

**CENTRO UNIVERSITÁRIO UNIFACVEST
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

DANIELA PEREIRA DE OLIVEIRA

**ANÁLISE DE MODELOS CONSTRUTIVOS, CONSIDERANDO PROJETO E
EXECUÇÃO DE BARRAGENS DE REJEITO DE MINERAÇÃO**

LAGES, SC

2021

DANIELA PEREIRA DE OLIVEIRA

**ANÁLISE DE MODELOS CONSTRUTIVOS CONSIDERANDO PROJETO E
EXECUÇÃO DE BARRAGENS DE REJEITO DE MINERAÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Centro Universitário
UNIFACVEST, como requisito obrigatório
para obtenção do grau de Bacharel em
Engenharia Civil.

Orientador: Prof. M. Aldori Batista dos Anjos

LAGES, SC

2021

DANIELA PEREIRA DE OLIVEIRA

**ANÁLISE DE MODELOS CONSTRUTIVOS CONSIDERANDO PROJETO E
EXECUÇÃO DE BARRAGENS DE REJEITO DE MINERAÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Centro Universitário
UNIFACVEST, como requisito obrigatório
para obtenção do grau de Bacharel em
Engenharia Civil.

Lages (SC), 12 de Julho de 2021

**Prof. M. Aldori dos Anjos
Coordenador do Curso de
Engenharia
Civil**

BANCA EXAMINADORA:

**Prof. M. Aldori dos Anjos
Coordenador do Curso de
Engenharia Civil**

**Prof. Pierre dos Anjos
Professor do Curso de
Engenharia Civil**

**Prof. Samuel Schmuller
Professor do Curso de
Engenharia Civil**

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, por ter me dado força, coragem e dedicação para chegar até aqui. Sem Ele nada disso seria possível.

Também agradeço a minha família por ter me apoiado e incentivado desde o início. Por acreditar em mim mesmo quando eu mesma não acreditava mais, por ter feito o possível para que eu estivesse onde estou.

Quero agradecer ao meu pai por ter sido um grande influenciador e ser meu espelho. Obrigada por se esforçar ao máximo por sempre me ajudar. A minha mãe por sempre estar ao meu lado, me amando, cuidando de mim, sou sua maior admiradora. Também a minha irmã por ser minha força e um dos motivos para eu lutar todos os dias.

Agradeço aos meus amigos de longa data que me apoiaram nessa jornada e agradecer aos meus amigos que eu conheci através da mesma. Pessoas que me fizeram sentir família mesmo não estando em casa.

Quero agradecer aos meus professores por todos os ensinamentos e agradecer ao meu coordenador Aldori pelas orientações.

ANÁLISE DE MODELOS CONSTRUTIVOS, CONSIDERANDO PROJETO E EXECUÇÃO DE BARRAGENS DE REJEITO DE MINERAÇÃO

Daniela Pereira de Oliveira¹

Aldori Batista dos Anjos²

RESUMO

A presente pesquisa tem como objetivo discutir os problemas das barragens de rejeitos, apresentando os diversos projetos que oferecem risco à sociedade e analisando, no âmbito da engenharia civil nas soluções deste problema inerente à atividade mineradora. A mesma detém no país o papel de grande exportador de “commodities” e evidentemente, captadora de recursos financeiros exportador de minério e geradora de recursos vultuosos ao país. Porém, como parte do processo de extração, observa-se que a construção de barragens tem gerado insegurança devido à proximidade das plantas ou cavas em muitas cidades. O trabalho pretende analisar os projetos em curso no país, estudar as formas construtivas e suas singularidades apontando soluções que possam contribuir com a melhoria e indicar formas de controle das barragens. Para isso, a pesquisa realizou levantamento bibliográfico de obras sobre o assunto e leituras relacionadas ao tema.

Palavras-chave: Barragens, engenharia civil, projetos

¹ Acadêmico (a) do curso de Engenharia Civil, 10ª fase, disciplina de TCC2, do Centro Universitário UNIFACVEST. Email: daniela.angra@hotmail.com

² Mestre e coordenador do Curso de Engenharia Civil do Centro Universitário UNIFACVEST. Email: prof.aldori.anjos@unifacvest.edu.br

ANÁLISE DE MODELOS CONSTRUTIVOS, CONSIDERANDO A REPARAÇÃO E RECUPERAÇÃO DE BARRAGENS DE REJEITO DE MINERAÇÃO

Daniela Pereira de Oliveira ¹

Aldori Batista dos Anjos ²

ABSTRACT

This current research aims to carry out a discussion on the problem of tailings dams, presenting the various projects that pose a risk to society and analyzing the role of civil engineering in solving this problem. The mining industry has in the country the roles of a major ore exporter and generator of substantial resources for the country, however part of this process, it is observed that the construction of dams has generated insecurity in many cities. The work aims to analyze the in progress projects in the country, study the constructive forms and their singularities, pointing out solutions that can contribute to the improvement of the process. For this, the research used a bibliographic survey of works on the subject and readings related to the theme.

Key-words: Dams, civil engineering, projects

¹ Acadêmico (a) do curso de Engenharia Civil, 10ª fase, disciplina de TCC2, do Centro Universitário UNIFACVEST. Email: daniela.angra@hotmail.com

² Mestre e coordenador do Curso de Engenharia Civil do Centro Universitário UNIFACVEST. Email: prof.aldori.anjos@unifacvest.edu.br

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANM – Agência Nacional de Mineração

CRI – Categoria de Risco

DPA – Dano Potencial Associado

IBRAM – Instituto Brasileiro de Mineração

PIB – Produto Interno Bruto

SIGBM – Sistema Integrado de Gestão de Barragens de Mineração

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Rocha de Minério de Ferro.....	15
Figura 2: Saldo da Balança Comercial Brasileira.....	15
Figura 3: Produção Nacional e Mundial de Minério de Ferro.....	16
Figura 4: Minério de Ferro no Pará.....	17
Figura 5: SIGBM (Sistema Integrado de Gestão de Segurança de Barragens de Mineração da ANM)	18
Figura 6: SIGBM (Sistema Integrado de Gestão de Segurança de Barragens de Mineração da ANM)	19
Figura 7: Barragem de Rejeito de Minério.....	19
Figura 8: Barragem Casa de Pedra, Congonhas-MG.....	20
Figura 9: Modelo de Barragem a Montante.....	24
Figura 10: Modelo de Barragem a Jusante.....	25
Figura 11: Modelo de Barragem Linha de Centro.....	26
Figura 12: Modelos de Barragens Atuais no Brasil.....	34
Figura 13: Danos Potenciais Associados.....	35
Figura 14: Categoria de Risco.....	35
Figura 15: Classes.....	36
Figura 16: Conjunto de Barragens Forquilha.....	37

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
1.1. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA.....	10
1.2. JUSTIFICATIVA.....	11
1.3. OBJETIVO GERAL.....	11
1.4. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	11
2. METODOLOGIA	13
3. REVISÃO DE LITERATURA	14
3.1. BARRAGENS E SEUS MÉTODOS CONSTRUTIVOS.....	14
3.1.1. MINÉRIO.....	14
3.1.2. DENOMINAÇÃO DE BARRAGENS.....	17
3.1.3. PANORAMA HISTÓRICO DAS BARRAGENS.....	21
3.1.4. PRINCIPAIS MODELOS UTILIZADOS NO BRASIL.....	22
3.2. REPRESENTATIVIDADE DO ENGENHEIRO CIVIL NA EXECUÇÃO DE MEDIDAS SEGURAS EM PROJETOS.....	27
3.2.1. MONITORAMENTO E INSTRUMENTOS UTILIZADOS.....	29
3.3. IMPACTOS AMBIENTAIS E SOCIOECONOMICAS NA REALIZAÇÃO DE PROJETOS.....	31
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	34
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	39
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	40
ANEXOS.....	45

1. INTRODUÇÃO

O Brasil encontra-se entre os maiores produtores de minerais do mundo, e conseqüentemente, percebe-se que existem lacunas enormes no que diz respeito a destinação de resíduos minerários.

Encontrar soluções que realmente correspondam as expectativas quanto a segurança e uma destinação menos agressiva ao meio ambiente e a segurança das comunidades situadas nas proximidades das atividades mineradoras, tem sido um desafio para as empresas, que precisam melhorar sua imagem frente aos últimos acontecimentos.

A análise do tema visa contribuir com os atuais modelos de gerenciamento de rejeitos utilizados no país, demonstrando quais as metodologias são as mais seguras e viáveis na produção.

1.1. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

Impulsionado pelos problemas decorrentes dos acidentes ocorridos nos últimos anos em barragens de mineração, esse tema tem estado em evidência em todo país.

As atenções têm se voltado para os modelos de construção de barragens e como se dá o processo de elaboração desses projetos, em virtude das medidas que precisam ser tomadas e em detrimento das escolhas que devem ser feitas, de modo a tornar o empreendimento o mais seguro possível.

Para que haja garantias mínimas de segurança e estabilidade técnica nos projetos, faz-se necessário a intervenção da engenharia civil através da análise de risco, o estudo prévio da região, os aspectos ambientais, entre outros. Com base nessas informações, o trabalho procurará compreender qual a importância da engenharia civil para a construção de barragens de rejeitos de minério. Embora exista uma série de atividades que são cruciais para a segurança e bom funcionamento desses projetos, a engenharia civil faz parte das atividades que tem a responsabilidade de assegurar que a estrutura esteja livre de impeditivos que atrapalhem ou impossibilitem seu uso, além de ser responsável por através de seus laudos viabilizarem o seguro dessas obras.

Com base em pesquisas bibliográficas, o trabalho procurará responder os questionamentos técnicos pertinentes à atividade realizada pela engenharia civil junto a área de acondicionamento de rejeitos minerais, viabilizando assim, uma demonstração de mais uma de muitas áreas de atuação dessa atividade.

1.2. JUSTIFICATIVA

Na atualidade, o Brasil não tem sido referência de boas práticas na tratativa e gerenciamento de barragens. A utilização de modelos ultrapassados na construção baseados nesse método visando principalmente à redução de custos tem colocado em risco e atingido até mesmo outros estados.

Uma vez que o minério-de-ferro é um produto de exportação e que contribui para o PIB nacional, caracterizando-se como matéria-prima base da cadeia mundial e em contrapartida, há sempre um questionamento dos clientes externos sobre a necessidade de que medidas podem ser tomadas para que o processo da mineração se torne mais seguro no âmbito técnico e ambiental.

A engenharia civil pode contribuir tanto na elaboração de projetos que ofereçam uma maior segurança aos empreendimentos quanto na execução de medidas em projetos já existentes, de modo a minimizar possíveis danos ambientais em caso de um acidente.

As atuais barragens podem ser utilizadas como um ponto de partida para identificação de erros e criação de novas alternativas que sejam viáveis, e ao mesmo tempo mais eficientes, sendo analisadas sobre o ponto de vista da engenharia, visando o aprimoramento da atividade.

1.3. OBJETIVO GERAL

Demonstrar de que forma a engenharia civil pode colaborar na elaboração de projetos mais seguros e viáveis nos modelos construtivos de barragens de rejeito de mineração.

1.4. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Definir as barragens e seus modelos construtivos;

- Analisar os modelos construtivos existentes no Brasil;
- Abordar o papel do engenheiro civil na execução de medidas seguras em projetos;
- Compreender as consequências ambientais e socioeconômicas de projetos já executados.

2. METODOLOGIA

A coleta de dados foi feita com pesquisas bibliográficas e pesquisas científicas com base no Google acadêmico, ScientificElectronic Library Online para pesquisas em artigos científicos. Além disso, foram realizadas consultas a legislação pertinente e as diretrizes de organizações governamentais e parcerias público-privado.

Considerando uma abordagem qualitativa, considerou-se a afirmação de Godoy (1995) em que “a abordagem qualitativa oferece três diferentes possibilidades de se realizar pesquisa: a pesquisa documental, o estudo de caso e a etnografia”. Nesse sentido, o trabalho apresentado utilizou o método de pesquisa documental, onde foi realizado um levantamento bibliográfico e documental das questões apresentadas.

Sendo assim, a pesquisa tem a intenção de contribuir com a comunidade científica com informações e dados relativos a projetos e formas de execução de barragens de rejeito de mineração.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1. BARRAGENS E SEUS MÉTODOS CONSTRUTIVOS

3.1.1. MINÉRIO

O ser humano possui em seu desenvolvimento uma grande dependência da mineração e seus subprodutos. Segundo Araújo e Fernandes (2016), a mineração é de grande relevância para a economia do Brasil. A atividade pontua a trajetória sociopolítica ao decorrer de todos os períodos dos regimes políticos.

Dentre os diversos produtos advindos desse processo. Encontra-se no minério de ferro, a matéria-prima presente em praticamente 90% da industrial mundial. O minério de ferro é muito utilizado pelo ser humano para suprir as demandas do setor industrial. Por esse motivo; é de grande relevância para a economia brasileira e mundial (ANDRADE, 2018). A indústria de mineração é uma das atividades que mais gera modificação para o meio ambiente. A mesma é evidente no cenário nacional e internacionalmente, mas continua sendo essencial como fornecedora de matérias-primas para vários setores de produção. (VINAUD, 2019)

O minério de ferro é o principal mineral extraído no Brasil, tendo sido responsável por um valor total de operação em 2018 de 62,7 bilhões de reais, enquanto os minérios de cobre e ouro alcançaram a cifra de 9,7 e 9,6 bilhões cada, respectivamente. (ANM, 2019) No Brasil, o maior produtor de minério de ferro é o estado de Minas Gerais, sendo ele, o principal produtor nacional, o maior arrecadador de impostos, em seguida do Pará como segundo maior. (TROCATE & COELHO, 2020)



Figura 01: Rocha de Minério de Ferro.
Fonte: Vale

O valor de operação por estado revela a concentração da mineração em Minas Gerais e Pará, ambos localizados em patamares mais elevados do que os outros estados brasileiros. Chama a atenção a proximidade entre os valores, em 2018, sendo Minas Gerais responsável por 43,7 bilhões e o Pará, por 42,4 bilhões de reais (TROCATE & COELHO, 2020).

Segundo Andrade (2018), atualmente o minério tem sido um dos principais produtos de exportação do Brasil, junto com a produção agrícola do agronegócio.

4.1 SALDO DA BALANÇA COMERCIAL BRASILEIRA

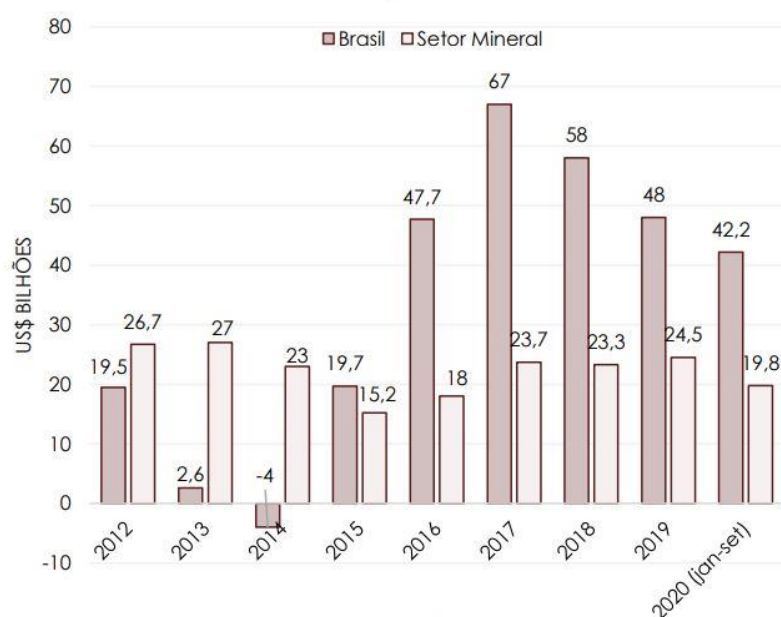


Figura 02: Fonte COMEX-STAT-ME (consolidado DTTM-SGM, 10-2020)

A China e a Austrália são os principais exportadores do mundo. O Brasil desempenha o terceiro lugar nesse ranking. Apesar de a China ser a produtora e a que mais extrai minério de ferro, a mesma é a maior compradora de ferro do Brasil, pois a qualidade do minério brasileiro é superior ao retirado em solo chinês. (SILVA, DINEU & SANTOS, 2019)



Figura 03: Fonte SGM 2020 USGS DNPM-ANM

O minério bruto não é composto só por metais que serão utilizados. No processo de mineração há a geração de muito resíduo para ser retirado somente os metais. Por isso, é necessário a retirada do chamado rejeito de minério. (SOUZA, MOREIRA & HEINECK, 2018)

O rejeito de minério é uma mistura de sólidos e água. O mesmo é a sobra quando se separa o minério da rocha. Esses rejeitos são líquidos e sólidos, formando uma lama. A lama é criada da fragmentação do minério que são partículas finas e ultrafinas de minério de ferro e sílica devida a variação de acordo com o mineral de interesse e as substâncias encontradas no mesmo (ARAÚJO, 2006).



Figura 04: Minério de Ferro no Pará.
Fonte: Agência Pará

Alta produção gera uma quantidade de rejeitos que precisam ser acondicionados em barragens e geram preocupação quanto a segurança desta estrutura. A responsabilidade resume-se em conduzir essas atividades maximizando os benefícios sociais e econômicos, bem como de enfrentar os impactos ambientais e sociais negativos que delas possam decorrer. (IBRAM, 2016)

3.1.2. DENOMINAÇÃO DE BARRAGENS

Tem-se por definição de barragem segundo a lei nº 14.066, de 30 de setembro de 2020:

Qualquer estrutura construída dentro ou fora de um curso permanente ou temporário de água, em talvegue ou em cava exaurida com dique, para fins de contenção ou acumulação de substâncias líquidas ou de misturas de líquidos e sólidos, compreendendo o barramento e as estruturas associadas; (BRASIL, 2020)

A lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010 (Brasil, 2010), especifica quais os critérios para que uma obra seja considerada barragem. Ela deve atender alguns padrões específicos de estrutura, como a altura do maciço, que do pé do talude de jusante até a crista do coroamento do barramento precisa ser igual ou maior que 15, a capacidade total igual ou maior que 3.000.000m³ para todo o reservatório, categoria de dano potencial médio ou alto, categoria de risco alta e quando o resíduo do reservatório seja perigoso.

Araújo (2006), diz que as barragens são classificadas segundo a sua dimensão, forma estrutural, material e capacidade de armazenamento. Em relação a dimensão, divide-se em pequenas ou grandes. Dentro da forma estrutural, a mesma é classificada em gravidade, contrafortes, arco e relativo. No tocante ao material, considera-se como elementos de identificação o aterro, alvenaria e betão. A classificação pela capacidade de armazenamento são classe I, classe II ou classe III. Segundo Duarte (2008), após a classificação das barragens, os desenvolvedores devem adotar medidas para adaptar os procedimentos de segurança das estruturas com o objetivo de reduzir o potencial de danos ambientais.

Segundo a Portaria 70.389 de 17 de maio de 2017 em relação as barragens de rejeito de mineração podem-se definir:

II. 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. (BRASIL, 2017)

Barragens de rejeitos são estruturas construídas com a finalidade de deposição e contenção de material proveniente da lavra de minerais. No Brasil, esse tipo de construção é encontrado de forma mais considerável no estado de Minas Gerais, especificamente no chamado quadrilátero ferrífero, onde se concentra a maior jazida brasileira responsável, pela maior parte das reservas nacionais.



Figura 05: SIGBM (Sistema Integrado de Gestão de Segurança de Barragens de Mineração da ANM)

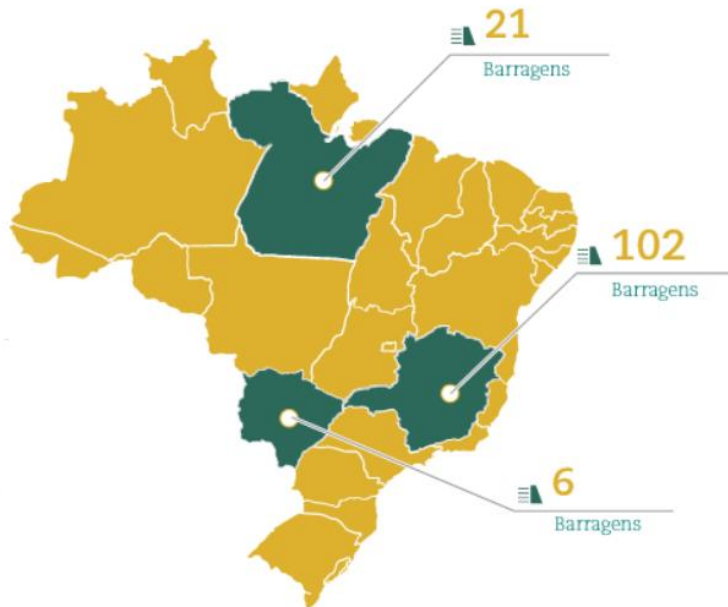


Figura 06: SIGBM (Sistema Integrado de Gestão de Segurança de Barragens de Mineração da ANM)

As barragens de rejeito de minério foram criadas para contenção de um material resultante do processo de mineração. É basicamente o que sobra desse processo e não pode ser mais utilizado. Esse material é basicamente uma lama que dependendo da região e do tipo do processo de mineração, pode ser composto por partículas mais finas, como a argilas e siltes ou até mesmo por partículas mais grossas, como no caso das areias. Essas barragens podem ser construídas utilizando-se solos, estéreis ou mesmo o próprio rejeito (DUARTE, 2008).



Figura 07: Barragem de Rejeito de Minério.
Fonte: Vale

O tipo de material resultante é de extrema importância porque parte das barragens são construídas por esses mesmos materiais, ou seja, o comportamento desse material amorfo em meio a um contexto estrutural, pode ser a diferença entre uma estrutura estável, e uma estrutura que pode se romper com facilidade devido sua consistência e suas características como granulometria, permeabilidade, argilosidade.

Segundo Seabra e Brandt (2015), esses rejeitos são despejados na área da barragem por gravidade através de canais ou até mesmo bombeados, uma vez que na barragem passam por um processo de decantação, que é quando as partículas sólidas se separam da água. A partir disso, forma-se na barragem uma espécie de praia de rejeito.

Entendendo o que é exatamente o rejeito de mineração e como eles são transportados até as barragens, pode-se entender como essas estruturas são construídas e quais os tipos principais de barragens utilizadas hoje no Brasil (VINAUD, 2019).

Como parte do processo de purificação desse material utiliza uma grande quantidade de água, o chamado rejeito é descartado em um estado pastoso, não podendo ser lançado diretamente na natureza devido a grande quantidade de materiais danosos ao meio ambiente (ARAÚJO, 2006).



Figura 08: Barragem Casa de Pedra, Congonhas-MG.
Fonte: Companhia Siderúrgica Nacional -CSN

3.1.3. PANORAMA HISTÓRICO DAS BARRAGENS

Segundo Araújo & Fernandes (2016), a mineração brasileira apresenta junto com o agronegócio as principais fontes da balança comercial brasileira. Os agregados da construção civil, bauxita, fosfato, manganês, alumínio primário, potássio concentrado, zinco concentrado, cobre, liga de nióbio, níquel contido e ouro são bens minerais produzidos pelo Brasil, de modo a destacar o minério de ferro que atingiu 430 milhões de toneladas. (IBRAM, 2018) Ao se observar o histórico da trajetória mineraria brasileira, verifica-se que essa atividade atravessa todos regimes políticos brasileiros.

Brasil Colônia

A exploração de minério no Brasil colônia se deu a partir do século 18. A descoberta de ouro e pedras preciosas foi responsável pela ocupação do interior brasileiro e de uma corrida que levou a fundação de importantes cidades no interior do país com Ouro Preto, Mariana e entre outras. (FIGUERÔA, 1994)

O fato de se utilizarem técnicas inseguras na exploração das minas, fora um fator crucial para muitos acidentes. Além disso, a exploração de minas com pouca profundidade por conta de ferramentas rudimentares da época fez com que os metais explorados logo viessem a escassear, paralisando assim as atividades. (ARAÚJO & FERNANDES, 2016)

Brasil Império

O período do império foi responsável por mudanças importantes quanto a questão mineraria brasileira. Com destaque para a ampliação da malha ferroviária e uma melhor estruturação dos portos. (ABREU & LAGO, 2010).

Minas que antes não produziam devido ao modo rudimentar de exploração, agora recebem investimentos provenientes da Europa que permitiam a utilização de perfuratrizes pneumáticas, escavações subterrâneas e máquinas a vapor, contribuindo assim para um aumento que não perdurou por muito tempo devido a problemas de logística encontrados na produção. (ARAÚJO & FERNANDES, 2016)

Brasil República

Segundo Andrade (2018), foi nesse período que o quadrilátero ferrífero fora descoberto e companhias se estabeleceram nessa região com o propósito da extração e comercialização do minério de ferro, visando uma maior produção e escoamento do

produto facilitado pelo uso da estrada de ferro Vitória Minas construída nessa época. (ARAÚJO & FERNANDES, 2016)

Nesse período também foi criada a Companhia Siderúrgica Nacional (CSN) através de uma ação do governo que pretendia implementar um projeto desenvolvimentista que incluía a criação da Vale do Rio Doce e a Petrobrás (VILLAS-BÔAS, 1995).

Ditadura Militar

Villas-Bôas (1995), destaca que o período da ditadura militar foi responsável por grande investimento no sentido do Brasil ser um grande produtor exportador de produtos como minério de ferro. Nessa época, o país já se destacava pela grande quantidade exportada e investimentos realizados na região do Amazonas com grandes empreendimentos instalados nessa região (ARAÚJO & FERNANDES, 2016).

Foi nessa época que o país ficou conhecido como milagre econômico, atingindo índices econômicos bem maiores que os países vizinhos em função dos acordos internacionais que permitiam grandes investimentos estrangeiros através de alianças internacionais (ARAÚJO & FERNANDES, 2016).

3.1.4. PRINCIPAIS MODELOS UTILIZADOS NO BRASIL

No Brasil, utilizam-se basicamente três modelos de barragens. Destacam-se os modelos de alteamento a montante, a jusante e o de linha de centro. Sua construção pode ser feita com materiais de outros empréstimos ou do mesmo rejeito, partículas de granulometria mais grossa que podem ser separadas pelo processo de ciclonagem¹ (ARAÚJO, 2006).

Método a montante é o modelo mais antigo a ser utilizado no Brasil, além de ser considerado também o mais econômico. Despende-se muito tempo durante a deposição de material resultante da atividade de mineração (SOARES, 2010).

Construção desse tipo de barragem começa por um processo que vai ser comum para todos os outros tipos que é a base, ou seja, a fundação, é um aterro compactado geralmente composto por rochas para garantir a estabilidade e capacidade de carga após esse processo (MACHADO, 2007).

É colocado um tapete drenante que vai servir para redirecionar a água represada em dutos de saída para que essa água não gere danos a estrutura

principal (SABBO, ASSIS & BERTERQUINI, 2017). Nesse ponto, é feito o dique de partida que é a primeira estrutura de contenção. Essa barreira geralmente é feita com aterro compactado com um enrocamento, que é basicamente uma estrutura feita de pedra (DUARTE, 2008).

Segundo Vinaud (2019), 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. Quando a barragem demanda uma maior capacidade, é feito um alteamento. Nesse caso, essa nova estrutura de contenção é construída com o próprio material de rejeito e é levantada a montante da primeira estrutura de contenção, ou seja, para dentro da barragem acima inclusive dos rejeitos.

Esse processo pode ser repetido de modo recorrente durante a vida útil da barragem. Ao necessitar, poderá ser feito o aumento da capacidade através um novo alteamento. O comprometimento da segurança neste caso está ligado ao fato de os alteamentos serem realizados sobre materiais previamente depositados e não consolidados (DUARTE, 2008).

São construídos em cima de camadas de rejeitos que podem não estar totalmente estáveis e são estruturas individuais quase sem ligação nenhuma entre si. Tornam-se frágeis e muito suscetíveis a rupturas quando perturbados, por exemplo, por tremores ou um aumento do volume de contenção. Nesse método construtivo ainda existe uma dificuldade na implantação de um sistema interno de drenagem eficiente para controlar o nível d'água dentro da barragem, constituindo um problema adicional com reflexos na estabilidade da estrutura (DUARTE, 2008).

Segundo a NBR 13.028 (2017), o método de alteamento a montante envolve uma atenção especial nas fases de projeto, construção, operação e desativação. Sua escolha deve ser pautada por um maior nível de detalhamento na engenharia dos rejeitos. A dinâmica da construção dessa barragem se dá pelo fato de se usar um rejeito mais grosso para a base. A partir disso, sucessivos depósitos serão realizados no sentido contrário ao fluxo de água, sendo alteada da foz para a nascente, de modo a dar sentido a nomenclatura. Constrói-se 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 (VINAUD, 2019).

Vale lembrar que existe uma dificuldade na implantação de um sistema interno de drenagem eficiente para controlar o nível d'água dentro da barragem (ARAÚJO, 2006). Existem complicações na construção de um eficiente sistema de drenagem, desestabilizando o maciço através da possibilidade de ocorrência de fraturas por cisalhamento. Sua altura é limitada, já que os alteamentos sucessivos reduzem a resistência do sistema, diminuindo seu fator de segurança (VINAUD, 2019).

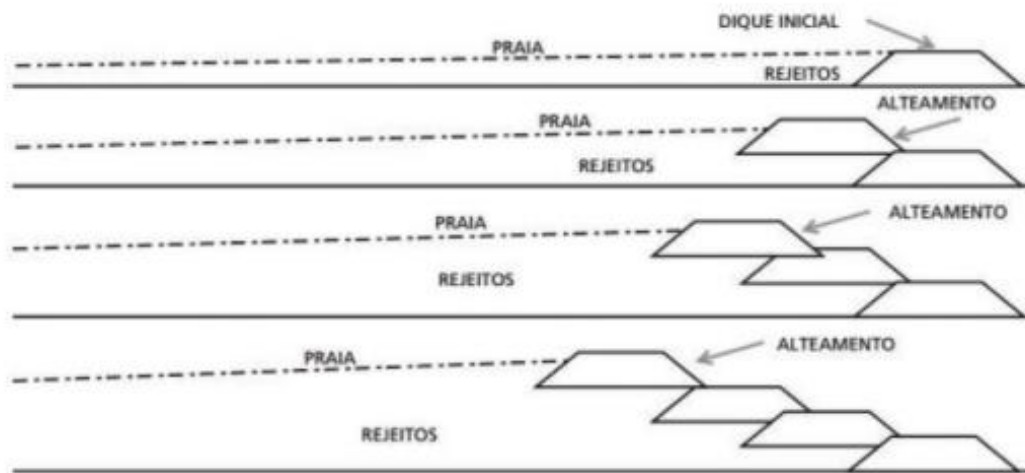


Figura 09: Modelo de Barragem a Montante.
 Fonte: WERNECK, 2019

Método a jusante é o tipo mais estável e seguro dentre os três tipos. O processo de fundação é exatamente igual a montante, porém, o alteamento da barragem é sempre feito a jusante, ou seja, sempre para o lado externo da barragem (MACHADO, 2007). Isso faz com que a estrutura cresça proporcionalmente na largura e na altura, isto é, a cada alteamento a estrutura ganha uma base maior, aumentando cada vez mais a sua inércia, o que conseqüentemente proporciona maior estabilidade (DUARTE, 2008).

Possui a vantagem de uma maior resistência a carregamentos dinâmicos. Outras de suas vantagens são a facilidade de drenagem, a pouca possibilidade de liquefação e a simplicidade em sua operação (MACHADO, 2007). Esse método garante maior estabilidade do corpo da barragem pois a compactação pode ser

adequada à medida que a barragem sofre os sucessivos alteamentos (ARAÚJO, 2006).

Para Vinaud (2019), 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. Sua construção é considerada segura, no entanto, ocupa um espaço maior demandando um desmatamento que não aconteceria nos outros modelos.

Para que ocorra o alteamento da mesma, o material depositado pode ser usado desde que acrescido de pedras e argila recolhidos da própria mineração. Necessitam maiores volumes de material, apresentando maiores custos associados ao processo de ciclonagem ou ao empréstimo de material (ARAÚJO, 2006). Tais práticas entre outras necessárias para a execução do processo o tornam 30% mais caro em relação aos demais motivo pelo qual parte das mineradoras não o utilizam ou utilizam com menor frequência (MACHADO, 2007).

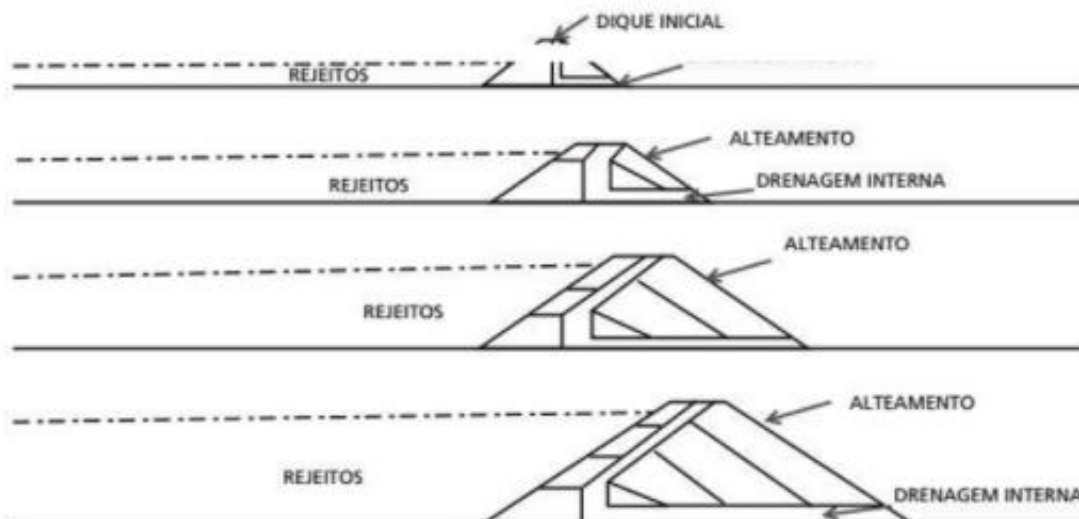


Figura 10: Modelo de Barragem a Jusante.
Fonte: WERNECK, 2019

Método de linha de centro é basicamente o alteamento feito seguindo o mesmo eixo. Todas as camadas de alteamento são ligadas entre si, assim como no tratamento da jusante e também tem um crescimento da base, o que aumenta a sua estabilidade (SOARES, 2010). Esse método vem a ser uma solução intermediária entre os métodos a jusante e a montante. Seu comportamento geotécnico se

assemelha mais a barragens alteadas para jusante, constituindo uma variação deste método, onde o alteamento da crista é realizado de forma vertical, sendo o eixo vertical dos alteamentos coincidente com o eixo do dique de partida (VINAUD, 2019).

O método permite ser usado até em áreas de alta sismicidade pelo fato de possuir zonas de drenagem interna que auxiliam no controle da linha de saturação, promovendo a dissipação da pressão exercida pelo material acumulado, melhor controle da linha de saturação, dissipando poros pressões graças à construção de zonas de drenagem interna em todas as fases do alteamento (MACHADO, 2007).

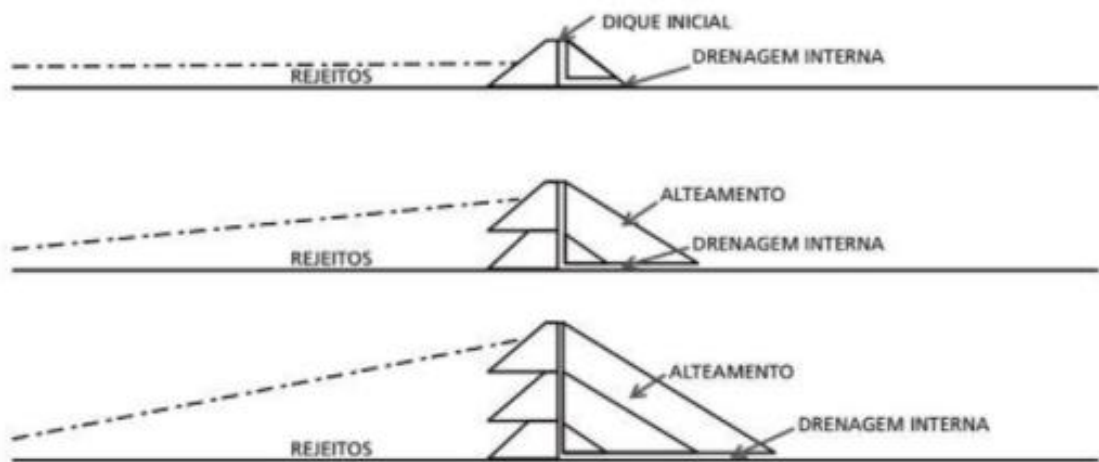


Figura 11: Modelo de Barragem Linha de Centro.
Fonte: WERNECK, 2019

Os tipos de estruturas não são tão simples assim. Além da complexidade de execução, necessitam de um constante monitoramento, de modo a serem instalados sensores que detectam variações incomuns na estrutura, chamados piezômetros (DUARTE, 2008).

Esses sensores em geral são sondas cravadas no solo próximos a barragem que podem, por exemplo, medir o aumento da umidade, vibrações e estabilidade do solo. Toda estrutura dá indícios quando está prestes a sofrer uma ruptura e as barragens não são diferentes. Dependendo do tipo de ruptura, é possível detectar com um bom tempo de antecedência permitindo a evacuação. Em casos extremos até mesmo a remediação (LOPES, 2016).

Todas as avaliações das estruturas são feitas por profissionais especializados que analisam o estado da estrutura periodicamente. No caso de Brumadinho e Mariana, não chovia no momento dos rompimentos. Os laudos técnicos mostraram que os riscos eram conhecidos e já se sabia do risco. O contato entre as pilhas de rejeitos e a barragem não são recomendados por causa do risco de desestabilização do maciço da pilha e da potencialização de processos erosivos. Nisto caracteriza-se uma negligência na recomendação prévia de necessidade de se fazer reparos na estrutura das barragens. E de considerar os mecanismos de monitoramento ou até mesmo em ambos, os casos, em que estes acontecimentos se sucederam simultaneamente anterior aos fatos.

3.2. REPRESENTATIVIDADE DO ENGENHEIRO CIVIL NA EXECUÇÃO DE MEDIDAS SEGURAS EM PROJETOS

A construção civil tem uma vasta gama de atividades. Dentre elas a construção de pontes, estradas, edifícios, barragens, entre outros. O engenheiro é uma peça fundamental nesse processo.

A história da engenharia civil está ligada diretamente com a história da humanidade e sua influência pode ser vista nas mais diversas construções observadas na atualidade, como palácios, templos, canais construídos a séculos e conservados por conta de técnicas que foram aperfeiçoadas e se perduram até hoje. (CHAVES, 2017)

No Brasil, essa ciência se iniciou ainda no período colonial através da construção de igrejas e fortificações com destaque para o engenheiro civil Luís Dias, que foi responsável por, dentre outras, a construção dos muros ao redor da então capital do Brasil, Salvador em 1549. (CHAVES, 2017)

Segundo Chaves (2017), com o estabelecimento da família real no Brasil foi criado em 1.810 escolas voltadas para a área específica de engenharia civil com ênfase na formação de cartógrafos, engenheiros e oficiais de artilharia. Mais tarde essa escola fora convertida em curso exclusivo de engenharia civil sendo atualmente a escola nacional de engenharia.

Durante épocas diferentes a construção civil teve uma influência maior ou menor no país, no entanto, em todas elas, sempre foi indispensável como um setor essencial no tocante ao desenvolvimento do país.

Segundo Reis, *et al.* (2019) Com o crescimento da atividade mineraria no Brasil o papel da construção civil e conseqüentemente do engenheiro civil nessa área tornou se fundamental para a construção e manutenção de barragens de rejeitos oferecendo a essas garantias de segurança e conservação.

Cabe ao engenheiro civil elaborar o projeto acompanhar sua execução e garantir que durante sua vida útil o empreendimento esteja totalmente apto para cumprir a função para a qual fora construído, para tal equipamentos específicos são utilizados nesse monitoramento garantindo ao engenheiro civil respostas rápidas em caso de alguma anormalidade. (CHAVES, 2017)

A segurança das barragens concebe graus de importância desde o início do projeto. A concepção geral do projeto, o arranjo e o dimensionamento das estruturas são fundamentais para o sucesso do empreendimento (PIASENTIN, 2020). O profissional tem um grande embasamento pela gama de disciplinas curriculares atreladas ao seu curso, de modo a possibilitar a realização e verificação de projetos desse porte. Destacam-se nesse contexto os ramos relacionados a mecânica do solo, hidrologia, hidráulica e a topografia.

No que se refere às fundações e aos materiais de construção, a escolha deve ser feita a partir de estudos geológicos e geotécnicos (PIASENTIN, 2020). Essas disciplinas geram uma série de estudos das águas e das muitas formas de prevenção de acidentes através da correta percepção da forma de drenagem e do transporte de sedimentos por ela, sendo possível projetar a construção de um projeto dedicado aos aspectos geológicos e regionais estipulados e requeridos tecnicamente.

A partir disso, verifica-se a possibilidade de estudar as características naturais e artificiais de um terreno, condicionando o mesmo para uma construção ou não, como também estabilidade estrutural. Segundo Moreira (2012), é importante ressaltar o papel de avaliar a resistência dos terrenos para conhecer os esforços elevados que serão transferidos para a barragem, que por sua vez, transmitirá ao terreno onde assenta.

Nesse contexto, observa-se a necessidade de buscar meios de reduzir o tempo de execução e os custos incorridos. Segurança e desgaste mínimo também são uma consideração de projeto para evitar intervenções futuras e proteger o meio ambiente. A construção deve obedecer fielmente ao projeto e seguir as normas e especificações. (PIASENTIN, 2020)

3.2.1. MONITORAMENTO E INSTRUMENTOS UTILIZADOS

Segundo Soares (2010), os tipos de instrumentação podem ser divididos em três fases:

- Etapas de implantação de uma barragem:

Inicialmente deve ser feita a verificação de situações que comprometam ou possam favorecer de incompatibilidade de projetos e anomalias no comportamento de barragens

Uma vez que foi verificado alguma observação de inconformidade com o projeto deve-se encontrar uma solução até tal fase se mostrem conservadoras demais, ou o oposto, indicando a redução ou necessidade de aditivo a obra.

- Etapas de operação de uma barragem:

Apontar eventos de anomalias que possa prejudicar de alguma forma a estabilidade da estrutura e verificar o desempenho das estruturas avaliando as medidas demonstradas pelos instrumentos, e auditar a conformidade dos critérios utilizados do projeto.

Avaliação do estado de conservação da barragem, conforme previsto em projeto;

Caracterização do comportamento dos materiais das estruturas com o desenvolvimento da obra, no intuito de levantar os parâmetros de tempo para estabilização dos deslocamentos, das tensões internas, estabilização das vazões, dentre outros. (SOARES, 2010)

- Etapa de desativação:

Avaliação da estabilidade estrutural resultante do lançamento de rejeitos;

Verificação do desempenho estrutural, através das medições de tensão interna, variações de vazão, dentre outros.

Os principais dados monitorados pelos instrumentos que são utilizados de maneira mais comum são os de piezometria, vazão de jusante, pluviometria, nível de água do reservatório e os marcos topográficos superficiais.

O ramo da engenharia civil, concernem aos papéis e responsabilidades vinculados e execução de barragens de rejeito, de modo a destacar suas vertentes ligadas a planejamento, projeto, construção e operação. (CHAVES, 2017)

É importante ressaltar que o monitoramento de uma barragem consiste na utilização de uma série de instrumentos que usados em conjunto compõe um sistema de auscultação. (GUERRA, 1996)

Segundo Machado (2007), auscultação vem a ser um sistema de observação e controle com o objetivo de preservar as funções operacionais e estruturais de uma barragem, podendo ser realizada por instrumentação utilizando o controle de diferentes tipos de instrumentos que oferecem dados sobre o comportamento da barragem.

Dentre os instrumentos utilizados num sistema de auscultação destaca-se o piezômetro também conhecido como medidor de pressão poroso, é usado para mensurar a pressão da água em solo, rochas, fundações e estruturas de concreto, medir lençol freático em tubos, perfurações e poços. Investigação hidrológica, controle de construção, investigação de estabilidade e monitorização de barragens de terra, fundações, trabalhos subterrâneos e escavações superficiais. Monitoramento e controle de infiltrações e drenagens. (MACHADO, 2007)

Existes alguns tipos de piezômetros diferentes e suas funções específicas para o ambiente adequado, são eles:

Piezômetro de tubo aberto: O sistema consiste em tubos de PVC, cuja extremidade inferior repousa sobre um elemento poroso (válvula) por onde a água escoar e forma uma coluna de água no tubo. Isso corresponde à pressão intersticial que atua na região onde atua a válvula porosa. A pressão é quantificada pela medição da coluna de água no tubo guia usando um sensor portátil de nível de água. É usado para determinar a pressão e a pressão neutra em engenharia civil, como massa do solo, declive e fundação.

O nível da coluna d'água no interior do tubo do piezômetro é medido por um fio elétrico ou por uma trena. O sensor opera eletricamente mostrando no mostrador digital o instante em que a ponta atinge o nível d'água. (SANTOS, 2019)

Piezômetro Hidráulico: É constituído por dois tubos hidráulicos ligados a uma ponta piezométrica de nylon com filtro cerâmico. O sistema é conectado ao coletor por meio de um tubo duplo de nylon revestido de polietileno com diâmetro interno de 4 mm. O sistema está cheio de água. A pressão de pico é medida em um ou ambos os tubos usando um sensor de fio vibratório. Leitura digital. O manômetro de óleo é adequado para medir pressões positivas e negativas de até 5 mca.

Foram desenvolvidos para instalação na fundação e no aterro de barragens de terra durante a construção. Esses modelos de piezômetros são considerados por vários engenheiros como sendo o mais indicado para medidas de poro-pressão, tanto na fase construtiva quanto na de enchimento e de operação do reservatório. (CRUZ, 2004)

Piezômetro Pneumático: Cruz (2004), descreve o funcionamento dos piezômetros pneumáticos como o equilíbrio de pressões atuantes em um diafragma flexível, em que de um lado atua a água cuja pressão se deseja medir e do outro lado atua um gás cuja pressão é variável e conhecida.

Aplica-se uma pressão crescente, através da tubulação de alimentação e mede-se a intensidade de pressão na tubulação de retorno, momento em que a pressão se iguala à pressão intersticial do solo. Quando a pressão na tubulação de retorno atinge zero, é possível determinar exatamente a pressão exercida pela água que passa através da pedra porosa, em equilíbrio com a água intersticial. (SILVEIRA, 2003)

Piezômetro de Corda Vibrante: Conforme Cerqueira (2017), o uso de piezômetros de corda vibrante vem substituindo o de piezômetros de Casagrande.

Existem diversos modelos de piezômetros de corda vibrante, e a escolha do mais adequado deve considerar o alcance da pressão que o sensor deve medir quando instalado, sabendo que quanto maior o alcance do sensor, maior o erro sistemático nas leituras. Piezômetros de corda vibrante são piezômetros elétricos que têm como base de funcionamento a medição da pressão intersticial da água que passa por uma pedra porosa para um diafragma interno, em que um transdutor mede a deflexão. (SANTOS, 2019)

3.3. IMPACTOS AMBIENTAIS E SOCIOECONÔMICAS NA REALIZAÇÃO DE PROJETOS

Barragens de rejeitos são construções que precisam ser observadas desde o início do projeto e necessitam do monitoramento adequado. Sua construção realidade de maneira errada poderá acarretar acidentes que podem ser referentes a falta de análise dos fatores que influenciam a segurança das operações. A Agência Nacional de Mineração (ANM) é responsável pela fiscalização das barragens de

mineração, sendo ela a entidade outorgante de direitos minerários para fins de disposição final ou temporária destes rejeitos (MACHADO, 2007).

Por conta dos constantes acidentes ocorridos em barragens à montante, esse método tende a desaparecer. Os acidentes que envolveram estruturas de contenção de rejeitos de minério no estado de Minas Gerais desde o ano de 2001 foram marcados pelo emprego do método a montante (THOMÉ & PASSINI, 2018).

Tratando-se de método menos seguro em relação aos demais, o Decreto n. 46.993, de 2 de maio de 2016 do Estado de Minas Gerais, institui a Auditoria Técnica Extraordinária de Segurança de Barragem para todos os empreendimentos que fazem a disposição final ou temporária de rejeitos de mineração em barragens que utilizem ou que tenham utilizado o método de alteamento para montante (MINAS GERAIS, 2016).

O projeto que define padrões mais rígidos para a segurança de barragens de rejeitos de mineração publicou no Diário Oficial da União, a Lei de nº 14.066/20 que proíbe o uso de barragens construídas pelo método a montante, prevendo multa administrativa de dois mil a um bilhão para empresas que descumprirem as normas de segurança, podendo o infrator sofrer penalidades que vão de advertência até a perda dos direitos de exploração mineral ou de benefícios fiscais concedidos.

Um dos principais motivos das constantes falhas e acidentes em barragens se dão pelo fato de as empresas entenderem como sendo a disposição final de resíduos como um custo adicional sem retorno financeiro.

Os resíduos sólidos são os principais responsáveis pelo impacto ambiental nas atividades mineradoras. Seu tratamento e armazenamento visando minimizar os custos e maximizar a segurança são um dos principais objetivos das mineradoras para cumprir as exigências ambientais, já que a disposição dos resíduos é catalogada como um custo adicional sem retorno financeiro dentro do projeto. (LOZANO, 2006)

Os dois últimos acidentes com mais vítimas fatais e danos ambientais acontecidos na barragem de Fundão em Mariana em 2015 e na mina do Córrego do Feijão em Brumadinho em 2019, foram provenientes de reservatórios que utilizavam o método a montante. Segundo Thomé e Passini (2018), é importante ressaltar que quase metade dos acidentes com barragens ocorridos no final do século XX e no início do século XXI envolveram estruturas alteadas com a utilização do método a montante.

O gerenciamento inadequado de uma barragem de rejeitos dá-se primeiramente pelo modelo que na maioria das vezes é escolhido (DUARTE, 2008).

Por conta de uma política de redução de gastos no processo, as empresas optam pelo sistema mais econômico, no entanto, mais suscetível a acidentes.

A despeito do sistema de aterro hidráulico ser o mais utilizado em todo mundo, atualmente existem técnicas mais modernas que permitem a drenagem mais segura dos resíduos da mineração através de filtros. Esse novo sistema, entretanto, eleva em até seis vezes os custos de produção, o que tem inviabilizado sua utilização pela maioria das empresas. (LOPES, 2016)

Sabe-se que as consequências sociais e ambientais do acidente foram dramáticas e de grande amplitude. Somente para se identificar e quantificar a dimensão dos prejuízos serão necessários anos de estudos e de análises. Especificamente no que tange à biodiversidade aquática e a qualidade das águas da bacia hidrográfica do Rio Doce, os danos causados foram particularmente perversos e imensos, proporcionais à extensão do corpo hídrico atingido pela lama (LOPES, 2016).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Sendo uma atividade de suma importância para o país, e entendendo seu papel fundamental no desenvolvimento de macro-regiões, faz-se necessário a análise dos melhores métodos a serem utilizados. Nesse sentido, busca-se assegurar a proteção da vida e dos bens daqueles que estão diretamente envolvidos no processo de extração e tratamento do minério, como das comunidades que vivem no entorno de projetos minerários e que de alguma forma são diretamente afetados com esse modelo de gestão.

O setor minerário tem seu destaque na economia nacional desde os tempos da fundação do país, ainda como colônia de Portugal (ARAÚJO & FERNANDES, 2016). Os recursos minerais vêm sendo explorados como fonte geradora de lucro desde então e exercendo significativo papel econômico e social no Brasil (VINAUD, 2019).

A partir disso, torna-se essencial a averiguação dos métodos de construções. No estado de Minas Gerais, cerca de 49% das barragens foram construídas em etapa única de 25% com o método alteamento a jusante, 19% a montante ou desconhecido ou que já tenha sido alteada a montante ao longo do ciclo da vida e apenas 7% pelo método por linha de centro (DANESE, 2020).

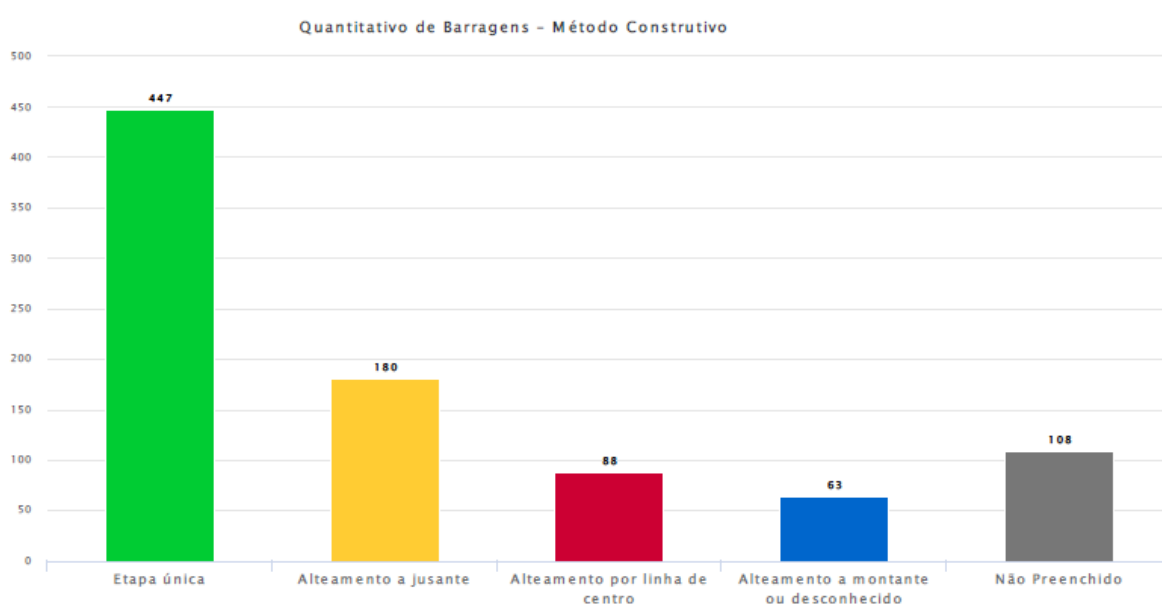


Figura 12: Modelos de Barragens Atuais no Brasil.
Fonte: ANM

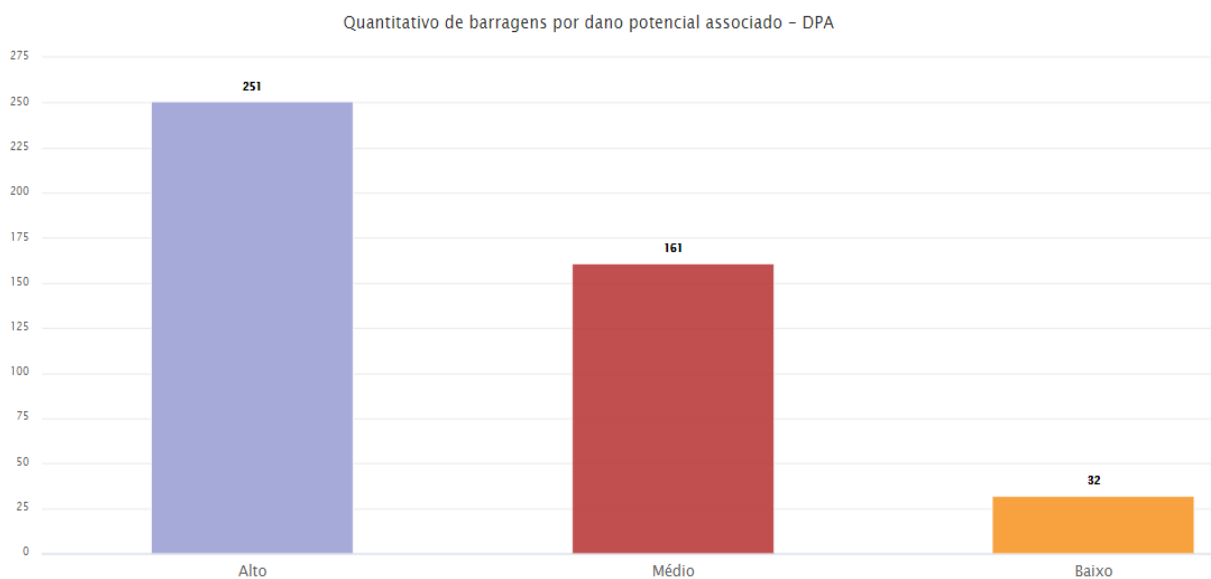


Figura 13: Danos Potenciais Associados.
Fonte: ANM

Segundo a ANM (2021), existem 251 barragens com alto dano potencial. O Dano Potencial Associado (DPA) de uma barragem é o somatório dos itens volume do reservatório, existência de população a jusante, impacto ambiental e impacto socioeconômico, sendo classificado como alto, médio ou baixo.

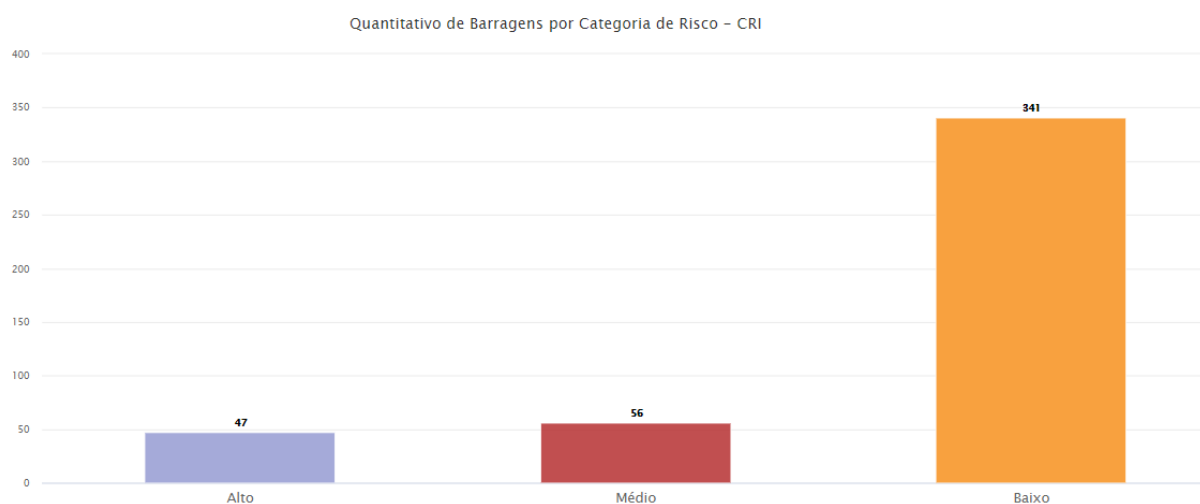


Figura 14: Categoria de Risco.
Fonte: ANM

A Categoria de Risco da barragem é o somatório dos itens Características Técnicas, Estado de Conservação e Plano de Segurança e é classificada em alto, médio ou baixo (DANESE, 2020).

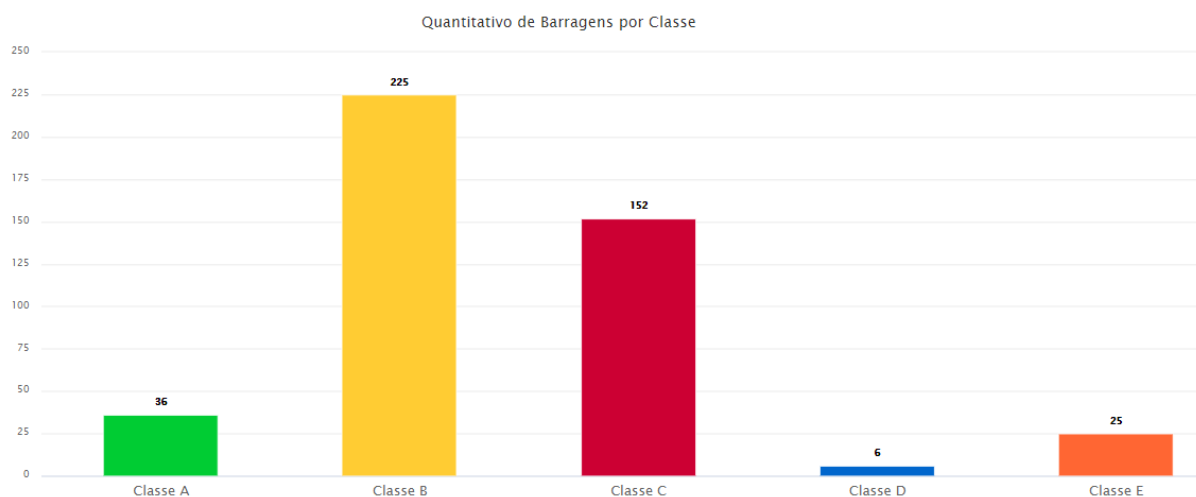


Figura 15: Classes.
Fonte: ANM

Para que uma barragem de mineração seja classificada como A, tanto o CRI quanto o DPA devem ter pontuação para ser classificada como alto. Para uma classificação B, o CRI deve ser alto e DPA médio, ou vice-versa. Já a para a possibilidade de uma barragem ser classificada como C, é necessário ter CRI e DPA médio, CRI alto e DPA baixo ou CRI baixo e DPA alto. A classificação de uma barragem como D indica que o CRI e DPA devem ser médio e baixo ou vice-versa. Por fim, para uma barragem ser classificada como E, tanto o CRI quanto o DPA devem ser baixo. (DANESE, 2020)

No que se refere aos métodos utilizados para a construção de barragens de rejeito, entende-se que com base na Resolução n. 4 de 15 de novembro de 2019 fica proibido a utilização do método de construção ou alteamento de barragens de mineração, denominando a montante em todo o território nacional. No entanto, segundo a Agência Nacional de Mineração (2021), atualmente somente no estado de Minas Gerais existem em operação 45 barragens que utilizam o método a montante ou desconhecido.

Desse total, somente o município de Ouro Preto, possui quatro barragens com nível de emergência 1, 3 barragens com nível de emergência 2 e uma barragem com nível de emergência 3, sendo essa a mais perigosa e com reais chances de um acidente com vítimas fatais. Além disso, o relatório aponta que no mesmo município, quatro barragens são classificadas com categoria de risco, alto e dano potencial também alto, todas pertencentes ao complexo Forquilha, da mineradora Vale.



Figura 16: Conjunto de Barragens Forquilha.
Fonte: Google Earth

No estado de Minas Gerais são 38 barragens nessa condição, embora exista a proibição de novos projetos que utilizem essa técnica. A preocupação maior se dá pelo descomissionamento urgente que necessita ser realizada nesses empreendimentos.

A explicação para muitos acidentes no Brasil, pode-se dar pelo modo que são administradas as questões relacionadas aos custos com a segurança das barragens, quando empresas buscam maximizar os lucros, reduzindo os gastos com segurança e negligenciando a fiscalização e gastos com a mesma.

Tornam-se urgentes medidas as quais visem o comprometimento com a desmobilização de barragens que por lei são proibidas de continuarem em atividade.

Quanto a outros modelos de barragens de rejeito é importante enfatizar o modelo a jusante. Dentre todos, o mesmo oferece uma segurança maior contra os acidentes que se costuma observar. O fato de ser necessário grandes quantidades de material grosseiro para garantir uma boa estabilidade, faz desse tipo de barragem um projeto mais caro, no entanto, a possibilidade de um controle de saturação maior além de se obter uma altura de barramento mais segura e conseqüentemente com uma quantidade maior faz desse modelo um exemplo de segurança quando se trata de depósito de rejeitos. O aprimoramento de técnica de disposição de materiais tem permitido o uso cada vez maior de depósitos com estruturas cada vez mais elevadas (DUARTE, 2008).

Com o passar do tempo, a produção de rejeitos aumentou e as áreas para disposição se tornaram cada vez mais escassas. Atualmente, o desenvolvimento dos projetos de engenharia vem permitindo a construção de barragens com alturas cada vez maiores e conseqüentemente, permitindo maiores volumes a serem armazenados (DUARTE, 2008).

Segundo a Agencia Nacional de Mineração (2021), atualmente somente no estado de Minas Gerais são 65 barragens em funcionamento que utilizam esse método.

O método a jusante dentre os demais possibilita a quem constrói a alternativa de uma vida útil mais alongada. De acordo com Duarte (2008), nenhuma parte ou alteamento da barragem é construída sobre o rejeito previamente depositado.

Além disso, os sistemas de drenagem interna podem ser instalados durante a construção da barragem e prolongados durante seu alteamento, permitindo o controle da linha de saturação na estrutura da barragem e aumentando sua estabilidade (DUARTE, 2008).

Outro modelo utilizado para acondicionamento de rejeitos de mineração vem a ser o método de linha de centro. Um modelo intermediário entre o método montante e o método jusante apresenta vantagens em relação ao montante, pois à medida que vai sendo alteada a estrutura vai ficando mais robusta e automaticamente mais segura a cada adição de material. É um método vantajoso em vários aspectos, podendo até ser utilizado em locais suscetíveis a abalos sísmicos (VINAUD, 2019).

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. (VINAUD, 2019)

O modelo de linha de centro exige uma menor quantidade de material para a construção da estrutura da barragem e esse método também é uma vantagem em relação aos outros modelos.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foram abordados temas correlacionados a questão do condicionamento de resíduos de mineração através de barragens de rejeitos, onde se analisou as técnicas utilizadas e o papel do profissional de engenharia na elaboração e manutenção dos diversos tipos de construções voltadas para a Área.

Pôde-se concluir que, embora exista um esforço de parte da sociedade visando o melhoramento desses projetos que são necessários para a continuidade da indústria do minério, ainda existem fatores que por serem negligenciados, preocupam aqueles que são diretamente envolvidos com a questão.

O trabalho cumpre o seu objetivo quando identifica questões relacionadas à segurança no sistema e aponta caminhos que podem oferecer uma resposta para os problemas inerentes ao tema.

Tudo aquilo que fora apresentado é de suma importância, no entanto, por ser um assunto de bastante profundidade, muito embora, ainda podem ser apresentados novos trabalhos para o aprimoramento do tema.

Por fim, destacam-se os tipos de barragens e seus modelos construtivos, abordando o papel de engenheiro e sua importância na execução e estudo dos projetos, apoiando na comprovação dos danos e consequências de empreendimentos já executados e adicionalmente a isso agregando valor e apresentando as diferenças entre os modelos utilizados e numerando as vantagens e desvantagens de metodologia e sistemas de gerenciamento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, Marcelo P.; LAGO, Luiz A. C. (2010). **A economia brasileira no Império, 1822-1889**. Texto para Discussão, n. 584. Rio de Janeiro: PUC-Rio, Departamento de Economia.

AMBIENTAL LEGAL. **barragem com maior risco de vazamento em Minas**, 2019. Disponível em: <https://www.ambientelegal.com.br/abandonada-barragem-com-maior-risco-de-vazamento-em-minas-espera-solucao-ha-sete-anos/> Acesso em: 23 de Maio de 2021.

ANDRADE, Wellington. **Beneficiamento de minério de ferro**: A importância da caracterização tecnológica na definição de rota de processo. Orientador: Prof. Me. Paulo Penha Santana. 2018. 45 p. Monografia (Bacharel em Engenharia de Minas) - Fundação Presidente Antônio Carlos, Conselheiro Lafaiete, 2018. Disponível em: <https://ri.unipac.br/repositorio/wp-content/uploads/tainacan-items/282/70011/BENEFICIAMENTO-DE-MIN%C3%89RIO-DE-FERRO-Wellington.pdf>. Acesso em: 5 de abril de 2021.

ANM. **Maiores arrecadadores**. 2019. Disponível em: < https://sistemas.dnpm.gov.br/arrecadacao/extra/Relatorios/cfem/maiores_arrecadadores.aspx > acesso em 15 de abril de 2021.

ANM: **Relatório quantitativo**. 2021. Disponível em: <https://app.anm.gov.br/SIGBM/Publico/Estatistica> acesso: 14 de Maio de 2021

ARAÚJO, Cecília. **Contribuição ao estudo do comportamento de barragens de rejeito de mineração de ferro**. Orientador: Francisco de Rezende Lopes. 2006. 143 p. Dissertação (Mestre em Ciências) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

ARAÚJO, Eliane; FERNANDES, Francisco. **Mineração no Brasil: Crescimento econômico e conflitos ambientais**. Centro de Tecnologia Mineral (CETEM), Rio de Janeiro, p. 65-88, 14 jun. 2016. Disponível em: http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/1909/1/conflitos_ambientais_cap.2%20p65.pdf. Acesso em: 24 de abril de 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **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. 22 p.

BRASIL. **Lei nº 14.066, de 30 de setembro de 2020**. Atos do Poder Legislativo. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, ano 03, 1 de outubro de 2020.

BRASIL. **Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010**. Subchefia para Assuntos Jurídicos. Presidência da República: Casa Civil, Brasília, DF, 21 de setembro de 2010.

BRASIL. **Portaria nº 70.389, de 17 de maio de 2017**. Departamento Nacional de Produção Mineral. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 19 de maio de 2016.

BRASIL. **Resolução nº 04, de 15 de fevereiro de 2019**. Ministério de Minas e Energia. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, p. 58, 2019.

BOSCOV, M.E.G. 2008. **Geotecnia Ambiental**. São Paulo: Oficina de Textos.

CERQUEIRA, Hélio Márcio Lopes. **Critérios de projeto para instrumentação piezométrica de diversas estruturas geotécnicas de mineração**. 2017. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Universidade Federal de Ouro Preto, 2017.

CHAVES, Thiago. **O papel do engenheiro civil como gestor de obras: aspectos técnicos, humanos e conceituais**. Orientador: Jorge dos Santos. 89 p. Projeto de Graduação (Bacharel em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

CRUZ, Paulo Teixeira. **100 Barragens brasileiras**. 2. ed. Oficina de textos, 2004.

DANESE, Luciana. **Síntese geral do diagnóstico e reavaliação geotécnica das barragens de rejeitos de mg inseridas na PNSB**. Orientador: Prof. Dr. Romero César Gomes. 2020. 189 p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2020.

DUARTE, Anderson. **Classificação das barragens de contenção de rejeitos de mineração e de resíduos industriais no estado de minas gerais em relação ao potencial de risco**. Orientador: Terezinha de Jesus Espósito. 2008. 130 p. Dissertação (Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008. Disponível em: <http://www.smarh.eng.ufmg.br/defesas/502M.PDF>. Acesso em: 20 de maio de 2021

FIGUEIRÔA, Silvia F. de M. (1994). **Mineração no Brasil: aspectos técnicos e científicos de suas histórias na Colônia e no Império (séculos XVIII-XIX)**. América Latina en la Historia Económica, v. 1, n. 1, p. 41-55.

FONTINELI, Mariana. **Infraestrutura da Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral – SGM/MME**, 2020.

GODOY, Arilda Schmidt. **Introdução à pesquisa qualitativa e suas possibilidades**. RAE - Revista de Administração de Empresas, São Paulo, v. 35, n. 2, p. 57-63, 1995.

GUERRA, Marcos. **Qualidade como fator de melhoria da performance de audição e monitoramento de barragens**. Orientador: ProL. Dr. Atlemir José Petenate. 177 p. Dissertação (Mestrado em Qualidade) - UNICAMP, Campinas, 1996.

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. **Relatório Anual de Atividades**. Brasília: IBRAM, 2018.

LAZANO, Fernando A. E. **Seleção de locais para barragens de rejeitos usando o método de análise hierárquica**. Orientador: Maria Eugênia Gimenez Boscov. 2006. 142 p. Dissertação (Mestre em Engenharia Geotécnica) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

LINHARES, Tatiana. **De Fato**, 2020. Disponível em: <https://defatoonline.com.br/minas-gerais-tem-apenas-um-fiscal-para-vistoriar-364-barragens/> Acesso em: 20 de maio de 2021.

LOPES, Luciano. **O rompimento da barragem de Mariana e seus impactos socioambientais**. Sinapse Múltipla, Niterói, v. 01, n. 01, p. 14, 2016.

MACHADO, William. **Monitoramento de barragens de contenção de rejeitos da mineração**. Orientador: Prof. Dr. Lindolfo Soares. 2007. 156 p. Dissertação (Mestre em Engenharia) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

MINAS GERAIS. **Decreto n. 46.993, de 2 de maio de 2016**. Institui a Auditoria Técnica Extraordinária de Segurança de Barragem e dá outras providências. Minas Gerais: Diário do Executivo de 02 de maio de 2016.

OLIVEIRA, Frederico. **Departamento de Geologia e Produção Mineral da Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral – DGPM/SGM/MME**, 2020.

PEREIRA, Luís; CRUZ, Gabriela; GUIMARÃES, Ricardo. **Impactos do rompimento da barragem de rejeitos de Brumadinho, Brasil: uma análise baseada nas mudanças de cobertura da terra**. Journal of Environmental Analysis and Progress, Minas Gerais, v. 04, n. 02, p. 122-129, 1 de fevereiro de 2019.

PIASENTIN, Corrado. **Segurança de barragens: aspectos legais, técnicos e sócioambientais**. Itaipu Binacional, Itaipu, v. 1, n. 2, 31 p. 2020.

REIS, Gabriella *et al.* **A ética dos profissionais da construção civil em empresas de mineração e os impactos socioambientais resultantes da postura negligenciável**. Pesquisa Unifimes, Rio de Janeiro, ano 2019, v. 4, p. 10, 21 maio 2019.

SABBO, Gabriela; ASSIS, Milena; BERTERQUINI, Aline. **Barragens de retenção de rejeitos de mineração**. Revista Engenharia em Ação UniToledo, Araçatuba, v. 02, n. 01, p. 3-15, 17 ago. 2017. Disponível em: <http://www.ojs.toledo.br/index.php/engenharias/article/viewFile/2542/147>. Acesso em: 6 de maio de 2021.

SANTOS, Laryssa. **Estudo sobre a instrumentação de barragens de terra e rejeitos**. Orientador: Profa. Dra. Giovana Bizão Georgetti. 60 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019.

SEABRA, Antonio Augusto; BRANDT, Wilfred. **Os Estudos de paleosismicidade como ferramenta de gestão de riscos: evidências, literatura e futuro**. Arquivos do Museu de História Natural e Jardim Botânico, Belo Horizonte, v. 24, n. 01, p. 44-63, 16 jul. 2015. Disponível em: <https://www.ufmg.br/mhnpj/wp-content/uploads/2017/02/Vol24n1.pdf>. Acesso em: 4 de maio de 2021.

SILVA, Lucas; DANEU, Rafael; SANTOS, Fernando. **O desempenho da exportação de minério de ferro em relação a produção para consumo interno no Brasil**. Revista Linceu On-line, São Paulo, v. 9, p. 46-59, 2019. Disponível em: https://liceu.fecap.br/LICEU_ON-LINE/article/view/1804. Acesso em: 1 de maio de 2021.

SILVEIRA, João Francisco Alves. **Instrumentação e segurança de barragens de terra e enrocamento**. 1. ed. [S. l.]: Oficina de textos, 2006.

SOARES, Lindolfo. **Barragem de Rejeitos**. Coordenação de Processos Minerais – COPM, Rio de Janeiro, 69 p. 2010. Disponível em: <http://mineralis.cetem.gov.br:8080/bitstream/cetem/769/1/CCL00410010.pdf>. Acesso em: 24 de março de 2021.

SOUZA, T. F.; MOREIRA, E. B.; HEINECK, K. S. **Barragens de contenção de rejeitos de mineração no Brasil**. Holos, Rio Grande do Sul, v. 05, 39 p. 2018.

THOMÉ, Romeu; PASSINI, Matheus. **Barragens de rejeitos de mineração: características do método de alteamento para montante que fundamentaram a suspensão de sua utilização em Minas Gerais**. Ciências Sociais Aplicadas em Revista, Paraná, v. 18, n. 34, p. 49-65, 10 abr. 2018.

TROCATE, Charles; COELHO, Tádzio. **Quando vier o silêncio: o problema mineral brasileiro**. São Paulo: Expressão Popular, 2006. 146 p.

VALE. **O que são barragens**. 2021. Disponível em: http://www.vale.com/brasil/PT/aboutvale/servicos-para-comunidade/minas-gerais/atualizacoes_brumadinho/Documents/PT/entenda-as-barragens-da-vale-pt.html acesso em: 08 de Abril de 2021

VILLAS-BÔAS, Ana Lúcia. (1995). **Mineração e Desenvolvimento Econômico: A questão nacional nas estratégias de desenvolvimento do setor mineral (1930-1964)**. Rio de Janeiro, CETEM/MCTI.

VINAUD, Laura. **Barragens de rejeito de mineração em minas gerais: listas de verificação de aspectos técnicos, legais e ambientais**. Orientador: Prof. Dr. Hildor José Seer. 2019. 84 p. Monografia (Bacharel em Engenharia de Minas) - CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS, Araxá, 2019. Disponível em: <https://www.eng-minas.araxa.cefetmg.br/wp->

content/uploads/sites/170/2020/02/TCC_Laura_Vinaud.pdf. Acesso em: 1 de março de 2021.

WERNECK, Márcio. **O que é e para que serve uma barragem de rejeitos?** 02. ed. São Paulo: UFABC Divulga Ciência, 1 fev. 2019. Disponível em: <https://ufabdivulgaciencia.proec.ufabc.edu.br/2019/02/01/o-que-e-e-para-que-serve-uma-barragem-de-rejeitos-v-2-n-1-p-5-2018/>. Acesso em: 19 de maio de 2021.

ANEXOS



Mina do Engenho, a Barragem com maior potencial de risco atualmente no Brasil, localizada no município de Rio Acima-MG.
Fonte: Portal Ambiente Legal, 2019



Figura 2: Dique B3 Ipê, a segunda barragem com maior potencial de risco, localizada no município de Itabiruçu-MG.
Fonte: De Fato