraulicamente em barragens, possuem a tendência de formar

camadas com alto grau de saturação e baixa densidade e, portanto, são sujeitos à liquefação mediante a aplicação de carregamentos não-drenados (RAFAEL, 2012).

Segundo Castro et al. (1977), a característica granulométrica dos rejeitos, sua densidade, tensão confinante, forma dos grãos, composição química e mineralógica são condicionantes dos rejeitos que influenciam no fenômeno da liquefação.

Adicionalmente, deficiências de drenagem interna e dificuldade de compactação nos rejeitos utilizados nos alteamentos (principalmente no método à montante), geralmente resultando em condições saturada e fofa na região da praia, favorecem a situação de ruptura de sua estrutura por liquefação (FILHO, 2004).

Casagrande (1936) classificou o fenômeno da liquefação em dois tipos principais, o primeiro, denominado liquefação cíclica, ocorre com materiais granulares saturados, de média a alta densidade, que são submetidos a repetidos aumentos e diminuições de tensões cisalhantes. Nas barragens de rejeito, estas tensões podem ser induzidas por carregamentos dinâmicos provenientes de sismos ou vibrações advindas da atividade minerária (RAFAEL, 2012).

O outro tipo de liquefação, chamada liquefação estática ou efetiva, ocorre em materiais granulares saturados, com baixa densidade relativa, que são submetidos a carregamentos não drenados e tendem a provocar uma contração na massa de rejeito, que não ocorre graças a condição saturada do rejeito e o curto tempo de aplicação da carga, mas, conseqüentemente, eleva a poro pressão, reduzindo a tensão efetiva e resultando na perda da resistência do maciço e provável ruptura por liquefação (HOLTZ & KOVACS, 1981).

Este aumento da poro pressão e conseqüente redução da tensão efetiva, podendo provocar a liquefação efetiva nas barragens de rejeito pode ser induzida por uma rápida elevação da linha freática, que pode ocorrer graças às chuvas, por exemplo. Além disto, o “gatilho” para liquefação estática pode ser devido à galgamentos dos resíduos sobre a crista da barragem (RAFAEL, 2012).

A Figura 31 exemplifica o fenômeno de liquefação em barragens de rejeito de mineração e destaca que este pode ocorrer tanto no rejeito depositado, que começa a se comportar como fluido, escorre e empurra o maciço ou, também, pode ocorrer no próprio maciço, comprometendo sua resistência e se tornando uma região de fraqueza na estrutura.

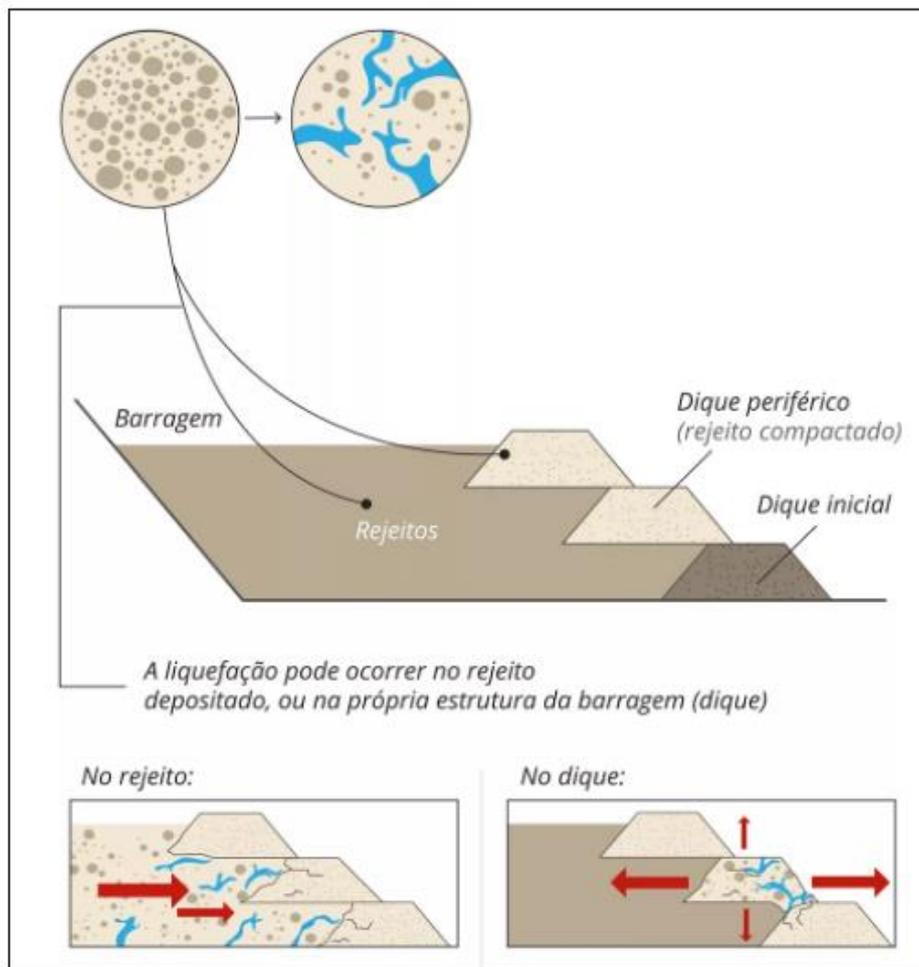


Figura 31. Liquefação em barragens de rejeito.

Fonte: MAURO et. al, 2019.

De acordo com Russo (2007), algumas medidas podem ser tomadas para redução da probabilidade de rompimento do barramento por liquefação, como realizar o aumento da largura da crista da barragem, provocando um aumento da resistência do maciço; Instalar um sistema eficiente de drenagem, que reduz a zona de saturação da barragem e provoca, indiretamente, o adensamento do maciço através da redução da poro pressão em casos de carregamentos estáticos ou dinâmicos; Reduzir a inclinação dos taludes do barramento, provocando aumento consequente de sua estabilidade e utilizar material para construção do aterro com melhores índices de compactação, em geral, acima de 60%.

Ainda, segundo o mesmo autor, no caso do uso do rejeito como material construtivo do aterro, sua segurança pode ser incrementada de algumas maneiras, como realizar a separação eficiente do rejeito em fração fina e fração grossa, utilizando apenas a fração grossa para construção; Realizar a compactação do rejeito grosso, reduzindo sua tendência à liquefação e

umentando sua resistência ao *piping* e revestir os taludes para evitar a erosão do material utilizado neste.

O galgamento, também chamado *overtopping*, ocorre quando o nível de água do reservatório se eleva além da cota da crista da barragem, decorrente de chuvas muito intensas, produzindo cheias superiores à capacidade do vertedouro (ANA, 2012). Para as barragens de rejeito, o galgamento produz um arraste de partículas e posterior ruptura da estrutura.

A ruptura por galgamento ocorre à partir da abertura gradual de uma brecha, de acordo com a ação erosiva provocada pelo escoamento. Segundo Lauriano et al. (2017), as principais causas da ocorrência de galgamento em barragens de rejeito são:

- Inadequada operação do reservatório e do vertedouro, durante o período de cheias;
- Praia de rejeito em inconformidade com os limites especificados em projeto;
- Lançamento inadequado dos rejeitos no reservatório;
- Redução da borda livre;
- Ocorrência de cheia extraordinária, incompatível com a capacidade hidráulica do reservatório;
- Deformações no maciço, com recalque na crista;
- Formação de onda induzida dentro do reservatório.

Para evitar a ruptura da barragem por galgamento é necessário o controle do nível do reservatório, de forma a preservar a borda livre de projeto (OLIVEIRA, 2010). Além disso, a realização de estudos hidrológicos eficientes, avaliar a capacidade e estrutura do vertedouro, possibilitando a vazão controlada de todas as cheias de projeto e controle de deformações na estrutura (MI, 2002).

A ocorrência destes fenômenos compromete a segurança das barragens e, além dos monitoramentos e controles anteriormente descritos, alguns métodos numéricos são utilizados para determinar o Fator de Segurança (FS) de uma determinada superfície potencial de ruptura.

Estes são baseados no princípio do equilíbrio limite e no critério de ruptura de Mohr Coulomb, utilizando-se de suposições para redução do número de incógnitas que será igual ao número de equações no equilíbrio. Suas principais diferenças são nas simplificações para se determinar o problema (CALLE, 2000) e são amplamente utilizados para o cálculo do FS de barragens de rejeito.

Os principais métodos numéricos para análise de estabilidade de taludes são o de Fellenius (1936), Bishop (1955), Bishop simplificado, Janbu (1973), Morgenstern-Price (1965), Spencer (1967), Madej (1971) e Sarma (1973). A partir da década de 80, estes métodos

numéricos vêm sendo solucionados com uso de ferramentas computacionais (MARANGON, 2017).

Um exemplo é o pacote de softwares desenvolvido pela GeoStudio®, em 1977, e utilizado em mais de 100 países para análises em geotecnia. O módulo SLOPE/W é útil para análises de estabilidade de taludes e determinação do Fator de Segurança (FS), baseado no princípio de equilíbrio limite e é amplamente utilizado por profissionais da área.

Outro módulo, o SEEP/W, também desenvolvido pela GeoStudio®, é um programa que se utiliza de elementos finitos para modelar o movimento e a distribuição de pressão de água dentro de materiais porosos, como solo e rocha, utilizado em modelagens de fluxo saturado e não saturado, para isso, supõe que o solo seja homogêneo e que a tensão total seja constante.

De forma geral, para a resolução de um problema prático envolvendo análise de estabilidade de taludes e cálculo do FS pelo SLOPE/W e SEEP/W serão necessárias as seguintes entradas:

- Definição do problema: Serão inseridas as configurações iniciais de unidades, escala, espaçamento da grade e eixos;
- Desenho dos contornos do problema e atribuição dos materiais: É adicionada a geometria do talude, assim como a distinção entre os tipos de materiais presentes na estrutura;
- Definir as propriedades dos solos e vincular as camadas: São adicionados dados como o modelo do material (o mais utilizado é o de Mohr Coulomb), peso específico, coesão e ângulo de atrito;
- Especificar os métodos de análise: Especifica qual método de análise numérica será escolhido para a análise, como o de Morgenstern-Price, Janbu, Spencer, etc.;
- Desenhar a linha piezométrica: Entrada de dados referentes às coordenadas da linha piezométrica e aplicação da poropressão no cálculo do problema;
- Desenhar a superfície de ruptura (ou pesquisa): Entrada das coordenadas ou desenho das superfícies de pesquisa;
- Salvar, resolver e visualização dos resultados: Após da execução do cálculo com os dados de entrada, o programa irá fornecer um FS para a situação delineada.

A Figura 32 exemplifica potenciais superfícies de ruptura obtidas por análise no SLOPE/W, sendo a superfície crítica delineada em branco.

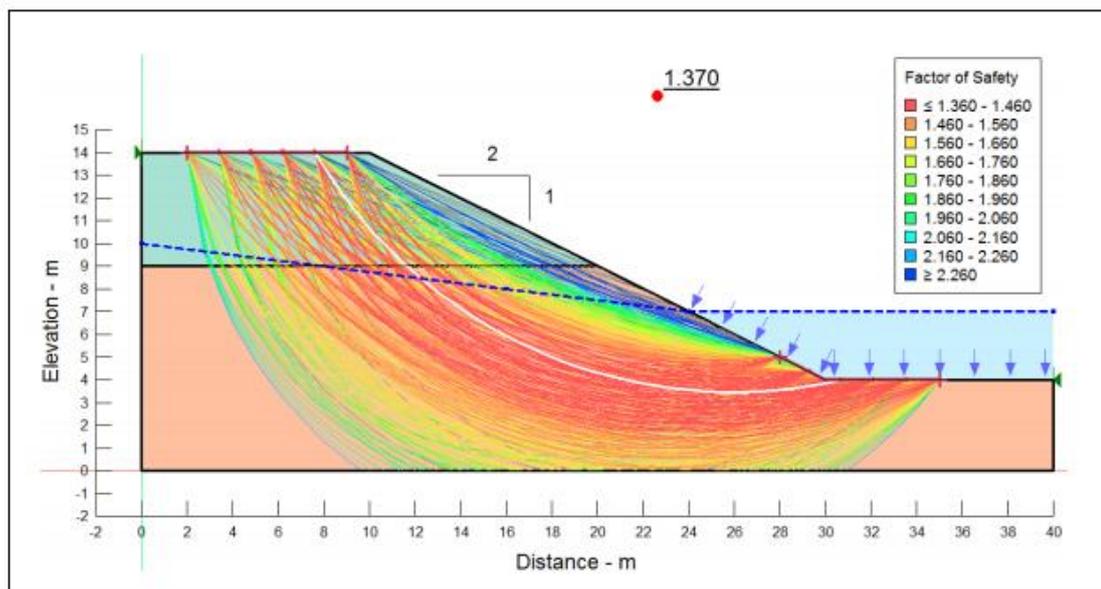


Figura 32. Exemplo de análise de estabilidade de talude via SLOPE/W, indicando FS para cada superfície de ruptura e FS global.

Fonte: GEO-SLOPE, 2018.

De acordo com a Norma Brasileira ABNT NBR 13.028/17, que trata do projeto de barragens para a disposição de rejeitos, existem fatores mínimos de segurança aceitáveis para a estabilidade de taludes, de acordo com as fases de construção do barramento e suas condições de operação, sendo estes demonstrados pela Tabela 4.

Tabela 4. FS mínimos aceitáveis para barragens de rejeito de mineração.

Fase	FS mínimo	Risco de ruptura
Final de construção	<b>1,3</b>	Maciço e fundação
Operação com rede de fluxo em condição normal de operação, nível máximo do reservatório	<b>1,5</b>	Maciço e fundação
Operação com rede de fluxo em condição extrema de operação, nível máximo do reservatório	<b>1,3</b>	Maciço e fundação
Operação com rebaixamento rápido do NA do reservatório	<b>1,1</b>	Maciço
Operação com rede de fluxo em condição normal	<b>1,5</b>	Maciço
Solicitação sísmica, com nível máximo do reservatório	<b>1,1</b>	Maciço e fundação

Fonte: ABNT, 2017.

## 2.2.2. Considerações legais e ambientais

### 2.2.2.1. Órgãos responsáveis

A Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, estabelece as responsabilidades acerca das barragens brasileiras para os órgãos federais (BRASIL, 2010), dentre eles a ANA, ANEEL, IBAMA e ANM. A Agência Nacional de Águas (ANA) é a responsável pela fiscalização das barragens de acumulação de água para usos múltiplos, como as de abastecimento de água para consumo humano, uso residencial e industrial, irrigação, regularização de vazões, navegação, aquicultura, lazer e turismo, mas não se aplica àquelas utilizadas para geração de energia.

A ANA é uma autarquia sob regime especial, vinculada ao Ministério do Meio Ambiente (MMA), responsável pela implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos e é a entidade emissora de outorga do uso destes recursos para corpos d'água que estejam sob domínio da União.

Já a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) é definida como a responsável pela fiscalização de barragens para geração de energia e é uma autarquia sob regime especial, vinculada ao Ministério de Minas e Energia (MME).

O Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais (IBAMA) é o responsável pela fiscalização de barragens de resíduos industriais. Tem como objetivos exercer a função de polícia ambiental, realizar execuções federais de licenciamento ambiental, controlar a qualidade ambiental, autorizar o uso dos recursos naturais, tal como exercer sua fiscalização e monitoramento. É uma autarquia federal, vinculada ao MMA e subdelega atribuições aos órgãos ambientais estaduais.

A Agência Nacional de Mineração (ANM), órgão que substituiu o Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), é a responsável pela fiscalização das barragens de mineração e é outorgante de direitos minerários para disposição final ou temporária de rejeitos. É uma autarquia federal, também vinculada ao MME e controla todas as atividades de mineração no território nacional, com base no Código de Mineração, Código de Águas Minerais e seus respectivos regulamentos complementares.

A Figura 33 ilustra os vínculos dos órgãos fiscalizadores de barragens brasileiras aos respectivos ministérios.

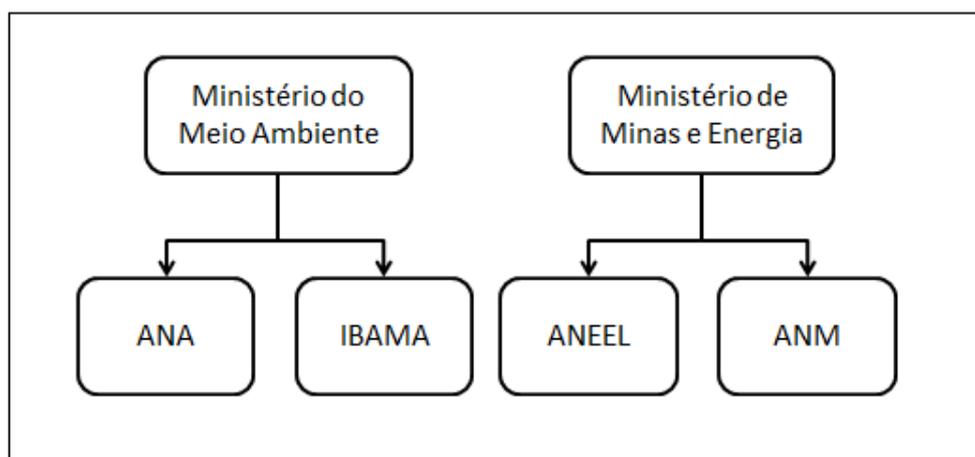


Figura 33. Relação de órgãos fiscalizadores de barragens brasileiras.

Em Minas Gerais, de acordo com a Lei nº 23.291, de 25 de fevereiro de 2019, os órgãos e entidades componentes do Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (SISEMA) são os responsáveis pelo cadastro, licenciamento e fiscalização de barragens de rejeito de mineração no estado, de forma articulada com os órgãos federais.

O SISEMA coordena vários órgãos mineiros, administrando políticas e instrumentos que contemplam a gestão ambiental do estado. Dentre os órgãos estaduais componentes do SISEMA estão a SEMAD, COPAM, CERH, FEAM, IGAM e IEF.

A Lei Delegada nº 180, de 20 de janeiro de 2011, dispõe sobre a estrutura da Secretaria de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável (SEMAD), órgão responsável pela formulação e coordenação da Política Estadual de Conservação e Proteção do Meio Ambiente, gerenciamento dos recursos hídricos e demais recursos ambientais, com o objetivo de buscar o desenvolvimento sustentável no estado.

O Conselho Estadual de Política Ambiental (COPAM) foi instituído pelo Decreto 44.667, de 3 de dezembro de 2007 e tem o objetivo de deliberar sobre diretrizes, políticas, regulamentos, técnicas, padrões e outras medidas de caráter operacional, para preservação e conservação do meio ambiente e dos recursos ambientais.

Já o Conselho Estadual de Recursos Hídricos (CERH) foi instituído pelo Decreto nº 37.191, de 28 de agosto de 1995, e possui o papel de gestor da Política Estadual de Recursos Hídricos. Em sua competência está a gestão do Plano Estadual de Recursos Hídricos, dos Comitês de Bacias Hidrográficas, assim como atua como órgão deliberativo e normativo acerca dos recursos hídricos no estado.

A Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM) foi criada pelo Decreto nº 28.163, de 6 de junho de 1988 e atua na implementação de políticas públicas relativas à mudança

climática, às energias renováveis, à qualidade do ar, à qualidade do solo e à gestão de efluentes líquidos e de resíduos sólidos. Realiza a supervisão de ações relativas à gestão ambiental de barragens de rejeito no estado e possui o Núcleo de Gestão de Barragens como o centro de competência para acompanhar e gerenciar cadastros sobre estes barramentos. Suas principais atribuições são (MINAS GERAIS, 2018):

- I – Processar e monitorar o cadastro e as informações fornecidas pelos empreendedores quanto à gestão dos rejeitos ou dos resíduos industriais e de mineração quando destinados a barragens de contenção, e divulgar anualmente os respectivos inventários;
- II – Desenvolver ações de gestão de barragens para contenção de resíduos ou de rejeitos da indústria e da mineração;
- III – Articular-se com os órgãos e entidades fiscalizadores de barragem a fim de alinhar e otimizar políticas públicas de gestão dessas estruturas de contenção de resíduos ou de rejeitos da indústria e da mineração;
- IV – Fiscalizar e aplicar sanções administrativas em relação à gestão e ao gerenciamento de barragens de contenção de rejeitos ou de resíduos industriais e de mineração.

O Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM) foi criado pela Lei nº 12.584, de 17 de julho de 1997 e busca desenvolver e implementar o Plano Estadual de Recursos Hídricos, atuando no controle, monitoramento e regulamento do uso de recursos hídricos, como na fiscalização de barragens de acumulação de água, dentre outros.

O Instituto Estadual de Florestas (IEF) foi criado pela Lei nº 2.606, de 05 de janeiro de 1962, com o objetivo de desenvolver e implementar as Políticas Florestal e de Biodiversidade de Minas Gerais, visando à manutenção do equilíbrio ecológico, à conservação, à preservação, ao uso sustentável e à recuperação dos ecossistemas. Desta forma, promove o mapeamento da cobertura vegetal do estado, implementa o Cadastro Ambiental Rural, realiza a gestão das Unidades de conservação, dentre outros.

Não existe uma hierarquia definida entre os órgãos fiscalizadores para a gestão de barragens brasileiras, porém, cabe à ANA articular aqueles envolvidos na sua fiscalização, de acordo com suas respectivas áreas de atuação (BRASIL, 2010).

Desta forma, no caso das barragens de rejeitos de mineração, os órgãos fiscalizadores de segurança de barragens federais, ANA e ANM, em conjunto com os órgãos estaduais, OERHs (Órgãos Estaduais de Recursos Hídricos) e OEMAs (Órgãos Gestores Estaduais do

Meio Ambiente), que, no caso de Minas Gerais, correspondem àqueles componentes do SISEMA, cadastram, regulamentam, fiscalizam e classificam as barragens de rejeito mineiras, encaminhando as informações pertinentes para a ANA.

A ANA, por sua vez, reúne e estrutura tais informações, implementando a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) e disponibiliza para a sociedade as informações referentes a estes barramentos através do Relatório Anual de Segurança de Barragens e do Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB), além de encaminhar o Relatório Anual para o Conselho Nacional de Recursos Hídricos, que o avalia e encaminha para o Congresso Nacional (ANA, 2011).

A Figura 34 ilustra a configuração dos órgãos fiscalizadores relacionados a PNSB.

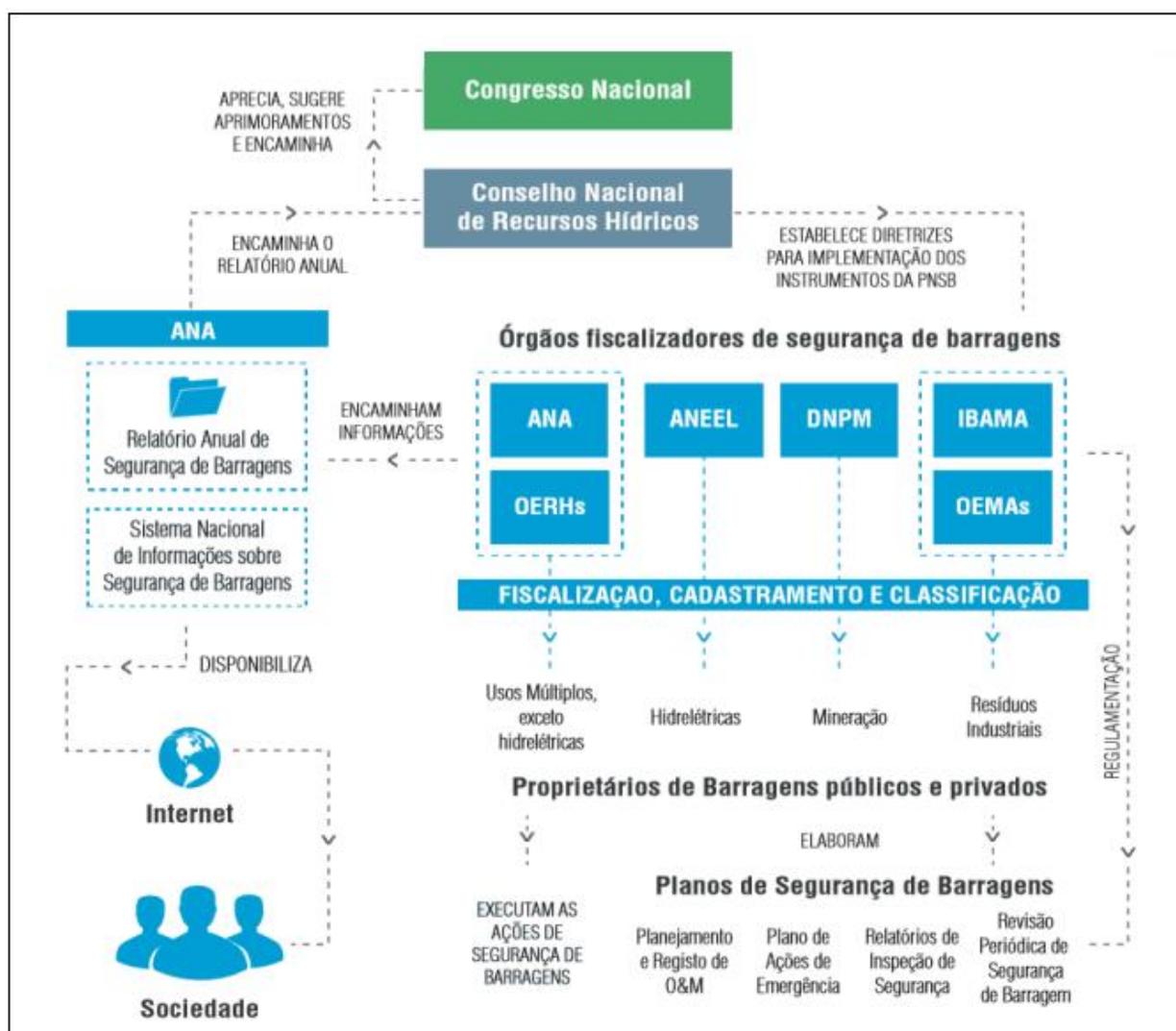


Figura 34. Estrutura dos órgãos fiscalizadores na PNSB.

Fonte: Adaptado de ANA, 2014.

### 2.2.2.2. Política Nacional de Segurança de Barragens

No período que antecede a promulgação da Lei 12.334, de 20 de setembro de 2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), não havia, em âmbito nacional, indicações diretas de responsabilidades visando à fiscalização da segurança das barragens no Brasil (NEVES, 2018). Na realidade, ocorriam supervisões isoladas de alguns empreendedores, com o intuito de adotar padrões internacionais para a segurança de seus barramentos.

Com a promulgação da referida Lei, iniciou-se a regulamentação das ações de segurança adotadas nas fases de planejamento, projeto, construção, primeiro enchimento, primeiro vertimento, operação, desativação e usos futuros da barragem (MARTINI, 2018).

A PNSB estipula as bases para um adequado programa de controle e monitoramento das ações referentes à segurança a serem empregadas pelos empreendedores responsáveis pelos barramentos. Ela trata das barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais, desde que a barragem possua (BRASIL, 2010):

- Altura do maciço maior ou igual a 15 metros, desde o ponto mais baixo da fundação à crista;
- Reservatório com capacidade maior ou igual a 3.000.000 m<sup>3</sup>;
- Reservatório contendo resíduos perigosos conforme normas técnicas;
- Dano potencial associado de grau médio a alto, considerando aspectos econômicos, sociais, ambientais ou de perda de vidas humanas.

Esta Política possui sete instrumentos para sua implementação (BRASIL, 2010), que contribuem de forma integrada para cumprir a Lei 12.334/10:

1. Sistema de classificação de barragens por categoria de risco e por dano potencial associado;
2. Plano de Segurança de Barragem (PSB);
3. Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB);
4. Sistema Nacional de Informações sobre o Meio Ambiente (SINIMA);
5. Cadastro Técnico Federal de Atividades e Instrumentos de Defesa Ambiental (CTF/AIDA);
6. Cadastro Técnico Federal de Atividades Potencialmente Poluidoras ou Utilizadoras de Recursos Ambientais (CTF/APP);

## 7. Relatório de Segurança de Barragens.

O Sistema de Classificação de Barragens busca a hierarquização destas estruturas no país, de acordo com as magnitudes das consequências de um possível acidente, estabelecendo níveis apropriados de monitoramento, inspeção e planos de segurança para cada empreendimento (MARTINI, 2018).

Esta classificação é realizada conforme Resolução nº 143 (CNRH, 2012), Anexo I, que dispõe sobre os critérios, parâmetros e as respectivas pontuações atribuídas para tal e, no caso de barragens de disposição de resíduos e rejeitos, a categoria de risco é calculada a partir de uma avaliação referente às características técnicas da barragem, seu estado de conservação e seu Plano de Segurança. Assim, com a pontuação obtida, as barragens são classificadas em categorias de risco e dano potencial alto, médio ou baixo.

Outro instrumento da PNSB, o PSB, é atribuição específica do empreendedor, com a função de auxiliá-lo na gestão da segurança da barragem, e deve ser elaborado por profissional devidamente habilitado, contendo, segundo o Artigo 8º da 12.334/2010 (BRASIL, 2010):

- I. Identificação do empreendedor;
- II. Dados técnicos referentes à implantação do empreendimento, inclusive, no caso de empreendimentos construídos após a promulgação desta Lei, do projeto como construído, bem como aqueles necessários para a operação e manutenção da barragem;
- III. Estrutura organizacional e qualificação técnica dos profissionais da equipe de segurança da barragem;
- IV. Manuais de procedimentos dos roteiros de inspeções de segurança e de monitoramento e relatórios de segurança da barragem;
- V. Regra operacional dos dispositivos de descarga da barragem;
- VI. Indicação da área do entorno das instalações e seus respectivos acessos, a serem resguardados de quaisquer usos ou ocupações permanentes, exceto aqueles indispensáveis à manutenção e à operação da barragem;
- VII. Plano de Ação de Emergência (PAE), quando exigido;
- VIII. Relatórios das inspeções de segurança;
- IX. Revisões periódicas de segurança.

O PSB dever ser compilado em cinco volumes distintos (MARTINI, 2018), conforme demonstra a Tabela 5, contendo as informações por ela demonstradas.

Tabela 5. Documentos técnicos compilados no PSB.

<b>PSB</b>	
<b>Volumes</b>	<b>Conteúdo</b>
I	Informações gerais
II	Planos e procedimentos
III	Registros e Controles
IV	Plano de ação emergencial
V	Revisão periódica de segurança de barragem

Fonte: Adaptado de MARTINI, 2018.

Já o SNISB tem a função de coletar, armazenar, tratar, gerir e disponibilizar para a sociedade as informações relacionadas à segurança de barragens em todo o território nacional (SNISB, 2018). É um cadastro consolidado de informações sobre as barragens brasileiras, que é responsabilidade de cada entidade ou órgão fiscalizador de barragens do país.

O SNISB integra seus dados com os do SINIMA, do Cadastro Técnico Federal de Atividades e Instrumentos de Defesa Ambiental (CTF/AIDA) e do Cadastro Técnico Federal de Atividades Potencialmente Poluidoras ou Utilizadoras de Recursos Ambientais (CTF/APP).

Além da Lei 12.334/2010, as seguintes resoluções complementam a PNSB:

- Resolução nº 143 (CNRH, 2012), criada pelo CNRH, estabelece os critérios gerais de classificação de barragens por categoria de risco, dano potencial associado e pelo volume do reservatório;
- Resolução nº 144 (CNRH, 2012), elaborada pelo CNRH, estabelece as diretrizes para implementar a PNSB, aplicar seus instrumentos e atuar no SNISB. O artigo 4º dessa Resolução demonstra quais documentos devem compor o PSB;
- Resolução nº 91 (ANA, 2012), confeccionada pela ANA, regulamenta as diretrizes gerais, o conteúdo mínimo e as demais prescrições para a elaboração do relatório de implantação do PSB, bem como de suas revisões periódicas.

### 2.2.2.3. Resolução nº 2.372/16

Em Minas Gerais, a Resolução nº 2.372 de 2016, elaborada pela SEMAD/FEAM, estabelece diretrizes para realizar Auditoria Técnica Extraordinária de Segurança de Barragens de rejeito com alteamento para montante e para a emissão da correspondente Declaração Extraordinária de Condição de Estabilidade de que trata o Decreto nº 46.993 de 02 de maio de 2016 e dá outras providências.

Esta Auditoria Extraordinária deve ser realizada por profissional habilitado, especialista em segurança de barragens, externo ao quadro de funcionários da empresa responsável pela barragem e com devida Anotação de Responsabilidade Técnica (ART) e, independente da conclusão na Declaração Extraordinária de Condição de Estabilidade, o empreendedor deverá adotar o Plano de Ação para Adequação das Condições de Estabilidade e de Operação de Barragem, contendo medidas para a minimização de acidentes ou incidentes.

O Anexo I desta Resolução demonstra as diretrizes para a realização da Auditoria Extraordinária. Neste caso, o auditor deverá avaliar:

- Caracterização tecnológica dos rejeitos: Natureza; Porcentagem de sólidos na polpa; Características físicas (granulometria e plasticidade); Parâmetros de adensamento, condutividade hidráulica, resistência drenada e não drenada, susceptibilidade à liquefação;
- Instrumentação e Sistemas de monitoramento: Tipos; Quantidade; Localização; Operação; Manutenção e condições gerais destes sistemas;
- Sistemas de drenagem interno, externo e extravasores da barragem: Dimensionamento, manutenção e condição dos sistemas de drenagem interno (filtros, tapetes, etc.) e de drenagem das águas superficiais sobre o barramento e as estruturas de extravasão;
- Segurança operacional: Metodologia de lançamento dos rejeitos; Procedimentos de leitura e análise dos resultados provenientes do monitoramento; Procedimentos adotados para o controle da linha freática e da borda livre do reservatório; Estimativas da delimitação das áreas de inundação; Rotas de fuga e procedimentos previstos para comunidades afetadas em caso de situações atípicas e/ou emergenciais;
- Mecanismo de rompimento de barragens: Instabilidade (maciço e fundação); Liquefação (rejeitos e/ou maciço); Galgamento; *Piping*;
- Registro de anomalias: Histórico de acidentes, incidentes ou eventos atípicos desde a implantação do barramento, descrevendo as medidas corretivas adotadas;

- Recomendações das auditorias anteriores: Execução das recomendações e ações estipuladas nas últimas auditorias, e justificativa pela sua continuidade ou descontinuidade, quando for o caso;

- Plano de ação: Plano de ação de Segurança de Barragens, contemplando a descrição das ações e medidas estabelecidas para alcançar a estabilidade, juntamente com cronograma executivo, além da descrição do acompanhamento da implantação de projetos básico e executivo de obras na barragem em avaliação, dentre outras questões que o Auditor e responsável legal considerem necessárias.

- Conclusão: Consolidação de informações quanto à condição de estabilidade da barragem sob todos os aspectos avaliados durante a realização da Auditoria Extraordinária de Segurança de Barragem, além da listagem e do cronograma das recomendações para manutenção ou melhoria das condições de estabilidade da barragem de rejeitos.

Assim, de acordo com o resultado desta auditoria, o órgão ambiental competente poderá determinar que o empreendedor realize novas auditorias para garantir a estabilidade do barramento, suspender ou reduzir as atividades minerárias do empreendimento ou, até mesmo, desativar a barragem.

A frequência das Auditorias Técnicas deve ter a periodicidade anual, para barragens com alto potencial de dano ambiental; a cada dois anos, para barramentos com médio potencial de dano ambiental e a cada três anos, para aquelas com baixo potencial (MINAS GERAIS, 2019).

Além disto, até que o COPAM defina critérios e procedimentos adicionais a serem adotados nos empreendimentos minerários após a apresentação da Declaração Extraordinária de Condição de Estabilidade, ficam suspensos os processos para o licenciamento ambiental de instalação ou ampliação de novas barragens de rejeito que utilizem o método de alteamento para montante.

#### 2.2.2.4. Projeto de Lei nº 3.913/19

Desde dezembro de 2015, tramita no Senado Federal Brasileiro, o Projeto de Lei que proíbe o licenciamento ambiental de novas barragens de rejeito e resíduos industriais, além de estabelecer regras de segurança e prazo para o descomissionamento das barragens de rejeitos e das barragens de resíduos industriais em construção ou existentes, ativas ou inativas, e institui a Taxa de Fiscalização de Segurança de Barragens de Rejeitos (TFSBR).

O descomissionamento de uma barragem é o encerramento de suas operações, com a retirada de estruturas associadas como espigotes e tubulações, excetuando-se aquelas que garantam a segurança da estrutura (ANM, 2019).

Neste projeto, proposto pela Comissão Parlamentar de Inquérito destinada a apurar as causas do rompimento da barragem na Mina Córrego do Feijão, da empresa de mineração Vale, em Brumadinho e outras barragens, a proposta é que as barragens ativas tenham dez anos para o descomissionamento e, para as inativas, este prazo chegue a cinco anos. Caso seja aprovada, é aplicável tanto para as barragens de rejeito de mineração quanto para as de rejeitos industriais em geral.

#### 2.2.2.5. Licenciamento ambiental

As atividades humanas geralmente interferem nos processos ambientais e, de acordo com o grau de modificação no meio natural, o desequilíbrio gerado nestes processos é consequência inevitável. Este desequilíbrio é danoso para a vida em geral, podendo acarretar em mudanças no clima, desaparecimento de espécies vegetais e animais, alterações no regime hidrológico, dentre muitos outros, comprometendo o modo e a qualidade de vida de todas as espécies.

No Brasil, o equilíbrio ecológico do meio ambiente é assegurado pela Constituição Federal de 1988 e sua defesa é de responsabilidade do poder público e da sociedade. A regulamentação ambiental brasileira teve início no período colonial, expandindo-se durante o Brasil imperial e se consolidando em 1934 (CÂMARA, 2013), durante a criação do Estado Novo, com a instituição do primeiro Código Florestal Brasileiro, via Decreto nº 23.793.

Na Resolução nº 1, de 23 de janeiro de 1986, o CONAMA institui o conceito de Impacto Ambiental, fundamental para que tivesse início a aplicação dos instrumentos da Política Nacional do Meio Ambiente (PNMA), como sendo:

Qualquer alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente, causada por qualquer forma de matéria ou energia resultante das atividades humanas que, direta ou indiretamente, afetem:

I - A saúde, a segurança e o bem-estar da população;

II - As atividades sociais e econômicas;

III - A biota;

IV - As condições estéticas e sanitárias do meio ambiente;

V - A qualidade dos recursos ambientais.

Desta forma, com a associação de impacto ambiental às atividades humanas, instituiu-se o Licenciamento Ambiental, que é o procedimento administrativo realizado pelo órgão ambiental competente para licenciar a localização, instalação, ampliação e a operação de empreendimentos e atividades utilizadoras de recursos ambientais, consideradas efetiva ou potencialmente poluidoras ou daquelas que, sob qualquer forma, possam causar degradação ambiental, considerando as disposições legais e regulamentares e as normas técnicas aplicáveis ao caso (CONAMA, 1997).

Em âmbito federal, a estrutura para o Licenciamento Ambiental é composta pelo CONAMA, órgão consultivo e deliberativo, que tem a função de estabelecer políticas, normas e padrões ambientais que devem ser obedecidos pelos interessados. Também é composto pelo IBAMA, órgão executivo federal, cuja função é de fiscalização e execução de licenças ambientais a nível federal. É sua responsabilidade exigir do empreendedor, através da licença ambiental, que sejam adotadas as medidas capazes de assegurar que as matérias-primas, insumos e bens produzidos tenham padrão de qualidade que elimine ou reduza o efeito poluente derivado de seu emprego e utilização (BRASIL, 1990).

No âmbito estadual, em Minas Gerais, de acordo com o Decreto nº 47.383, de 03 de março de 2018, o processo de Licenciamento Ambiental é competência do COPAM, através das Câmaras Especializadas das Unidades Regionais Colegiadas (URCs) e das Superintendências Regionais de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável (SUPRAMs), além de outros órgãos integrantes do SISEMA, como o CERH, SEMAD, FEAM, IGAM e IEF (MINAS GERAIS, 2018), atuando em articulação com entidades federais, estaduais e municipais, quando for o caso.

No caso da indústria da mineração, tanto a pesquisa quanto a lavra, perfuração, beneficiamento e disposição final dos rejeitos em barragens são itens constantes do Anexo I da Resolução CONAMA nº 237/1997, ou seja, são atividades que necessitam de passar pelo processo de Licenciamento Ambiental. Este poderá resultar na expedição das seguintes licenças (BRASIL, 1997):

- Licença Prévia (LP): É concedida na fase preliminar do planejamento do empreendimento ou atividade, de forma a aprovar sua localização, analisando sua viabilidade ambiental e estabelecendo os requisitos básicos e condicionantes a serem atendidos nas próximas fases de sua implementação;
- Licença de Instalação (LI): Autoriza a instalação do empreendimento ou atividade em relação às especificações constantes dos planos, programas e projetos aprovados, incluindo as medidas de controle ambiental e demais condicionantes;

- Licença de Operação (LO): Autoriza a operação da atividade ou empreendimento, após a verificação do efetivo cumprimento dos condicionantes das licenças anteriores.

Em Minas Gerais, a Deliberação Normativa COPAM nº 217 de 2017 estabelece novas modalidades para o Licenciamento Ambiental, permitindo que as LP, LI e LO possam ser concedidas de maneira conjunta:

I – Licenciamento Ambiental Trifásico (LAT): Licenciamento no qual a LP, LI e LO da atividade ou do empreendimento são concedidas em etapas sucessivas;

II – Licenciamento Ambiental Concomitante (LAC): Licenciamento no qual serão analisadas as mesmas etapas previstas no LAT, com a expedição concomitantemente de duas ou mais licenças;

III – Licenciamento Ambiental Simplificado: Licenciamento realizado em uma única etapa, mediante o cadastro de informações relativas à atividade ou ao empreendimento junto ao órgão ambiental competente, ou pela apresentação do Relatório Ambiental Simplificado (RAS), contendo a descrição da atividade ou do empreendimento e as respectivas medidas de controle ambiental.

Durante o Licenciamento Ambiental, para aqueles empreendedores que possuam atividades modificadoras do meio ambiente, conforme listado no Artigo 2º da Resolução CONAMA nº 01/1986, fica estabelecida a obrigatoriedade de apresentação, ao órgão competente, do o Estudo de Impacto Ambiental e respectivo Relatório de Impacto Ambiental (EIA/RIMA), como é o caso das barragens de rejeito de mineração.

O EIA/RIMA é uma forma dos órgãos ambientais, a expensas do interessado, analisarem a viabilidade ambiental de um empreendimento. Este estudo deverá conter, no mínimo, as seguintes informações (CONAMA, 1986):

I - Diagnóstico ambiental da área de influência do projeto: Completa descrição e análise dos recursos ambientais e suas interações, tal como existem, de modo a caracterizar a situação ambiental da área, antes da implantação do projeto, considerando:

a) o meio físico - o subsolo, as águas, o ar e o clima, destacando os recursos minerais, a topografia, os tipos e aptidões do solo, os corpos d'água, o regime hidrológico, as correntes marinhas, as correntes atmosféricas;

b) o meio biológico e os ecossistemas naturais - a fauna e a flora, destacando as espécies indicadoras da qualidade ambiental, de valor científico e

econômico, raras e ameaçadas de extinção e as áreas de preservação permanente;

c) o meio socioeconômico - o uso e ocupação do solo, os usos da água e a socioeconomia, destacando os sítios e monumentos arqueológicos, históricos e culturais da comunidade, as relações de dependência entre a sociedade local, os recursos ambientais e a potencial utilização futura desses recursos.

II - Análise dos impactos ambientais do projeto e de suas alternativas, através de identificação, previsão da magnitude e interpretação da importância dos prováveis impactos relevantes, discriminando: os impactos positivos e negativos (benéficos e adversos), diretos e indiretos, imediatos e a médio e longo prazos, temporários e permanentes; seu grau de reversibilidade; suas propriedades cumulativas e sinérgicas; a distribuição dos ônus e benefícios sociais.

III - Definição das medidas mitigadoras dos impactos negativos, entre elas os equipamentos de controle e sistemas de tratamento de despejos, avaliando a eficiência de cada uma delas.

IV - Elaboração do programa de acompanhamento e monitoramento (os impactos positivos e negativos, indicando os fatores e parâmetros a serem considerados).

Assim, a partir do diagnóstico ambiental da área de influência do projeto, os impactos ambientais podem ser criteriosamente levantados pelo EIA/RIMA e, desta forma, podem ser individualmente avaliados para definição de medidas mitigadoras de impactos negativos, medidas que aumentem o potencial de impactos positivos, assim como a definição de parâmetros para seu monitoramento.

A Avaliação de Impacto Ambiental (AIA), é a principal forma de análise dos impactos ambientais de um projeto e, apesar de não ser um instrumento de decisão (COSTA et al., 2005), fornece uma metodologia para avaliar sistematicamente os impactos de um projeto, maximizando os benefícios relacionados à saúde, bem-estar humano, meio ambiente e outros elementos. O Check-List é um dos métodos mais utilizados em AIA, identificando e magnificando os impactos enumerados pelo EIA/RIMA.

Os impactos ambientais decorrentes da instalação e operação de uma barragem de rejeitos são variáveis, dependendo de cada projeto e área de instalação. No Estudo de Impacto Ambiental da Barragem de Rejeitos B5 da Bungue Fertilizantes (PROMINER, 2008) são descritos alguns impactos ambientais como a deterioração das propriedades físicas do solo,

risco de contaminação do solo, deterioração da qualidade do ar e das águas superficiais, perda de fauna e flora, desconforto visual, perda de vestígios arqueológicos, dentre outros.

Portanto, é de extrema importância que o empreendedor responsável pela barragem de rejeitos submeta o projeto ao processo de Licenciamento Ambiental sendo que, em Minas Gerais, deve seguir as diretrizes dispostas pelo Decreto nº 47.383 de 2018, conforme demonstra a Tabela 6.

Tabela 6. Etapas necessárias para requisição de Licença Ambiental em Minas Gerais.

<b>Etapas para aquisição de Licença Ambiental</b>
Preenchimento do Formulário de Caracterização do Empreendimento (FCE)
Entrega do FCE na respectiva SUPRAM
Análise de documentação pela SUPRAM e geração de Formulário de Orientação Básica (FOB), que irá listar todos os documentos necessários para obtenção da Licença Ambiental ou da Autorização Ambiental de Funcionamento (AFF)
Após o recebimento da FOB, em prazo de 180 dias, protocolar pedido de licença na SUPRAM
Com o recibo do protocolo, dá-se início ao processo de licença
Publicação no Diário Oficial do Estado sobre o requerimento de Licença Ambiental
Publicação sobre o requerimento da licença em jornal de grande circulação na área de influência do empreendimento
Caso haja necessidade de apresentação de EIA/RIMA (CONAMA 01/86), é necessário um prazo de 45 dias para solicitação de audiência pública pela comunidade afetada
O processo de licenciamento é encaminhado para a Diretoria Técnica de Análises, que elabora seu parecer
O processo de licenciamento é encaminhado para a Assessoria Jurídica, que elabora seu parecer ao fórum de decisão
Com o parecer da FEAM, o processo é formalmente encaminhado para as Unidades Regionais Colegiadas (URC) do COPAM para análise e julgamento
As URC do COPAM avaliam, julgam e decidem sobre o processo de licenciamento
O processo é encaminhado para assinatura de certificado ou notificação de indeferimento pelo Presidente da FEAM

Fonte: Adaptado de MINAS GERAIS, 2018.

Além das obrigações estipuladas pelo órgão responsável através do processo de Licenciamento Ambiental, em especial em relação à PNSB, o empreendedor deverá (MINAS GERAIS, 2019):

- Informar ao órgão responsável qualquer alteração que possa resultar na redução da capacidade de descarga da barragem ou que possa comprometer sua segurança;
- Permitir acesso irrestrito aos representantes dos órgãos componentes do SISEMA, do Sistema Nacional de Proteção e Defesa Civil (SINPDEC) tanto ao local da barragem quanto à sua documentação;
- Manter registros periódicos dos níveis dos reservatórios (volume armazenado e características físico-químicas do fluido nele armazenado);
- Manter registros periódicos dos níveis de contaminação do solo e lençol freático, na área de influência do reservatório;
- Executar ações de garantia e manutenção de segurança da barragem, conforme exigido por responsável técnico;
- Devolver a água para a bacia hidrográfica de origem, no mínimo, com a mesma qualidade em que foi captada;
- Disponibilizar em site público as informações: Empresas terceirizadas; Resultados das análises e dos acompanhamentos do grau de umidade e do nível da barragem, com respectivo ART; Análise semestral da água e dos rejeitos, com respectivo ART.

### **3. METODOLOGIA**

O presente trabalho visa fornecer um levantamento crítico da vasta literatura aplicada, considerando, de maneira geral, aspectos técnicos, legais e ambientais relacionados às barragens de rejeito de mineração, em especial para aqueles presentes no estado de Minas Gerais e, desta forma, apontar seus principais aspectos na forma de Listas de Verificação. A Figura 35 demonstra a sequência dos estudos realizados para sua obtenção.

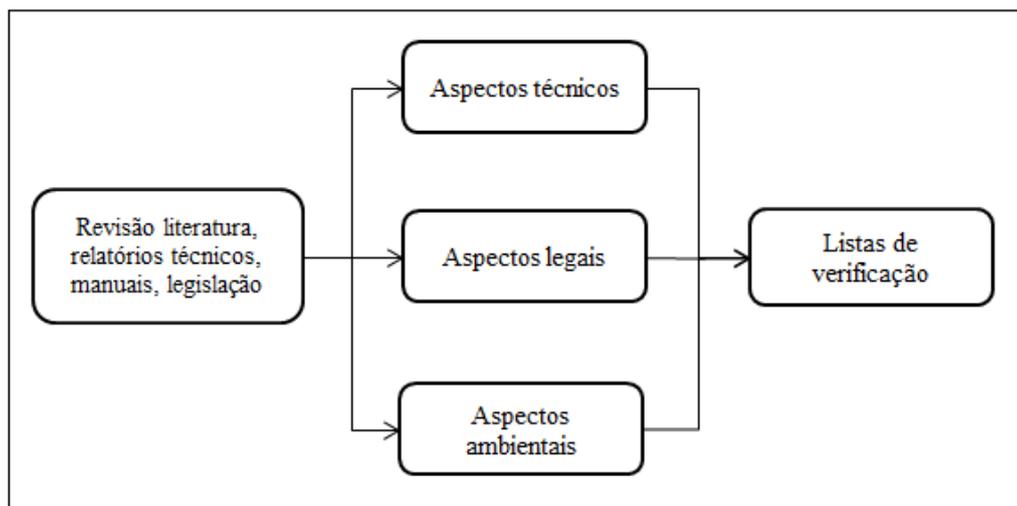


Figura 35. Sequência das etapas para obtenção das Listas de Verificação.

Em relação aos aspectos técnicos de barragens de rejeito de mineração, a pesquisa objetivou o estudo de sua construção, operação, monitoramento, inspeção e fatores condicionantes ao rompimento. Já em relação aos aspectos legais e ambientais, o foco deste trabalho foi levantar os principais órgãos brasileiros e mineiros relacionados à gestão de barragens de rejeito de mineração, a Política Nacional de Segurança de Barragens e seus instrumentos, a Resolução nº 2.372/16, o Projeto de Lei nº 3.913/19 e o Licenciamento Ambiental destas estruturas no estado de Minas Gerais. A Tabela 7 demonstra a estrutura das Listas de Verificação obtidas a partir de tais levantamentos.

Tabela 7. Conteúdo das Listas de Verificações.

<b>LISTAS DE VERIFICAÇÕES</b>	<b>INFORMAÇÕES</b>
Aspectos construtivos e operacionais de barragens de rejeito (aterro hidráulico)	Definição
	Operação
	Classificação
	Documentos (processo construtivo)
	Documentos (gerenciamento operacional)
Monitoramento e inspeção de barragens de rejeito	Componente da barragem
	Anomalias
	Instrumentação

Condicionantes ao rompimento de barragens de rejeito	Fenômeno
	Fatores condicionantes ao rompimento
	Causas
	Dispositivos de controle
Responsabilidades atribuídas à gestão de barragens de rejeito: Empreendedor, Órgãos Federais e Estaduais (MG)	Responsável
	Atribuições
Instrumentos legais e ambientais aplicáveis à gestão de barragens de rejeito no Brasil e em Minas Gerais	Instrumento
	Informações relevantes

#### 4. RESULTADOS

##### 4.1. Lista de verificação de aspectos construtivos e operacionais de barragens de rejeito

Esta Lista de Verificação, indicada pela Tabela 8, descreve a definição, a forma de operação e diferentes classificações de barragens de rejeito construídas pelo método do aterro hidráulico, já que este é o mais comumente utilizado pelas mineradoras brasileiras. Além disto, esta Lista demonstra uma relação dos tipos de documento e suas respectivas informações em relação ao processo construtivo e ao procedimento de operação de uma barragem de rejeito.

Tabela 8. Lista de verificação de aspectos construtivos e operacionais de barragens de rejeito

<b>ATERRO HIDRÁULICO</b>	
<b>Definição</b>	Transporte de rejeitos heterogêneos, na forma de polpa, por tubulações que o conduzem da saída da usina de beneficiamento até a entrada na barragem.
<b>Operação</b>	Uso de hidrociclones para classificação dos rejeitos em frações grossa e fina para descarga na barragem (por ponto único ou em linha). <b>Fração grossa (areia):</b> Saída na porção inferior do hidrociclone, depositada na região da praia. Material pode ser usado na construção da barragem. <b>Fração fina:</b> Saída na porção superior do hidrociclone, deposição na região do reservatório, por sedimentação.

<b>Classificação</b>	<p><b>De acordo com a seção da barragem:</b>  Homogêneas: Construída por materiais de única granulometria  Heterogêneas: Núcleo com materiais menos permeáveis que os espaldares de areia  Mistas: Núcleo com materiais menos permeáveis, lançados hidráulicamente e espaldares compactados.</p> <p><b>De acordo com o método construtivo:</b>  Montante: Rejeitos lançados à montante da crista até se atingir cota final de projeto  Jusante: Rejeitos lançados e compactados à jusante da crista até se atingir a cota final de projeto  Linha de centro: Rejeitos lançados à montante e jusante da crista, com eixo vertical coincidente com o dique de partida</p>
<b>DOCUMENTAÇÃO: PROCESSO CONSTRUTIVO</b>	
<b>Tipo de documento</b>	<b>Informações</b>
Relatório	Data de início e fim da obra
Contrato	Engenheiros responsáveis (com registro CREA)
Relatório	Detalhes da obra: Método de construção, tipo de seção, tipo e tratamento da fundação, implantação de desvios, Termo de liberação da construção, materiais utilizados
Relatório	Projeto executivo: Estudos geotécnicos, hidrológicos, hidráulicos, caracterização dos rejeitos
Relatório	Memorial de cálculos
Manuais	Dispositivos de controle e demais equipamentos
Relatório	Monitoramento: Batimetrias, qualidade da água, caracterização dos rejeitos, instrumentação
Registro	Incidentes (RI)
Plano	Ações Emergenciais (PAE)
Plano	Fechamento da barragem (PF)
<b>DOCUMENTAÇÃO: PROCEDIMENTO OPERACIONAL</b>	
<b>Tipo de documento</b>	<b>Informações</b>
<b>MANUAL DE OPERAÇÃO DA BARRAGEM</b>	Lançamento de rejeitos
	Manutenção da praia
	Manutenção do sistema extravasor
	Manutenção do nível de água do reservatório
	Bombeamento
	Recuperação de água
	Transporte de rejeitos
	Periodicidade de inspeções
	Auditorias internas: Descrição e periodicidade
	Auditorias externas: Descrição e periodicidade
	Avaliações de desempenho
	Leituras instrumentos de medição
	Revisão de conteúdo
	Treinamentos
Procedimentos em caso de emergência	

#### 4.2. Lista de verificação para monitoramento e inspeção de barragens de rejeito

A Lista de Verificação indicada pela Tabela 9, demonstra os principais parâmetros qualitativos, que podem ser observados durante inspeções rotineiras de anomalias na estrutura da barragem e os principais parâmetros quantitativos, obtidos à partir da análise criteriosa de medidas instrumentais, que devem ser monitorados por componente da barragem, sendo todos eles importantes para a manutenção da segurança do barramento.

Tabela 9. Lista de verificação para monitoramento e inspeção de barragens de rejeito.

<b>Componente da barragem</b>	<b>Anomalias (parâmetros qualitativos)</b>	<b>Instrumentação (parâmetros quantitativos)</b>
Taludes	Erosões; Rachaduras; Deslizamentos; Sumidouros; Afundamentos; Vegetação; Tráfego de animais; Formigueiros; <i>Rip-rap</i> incompleto, destruído ou deslocado; Presença de áreas molhadas e vazamentos.	Medidas de inclinações e dimensões das erosões.
Crista	Erosões; Rachaduras; Buracos; Vegetação; Trilhas e afundamentos.	Medidas em relação ao deslocamento e erosões.
Reservatório	Aspecto e nível da água; Aspecto e nível do rejeito.	Cota do N.A.; Borda livre, Capacidade; Superfície batimétrica; Parâmetros de estações meteorológicas e análises físico-químicas de qualidade da água descartada e do reservatório.
Extravasor	Aspecto do efluente descartado; Aspecto das estruturas e sistemas de segurança.	Medidas de vazão; Parâmetros de físico-químicos de qualidade, especialmente a turbidez; Medidas de seções e dimensões internas.
Tubulações	Condições gerais de transporte dos rejeitos e da água.	Análises das vazões e pressões; Posições dos tubos.
Rejeitos	Aspecto geral: cor, textura, odor.	Análises granulométricas; Porcentagem de sólidos; Vazão e densidade de polpa; Volumes lançados e depositados; Análises químicas; Permeabilidade e resistência ao cisalhamento.
Praia	Condição geral.	Posição; Inclinação; Largura e posição dos ciclones ou espigotes.

#### 4.3. Lista de verificação de condicionantes ao rompimento de barragens de rejeito

Esta Lista de Verificação aponta os principais fenômenos que comprometem a segurança estrutural de uma barragem de rejeito de aterro hidráulico e relaciona cada fenômeno ao respectivo fator que condiciona a barragem à situação de ruptura, suas principais causas e dispositivos de controle. Esta Lista é indicada pela Tabela 10.

Tabela 10. Lista de verificação de condicionantes ao rompimento de barragens de rejeito.

<b>Fenômeno</b>	<b>Fatores condicionantes ao rompimento</b>	<b>Causas</b>	<b>Dispositivos de controle</b>
Percolação pelo maciço	Erosão regressiva ( <i>piping</i> ) tubular e global	Falha no controle da superfície freática da percolação; Aumento da poropressão; Ineficiência no sistema de drenagem interno; Defeitos na estrutura ( <i>rachaduras, sinkholes</i> )	Cut off; Tapetes impermeáveis; Filtros e drenos; Poços de alívio
Deslocamentos	Fissuração	Alterações na geometria do maciço; Redução na resistência interior do maciço; Ocorrência de trincas, recalques e/ou assentamentos	Compactação adequada durante construção do maciço; Controle NA
Deformações	Fissuração	Propriedades mecânicas inadequadas dos materiais de construção; Baixa resistência ao cisalhamento dos materiais de construção; Inadequada espessura de camada compactada do maciço; Inadequado método de lançamento, direção de espalhamento e/ou compactação do rejeito; Falhas na fundação; Alto índice de poropressão; Variação do NA do reservatório; Sismicidade regional.	Materiais construtivos adequados; Compactação das camadas do maciço; Compactação do rejeito; Eficiente sistema de drenagem interna
Erosão superficial	Sulcos, ravinas	Escoamento de águas superficiais; Deficiente nivelamentos e inclinação da crista	Revestimento da crista (cascalho, concreto, asfalto, grama); Revestimento dos taludes ( <i>rip-rap</i> )
Liquefação	Comportamento fluido de camadas de materiais da barragem	Características físico-químicas dos rejeitos; Aplicação de carregamentos não drenados; Deficiência no sistema de drenagem interna; Aumento da poropressão; Redução da tensão efetiva; Sismos ou vibrações	Aumento da largura da crista; Instalação de eficiente sistema de drenagem; Redução da inclinação de taludes; Índices de compactação dos materiais de construção acima de 60%

Galgamento	Ação erosiva do escoamento (brechas)	Operação inadequada durante a ocorrência de cheias; Limites inconformes da região da praia; Lançamento inadequado de rejeitos; Redução de borda livre; Cheias extraordinárias não previstas; Deformações; Formação de ondas induzidas.	Controle do NA; Preservação da borda livre; Estudos hidrológicos; Operações adequadas em cheias; Controle de deformações.
------------	--------------------------------------	--	---

#### 4.4. Lista de verificação de responsabilidades atribuídas à gestão de barragens de rejeito no Brasil e em Minas Gerais

A Lista de Verificação demonstrada pela Tabela 11, aponta os principais responsáveis e suas respectivas atribuições em relação à gestão das barragens de rejeito de mineração no Brasil e no estado de Minas Gerais.

Tabela 11. Lista de verificação de responsabilidades atribuídas à gestão de barragens de rejeito no Brasil e em Minas Gerais.

RESPONSÁVEIS	ATRIBUIÇÕES
<b>Empreendedor</b>	
Empreendedores que possuam barragens de rejeito: - Maciço > 15m - Capacidade reservatório > 3 milhões m <sup>3</sup> - Reservatório com resíduos perigosos - Dano potencial médio a alto	Elaborar e executar o PSB; Contratar Auditoria Técnica Extraordinária de Segurança; Emitir Declaração Extraordinária de Condição de Estabilidade; Adotar Plano de Ação para Adequação das Condições de Estabilidade e de Operação de Barragem. Executar condicionantes do Licenciamento Ambiental; Realizar CTF/APP; Realizar CTF/AIDA.
<b>Nível federal</b>	
ANM	Implementar a PNSB; Cadastro, classificação e fiscalização; Regulamentar PSB; Encaminhar dados para ANA.
IBAMA	Licenciamento ambiental.
ANA	Outorga para uso em corpos d'água sob domínio da União; Publicação do Relatório Anual de Segurança de Barragens; Manutenção do Sistema Nacional de Informação Sobre Barragens; Encaminhamento de Relatório Anual sobre Barragens para CNRH.
CNRH	Estabelecimento de diretrizes para PNSB.
<b>Nível estadual (MG)</b>	

COPAM	Deliberação sobre diretrizes, políticas, técnicas e licenciamento ambiental.
CERH	Deliberação e consulta sobre diretrizes, políticas e técnicas.
FEAM	Supervisão de ações relativas à gestão ambiental de barragens de rejeito Núcleo de Gestão de barragens: Processar e monitorar informações fornecidas pelos empreendedores; Desenvolvimento de ações na gestão de barragens de rejeito; Articulação com órgãos fiscalizadores; Fiscalizar e aplicar sanções administrativas.
IGAM	Controle, monitoramento e regulamento de recursos hídricos.
IEF	Controle, monitoramento e regulamento de recursos florestais.

#### 4.5. Lista de verificação do conteúdo dos instrumentos legais e ambientais aplicáveis à gestão de barragens de rejeito no Brasil e em Minas Gerais

A Lista de Verificação, conforme demonstra a Tabela 12, descreve as informações referentes à cada instrumento a ser adotado pelo gestor da barragem de rejeito no país e no estado de Minas Gerais.

Tabela 12. Lista de verificação do conteúdo dos instrumentos legais e ambientais aplicáveis à gestão de barragens de rejeito no Brasil e em Minas Gerais.

<b>Instrumento</b>	<b>Informações relevantes</b>
Plano de Segurança de Barragem (PSB)	Elaborado por profissional habilitado; Conteúdo: Identificação do empreendedor; Dados técnicos de implantação; Organização e qualificações da equipe responsável; Roteiros de inspeção e segurança; Relatórios de segurança; Modo operacional dos dispositivos de descarga; Área no entorno isolada de usos ou ocupações; Plano de Ação de Emergência (PAE); Relatórios de Inspeção de Segurança (RIS) e Revisões Periódicas de Segurança (RPS).
Auditoria Técnica Extraordinária de Segurança (Documentação)	Relatório de Auditoria Técnica Extraordinária de Segurança de Barragem; Declaração Extraordinária de Condição de Estabilidade (Inserida no Banco de Declarações Ambientais - BDA); Plano de Ação para adequação das condições de estabilidade e operação; Recomendações de rotina, de alerta e crítica; Apresentar trimestralmente para a Diretoria de Gestão de Resíduos (FEAM) relatório técnico e fotográfico demonstrando o cumprimento da Auditoria Técnica (com ART).
Auditoria Técnica Extraordinária de Segurança (Diretrizes)	Caracterização tecnológica de rejeitos; Instrumentação e Sistemas de monitoramento; Sistema de drenagem interno, externo e extravasores; Segurança operacional; Mecanismos de rompimento da barragem; Registro de anomalias; Recomendações das auditorias anteriores; Plano de ação; Conclusão.

Adequação das Condições de Estabilidade e de Operação de Barragem	Ações e medidas, definidas pelo responsável técnico do empreendimento, necessárias à minimização dos riscos de acidentes ou incidentes, até que seja concluída a Auditoria Técnica.
Licenciamento ambiental (Fiscalização)	Comprovação de cumprimento dos condicionantes da licença; Registros periódicos: NA do reservatório, contaminação do solo e do lençol freático, Vazão de devolução de água captada para o respectivo recurso hídrico com análises que comprovem sua qualidade; Disponibilizar em site de livre acesso: Informações detalhadas sobre empresas terceirizadas; Resultados de análises e dos acompanhamentos do grau de umidade e do nível da barragem (com ART); Análise semestral da água, poeira e rejeitos; Executar e atualizar PSB.
Cadastro Técnico Federal de Atividades Potencialmente Poluidoras e Utilizadoras de Recursos Naturais (CTF/APP)	Identificação responsável técnico; Descrição das atividades potencialmente poluidoras desenvolvidas (Anexo I da IN 06/2013); Data de início das atividades; Coordenadas geográficas e declaração de porte; Licenças ambientais; Aceite do Termo de Ciência e Responsabilidade; Comprovante de inscrição CTF/APP (Sem prazo de validade).
Cadastro Técnico Federal de Atividades e Instrumentos de Defesa Ambiental (CTF/AIDA)	Identificação responsável técnico; Descrição das atividades e instrumentos de defesa ambiental que são desenvolvidas (Anexos I e II da IN 10/2013); Data de início; Coordenadas geográficas e declaração de porte; Aceite do “Termo de Ciência e Responsabilidade”; Comprovante inscrição CTF/AIDA (validade 2 anos).

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Além das considerações enumeradas abaixo, extraídas da bibliografia, foram elaboradas listas de verificação relacionadas à construção, operação, monitoramento, inspeção, conformidade legal e ambiental de barragens de rejeito de mineração, buscando auxiliar o trabalho dos profissionais envolvidos em sua problemática.

- O método do aterro hidráulico é o mais comum para a construção de barragens de rejeito e depende da prévia classificação granulométrica dos rejeitos em fração fina, direcionada para o reservatório e em fração grossa, direcionada para a região da praia, sendo que esta última também pode ser utilizada como material construtivo mediante avaliação do seu comportamento na estrutura. A classificação das frações é realizada por hidrociclones;

- Estruturalmente, os principais componentes de uma barragem para contenção de rejeitos são: O maciço, aterro ou dique, composto por taludes de jusante e montante, espaldares e crista; Sistema de drenagem interna; Extravasores; Reservatório; Praia; Tubulações e ombreiras;
- A seção das barragens pode ser homogênea, heterogênea ou mista, dependendo da granulometria e permeabilidade dos materiais de construção do aterro;
- As barragens de aterro hidráulico são construídas via método de montante, jusante ou linha de centro, dependendo da direção de lançamento dos rejeitos em relação à crista e da sua forma de alteamento;
- Os documentos que devem ser disponibilizados em relação ao processo construtivo contemplam dados dos responsáveis da obra; Detalhes da engenharia de construção do maciço; Estudos hidrológicos, hidráulicos e geotécnicos; Equipamentos; Monitoramentos; Registros de incidentes; Plano de ações emergenciais e Plano de fechamento da barragem. Já em relação ao procedimento operacional, devem estar contempladas as informações pertinentes ao Manual de Operação da Barragem;
- Sua inspeção é realizada a partir da observação de possíveis anomalias existentes em cada componente da estrutura do barramento e o monitoramento é realizado à partir de dados instrumentais e, desta forma, periodicamente, avalia-se o comportamento real da barragem em relação ao ideal;
- Os principais fenômenos que comprometem a segurança das barragens de rejeito são a percolação descontrolada pelo maciço; Ocorrência de deslocamentos e deformações na estrutura; Erosões superficiais; Liquefação e galgamento. Estes fenômenos causam, respectivamente, a erosão interna (*piping*); Fissuração da estrutura; Ocorrência de sulcos e ravinas; Comportamento fluido de camadas de materiais da barragem e a ocorrência de brechas graças à ação erosiva do escoamento;
- Os órgãos brasileiros responsáveis pelas barragens de rejeito, à nível federal, são a ANM, IBAMA, ANA e CNRH e, em Minas Gerais, o COPAM, CERH, FEAM, IGAM e IEF sendo que não existe uma hierarquia definida entre eles na gestão de barragens brasileiras, porém, cabe à ANA articular aqueles envolvidos na sua fiscalização, de acordo com suas respectivas áreas de atuação;
- Aqueles empreendedores que possuam barragens de rejeito com altura do maciço maior ou igual a 15 metros, desde o ponto mais baixo da fundação à crista; Reservatório com capacidade maior ou igual a 3.000.000 m<sup>3</sup>; Reservatório contendo resíduos perigosos conforme

normas técnicas ou dano potencial associado de grau médio a alto, de acordo com o Anexo I da Resolução nº 143/12, ficam obrigados à cumprirem os sete instrumentos previstos no Artigo 6º da Lei 12.334/10;

- Os principais instrumentos a serem implementados pelo empreendedor para comprovar a segurança de sua barragem de rejeitos são o PSB, Auditoria Técnica Extraordinária de Segurança, Adequação das Condições de Estabilidade e de Operação de Barragem, Licenciamento ambiental, CTF/APP e CTF/AIDA

- É importante ressaltar que cada barragem de rejeitos é um projeto único e, apesar das considerações gerais apresentadas neste trabalho, cada responsável deve atuar de acordo com as peculiaridades técnicas de seu projeto.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS, INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. A gestão dos recursos hídricos e a mineração. Brasília, 2017. Disponível em: [http://www.em.ufop.br/ceamb/petamb/cariboost\\_files/gestao\\_20da\\_20agua\\_20na\\_20mineracao\\_20ibram.pdf](http://www.em.ufop.br/ceamb/petamb/cariboost_files/gestao_20da_20agua_20na_20mineracao_20ibram.pdf). Acesso em: 25/08/2019.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. Relatório de Segurança de Barragens, Comissão de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável. Brasília, 2014.

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM). Perguntas e Respostas sobre Barragens de Mineração e o caso de Brumadinho. 2019. Disponível em: <http://www.anm.gov.br/assuntos/barragens/perguntas-e-respostas-sobre-barragens-de-mineracao-e-o-caso-de-brumadinho>>. Acesso em: 25/08/2019.

ALBUQUERQUE FILHO, L. H. Avaliação do comportamento geotécnico de barragens de rejeitos de Minério de Ferro através de ensaios de Piezocone, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, 2004. 194 p.

ALVES, A. N. Histórico e importância da mineração no Estado. Revista do legislativo, Belo Horizonte: Assembleia Legislativa do Estado de Minas Gerais, n. 41, p. 27-32, jan./dez,2008. Disponível em <https://dspace.almg.gov.br/xmlui/bitstream/handle/11037/1589/1589.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 29/09/2019.

ARAGÃO, G. A. S. A. Classificação de pilhas de estéril na mineração de ferro. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto, Pós-Graduação em Engenharia Mineral. 2008.

ASSOCIAÇÃO DOS ENGENHEIROS DA SABESP. 29º Congresso Nacional de Saneamento e Meio Ambiente. São Paulo, 2018. Disponível em: <

<https://www.saneamentobasico.com.br/wp-content/uploads/2019/05/3.pdf>>. Acesso em: 08/08/2019.

BARBOZA, D.; FLORIANO, C. F. Estudo de percolação em barragens de concreto e terra com base em análises numéricas de fluxo. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2018.

BITTAR, R. J. Caracterização tecnológica de rejeitos de fosfato e análises da estabilidade da barragem de contenção de rejeitos B5 da Bunge Mineração S. A., Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, 2006. 257 p.

BRANCO, Pércio de Moraes. Dicionário de Mineralogia e Gemologia. São Paulo: Oficina de Textos, 2008. 608 p. il.

BRASIL. Agência Nacional de Águas (ANA). A gestão dos recursos hídricos e a mineração. Brasília: ANA; IBRAM 2006. 334 p. : il.

BRASIL. Associação Brasileira de Normas Técnicas. ABNT NBR 13028 – Mineração - Elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água – Requisitos. Rio de Janeiro, 2017. 16 p.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 1, de 23 de janeiro de 1986. Diário Oficial da União.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 237 , DE 19 de dezembro de 1997. Diário Oficial da União.

BRASIL. Decreto nº 9.406, de 12 de junho de 2018. Diário Oficial da União. Poder executivo.

BRASIL. Departamento Nacional de Produção Mineral. Portaria nº 70.389, de 17 de maio de 2017. Ministério de Minas e Energia.

BRASIL. Ministério de Ciência e Tecnologia. Centro de Tecnologia Mineral. Mineração e desenvolvimento sustentável: desafios para o Brasil. Editor Maria Laura Barreto. Rio de Janeiro: CETEM; MCT, 2001. 216 p., il.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente, Conselho Nacional de Recursos Hídricos. Resolução nº 143, de de 10 de julho de 2012. Diário Oficial da União.

BRASIL. Presidência da República. Decreto nº 99.274 de 6 de junho de 1990. Diário do executivo.

BRASIL. Presidência da República. Decreto nº 99.275, de 6 de junho de 1990. Casa Civil.

BRASIL. Presidência da República. Lei 6.938, de 31 de agosto de 1981. Casa Civil.

BRASIL. Presidência da República. Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010.

BRASIL. Resolução nº 13, de 08 de agosto de 2019. Diário Oficial da União. Ministério de Minas e Energia/Agência Nacional de Mineração, Ed. 154, Seção 1, p. 44.

CALLE, J. A. C. Análise de ruptura de talude em solo não saturado. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000. 156p.

CÂMARA, J. B. D. Governança ambiental no Brasil: Ecos do passado. *Revista de Sociologia e Política*. v. 21, n° 46: 125-146 jun. 2013.

CASAGRANDE A. Characteristic of Cohesionless Soils Affecting the Stability of Slope and Earth Fill. *Journal of the Boston Society of Civil Engineering*. 1936.

CASTRO, G. & POULOS, S.J. Factors affecting liquefaction and cyclic mobility. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, v. 103, p. 501-516. 1977.

COSTA, M.V.; CHAVES, P.S.V; OLIVEIRA, F.C. Uso das Técnicas de Avaliação de Impacto Ambiental em Estudos Realizados no Ceará. In: XXVIII Congresso Brasileiro de Ciências da Comunicação, Anais. Rio de Janeiro, 2005. Disponível em:<<http://www.intercom.org.br/papers/nacionais/2005/resumos/r0005-1.pdf>>. Acesso: 05/08/2019.

D'AGOSTINO, L. F. Praias de barragens de rejeitos de mineração: características e análise da sedimentação. São Paulo: Escola Politécnica de São Paulo, Doutorado em Engenharia. 2008. Disponível em< [https://teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3134/tde-13082008-132420/publico/Tese\\_LuizFernandoDAgostino\\_Praias\\_de\\_barragens\\_de\\_rejeitos\\_de\\_mineracao.pdf](https://teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3134/tde-13082008-132420/publico/Tese_LuizFernandoDAgostino_Praias_de_barragens_de_rejeitos_de_mineracao.pdf)>

DE CARLI, C. Análise de Projetos Limites: Lavra a Céu Aberto VS Lavra Subterrânea. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais. 2013

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL (DNPM). Anuário Mineral Brasileiro: Principais Substâncias Metálicas. Brasília: DNPM, 2018. 33 p.: il.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL (DNPM). Sumário Mineral. Brasília, 2018. 131 p.: il.

DITR. Tailings Management – Leading Practice Sustainable Development Program for the mining Industry. Department of Industry, Tourism and Resources – Australian Government, 2007. 73 p.

ESPÓSITO, T. J. Controle geotécnico da construção da barragem de rejeito – Análise da estabilidade de taludes e estudos de percolação, Dissertação de Mestrado em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 1995. 159 p.

FARIAS, C. E. G. Mineração e meio ambiente no Brasil. Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2002.

FENG, D. ; ALDRICH, C. Recovery of chromite fines from wastewater streams by column flotation. *Hydrometallurgy*, vol. 72, p. 319-325, 2004.

FERRAZ, F. Disposição de Rejeitos de Mineração. Aperfeiçoamento Técnico dos Serviços de Engenharia em Atividades de Mineração, Departamento de Engenharia Civil, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, 1993. 62 p.

FERREIRA, L. A. ESCAVAÇÃO E EXPLORAÇÃO DE MINAS A CÉU ABERTO. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Civil). UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA, Juiz de Fora, 2013.

FIALHO, G. Drones podem auxiliar na fiscalização de barragens, sugere ABDI. Associação Brasileira de Desenvolvimento Industrial, jan/2019. Disponível em: <https://www.abdi.com.br/postagem/drones-podem-auxiliar-na-fiscalizacao-de-barragens-sugere-abdi>. Acesso em: 26/09/2019.

GEO-SLOPE INTERNATIONAL LTD. SLOPE/W Tutorial. Calgary, Canada. Disponível em: <http://downloads.geoslope.com/geostudioresources/examples/9/0/SlopeW/SLOPE%20Tutorial.pdf>. Acesso em: 03/10/2019.

HOLTZ, D.R.; KOVACS, D.W. An Introduction to Geotechnical Engineering. Prentice-Hall, Inc. 1981.

INSTITUTO BRASILEIRO DE AVALIAÇÕES E PERÍCIAS DE ENGENHARIA (IBAPE). Barragens de terra e rejeito: A importância da inspeção e manutenção. Seminário Nacional de Inspeção de Obras em Engenharia. São Paulo, 2019. Disponível em <https://ibape-nacional.com.br/biblioteca/wp-content/uploads/2019/04/Barragens-de-Rejeito-%E2%80%93-A-Import%C3%A2ncia-da-Inspe%C3%A7%C3%A3o-e-Manuten%C3%A7%C3%A3o-Thomaz-Henrique-Leite-de-Jesus.pdf> Acesso em: 20/08/2019.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. Gestão e Manejo de Rejeitos da Mineração/Instituto Brasileiro de Mineração; organizador, Instituto Brasileiro de Mineração. 1.ed. - Brasília: IBRAM, 2016.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. Guia para o planejamento do fechamento de mina. Brasília: Instituto Brasileiro de Mineração, 2013. 224p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. Relatório Anual de Atividades. Brasília: IBRAM, 2018.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. Relatório Anual de Atividades. Brasília: IBRAM, 2019.

KLOHN, E. J. Design and construction of tailings dams. CIM Transactions, 1982.

LAURIANO, A.; PIMENTA, J.A.; CORTEZ, J.; SILVA, A. Discussões sobre os modos de falha e risco de galgamento de barragens de rejeito. II Seminário Gestão de Riscos e Segurança de Barragens de Rejeito. 2017. 17 p.

LUZ, A. B.; LINS, F. A. F. Introdução ao tratamento de minérios. In: Tratamento de minérios, 5.ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010.

LUZ, A. B.; SAMPAIO, J. A.; ALMEIDA, S. L. M. Tratamento de minérios. 4 ed. Ed. Adão Benvindo da Luz, Mario Valente Possa, Salvador Luiz de Almeida. Rio de Janeiro, CETEM/MCT, 1998. 867 p.

MACÊDO, A. B. et al. Seleção do Método de Lavra: Arte e Ciência. Revista Escola de Minas, Ouro Preto, v.54, n.3, jul./set 2001. Não Paginada.

MACHADO, W. G. F. Monitoramento de barragens de contenção de rejeitos da mineração. Dissertação de Mestrado, Departamento de Minas e de Petróleo, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2007. 155 p.

MARANGON, M. Tópicos em Geotecnia e Obras de Terra. Universidade Federal De Juiz De Fora, Faculdade de Engenharia, Departamento de Transportes e Geotecnia. Juiz de Fora, 2004.

MARTINI, B. D. Sistema web para gestão de segurança de barragens. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, 2018. 95p.

MASSAD, F. Obras de Terra – Curso Básico de Geotecnia. São Paulo, editora Oficina de Textos. 2003.

MAURO, A.; ALMEIDA, K. Entenda o que é liquefação, fenômeno que pode levar barragens ao colapso. Jornal G1. Minas Gerais, fev/2019. Disponível em: <<https://g1.globo.com/mg/minas-gerais/noticia/2019/02/07/entenda-o-que-e-a-liquefacao-fenomeno-que-pode-levar-barragens-ao-colapso.ghtml>>. Acesso em: 23/10/19.

MINAS GERAIS. Conselho de Política Ambiental. Deliberação Normativa COPAM nº 217, de 06 de dezembro de 2017. Diário Executivo.

MINAS GERAIS. Conselho de Política Ambiental. Deliberação Normativa COPAM nº 228, de 28 de novembro de 2018. Diário executivo.

MINAS GERAIS. Decreto nº 47.383, de 03 de março de 2018. Diário do Executivo. p4. col. 2.

MINAS GERAIS. Governo do Estado. Lei Delegada nº 180, de 20 de janeiro de 2011. Diário Executivo.

MINAS GERAIS. Governo do Estado. Lei nº 23.291, de 25 de fevereiro de 2019. Diário Executivo.

MINAS GERAIS. Governo do Estado. Lei nº 23.291, de 25 de fevereiro de 2019. Diário Estadual de Minas Gerais. pg 1. col. 1.

MINAS GERAIS. Resolução Conjunta SEMAD/FEAM nº 2.372, de 06 de maio de 2016. Diário Executivo.

MINAS GERAIS. Resolução Conjunta SEMAD/FEAM nº 2.372, de 06 de maio de 2016. Diário Executivo.

MINAS GERAIS. Resolução Conjunta SEMAD/FEAM nº 2.784, de 21 de março de 2019. Diário executivo.

MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL (MI). Secretaria de Infra-Estrutura Hídrica. Manual de Segurança e Inspeção de Barragens. Brasília, 2002. 148p.

MIRANDA, A. N. Notas de aula: Inspeção de barragens de aterro. Curso: Inspeção e Segurança de Barragens. Fundação Parque Tecnológico do Itaipu, Agência Nacional de Águas. 2016.

MORAES, I. Procuradoria quer suspensão de novas licenças para barragens como Brumadinho. *Jornal Estadão*, São Paulo, fev/2019. Disponível em: <<https://politica.estadao.com.br/blogs/fausto-macedo/procuradoria-quer-suspensao-de-novas-licencas-para-barragens-como-de-brumadinho/>>. Acesso em: 06/09/2019.

NEVES, L. P. Legislação federal brasileira em segurança de barragens comentada. Curso de Segurança de Barragens, Agência Nacional de Mineração, 2018.

OLIVEIRA, J. B. V. R. Manual de operação de barragens de contenção de rejeitos como requisito essencial ao gerenciamento dos rejeitos e à segurança de barragens, Dissertação de Mestrado em Geotecnia Aplicada à Mineração, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, 2010. 149 p.

PEIXOTO, C. L. P. Proposta de nova metodologia de desaguamento de rejeitos em polpa. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas, Ouro Preto, 2012. 93 p.

RAFAEL, H. M. A. M., 2012. Análise do potencial de liquefação de uma barragem de rejeito. Dissertação de Mestrado, PUC-Rio, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

Resolução nº 1, de 23 de janeiro de 1986

RIBEIRO, L. F. M. Simulação Física do Processo de Formação dos Aterros Hidráulicos Aplicado a Barragens de Rejeito, Tese de Doutorado em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2000. 235 p.

RUSSO, F. M. Comportamento de Barragens de Rejeito Construídas por Aterro Hidráulico: Caracterização Laboratorial e Simulação Numérica do Processo Construtivo. Tese de doutorado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2007. 292p.

SÁNCHEZ, M. G. P. Notas de Aula: Lavra de Minas I: Desenvolvimento. Goiás, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, CEFETGO, 2012.

SARÉ, A.R. Análise das Condições de Fluxo na Barragem de Curuá-Una, Pará. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, PUC-Rio, Rio de Janeiro, RJ, 2003.149 p.

SENADO FEDERAL. Projeto de Lei nº 3.913 de 2019. Comissão Parlamentar de Inquérito destinada a apurar as causas do rompimento da barragem na Mina Córrego do Feijão, da empresa de mineração Vale, em Brumadinho e outras barragens.

SILVA, A. R. L. Avaliação do potencial de liquefação em barragens de rejeito através de ensaios de campo. Projeto de graduação, Engenharia Civil da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ, 2016. 51p.

SOUZA, M. M. Estudo para o projeto geotécnico da barragem de Alto Irani, SC. Projeto de Graduação, Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2013. 129 p.

V CONGRESSO BRASILEIRO DE MINA SUBTERRÂNEA IBRAM. Belo Horizonte: 2008. Disponível em: < [http://www.ibram.org.br/cbminas/palestras/25\\_9\\_00\\_CarlosDinizGama.pdf](http://www.ibram.org.br/cbminas/palestras/25_9_00_CarlosDinizGama.pdf) >. Acesso em: 12/09/2019.

VICK, S.G. (1983). Planning, Design and Analysis of Tailings Dams. John Wiley & Sons, Inc., 369 p.