



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas – Departamento de Engenharia Civil
Curso de Graduação em Engenharia Civil



Ariane Braga Fachinetti Lopes

**ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE BARRAGEM COM BASE NA
INSTRUMENTAÇÃO PIEZOMÉTRICA E DADOS PLUVIOMÉTRICOS: UM
ESTUDO DE CASO**

Ouro Preto

2024

Análise de estabilidade de barragem com base na instrumentação piezométrica e dados pluviométricos: um estudo de caso

Ariane Braga Fachinetti Lopes

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como parte dos requisitos para obtenção do Grau de Engenharia Civil na Universidade Federal de Ouro Preto.

Data da aprovação: 07/10/2024

Área de concentração: Geotecnia

Orientador: Prof. Dr. Felipe de Campos Loch – UFOP

Ouro Preto

2024

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

L864a Lopes, Ariane Braga Fachinetti.
Análise de estabilidade de barragem com base na instrumentação
piezométrica e dados pluviométricos [manuscrito]: um estudo de caso. /
Ariane Braga Fachinetti Lopes. - 2024.
73 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Dr. Felipe Loch.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola
de Minas. Graduação em Engenharia Civil .

1. Engenharia geotécnica. 2. Piezômetro. 3. Barragens e açudes. I.
Loch, Felipe. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 624

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



FOLHA DE APROVAÇÃO

Ariane Braga Fachinetti Lopes

Análise de estabilidade de barragem com base na instrumentação piezométrica e dados pluviométricos: um estudo de caso

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenharia Civil

Aprovada em 07 de outubro de 2024

Membros da banca

Prof. Dr. Felipe de Campos Loch - Orientador - Universidade Federal de Ouro Preto
Prof. Dr. Pedro Manuel Alameda Hernandez - Universidade Federal de Ouro Preto
MSc. Hebert da Consolação Alves - Universidade Federal de Ouro Preto

Prof. Dr. Felipe de Campos Loch, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 07/10/2024.



Documento assinado eletronicamente por **Felipe de Campos Loch, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 07/10/2024, às 13:36, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0790265** e o código CRC **75E5B85D**.

Dedico este trabalho a todas as pessoas que me acompanham até aqui.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha profunda gratidão aos meus pais, que sempre foram minha base, me apoiando e me encorajando a acreditar em mim mesma.

Agradeço ao meu avô, cuja presença é fundamental na minha vida, e à minha tia Lucília, que sempre me cercou de carinho e bons desejos.

Ao meu namorado, que é meu porto seguro e me proporciona conforto e amor, sou eternamente grata.

A Maria Carolina e Luiz Gustavo, que também têm sido um apoio constante, sempre me tranquilizando sobre o futuro e mostrando que tudo vai dar certo.

Agradeço aos meus amigos, especialmente Lucas, Carol, Rian e as meninas da República Xamego, que considero minha segunda casa. Todos vocês foram fundamentais na minha jornada, e só tenho a agradecer.

No âmbito profissional, sou grata a muitas pessoas que me guiaram. Um agradecimento especial ao professor Felipe Loch, que me orientou neste trabalho, e ao professor Hebert, que sempre esteve ao meu lado. Durante meus estágios, tive a oportunidade de conhecer pessoas incríveis como Luiz Ianelli, Gean Teixeira, Felipe Ruben e Guilherme Galhardo, trabalhar com vocês foi um prazer, e sou eternamente grata por tudo. Vocês são verdadeiramente inspiradores!

RESUMO

O monitoramento geotécnico de estruturas de disposição de rejeitos da mineração é essencial para garantir a segurança e a estabilidade das barragens, especialmente à luz da crescente legislação que regula a segurança dessas estruturas no Brasil. A coleta, registro e processamento de dados provenientes dos instrumentos instalados permitem um acompanhamento constante, aumentando a confiabilidade e a segurança das operações. Além disso, a gestão inadequada de rejeitos pode resultar em sérios impactos ambientais, afetando ecossistemas e comunidades. Assim, as inovações tecnológicas, a necessidade de práticas sustentáveis e o desenvolvimento profissional na área de engenharia geotécnica tornam a pesquisa sobre esse tema não apenas relevante, mas crucial para a formação de profissionais capacitados e conscientes dos desafios contemporâneos. O principal objetivo deste estudo foi analisar a estabilidade de uma barragem de contenção de rejeitos, utilizando dados de instrumentação piezométrica e comparando-os com dados pluviométricos coletados entre 2021 e 2024. A metodologia baseou-se no método de equilíbrio limite rigoroso de Morgenstern-Price, considerando as condições geotécnicas e piezométricas da barragem durante os períodos de chuva. Os resultados indicaram que o fator de segurança variou diretamente em função do volume de precipitação. Em todos os períodos, o fator de segurança manteve-se superior ao mínimo normativo de 1,5, atestando a estabilidade da barragem. Esses resultados reforçam a importância do monitoramento contínuo para garantir a segurança.

Palavras-Chave: barragens de rejeito; instrumentação geotécnica; monitoramento geotécnico.

ABSTRACT

Geotechnical monitoring of mining tailings disposal structures is essential to ensure the safety and stability of dams, especially in light of the increasing legislation regulating the safety of these structures in Brazil. The collection, recording, and processing of data from the installed instruments allow for continuous monitoring, thereby increasing the reliability and safety of operations. Furthermore, inadequate tailings management can result in serious environmental impacts, affecting ecosystems and communities. Thus, technological innovations, the need for sustainable practices, and professional development in geotechnical engineering make research on this topic not only relevant but crucial for the training of skilled professionals who are aware of contemporary challenges. The main objective of this study was to analyze the stability of a tailings dam using piezometric instrumentation data and comparing it with pluviometric data collected between 2021 and 2024. The methodology was based on the rigorous Morgenstern-Price limit equilibrium method, considering the geotechnical and piezometric conditions of the dam during the rainy periods. The results indicated that the safety factor varied directly as a function of precipitation volume. In all periods, the safety factor remained above the regulatory minimum of 1.5, confirming the stability of the dam. These results reinforce the importance of continuous monitoring to ensure safety.

Keywords: tailings dams; geotechnical instrumentation; geotechnical monitoring.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 – Sistemas de disposição de rejeito..... | 7 |
| Figura 2 – Seção típica de uma barragem com alteamento a montante. | 8 |
| Figura 3 – Seção típica de uma barragem com alteamento a jusante. | 10 |
| Figura 4 – Seção típica de uma barragem com alteamento pela linha de centro..... | 12 |
| Figura 5 – Barragens de mineração cadastradas na Agência Nacional de Mineração por unidade federativa (UF). | 14 |
| Figura 6 – Estágios de desenvolvimento de ruptura por piping..... | 17 |
| Figura 7 – Ruptura de barragem por liquefação..... | 20 |
| Figura 8 – Esquema do medidor de nível d'água. | 27 |
| Figura 9 – Esquema de um piezômetro de tubo aberto. | 29 |
| Figura 10 – Esquema de funcionamento dos piezômetros hidráulicos de dupla tubulação..... | 30 |
| Figura 11 – Esquema do piezômetro de corda vibrante..... | 32 |
| Figura 12 – Representação do Tubo telescópio..... | 34 |
| Figura 13 – Esforços da fatia pelo método de Fellenius..... | 39 |
| Figura 14 – Forças atuantes em uma fatia pelo método de Morgenstern e Price (1965). | 41 |
| Figura 15 – Fluxograma de execução do trabalho. | 43 |
| Figura 16 – Apresentação da seção de estudo. | 44 |
| Figura 17 – Seção de estudo com os instrumentos locados. | 45 |
| Figura 18 – Representação do piezômetro de corda vibrante locado na seção..... | 45 |

| | |
|--|----|
| Figura 19 – Volume de pluviometria referente ao período de chuva de 2023-2024. . | 48 |
| Figura 20 – Leitura dos instrumentos no período de chuva 2021-2022. | 49 |
| Figura 21 – Leitura dos instrumentos no período de chuva 2022-2023. | 50 |
| Figura 22 – Leitura dos instrumentos no período de chuva 2023-2024. | 50 |
| Figura 23 – Análise de estabilidade referente ao período de 2021-2022. | 51 |
| Figura 24 – Análise de estabilidade referente ao período de 2022-2023. | 52 |
| Figura 25 – Análise de estabilidade referente ao período de 2023-2024. | 52 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 - Etapas do beneficiamento do minério de ferro e a geração de rejeitos..... | 6 |
| Tabela 2 – Comparação dos métodos de construção de barragens de contenção... | 11 |
| Tabela 3 – Número de barragens segundo a categoria de risco e dano potencial associado das barragens cadastradas na Agência Nacional de Mineração (ANM)..... | 14 |
| Tabela 4 – Frequências mínimas recomendadas para a leitura da instrumentação de barragens de terra e enrocamento. | 37 |
| Tabela 5 - Parâmetros dos materiais da seção de estudo. | 46 |
| Tabela 6 – Leitura máxima dos instrumentos nos períodos de referência. | 51 |

SUMÁRIO

| | | |
|-------|---|----|
| 1 | Introdução..... | 1 |
| 1.1 | Objetivo..... | 3 |
| 2 | Revisão Bibliográfica..... | 5 |
| 2.1 | Mineração e a disposição de rejeitos..... | 5 |
| 2.1.1 | Disposição hidráulica | 5 |
| 2.1.2 | Métodos de construção de barragens de contenção: A montante | 7 |
| 2.1.3 | Métodos de construção de barragens de contenção: A jusante..... | 10 |
| 2.1.4 | Métodos de construção de barragens de contenção: Linha de centro. 11 | |
| 2.2 | Histórico de incidentes de barragens brasileiras..... | 12 |
| 2.3 | Modos de falha em barragens | 16 |
| 2.3.1 | Erosão Interna (Piping) | 16 |
| 2.3.2 | Galgamento..... | 18 |
| 2.3.3 | Ruptura por liquefação..... | 19 |
| 2.4 | Segurança de barragens | 20 |
| 2.4.1 | Leis e normas vigentes | 20 |
| 2.4.2 | Norma ABNT NBR 13028:2017..... | 21 |
| 2.4.3 | Lei nº 14.066/2020 | 22 |
| 2.4.4 | Resolução ANM N° 95/2022..... | 23 |

| | | |
|-------|--|----|
| 2.5 | Instrumentação | 24 |
| 2.5.1 | Medição de nível d'água | 26 |
| 2.5.2 | Medição da pressão neutra | 28 |
| 2.5.3 | Medição de deslocamentos | 33 |
| 2.5.4 | Medição de vazão | 35 |
| 2.5.5 | Medição de aceleração sísmológica | 35 |
| 2.6 | Frequência das medições | 36 |
| 2.7 | Análise de estabilidade | 38 |
| 2.7.1 | Método das fatias | 39 |
| 2.7.2 | Método de Morgenstern-Price | 40 |
| 3 | Metodologia | 42 |
| 3.1 | Descrição da Seção da Barragem Analisada | 43 |
| 3.2 | Instrumentação | 44 |
| 3.3 | Parâmetros Geotécnicos | 45 |
| 3.4 | Análise de estabilidade referente ao período de chuva dos anos de 2021 a 2024. | 46 |
| 4 | Resultados e discussões | 48 |
| 4.1 | Análise comparativa dos resultados das análises de estabilidade com as leituras piezométricas dos períodos estudados | 48 |
| 5 | Conclusão | 54 |
| 6 | Referencias | 55 |

1 INTRODUÇÃO

Minerar representa o processo de extrair economicamente minerais naturais encontrados na crosta terrestre. É uma atividade que engloba o conjunto de processos de pesquisa, desenvolvimento e lavra, desde a extração dos minerais até seu beneficiamento.

De acordo com o Plano Nacional de Mineração, 2030, o setor mineral contribui significativamente para a economia brasileira, participando de 4,2% no PIB e 20% do valor das exportações, gerando um milhão de empregos diretos, sendo visível a importância da mineração para a economia brasileira.

A transformação do minério em uma matéria prima de qualidade para a comercialização, se refere beneficiamento. Existem duas formas de beneficiamento, sendo eles: úmido e seco, o beneficiamento a seco é um dos métodos mais inovadores, onde ocorre 100% do aproveitamento do minério. Essa tecnologia utiliza o filtro prensa, que possibilita o beneficiamento utilizando pouca ou nenhuma água. Nesse método ocorre a filtragem do material onde reduz a quantidade de lama de rejeitos e gera um material mais seco para ser empilhado, não ocorrendo a utilização de barragens. Além disso, o material residual mais seco pode se tornar substratos para a produção de novos materiais, como tijolos e areias para pavimentação.

Em relação ao beneficiamento úmido, ocorre a utilização da água para a retirada das impurezas que irão prejudicar a qualidade final do produto. Esse método utiliza-se muita água, e gera um rejeito mais úmido, onde pode ser disposto em barragens, que são estruturas de terra construídas para armazenar esses resíduos. As barragens geram uma barreira para segurar o material depositado, nela ocorre a acomodação dos materiais sólidos no fundo da estrutura e a água decantada se armazena na parte superior, onde é drenada e tratada, podendo ser reutilizada no processo de mineração, e o que sobra devolvido ao meio ambiente.

O método de construção ou alteamento de barragem a montante foi proibido de ser executado na Lei nº 14.066/2020, dessa forma, barragens para contenção de rejeitos da mineração podem ser construídas baseadas em 2 métodos: o de jusante e o de linha de centro, em geral é construída em fundos de vales para ocorrer o barramento da lama de rejeitos, podendo ser utilizado blocos de rochas, o rejeito e solo compactado em sua formação. Além disso, de acordo com o enchimento da barragem, podem ser feitos novos barramentos para conter o material depositado.

Os desastres relacionados aos rompimentos de barragem, como o desastre em Mariana, Minas Gerais, em 2015, considerado um dos maiores desastres ambientais do Brasil, e o desastre de Brumadinho, Minas Gerais, em 2019, que resultou em centenas de mortes, e a contaminação do rio Paraopeba, reforçou a necessidade de um controle e monitoramento mais efetivo das estruturas.

O monitoramento tem o propósito de subsidiar os gestores com informações mais simples e tempestivas sobre a operação e os efeitos do programa, resumidas em painéis ou sistemas de indicadores de monitoramento (Jannuzzi, 2009). Logo, o sistema tem como função a apresentação objetiva e simples de informações que representem o estado da estrutura, sendo ela realizada com inspeções visuais e com a utilização de equipamentos.

A história do monitoramento se inicia em 1853, na França, onde houve medições referentes a topografia do local, analisando o deslocamento da crista da barragem em Cantaria de Grosbois. Na Índia, foi utilizado o piezômetro no fim do século XIX para analisar as condições de percolação nas barragens para irrigação e a partir de 1917, nos Estados Unidos, começaram a utilizar os piezômetros em barragens de terra.

Além de outras situações, o primeiro grande programa de monitoramento foi na França na barragem de Marèges (1932-1935), na qual 78 extensômetros foram instalados no corpo da barragem em arco e 40 outros, nas ombreiras. Desde então, esses tipos de sensores, que deram origem a uma grande variedade de instrumentos, vêm sendo utilizados em monitoramentos em muitas barragens em vários países.

No Brasil, a Lei Federal nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, estabeleceu a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), onde teve como intuito

disciplinar a fiscalização, o monitoramento e gestão de risco e segurança de barragens. Nela, foi definido parâmetros e padrões técnicos que trariam mais segurança nas barragens, estabelecendo também a categoria de risco e classificação das estruturas, aplicando realizações de inspeções técnicas periódicas e monitoramento contínuo.

Dessa forma, percebe-se a necessidade de um monitoramento contínuo de barragem, visando segurança, preservação social e ambiental. Neste trabalho, além de apresentar os métodos de construção de barragem, instrumentação e legislação, foi realizado um estudo de caso avaliando as leituras dos piezômetros em uma seção crítica de barragem durante os períodos de chuva de 2021 a 2024, analisando a variação da piezometria em relação à pluviometria e aos resultados das análises de estabilidade, destacando a importância do monitoramento e da legislação sobre segurança de barragens de rejeito.

1.1 Objetivo

Analisar a estabilidade de uma barragem de contenção de rejeitos com base em dados de instrumentação piezométrica, comparando-os com informações pluviométricas do período de 2021 a 2024, a fim de avaliar o comportamento estrutural da barragem e identificar possíveis riscos de falha.

Os objetivos específicos são:

- Realizar revisão bibliográfica sobre metodologias de construção, modos de falha em barragens, legislação e instrumentação de barragem de rejeito;
- Coletar e analisar os dados piezométricos obtidos pela instrumentação da barragem durante o período de estudo.
- Comparar os dados piezométricos com os registros pluviométricos, identificando padrões de variação no nível d'água e pressão neutra.

- Avaliar a estabilidade da barragem utilizando o método de equilíbrio limite geral, rigoroso, de Morgenstern-Price, considerando as condições geotécnicas e piezométricas.
- Realizar uma análise comparativa entre os resultados das análises de estabilidade e as leituras piezométricas nos períodos estudados.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Mineração e a disposição de rejeitos.

A produção de rejeitos devido a extração de minérios é algo inevitável, gerado pelo beneficiamento do material que devido a venda, necessita estar adequado, em seu formato e qualidade, resultando em grandes quantidades de resíduos. Dessa forma, a disposição desses materiais vem sendo estudada, entretanto a disposição de barragens atualmente é muito utilizada, devido a sua praticidade e economia

2.1.1 Disposição hidráulica

A mineração tem sido uma atividade crucial para o desenvolvimento humano há milhares de anos, empregada na extração de ferro, prata, chumbo e outros minerais, utilizados para diversas finalidades, como a fabricação de ferramentas e utensílios. Com a Revolução Industrial, o uso intensivo de minerais gerou grandes quantidades de rejeitos, que eram descartados diretamente no meio ambiente sem regulamentação. Somente a partir da década de 1980 os aspectos ambientais começaram a receber maior atenção (IBRAM, 2016).

Com o avanço da mineração e o crescente foco na preservação ambiental, surgiram métodos mais adequados para a disposição de rejeitos. Entre esses métodos, a disposição em reservatórios criados por diques de contenção ou barragens tornou-se a mais utilizada pelas mineradoras brasileiras no setor metálico (IPEA, 2012).

O beneficiamento de minérios é o processo de tratamento do minério para transformá-lo em um bem puro e de valor econômico. O material resultante desse processo, que não possui valor econômico, é chamado de rejeito e pode ser descartado de várias formas, sendo a mais comum a disposição em barragens. As

propriedades dos rejeitos variam conforme as características do processo de beneficiamento aplicado e dos minerais presentes, influenciando diretamente o método de disposição utilizado (LIMA, 2006). Como pode ser observado na Tabela 1.

Tabela 1- Etapas do beneficiamento do minério de ferro e a geração de rejeitos.

| Fração | Método de concentração | Produto | Rejeito | Destinação do rejeito |
|-----------------|--------------------------------------|-------------|--|--|
| (6,3<Ø<31,5) mm | - | Granulado | - | - |
| (1<Ø<6,3) mm | Jigagem | Sinter feed | Rejeito da jogagem | Pilhas de rejeito ou moagem e incorporação ao circuito |
| (0,15<Ø<1) mm | Concentração magnética ou espirais | | Produto não magnético ou rejeito de espirais | Pilhas de rejeito ou barragem |
| (Ø<0,15) mm | Concentração magnética e/ou flotação | Pellet feed | Produto não magnético e/ou rejeito de flotação | Barragem |
| (Ø<0,010) mm | - | | Lamas | Barragem |

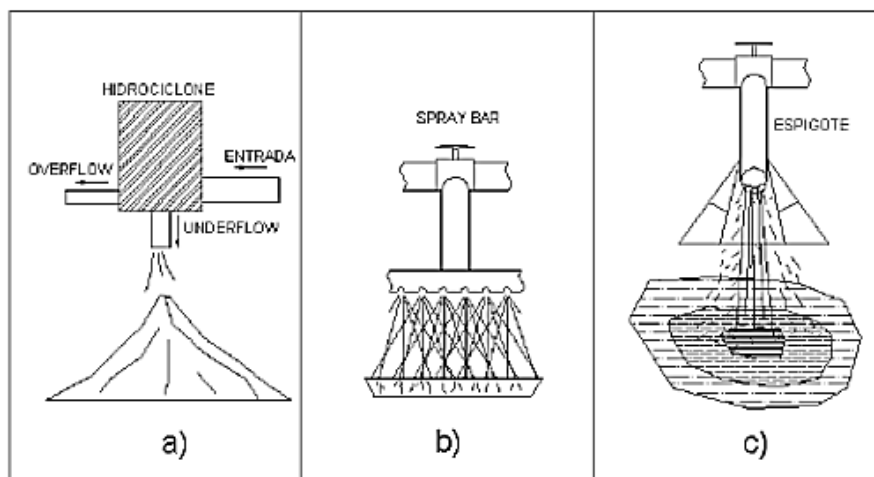
Fonte: adaptado de Guimarães (2011).

Gomes e Pereira (2002) apud Russo (2007), indicam que os processos de lavra e beneficiamento do minério de ferro geram aproximadamente 40% de rejeitos. A retenção desses rejeitos na mineração é realizada por meio de tanques ou barragens (MACHADO, 2007). Conforme a Deliberação Normativa do Conselho Estadual de Política Ambiental (COPAM, 2002), uma barragem é qualquer estrutura, como barramentos ou diques, que cria uma parede de contenção para rejeitos, resíduos ou a formação de um reservatório de água.

O processo de disposição envolve o transporte da polpa resultante do beneficiamento úmido do minério até o local de disposição. Esses materiais descartados são conduzidos por tubulações, utilizando a gravidade ou bombeamento, e são descartados em forma de pasta, a granel, ou líquida (polpa de água com sólidos ou lama) (ESPÓSITO e DUARTE, 2010).

No método convencional, o lançamento desse material nos reservatórios pode ser feito utilizando hidrociclones, spray bars ou espigotes, ilustrados na Figura 1.

Figura 1 – Sistemas de disposição de rejeito.



a) Hidrociclone

b) *Spray bar*

c) Espigotes

Fonte Silva (2010).

O sistema de espigotes é o método mais simples de instalação, mas possui a operação mais complexa devido a problemas como a formação irregular de praias, a não uniformidade nos pontos de lançamento, a criação de poças de lama e água entre os pontos de lançamento e a grande variabilidade dos parâmetros geotécnicos dos materiais depositados. As barras aspersoras (*spray bars*) tendem a uniformizar o processo de disposição, melhorando assim a segregação hidráulica dos rejeitos. O uso de hidrociclones permite a separação granulométrica dos rejeitos em frações mais grosseiras (*underflow*) e mais finas (*overflow*). A fração mais grosseira é utilizada na construção da própria barragem, enquanto a fração fina é depositada no reservatório da barragem (PEIXOTO, 2012).

2.1.2 Métodos de construção de barragens de contenção: A montante

As barragens de rejeito diferem significativamente em relação aos métodos de construção, ao tipo de rejeito armazenado, às suas características específicas e à

maneira como são geridas e operadas (MARTA ROCA, 2019). No método de alteamento a montante, o rejeito é usado como base para a elevação da barragem, como pode ser observado na Figura 2. O rejeito é depositado a montante ao longo da crista, formando uma "praia" que servirá de fundação para a próxima elevação (MACHADO, 2007).

Figura 2 – Seção típica de uma barragem com alteamento a montante.



Fonte: Albuquerque-Filho (2004)

Para realizar a disposição a montante de forma mais grossa, utiliza-se ciclones sobre o dique para separar as frações mais grossas das mais finas durante o descarte do rejeito. Dessa maneira, a fração mais fina permanece dentro do reservatório enquanto a mais grossa se acumula no talude a jusante, caracterizado por maior coeficiente de permeabilidade e resistência elevada. Este método é predominantemente escolhido devido à sua maior viabilidade econômica. No entanto, ele apresenta depósitos com coeficiente de segurança reduzido, sujeitos ao fenômeno de liquefação estática, que é difícil de prever (OLIVEIRA, 2014).

Neste método, quando o nível de rejeito atinge o limite do reservatório, um novo dique é construído sobre o rejeito a montante do dique inferior, repetindo-se esse processo até alcançar a altura máxima estabelecida pelo projeto.

Esse método apresenta vantagens e desvantagens, sendo elas:

Vantagens:

- Menor custo para realizar sua construção;

- O alteamento corre de forma rápida;
- Fácil execução;
- Pode ser construída em locais íngremes, onde o limitante principal é a área de deposição.

Desvantagens:

- Segurança muito baixa;
- Possibilidade de ocorrência de “piping”, causado pela proximidade da linha freática com a do talude de jusante;

Segundo Espósito (2000) e Milonas (2006), apesar do aspecto econômico vantajoso, o método construtivo de montante aliado à técnica de disposição hidráulica submete a estrutura a riscos como liquefação, elevação da linha freática e piping, devido ao fato dos alteamentos serem construídos sobre fundação composta por camadas fofas de rejeito associado a dificuldade de implantação da drenagem interna.

Conforme apontado por Troncoso (1997), rupturas por percolação e piping podem ocorrer quando a linha freática está muito próxima do talude a jusante, o que pode gerar instabilidades significativas.

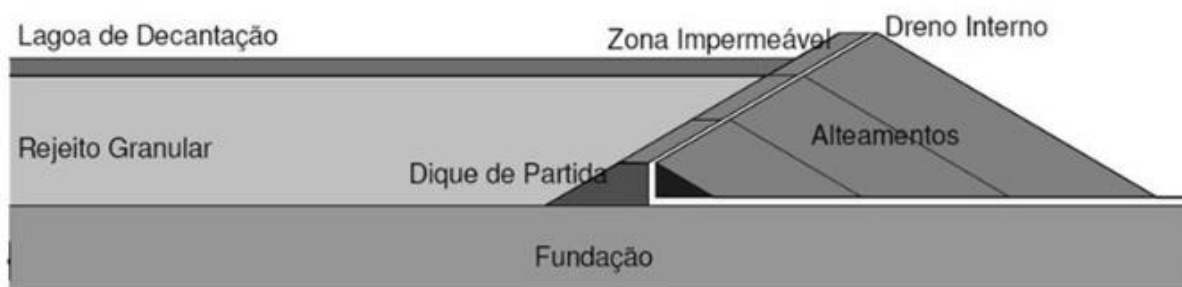
A Agência Nacional de Mineração (ANM) publicou a Resolução ANM Nº 13, em 8 de agosto de 2019, que medidas regulatórias objetivando assegurar a estabilidade de barragens de mineração, notadamente aquelas construídas ou alteadas pelo método denominado "a montante" ou por método declarado como desconhecido. Nesta resolução foi proibida a utilização do método de alteamento de barragens de mineração denominado "a montante" em todo o território nacional.

A Lei nº 14.066/2020 modificou a Lei Nº 12.334/2010, que trata da Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), adicionando a proibição da construção ou alteamento de barragem de mineração pelo método a montante, pela sua baixa segurança.

2.1.3 Métodos de construção de barragens de contenção: A jusante.

Neste método, também é erguido um dique inicial para futuros alteamentos, porém estes são realizados a jusante do dique inicial, como ilustrado na Figura 3, sem qualquer estrutura construída sobre o rejeito depositado. Isso resulta em uma necessidade maior de materiais para a execução, o que aumenta os custos envolvidos.

Figura 3 – Seção típica de uma barragem com alteamento a jusante.



Fonte: Albuquerque-Filho (2004).

Chammas (1989) apud Passos (2009) observa que o método de alteamento a jusante oferece resistência a carregamentos dinâmicos devido à construção escalonada que preserva a segurança, facilita a drenagem, apresenta baixa suscetibilidade à liquefação e é operacionalmente simples. É considerado o método clássico para o alteamento em barragens de rejeito devido à facilidade de construção, pois toda a estrutura é erguida a jusante sem necessidade de aterros dentro do reservatório (OLIVEIRA, 2014). No entanto, o monitoramento é desafiador, pois a cada alteamento, os instrumentos devem ser deslocados para a jusante (MACHADO, 2007).

Neste método, os rejeitos são submetidos a ciclonação e o "underflow" é descartado no talude a jusante. Apenas os rejeitos grossos são usados nos alteamentos, sendo compactados quando as condições de umidade permitirem;

também pode-se utilizar material de empréstimo ou estéril proveniente da lavra (RITCEY, 1989).

A Tabela 2, apresenta a comparação das vantagens e desvantagens dos métodos construtivos de barragem abordados.

Tabela 2 – Comparação dos métodos de construção de barragens de contenção.

| | Método de montante | Método de jusante | Método de linha de centro |
|---------------------|--|--|---|
| Vantagens | Menor custo | Maior segurança | Varição de "underflow" em relação ao método a jusante |
| | Maior velocidade de alteamento | Compactação de todo corpo da barragem | Necessidade de sistema de drenagem eficiente |
| Desvantagens | Baixa segurança devido à linha freática próxima ao talude de jusante | Necessidade de grandes quantidades de "underflow" | Sistema de contenção a jusante |
| | Baixa compacidade do material, possibilitando a liquefação | Deslocamento do talude de jusante (proteção superficial só no final da construção) | |
| | Possibilidade de Piping | | |

Fonte: Castro (2008).

2.1.4 Métodos de construção de barragens de contenção: Linha de centro.

Neste método, o eixo da barragem é mantido durante o seu alteamento, ou seja, ele se eleva verticalmente ao longo da crista, com o eixo vertical coincidindo com o dique inicial. O dique inicial serve como ponto de partida para a construção da barragem, com os subseqüentes alteamentos realizados sem alterar o eixo original (MACHADO, 2007). Esse método combina elementos dos dois métodos mencionados anteriormente: em termos estruturais, assemelha-se ao método a jusante, pois

mantém o eixo central enquanto os alteamentos são estendidos a jusante. Método ilustrado na Figura 4.

Figura 4 – Seção típica de uma barragem com alteamento pela linha de centro.



Fonte: Albuquerque-Filho (2004).

No método de alteamento subsequente, os materiais de empréstimo, estéril da mina ou "underflow" de ciclones são lançados sobre o limite da praia anterior e no talude a jusante do maciço inicial, mantendo o eixo alinhado com o do dique inicial (SOARES, 2004). De acordo com Machado (2007), este método possibilita o controle da linha freática através da implementação de zonas de drenagem interna em todas as fases do alteamento, facilitando a dissipação da poropressão. É considerado um método intermediário em termos de custo e segurança.

2.2 Histórico de incidentes de barragens brasileiras

No Brasil, há registros antigos da construção de barragens que remontam ao século XVI, situadas onde hoje se encontra a cidade de Recife, PE, antes mesmo da invasão holandesa (SANTOS, 2018). Atualmente, o país possui mais de 22.000 barragens, com mais de 2300 classificadas como de Risco Alto e mais de 3600 com Dano Potencial Associado (DPA) Alto (SNISB, 2021).

Segundo Vieira (2005), um acidente em barragem refere-se a uma anomalia significativa que pode resultar na ruptura parcial ou total da estrutura, ou na sua completa disfuncionalidade, acarretando sérias consequências econômicas e sociais. Já um incidente é um evento indesejável de menor porte que compromete a funcionalidade da barragem e pode potencialmente levar a acidentes maiores se não corrigido a tempo, com possíveis consequências graves.

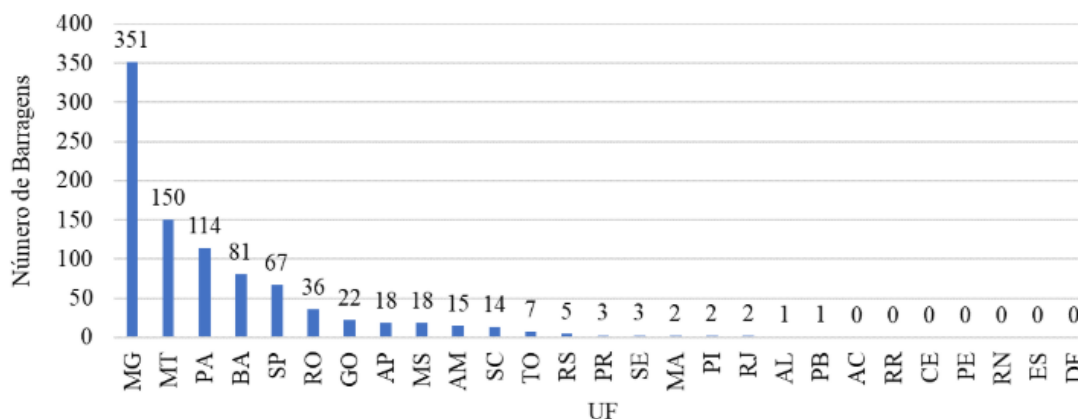
Pereira et al. (2008), destaca que o método construtivo de montante corresponde a 76% das falhas em barragens, enquanto os demais métodos (jusante, linha de centro e outros) contribuem com os 24% restantes.

As barragens estão sujeitas a deslocamentos e deformações, influenciados por fatores internos e externos, além de seu tamanho e função estrutural. Estas mudanças podem ocorrer na geometria externa, indicando um deslocamento estrutural global, ou na geometria interna, caracterizando uma deformação (CHAVES, 1994).

Até 1º de junho de 2022, a Agência Nacional de Mineração (ANM) registrava 912 projetos minerários que utilizam barragens para disposição de rejeitos em 20 estados brasileiros (Figura 5), distribuídos por 181 municípios. Minas Gerais concentra mais de um terço desses projetos, com 38,4%.

Das 912 barragens de mineração cadastradas no Sistema de Gestão de Segurança de Barragens de Mineração, 261 (28,6%) foram classificadas com Dano Potencial (DP) Alto e 114 (15,8%) com Categoria de Risco (CR) Alto. Outras 400 (43,9%) não foram classificadas quanto ao DP e à CR. Das 375 barragens classificadas, 37 foram identificadas como de DP e CR Alto simultaneamente (Tabela 3), sendo 92% delas localizadas em Minas Gerais.

Figura 5 – Barragens de mineração cadastradas na Agência Nacional de Mineração por unidade federativa (UF).



Fonte: Agência Nacional de Mineração (2022).

Tabela 3 – Número de barragens segundo a categoria de risco e dano potencial associado das barragens cadastradas na Agência Nacional de Mineração (ANM).

| Categoria de risco | | Dano Potencial Associado | | | | Total |
|--------------------|-------------------------|--------------------------|-------|-------|------------------|-------|
| | | Alto | Médio | Baixo | Não classificada | |
| | Alto | 37 | 22 | 55 | | 114 |
| | Médio | 32 | 40 | 14 | | 86 |
| | Baixar | 192 | 100 | 20 | | 312 |
| | Não classificada | | | | 400 | 400 |
| | Total | 261 | 162 | 89 | 400 | 912 |

Fonte: ANM (2022).

Além dos riscos relacionados à estrutura das barragens, há o agravamento dos incidentes devido ao aumento das chuvas, que está ligado às mudanças climáticas e às variações anuais de precipitação. Conforme destacado pelo Engenheiro de Minas João Augusto Hilário, presidente da Associação dos Engenheiros de Minas do Estado de Minas Gerais (Assemg), estamos enfrentando períodos mais longos de seca, seguidos por concentrações elevadas de chuvas em determinadas regiões. Essas estruturas não foram projetadas para suportar essas mudanças climáticas, o que tem ocasionado problemas, desde o excesso de água até rupturas.

Os desastres mais marcantes registrados no Brasil incluem o rompimento da Barragem de Fundão em Mariana, Minas Gerais, em 2015, que despejou 39,2 milhões de metros cúbicos de rejeitos no Rio Gualaxo do Norte, contaminando o Rio Doce e afetando severamente a Bacia do Rio Doce, além de atingir a vida marinha no Oceano Atlântico e devastar vários distritos da cidade de Mariana, resultando em 19 mortes. Em Brumadinho, em 2018, ocorreu o rompimento da barragem de rejeitos na Mina do Córrego do Feijão, classificada como de "baixo risco", mas com "alto dano potencial associado", causando a morte de 270 pessoas e deixando 10 desaparecidas. Resumidamente, de acordo com o Sampaio, 2021, pode-se pontuar os desastres ocorridos no Brasil em:

- Junho/2001 > Barragem de rejeitos de minério em São Sebastião das Águas Claras, Nova Lima (MG), com 5 mortes
- Junho/2004 > Barragem de Camará, em Alagoa Nova (PB), 5 mortes
- Maio/2009 > Barragem hídrica de Algodões, nos municípios de Cocal e Buriti dos Lopes (PI), 24 mortes (9 no momento do rompimento e 15, posteriormente)
- Março/2014 > Barragem de terra de uma fazenda no município de Uruana (GO), 22 mortes
- Março/2014 > Barragem provisória da hidrelétrica de Santo Antônio, em Laranjal do Jari (AP), 4 mortes
- Setembro/2014 > Barragem de rejeito em uma mina em Itabirito (MG), 3 mortes
- Novembro/2015 > Barragem de rejeitos Fundão, no distrito de Bento Rodrigues, em Mariana (MG), 19 mortes
- Agosto/2016 > Barragem na Fazenda Guavirova, em União da Vitória (PR), 12 mortes
- Abril/2018 > 3 barragens elevaram o nível do Rio Uraim e inundaram Paragominas (PA), 2 mortes
- Janeiro/2019 > Barragem de rejeitos da Mina Córrego do Feijão, em Brumadinho (MG), 270 mortes, 10 pessoas desaparecidas.

2.3 Modos de falha em barragens

É crucial caracterizar adequadamente os modos de falha aos quais as barragens estão expostas para uma gestão de risco eficaz, pois o entendimento desses fenômenos auxilia na avaliação do desempenho dessas estruturas (ROCA, 2019). As causas dos modos de falha em barragens podem ser diversas, abrangendo desde causas naturais até consequências da intervenção humana. A falta de monitoramento adequado das estruturas pode resultar em rupturas, além de outros parâmetros como o aumento de volumes e alturas das estruturas, a eficiência do sistema de drenagem, e fatores geotécnicos, atmosféricos e ambientais.

Segundo Arnez (1999), análises estatísticas de acidentes em barragens de rejeitos atribuíram as principais causas de ruptura a fenômenos geológico-geotécnicos como liquefação e piping.

2.3.1 Erosão Interna (Piping)

O fenômeno de erosão interna ocorre quando as partículas de solo são excessivamente carregadas devido ao fluxo de percolação no maciço, geralmente devido à ausência ou ao funcionamento inadequado do sistema de filtros (PIMENTA FILHO, 2013). Um dos principais mecanismos causadores de rupturas em barragens é o fenômeno de entubamento, conhecido internacionalmente como piping. Esse processo se dá pela erosão regressiva, onde grânulos de silte e argila são carregados dentro da barragem, formando um tubo de escoamento preferencial de jusante a montante. À medida que a água percola pelo solo compactado, esse tubo tende a se alargar, carregando mais material e eventualmente levando ao colapso da estrutura (LADEIRA et al., 2007).

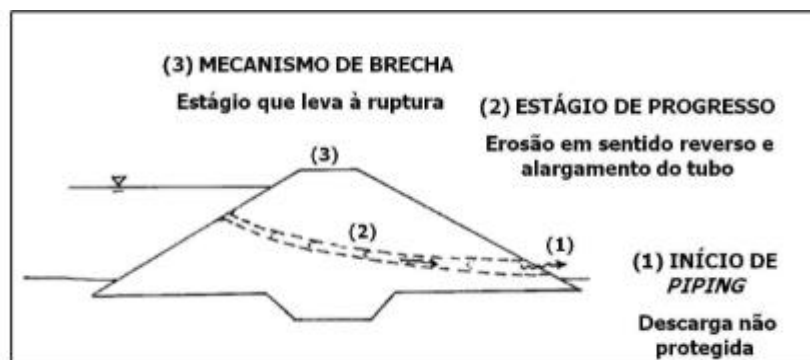
Vários fatores podem estar envolvidos nesse processo (BERRONES, 2011):

- Erodibilidade do solo;

- Velocidade da água dentro do aterro ou fundação;
- Geometria do maciço;
- Homogeneidade e anisotropia da estrutura (relacionado muitas vezes a fatores construtivos);
- Grau de compactação do solo;
- Condutividade hidráulica dos materiais constituintes do aterro ou fundação.

Materiais mal compactados e heterogêneos contribuem para a formação desses tubos internos, que estabelecem uma rota preferencial de fluxo, resultando no arrastamento de materiais do talude de jusante para montante. Com o tempo, esses tubos podem se alargar, aumentando a poropressão e o transporte de materiais dentro do talude, desencadeando a erosão interna e, eventualmente, o rompimento da barragem. Para mitigar esse modo de falha, é crucial investir no adequado dimensionamento do sistema de drenagem e na impermeabilização das áreas críticas (BERRONES, 2011).

Figura 6 – Estágios de desenvolvimento de ruptura por piping.



Fonte: Ladeira (2007).

Nenhuma barragem de terra ou enrocamento é completamente impermeável, portanto, é essencial que a água tenha uma via de saída, seja por meio de extravasores ou por percolação através do maciço. A percolação precisa ser cuidadosamente estudada e planejada, sendo controlada pela drenagem interna da

barragem. No entanto, se houver falha nesses dispositivos, pode ocorrer o arraste de materiais para jusante, como mencionado anteriormente.

A água naturalmente percolará pelo caminho de menor resistência, daí a importância de um sistema de drenagem interno eficiente para direcionar o fluxo de água de maneira adequada. Um problema significativo é o dimensionamento inadequado ou a falta desses sistemas, o que pode resultar em problemas sérios. Além disso, o monitoramento contínuo do fluxo de água no maciço é crucial para antecipar o transporte de materiais e prevenir possíveis problemas.

2.3.2 Galgamento

O fenômeno de galgamento ocorre quando os sistemas de extravasão, como os vertedouros, são inadequados para lidar com o fluxo recebido, resultando no transbordamento da água sobre a barragem. Estatísticas nacionais indicam que cerca de 30% das falhas de barragens nos Estados Unidos são atribuídas a problemas relacionados ao galgamento, como projeto inadequado dos vertedouros, obstrução por detritos e dimensionamento deficiente da crista (FEMA, 2005).

Uma das causas potenciais de rompimento de barragens de terra é o galgamento, que ocorre quando o vertedouro não consegue lidar com o volume de água, resultando no transbordamento sobre a crista da barragem. Isso pode provocar erosão regressiva no talude de jusante, levando à formação de uma brecha que pode resultar no colapso total da barragem. Geralmente ocorre durante cheias que excedem a capacidade hidráulica projetada para o vertedouro, seja devido a uma operação inadequada do reservatório ou a cheias extraordinárias (PEREIRA, 2009).

Sendo assim, o galgamento ocorre devido ao dimensionamento inadequado dos vertedouros ou à drenagem insuficiente, exacerbado por condições pluviométricas anormais que a estrutura não consegue gerenciar. Este modo de falha é caracterizado por uma pressão hidrostática maior do que a resistência da estrutura, saturando o talude a jusante e potencialmente levando ao seu rompimento.

Segundo Roca et al. (2019), o galgamento pode ocorrer de duas maneiras devido as diferentes causas: o overtopping (transbordante) e o overflowing (galgamento). O *Overtopping* ocorre devido a ação das “ondas” que são geradas pelos ventos, na crista, gerando deslizamento de terra. Já o *Overflowing* acontece quando o overtopping se mantém acima da crista, passando pela cota da crista e gerando a ruptura.

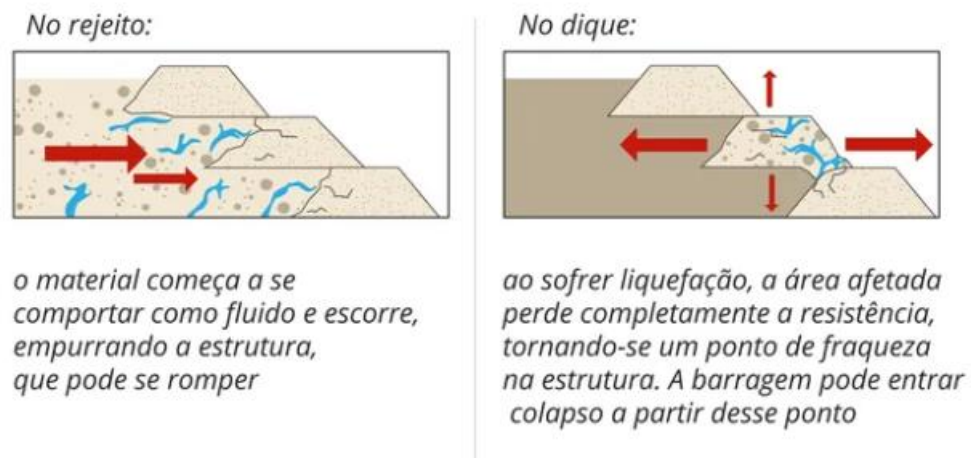
2.3.3 Ruptura por liquefação

Maturano (2012) distingue dois tipos de liquefação: estática e dinâmica, cuja natureza do agente causador é indicada pela própria classificação. A liquefação dinâmica geralmente ocorre em resposta a eventos sísmicos, enquanto a liquefação estática é desencadeada por carregamentos que geram excesso de poropressão sob condições não drenadas, levando à perda rápida de resistência ao cisalhamento do solo até valores nulos ou quase nulos. Esse fenômeno ocorre quando o solo é submetido a uma carga súbita e intensa, como explosões, impactos ou terremotos (Murrieta, 2018).

A ocorrência de liquefação em um solo resulta em deformações que aproximam o solo do estado crítico, especialmente em condições não drenadas (Poulos et al., 1985). Um exemplo notório é a ruptura da Barragem de Fundão na Mina Germano em 2015 (Morgenstern et al., 2016). Em 5 de novembro de 2015, a Barragem de Fundão em Mariana, construída com o método de alteamento a montante, rompeu devido à liquefação.

A ruptura por liquefação envolve grandes deslocamentos de massa fluida, típicos em estruturas altamente saturadas, especialmente em solos não coesivos, influenciados por fatores como excesso de carga, precipitação intensa, atividade sísmica e falhas nos sistemas de drenagem, a Figura 7 ilustra a ruptura por *pipíng*. Para prevenir a ocorrência de liquefação, é recomendado evitar o uso de materiais arenosos nos maciços, melhorar a resistência, densidade e drenagem do solo, e construir estruturas projetadas para resistir a esse tipo de fenômeno.

Figura 7 – Ruptura de barragem por liquefação.



Fonte: Cantini e Martinez (2019).

2.4 Segurança de barragens

2.4.1 Leis e normas vigentes

No Brasil, a segurança de barragens é regulamentada por um conjunto de leis e normas que determinam diretrizes para sua operação, construção, manutenção e descomissionamento, visando a proteção da vida, do meio ambiente e do patrimônio. Essas regras servem para garantir um bom funcionamento das estruturas, relacionados à segurança, visando sua construção e operação de forma segura, minimizando os riscos para as populações a jusante, além do meio ambiente. Também, estabelece a obrigatoriedade de monitoramento contínuo, com relatórios periódicos e inspeções, implementando também, planos de emergência para a mitigação dos impactos de possíveis falhas. São listadas abaixo, algumas das leis federais, normas técnicas e resoluções da Agência Nacional de Mineração (ANM) relacionadas à segurança de barragem de mineração:

- Lei Nº 12.334 / 2010 – Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) e cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB).

- Resolução ANM Nº 143 / 2012 – Estabelece critérios gerais de classificação de barragens por categoria de risco, dano potencial associado e pelo volume do reservatório.
- Resolução ANM Nº 144 / 2012 – Estabelece diretrizes para implementação da Política Nacional de Segurança de Barragens, aplicação de seus instrumentos e atuação do Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens.
- Norma ABNT NBR 13028:2017 – Estabelece os requisitos para a elaboração e apresentação de projetos de barragens, incluindo as barragens para disposição.
- Portaria ANM Nº 70.389 / 2017 – Cria o Cadastro Nacional de Barragens de Mineração, o Sistema Integrado de Gestão em Segurança de Barragens de Mineração e estabelece a periodicidade de execução ou atualização, a qualificação dos responsáveis técnicos, o conteúdo mínimo e o nível de detalhamento do Plano de Segurança da Barragem, das Inspeções de Segurança Regular e Especial, da Revisão Periódica de Segurança de Barragem e do Plano de Ação de Emergência para Barragens de Mineração.
- Resolução ANM Nº 13 / 2019 – Estabelece medidas regulatórias objetivando assegurar a estabilidade de barragens de mineração. Proíbe a construção de barragens de mineração pelo método à montante e estabelece outras medidas de segurança.
- Lei Nº 14.066 / 2020 – Atualiza e complementa a Lei nº 12.334/2010, trazendo o aumento das exigências para barragens com alto potencial de dano e maior rigidez na fiscalização e nas penalidades para casos de negligência.
- Resolução ANM Nº 95 / 2022 – Estabelece critérios, procedimentos e responsabilidades para a gestão da segurança de barragens de mineração no Brasil.

2.4.2 Norma ABNT NBR 13028:2017

Esta norma, detalha apresentando os requisitos mínimos para a apresentação de projetos de barragens, tendo o intuito de estar adequada às condições de segurança,

operacionalidade, economicidade e desativação, para que ocorra a minimização dos impactos ao meio ambiente.

A ABNT NBR 13028:2017 estabelece os tópicos necessários para a realização do Plano de Segurança de Barragem (PSB). Ela visa garantir segurança durante todas as fases de vida de uma barragem, desde o projeto até seu descomissionamento, procurando sempre a prevenção de acidentes que causem danos a vida humana e ao meio ambiente.

Os principais pontos apresentados na norma, são: o objetivo do PSB, o conteúdo do PSB, as responsabilidades, os critérios de projeto e construção, a revisão e a atualização e as auditorias e fiscalizações. Referenciando as informações sobre a localização, tipo, altura, entre outros, identificação dos riscos, visualizando os potenciais cenários de falha, estabelece os procedimentos de inspeção de segurança regulares, além do monitoramento contínuo, prevê a elaboração do Plano de Ação de Emergência (PAE), que deve ser elaborado pensando no contato com as autoridades e comunidade, a manutenção e intervenção e os relatórios de segurança que exige que seja elaborado periodicamente.

Essa norma é importante para a segurança das estruturas, ela apresenta um guia detalhado sobre o desenvolvimento de um PSB eficiente.

2.4.3 Lei nº 14.066/2020

A lei nº 14.066/2020 é uma legislação que alterou a lei nº 12.334/2010, onde foi estabelecida a Política Nacional de Segurança de Barragens. Ela foi criada por causa dos grandes desastres envolvendo barragens no Brasil, tendo o objetivo de aumentar a rigorosidade e as penalidades das regras de segurança.

Nessa lei ocorre o aumento da rigorosidade na fiscalização, proibição de novas barragens com o método de alteamento a montante, Plano de Ação de Emergência, responsabilização dos empreendedores, reforço no monitoramento e inspeções, classificação de barragens e aumento das penalidades. A lei aumenta a responsabilidade dos empreendedores e dos órgãos fiscalizadores, ela exige mais

frequência nas fiscalizações e na gestão de monitoramento das estruturas por parte das autoridades competentes, sendo elas: como a Agência Nacional de Mineração (ANM), a Agência Nacional de Águas (ANA) e o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA). A Lei nº 14.066/2020 reforça a obrigatoriedade no plano de ação de emergência, devendo ser aplicada para barragens consideradas de alto risco e alto nado potencial associado, devendo haver medidas de respostas rápidas para caso de emergência.

Essa lei apresenta um desenvolvimento importante para a melhoria na segurança de barragens, ela ajuda na resposta a necessidade de penalizações mais severas, além de enfatizar a necessidade de fiscalização dos órgãos competentes, buscando promover uma cultura mais rígida de prevenção e responsabilização.

2.4.4 Resolução ANM Nº 95/2022

Essa resolução apresenta os requisitos técnicos e operacionais, a classificação de barragens, o Plano de Ação de Emergência, fiscalização e auditorias, responsabilidade dos empreendedores, documentação e transparência e prazo de adequação. Sendo assim, ela define os critérios técnicos e operacionais, além de definir o risco e o dano potencial associado, definindo quais cumprimentos deve ser seguidos de acordo com sua classificação, ela também reforça a implementação do Plano de Ação de Emergência e das fiscalizações e auditorias, sendo obrigatório a participação de auditorias externas, além das realizadas pelos responsáveis técnicos, exige também os relatórios de inspeção e monitoramento e define prazos para que as barragens atendam os novos requisitos e sejam adequadas.

A ANM nº 95/2022 prevê o aumento do rigor na gestão de segurança, onde cria um conjunto bem definido de responsabilidades e procedimentos que os empreendimentos devem seguir, melhorando a fiscalização e garantindo mais segurança.

2.5 Instrumentação

A preocupação crescente com a segurança de barragens, tanto convencionais quanto para contenção de rejeitos, tem levado muitos países a estabelecer normas e critérios específicos para o projeto, construção, monitoramento, inspeção e operação dessas estruturas (BHERING, 2006).

De acordo com Dunicliff (1988), a instrumentação geotécnica envolve a integração de instrumentos de medição com o conhecimento humano. A prática da instrumentação não se limita apenas à escolha dos instrumentos, mas é um processo que começa com a definição dos objetivos e termina com a análise meticulosa dos dados coletados. Cada etapa deste processo é crucial para o sucesso do programa de instrumentação.

Segundo Fonseca (2003), a auscultação de uma barragem consiste nos métodos destinados a observar, detectar e identificar quaisquer deteriorações que possam representar risco à segurança global da estrutura. A auscultação pode ser realizada através de inspeções visuais (abordagem qualitativa), por meio de visitas periódicas ao local, e pela instrumentação (abordagem quantitativa), que envolve a aquisição, registro e processamento de dados obtidos por meio de instrumentação geotécnica instalada no aterro ou nas fundações das estruturas.

A instrumentação desempenha um papel crucial no monitoramento das barragens, utilizando equipamentos que fornecem dados periódicos sobre as condições na superfície e no subsolo das estruturas. Esses instrumentos detectam possíveis falhas e potenciais desastres, orientando ações para resolver e mitigar problemas emergentes. Portanto, é essencial ter um sistema rigoroso de monitoramento e instrumentação para barragens de contenção de rejeitos, o que inclui a utilização de instrumentos fundamentais para a supervisão eficaz dessas estruturas (ÁVILA, 2008).

Dunicliff (1988) classifica os instrumentos de medida em duas categorias, dependendo da finalidade:

- Instrumentos usados para determinar as propriedades de solos e rochas in situ: medem parâmetros geotécnicos como resistência, compressibilidade e permeabilidade, sendo usados normalmente durante a fase de projeto das obras (ex. piezocone, palheta, pressiômetro).
- Instrumentos usados para monitorar o comportamento da obra durante construção/operação: podem envolver medidas de pressão da água subterrânea, tensão total, deformação e/ou carregamento aplicado (ex. piezômetros, células de carga, extensômetros, inclinômetros).

De acordo com Kanji e Figueira (1990), devido à ampla diversidade das condições locais e das soluções técnicas disponíveis, os projetos de instrumentação para barragens de terra e/ou enrocamento variam consideravelmente, não havendo uma abordagem única aplicável a todas as situações. No entanto, é possível identificar, de maneira estatística, as práticas comuns adotadas na instrumentação dessas barragens, o que permite observar tendências e identificar fatores comuns entre diferentes projetos.

Kanji e Figueira (1990) observaram que existe uma correlação direta entre a altura das barragens e o número total de instrumentos instalados, geralmente seguindo uma proporção de 1:1. Eles também constataram que, em média, cerca de 50% dos instrumentos utilizados em barragens de terra são piezômetros, enquanto os inclinômetros representam aproximadamente 5%, os marcos topográficos em torno de 30% e os medidores de deslocamento cerca de 20%.

Fonseca (2003) destaca que um programa de instrumentação bem planejado visa assegurar a precisão e a confiabilidade das leituras, garantindo que sejam compatíveis com as metodologias construtivas e as premissas do projeto.

Silveira (2006) enfatiza a importância de monitorar uma variedade de parâmetros em barragens, como pressão da água nos poros, na rocha de fundação, pressões totais, recalques, deslocamentos horizontais, cargas estruturais, temperatura e vazões de drenagem, entre outros. Esses parâmetros são essenciais para avaliar o

desempenho de longo prazo das estruturas e identificar quaisquer mudanças que possam afetar sua segurança.

A instrumentação é crucial para detectar problemas de forma precoce e evitar potenciais falhas, fornecendo dados quantitativos que ajudam na avaliação contínua da segurança da barragem (DHAWAN et al., 2018).

Segundo Silveira (2006), ao lidar com medidas de controle de barragens relacionadas à segurança, é crucial estabelecer previamente valores numéricos que indiquem quando ações corretivas são necessárias. Esses valores são determinados com base na taxa de variação, em vez de serem absolutos.

Ele também destaca que o processo de seleção do local para instalação da instrumentação envolve três etapas fundamentais: primeiro, identificar áreas de risco, como locais com cargas mais intensas ou estruturalmente frágeis; segundo, se não houver tais áreas ou se mais de um local precisar ser instrumentado, selecionar as áreas. Normalmente, são escolhidas seções transversais que são consideradas representativas do comportamento geral do protótipo, fornecendo dados de desempenho global. É recomendável ter no mínimo duas seções para comparação do comportamento geral.

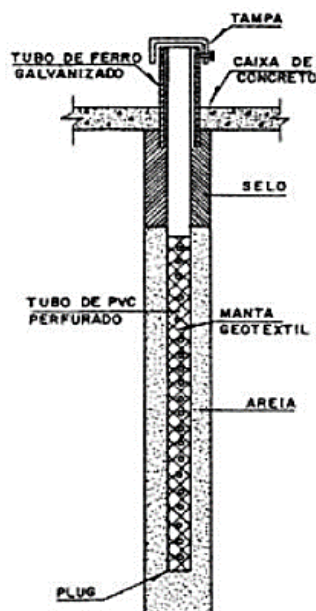
Silveira enfatiza que, devido à possibilidade de erro na seleção de áreas representativas, é essencial também instalar instrumentação em outras seções para garantir uma análise abrangente do comportamento da barragem.

2.5.1 Medição de nível d'água

A medição do nível d'água é realizada para definir a cota do nível freático, sendo ela na fundação da barragem ou em seu corpo, Costa, (2012). O dispositivo de medição de nível de água é caracterizado por sua simplicidade tanto na construção quanto na operação. Seu propósito principal é determinar a posição da linha freática dentro de uma estrutura. Consiste em um tubo feito geralmente de PVC, com perfurações na extremidade inferior para permitir a entrada de água. Uma tampa hermética é fixada na parte inferior do tubo, enquanto a extremidade superior é

envolvida por um material filtrante, como uma manta geotêxtil, conforme descrito por Machado (2007), observado na Figura 8.

Figura 8 – Esquema do medidor de nível d'água.



Fonte: Cruz (1996).

Os instrumentos utilizados para medir o nível de água em maciços de solo ou rocha operam com o princípio fundamental de acessar diretamente a água em profundidade e determinar a altura de sua superfície através de um dispositivo específico. Geralmente, esse dispositivo consiste em um cabo graduado equipado com um sensor elétrico na extremidade inferior e um emissor sonoro ou luminoso na superfície, conforme explicado por Fonseca (2003).

Em barragens de terra, os medidores de nível d'água desempenham um papel crucial na avaliação da potencial colmatção e na detecção de cargas hidráulicas nos sistemas de drenagem interna, nas paredes laterais e nas áreas a jusante. Eles são essenciais para monitorar os riscos potenciais de saturação e para garantir a estabilidade do talude de jusante.

Machado (2007) destaca que esse instrumento se torna inoperante ou perde a sensibilidade quando ocorre:

- Obstrução do tubo;
- Cisalhamento de tubo que foi inserido no maciço;
- Colmatação das aberturas do tubo ou do material drenante;
- Ruptura do tubo;
- Alto tempo de resposta na leitura do instrumento, decorrente da colmatação.

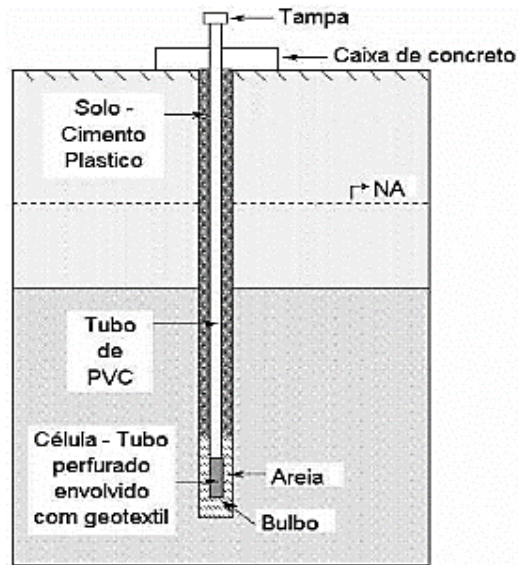
2.5.2 Medição da pressão neutra

A medição de pressão neutra é realizada pelos piezômetros. A instrumentação piezométrica desempenha um papel crucial na avaliação da estabilidade das barragens, tanto em relação à resistência ao cisalhamento quanto à resistência à erosão interna. Esses instrumentos permitem determinar a posição da linha freática no maciço ou na fundação da barragem de maneira direta e eficiente (OLIVEIRA, 2008).

2.5.2.1 Piezômetros de tubo aberto

O piezômetro de tubo aberto, conhecido como Casa Grande ou standpipe, é composto por um bulbo localizado onde se deseja medir a carga de pressão, conectado a um tubo que se estende até o ponto de leitura. O bulbo é envolvido por uma camada de areia e selado com bentonita ou cimento para isolamento. O restante do furo de sondagem é preenchido com o solo natural, ilustrado na Figura 9. A leitura do instrumento é realizada com o uso de um piezômetro elétrico, que consiste em uma trena com uma ponta elétrica que emite um sinal sonoro ao entrar em contato com a água, permitindo assim a medição entre a boca do tubo e o nível da água (VICK, 1999).

Figura 9 – Esquema de um piezômetro de tubo aberto.



Fonte: Fonseca (2003)

Os piezômetros são empregados para aferir a pressão da água, também conhecida como poropressão, em pontos específicos de barragens, fundações e taludes. A finalidade de realizar medições piezométricas é determinar a pressão da água em locais específicos dentro de um maciço de terra, rocha ou concreto (DHAWAN et al., 2018).

Segundo Machado (2007), a variação dos registros piezométricos pode ocorrer quando se verifica uma das seguintes condições:

- Aumento da vazão de percolação;
- Elevação do nível d'água de montante e jusante;
- Aumento da permeabilidade de materiais a montante do piezômetro;
- Redução da permeabilidade de materiais a jusante do piezômetro.

Os piezômetros do tipo Casagrande ou Standpipe são instrumentos amplamente utilizados no monitoramento de barragens de rejeito devido à sua robustez, simplicidade, confiabilidade e custo acessível (SILVEIRA, 2006). Especificamente projetados para observar poropressões, subpressões e cargas piezométricas em barragens de terra e enrocamento, esses instrumentos são considerados uma

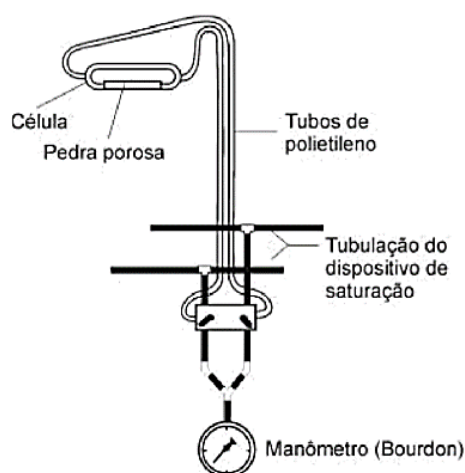
evolução dos tradicionais indicadores de nível de água (INA) (MACHADO, 2007). Eles operam medindo a pressão hidrostática na ponta porosa do tubo, que é envolto por camadas de material filtrante como areia grossa, brita e areia fina para garantir um isolamento hidráulico adequado.

Em comparação com os medidores de nível d'água, os piezômetros *standpipe* se distinguem pelo comprimento da perfuração necessária para instalação e pelo trecho do furo preenchido com material drenante, geralmente limitado a poucos metros (CRUZ, 2004). É possível instalar múltiplos piezômetros em um único furo de sondagem, dependendo do diâmetro do furo, posicionando-os em diferentes alturas para monitorar diferentes níveis dentro do maciço.

2.5.2.2 Piezômetros hidráulicos de dupla tubulação

Este tipo de piezômetro é feito para a instalação durante a obra de execução da estrutura, localizado na fundação ou no aterro. Ele realiza a leitura pelas duas tubulações que são ligados a um elemento poroso e a cabine de leitura, podendo ser observado na Figura 10. A leitura se baseia na soma da pressão média das duas tubulações somando a cota de instalação do manômetro.

Figura 10 – Esquema de funcionamento dos piezômetros hidráulicos de dupla tubulação.



. Fonte: Silveira (2006).

As vantagens do piezômetro de corda vibrante listadas por Machado (2007), são:

- Técnica e construção simples;
- Permite avaliação de poropressão negativa;
- Sensor acessível;
- Permite a realização de ensaios de permeabilidade;
- Custo médio e alta durabilidade.

As limitações, são:

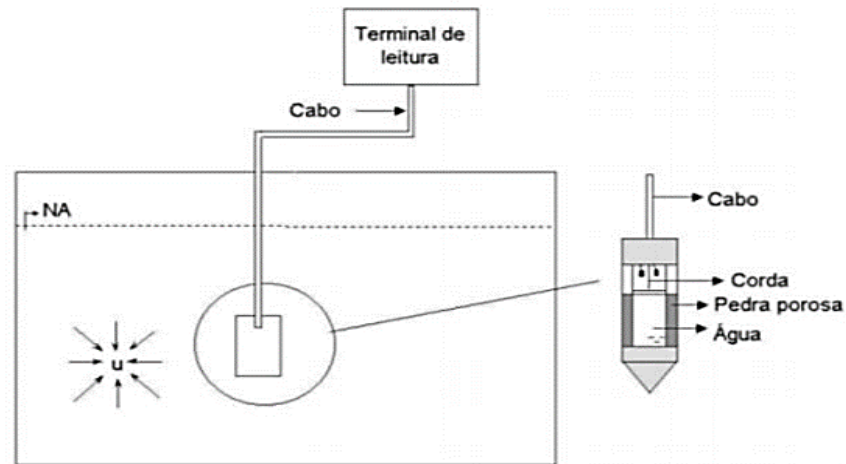
- Não indicado para cotas de instalação muito superiores que a do terminal de leitura;
- Possibilidade de fornecer água ao maciço durante operação de deaeração das tubulações, situação prejudicial quanto a altura do aterro sob o instrumento é pequena;
- Necessidade de operação demorada e relativamente complexa para a deaeração das tubulações e manutenção dos sistemas;
- Tempo de resposta muito grande quando instalado em solos de baixa permeabilidade;
- Eventuais influências de recalque nas leituras dos instrumentos.

2.5.2.3 Piezômetro de corda vibrante

É um piezômetro elétrico composto por um cilindro metálico rodeado de uma pedra porosa e diafragma, que é por onde a água passa e onde o transdutor mede a deflexão. Como existem muitos tipos desse piezômetro, é necessário que a escolha seja feita baseada no alcance de pressão que o sensor deverá medir, sendo que quanto maior o alcance do sensor, maior o erro sistemático nas leituras.

A água passa pela pedra porosa e gera uma alteração no diafragma, resultando em uma variação na tensão da corda, que gera uma vibração. Essa vibração gerada do fio, resulta em uma oscilação elétrica causada pela indução da bobina magnética, podendo ser observado na Figura 11.

Figura 11 – Esquema do piezômetro de corda vibrante.



Fonte: Silveira (2006).

Existem diversas abordagens para a instalação de piezômetros desse tipo. Segundo Cerqueira (2017), dois métodos comuns são comparados: no método convencional, o sensor de corda vibrante é posicionado e envolvido por areia lançada desde a boca do furo, de modo que a poropressão equalizada na célula de areia seja medida. Já a instalação pelo método completamente grauteado envolve o preenchimento total do furo de sondagem, do sensor piezométrico e do seu cabo até a boca do furo com uma mistura de cimento, água e bentonita. Nesse tipo de instalação, o parâmetro medido é a poropressão equalizada do bulbo adjacente à ponta do sensor.

As vantagens e limitações do piezômetro de corda vibrante listadas por Machado (2007), são:

- Alta resolução e precisão;
- Resposta rápida;
- Sinais podem ser transmitidos a longa distância;
- Facilidade de instalação e simples leitura;
- Possibilidade de automação das leituras.

Limitações:

- Podem ser danificados por descarga elétrica;

- Custo elevado de aquisição.

2.5.2.4 Piezômetros pneumáticos

Este tipo de piezômetro opera com base na variação da pressão externa sobre um diafragma que comprime o gás, resultando na medição da poropressão da água. A leitura ocorre através do equilíbrio das pressões atuantes em um diafragma flexível, onde a água exerce pressão de um lado a ser medida, enquanto o gás exerce pressão conhecida e variável do outro lado. Silveira (2003) descreve o processo de leitura: uma pressão crescente é aplicada através da tubulação de alimentação e a intensidade da pressão na tubulação de retorno é medida, momento em que a pressão se equilibra com a pressão intersticial do solo. Quando a pressão na tubulação de retorno atinge zero, é possível determinar com precisão a pressão exercida pela água através da pedra porosa, equilibrada com a água intersticial.

A principal vantagem deste tipo de piezômetro está relacionada à sua fabricação com materiais plásticos, que garantem durabilidade e robustez em ambientes como barragens. Além disso, é um piezômetro que não requer calibração e não utiliza componentes eletrônicos.

Por outro lado, suas desvantagens incluem o tempo necessário para realizar as leituras e a necessidade de manter o sistema sempre limpo, livre de materiais finos, além do fornecimento contínuo de gás comprimido.

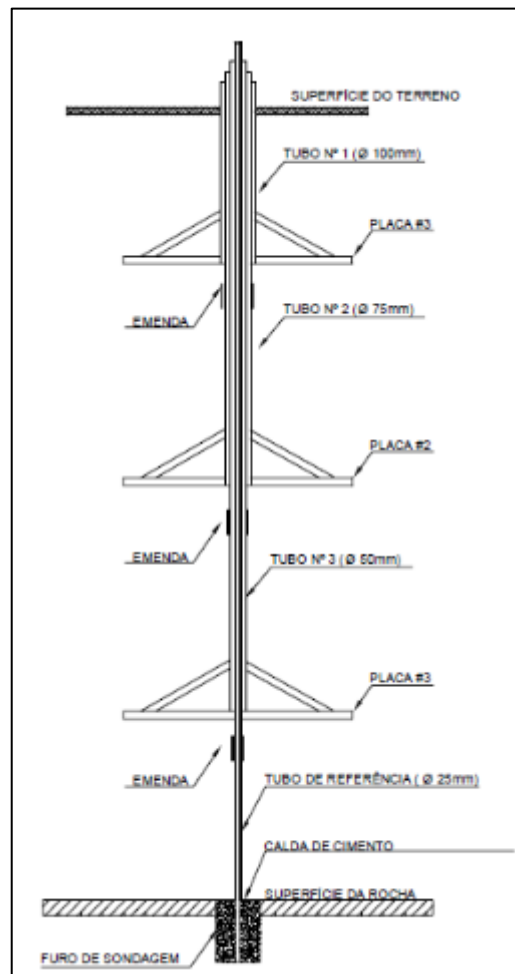
2.5.3 Medição de deslocamentos

2.5.3.1 Medição de deslocamento vertical

O deslocamento vertical também pode ser conhecido como recalque, o equipamento mais utilizado para essa medição é chamado de Tubos telescópicos, esse instrumento se baseia em um tubo fixado na rocha sã, e de várias placas solidárias a tubos também galvanizados, com diâmetros variando e crescendo de

baixo para cima, assim que o aterro da barragem vai subindo, a instalação de novas placas do tubo é realizada, como ilustrado na Figura 12. Na sua extremidade superior, ao realizar a leitura, é ajustado um compasso metálico de pontas secas, nas punções do tubo original e do tubo da placa medida, essa distância determinara o recalque (COSTA, 2012).

Figura 12 – Representação do Tubo telescópico.



Fonte: Costa (2012).

2.5.3.2 Medição de deslocamento horizontal

Fonseca (2003), os indicadores de inclinação são usados, principalmente, para monitorar os movimentos do solo em massas de solo não perturbadas, bem como

aterros compactados detectando mudanças na inclinação da estrutura do solo. Machado (2007), os inclinômetros podem medir deformações horizontais de massas de solo para detectar regiões de concentração de deformações, sendo elas, possíveis superfícies de ruptura, como ele descreveu os potenciais problemas relacionados:

- Fissuras transversais no aterro
- Ocorrência de erosão interna
- Erosão interna induz a superfícies potenciais de ruptura.

2.5.4 Medição de vazão

Esta medição é feita para verificar a medição da vazão em canaletas, drenos de fundação, além de pequenos barramentos, inseridas principalmente no pé de jusante das estruturas. Embora as barragens apresentem o objetivo de barrar grandes volumes de água ou até mesmo segurar a vazão natural da água, as barragens não apresentam dispositivos estanques, dessa forma, as estruturas apresentam infiltrações ao longo de seu aterro ou fundação, dessa forma é necessário a medição desses fluxos, para o monitoramento do desempenho da estrutura. A medição pode ser realizada de muitas formas, variações de vertedouros triangulares e retangulares ou a utilização da medição de vazão por enchimento de um volume conhecido em um tempo de 30 segundos, apresentando em litros por minuto, utilizando a equação 1.

$$Q = V/T \quad (1)$$

Onde:

V = Volume (litros)

T = Intervalo de tempo (minutos)

2.5.5 Medição de aceleração sísmológica

A utilização de sismógrafos serve para monitorar possíveis abalos que ocorram nas regiões das estruturas geotécnicas, eles detectam ondas sísmicas de três regiões

diferentes, sendo elas: vertical, horizontal e transversal, podendo ser de origem natural ou induzida. Ele registra as vibrações do solo e realizam gráficos que são utilizados para observar o comportamento da barragem e até mesmo falhas, Costa, (2012).

2.6 Frequência das medições

Silveira (2006), aborda a frequência das leituras dos instrumentos, como algo que depende do desempenho previsto no projeto da criação da estrutura, feitas para acompanhar a realização das obras da barragem, em seu período de construção, ou até mesmo para acompanhar as variações das grandezas medidas por cada instrumento em sua operação, para assim ser possível a identificação de problemas nas estruturas.

Ele também avalia que no período de construção, a frequência do monitoramento é definida a partir do projeto e do empreendedor, ficando as informações registradas nos dados controle realizado para a segurança da barragem. Durante a fase de operação, é avaliado potenciais riscos e áreas as quais demandam maior atenção, dessa forma cria-se rotinas e ações para realizar a coleta de dados e prevenção de falhas. A partir desse contínuo acompanhamento é avaliado os limites de controle estabelecidos e se necessário a realização de alteração dos níveis de controle dos instrumentos.

Silveira (2006), descreve a necessidade de os leituristas de campo realizarem as inspeções visuais, semanalmente ao coletarem os dados dos instrumentos, em período operacional. Já os instrumentos de auscultação instalados, preferencialmente, devem realizar as leituras na mesma hora nos dias estabelecidos, apresentando programação para as leituras com sequência e itinerário fixo.

Os instrumentos que são analisados de forma conjunta, como marcos superficiais e inclinômetros, apresentam a necessidade de leituras em dias e horas iguais, para comparações realistas. Silveira (2006), descreve a diminuição de leituras para

barragens que após quatro, cinco anos de operação, apresentam-se estáveis, podendo haver o aumento nos intervalos de leitura, ainda que permaneça as inspeções visuais periódicas. Entretanto, se a barragem apresentar qualquer indício de condição perigosa, é solicitado que as medidas de instrumentos relevantes e inspeções, sejam intensificadas.

É apresentado na Tabela 4 descrita por Silveira, 2006, onde apresenta as frequências mínimas recomendadas para as leituras dos instrumentos de barragem de terra-enrocamento.

Tabela 4 – Frequências mínimas recomendadas para a leitura da instrumentação de barragens de terra e enrocamento.

| Tipo de instrumento | Período construtivo | Enchimento do reservatório | Período inicial de operação | Período de operação |
|--------------------------------------|----------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|----------------------------|
| Marco superficial | Semanal | Semanal | Mensal | Semestral |
| Medidor de recalque | 2 vezes semanais | 2 vezes semanais | Semanal | Mensal |
| Inclinômetro | 2 vezes semanais | 2 vezes semanais | Semanal | Mensal |
| Extensômetro para solo | 2 vezes semanais | 2 vezes semanais | Semanal | Mensal |
| Célula de pressão total | 2 vezes semanais | 2 vezes semanais | Semanal | Mensal |
| Piezômetro de fundação | Semanal | 3 vezes semanais | 2 vezes semanais | Semanal |
| Célula piezométrica no aterro | 2 vezes semanais | 3 vezes semanais | 2 vezes semanais | Semanal |
| Medidor de N.A. no filtro | | 3 vezes semanais | 2 vezes semanais | Semanal |
| Medidor de vazão | | Diária | 3 vezes semanais | Semanal |
| Medidor de turbidez | | Diária | 3 vezes semanais | Semanal |

Fonte: Silveira (2006).

Para as barragens classificadas com o Dano Potencial Associado alto, é obrigatório manter o sistema de monitoramento automatizado e adequado a estrutura

e sua complexidade, com o acompanhamento contínuo e em tempo real, de acordo com a Resolução ANM N° 95 / 2022.

2.7 Análise de estabilidade

De acordo com Soares (1996), os estudos dos métodos de estabilidade de taludes, tem como objetivo apresentar valores realistas para as variáveis dominantes, e resultar em fatores de segurança correspondentes a diferentes situações de solicitação. A relação das resistências e das solicitações, é proporcionado pelo fator de segurança, sendo um coeficiente aplicado ao modelo de cálculo selecionado.

Com isso, nos cálculos é implicado as variabilidades dos parâmetros de resistência e a aplicabilidade do modelo, para encontrar o mecanismo de ruptura. Na análise determinística o Fator de Segurança é baseado em um valor fixo de parâmetros dos materiais que pertencem ao talude em análise. Ao apresentar o fator de segurança acima dos valores mínimos indicado por norma, representa um talude estável, se o Fator de Segurança for abaixo do mínimo, é considerado um talude instável, sendo dado pela equação 2.

$$FS = M_R/M_S \quad (2)$$

Onde:

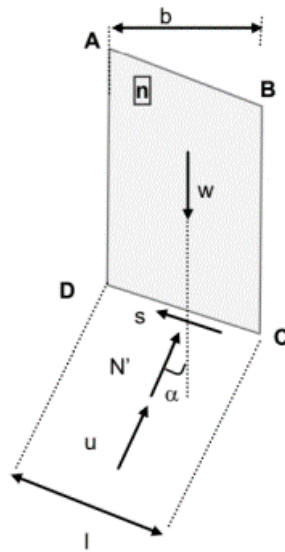
M_R = Momento resistente ao deslizamento.

M_S = Momento solicitante.

2.7.1 Método das fatias

O método das Fatias, descrito por Fellenius em 1936, se baseia na divisão da massa acima da superfície de ruptura em diversas fatias verticais. Esse método considera que as forças resultantes nos lados da fatia, tanto acima quanto abaixo, são iguais e opostas, agindo ao longo de uma linha paralela à base da fatia (BRITO, 2003). Essa abordagem permite desconsiderar as forças cisalhantes e normais nas laterais, tornando o problema estaticamente determinado. O fator de segurança é determinado considerando apenas o equilíbrio de forças na direção normal à superfície de deslizamento e fazendo o equilíbrio de momentos (GERSCOVICH, 2012). Na Figura 13 são apresentados os esforços considerados na fatia pelo método de Fellenius. O fator de segurança é dado pela equação 3.

Figura 13 – Esforços da fatia pelo método de Fellenius.



Fonte: Gerscovich (2012)

$$FS = \frac{\Sigma(c'l + (Wi \cdot \cos\alpha - ul)\tan\phi')}{\Sigma(Wi \cdot \text{sena})} \quad (3)$$

Onde:

FS é o fator de segurança (adimensional);

c' é a coesão do solo, em kPa;

ϕ' é o ângulo de atrito;

l é o comprimento da base da fatia, em metros;

α é inclinação da base da fatia;

W_i é o peso da n -ésima fatia, em kN;

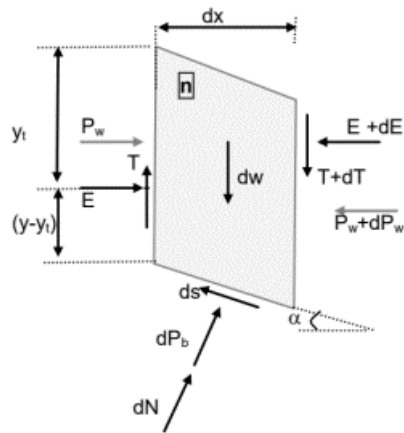
u é a força de percolação, em kN.

2.7.2 Método de Morgenstern-Price

Segundo Antonio (2011), como muitas situações a ruptura não se representa como circular, existem métodos das fatias que devem ser aplicados para esta situação, como o Morgenstern e Price (1956), sendo o mais utilizado, pois satisfaz completamente as condições de equilíbrio, sendo também o que envolve menor dificuldade numérica. A Figura 14 apresenta as forças atuantes nas fatias, onde P_w é a poropressão entre as fatias, dP_b é a resultante da poropressão na base da fatia, dW é a força peso da fatia, T é a força tangencial entre as fatias, E é a força normal entre as fatias, dN é a força normal na base da fatia, e d_s é a força cisalhante na base da fatia.

O método de Morgenstern e Price (1956), conforme Antonio (2011), é um dos métodos mais rigorosos, pois ele faz com que as condições de equilíbrio de forças e momento sejam satisfeitas simultaneamente. Segundo Vicente, (2006), a massa encontrada na ruptura é dividida em fatias, e para calcular é necessário o auxílio do computador.

Figura 14 – Forças atuantes em uma fatia pelo método de Morgenstern e Price (1965).



Fonte: Gerscovich (2012)

Vicente (2006), descreve que para encontrar a indeterminação do problema, é admitido a relação das forças E e T (equação 4)

$$T = \lambda \cdot f(x) \cdot E \quad (4)$$

Sendo:

λ = Constante do processo iterativo.

$f(x)$ = Função a qual precisa ser especificada.

Normalmente utiliza-se a função arco seno para $f(x)$, pois é uma função que influencia pouco o Fator de Segurança final, porém também é utilizado outras funções. O método é considerado o mais rigoroso.

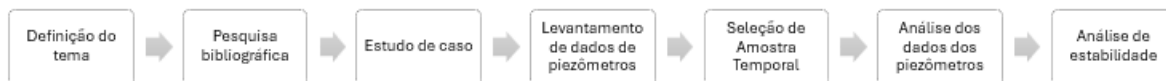
3 METODOLOGIA

O presente trabalho buscou amparo legal no tema de segurança, fiscalização e monitoramento, com base na Portaria Nº 70.389/2020 da ANM, na definição de critérios de segurança e fiscalização, Lei Federal Nº 12.334/2010, a qual estabelece diretrizes sobre a segurança de barragens no Brasil, e NBR 13028:2018, que especifica os requisitos mínimos para elaboração e apresentação de projetos de barragens da mineração. Sendo as principais referências normativas que regulamentam o monitoramento e a segurança de barragem no Brasil.

Logo, de forma qualitativa, foi analisado o estudo utilizando referências bibliográficas, pesquisas, normas, artigos e leis, publicadas sobre o assunto. Além disso, através da metodologia quantitativa o estudo de caso apresenta e analisa os dados numéricos referentes ao resultado dos instrumentos inseridos em uma seção crítica, verificando sua eficiência a partir dos três anos apresentados.

Assim, o trabalho visa apresentar o desenvolvimento da utilização das barragens, além de descrever suas formas de construção e monitoramento, visualizando a legislação atual e seus efeitos. Neste estudo de caso, analisa-se as leituras dos piezômetros em uma seção crítica de barragem durante os períodos de chuva de 2021-2022, 2022-2023 e 2023-2024, com o objetivo de avaliar a variação da piezometria em relação à pluviometria registrada e os resultados das análises de estabilidade de cada período. A pesquisa investiga como a variação das leituras dos instrumentos, atrelada ao volume de chuva, influencia o fator de segurança da barragem. A análise dos dados coletados visa compreender os impactos dessas variações na estabilidade da estrutura, reforçando a importância do monitoramento de barragens e da legislação atual relacionada à segurança de barragem de rejeito. A Figura 15 apresenta a descrição de como foi realizado o trabalho.

Figura 15 – Fluxograma de execução do trabalho.



Fonte: Autor.

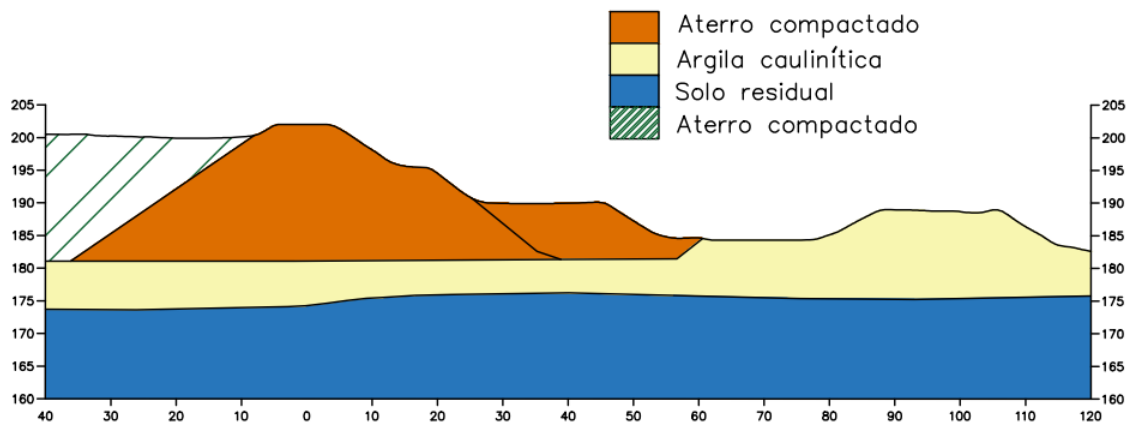
3.1 Descrição da Seção da Barragem Analisada

A barragem utilizada no estudo de caso é uma estrutura real, refere-se a uma contenção realizada pelo método a jusante, considerado mais seguro em relação ao método a montante, especialmente para barragens de rejeito, onde o alteamento é feito pela fundação original.

Essa barragem é utilizada para reservar rejeitos do beneficiamento de bauxita, apresentando materiais finos, de baixa densidade e alta fluidez, necessitando de cuidados para garantir a estabilidade da barragem.

A seção crítica estudada (Figura 16), apresenta altura de aproximadamente 65 metros e de comprimento 250 metros, apresentando o aterro compactado na camada inicial, mediada pela argila caulinítica e finalizada com solo residual.

Figura 16 – Apresentação da seção de estudo.



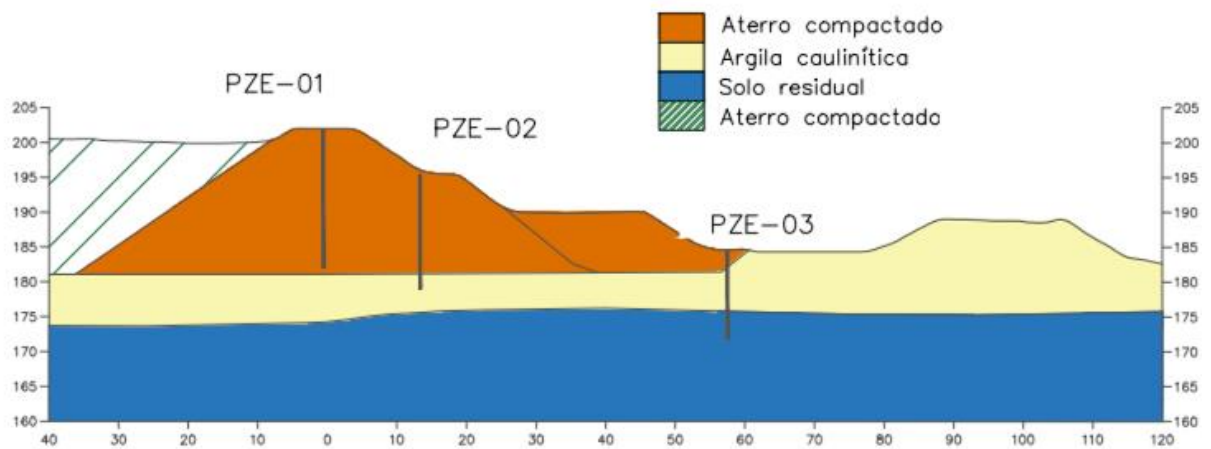
Fonte: Autor.

3.2 Instrumentação

A barragem estudada construída pelo método a jusante, apresenta 3 piezômetros. A Figura 17 apresenta os instrumentos locados na seção, nomeados de: PZE-01 localizado na crista da seção, tem sua continuidade apenas no aterro compactado, PZE-02, localizado no talude a jusante do aterro compactado e o início de seu tubo se encontra em argila caulínica, e o PZE-03, que se localiza entre o fim do aterro compactado e o início da argila caulínica, apresentando o início do instrumento no solo residual.

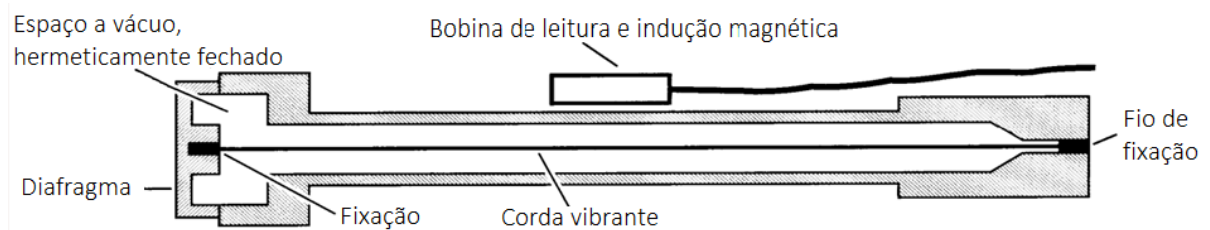
Os três instrumentos são piezômetros de corda vibrante, os quais podem realizar registros contínuos de dados e respostas praticamente instantâneas, sendo um ótimo equipamento para o monitoramento de barragens de rejeito, apresentado na Figura 18.

Figura 17 – Seção de estudo com os instrumentos locados.



Fonte: Autor.

Figura 18 – Representação do piezômetro de corda vibrante locado na seção.



Fonte: Silveira (2006).

3.3 Parâmetros Geotécnicos

A partir de estudos de investigações geotécnicas, ensaios e amostras, realizados anteriormente e não disponíveis para apresentar no trabalho, foi possível identificar os valores dos parâmetros de coesão (c), peso específico (γ) e ângulo de atrito (ϕ) para o aterro compactado e argila caulínica drenada (Tabela 4).

Para a argila caulínica não-drenada foi utilizada a abordagem SHANSEP (*Stress History and Normalized Soil Engineering Properties*), elaborada por Ladd e Foot

(1974), para prever a resistência ao cisalhamento não drenada, levando em consideração a história de tensões e a condição de carregamento no local.

O método SHANSEP, pode ser utilizado para normalizar a resistência em função das tensões efetivas atuais e históricas, utilizando a razão de resistência normalmente adensada ($S = S_u/\sigma'_v$), a razão de pré-adensamento ($OCR = \sigma'_{vm}/\sigma'_v$) e um expoente (m) controlando a não linearidade, obtém-se a equação 5. Sendo S_u a resistência não-drenada, σ'_{vm} a tensão de pré-adensamento e σ'_v a tensão efetiva vertical *in situ*. A tabela 4 apresenta os valores de S , m e σ'_{vm} da argila caulínica não-drenada.

$$S_u = \sigma'_v(S)(OCR)^m \quad (5)$$

Tabela 5 - Parâmetros dos materiais da seção de estudo.

| Material | Peso específico (γ) (KN/m ³) | Coesão (kPa) | Ângulo de atrito (Φ) | S | m | σ'_{vm} (kPa) |
|------------------------------|---|--------------|-----------------------------|------|------|----------------------|
| Rejeito | 16,3 | | | | | |
| Aterro compactado | 17,5 | 19 | 33 | | | |
| Argila caulínica drenada | 17,7 | 13 | 32 | | | |
| Argila caulínica não-drenada | 18,2 | | | 0,26 | 0,79 | 142 |

Fonte: Autor.

3.4 Análise de estabilidade referente ao período de chuva dos anos de 2021 a 2024.

As análises de estabilidade foram realizadas utilizando o software *Slide2* (versão 9.034), da empresa *Rocscience*. Para a avaliação de superfícies circulares, foi aplicado o método de equilíbrio limite geral (*Generalized Limit Equilibrium - GLE*), rigoroso, de Morgenstern-Price, considerando o critério de Mohr-Coulomb, que modela o comportamento de resistência ao cisalhamento de solos e rochas, além da abordagem SHANSEP para argila pré-adensada não-drenada.

Os dados inseridos nas linhas piezométricas da seção analisada, foi coletado de três períodos de chuva diferentes, de 2021 a 2024, período em que os dados fornecidos pertenciam. Os limites de ruptura inseridos são realizados para uma análise de ruptura global. Por fim, foi analisado o comportamento em operação, que, conforme a norma, exige um fator de segurança mínimo de 1,5, conforme estabelecido pela NBR 13.028 (ABNT, 2017).

As análises realizadas neste trabalho têm a finalidade acadêmica, para o desenvolvimento do trabalho de conclusão de curso, e não devem ser empregadas para outros fins.

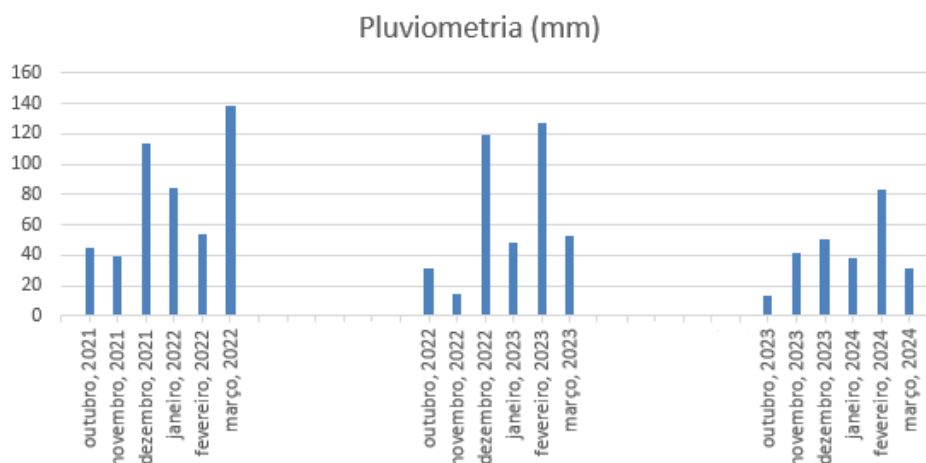
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Análise comparativa dos resultados das análises de estabilidade com as leituras piezométricas dos períodos estudados

O estudo de caso tem como objetivo avaliar a variação do fator de segurança da seção de acordo com a linha piezométrica encontrada com a maior leitura dos instrumentos nos períodos de chuva (outubro-março) referentes, sendo eles 2021-2022, 2022-2023, 2023-2024. Dessa forma, com as maiores leituras de cada instrumento durante esses períodos, é traçado a linha piezométrica a partir do reservatório com cota padronizada de 199,46 metros, seguindo os instrumentos até o fim da seção, e assim comparar o fator de segurança e a variação de leitura dos instrumentos.

Os períodos estudados apresentaram variação no volume das chuvas, sendo o maior volume no período de 2021-2022 e o menor entre 2023-2024, como pode ser observado na Figura 19.

Figura 19 – Volume de pluviometria referente ao período de chuva de 2023-2024.

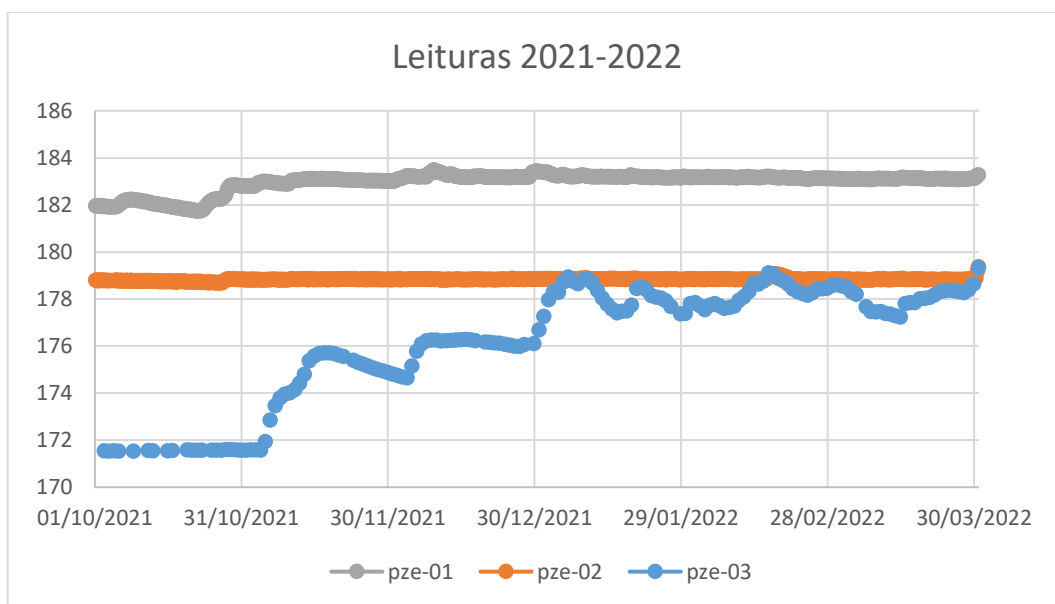


Fonte: Autor.

Porém, como estamos analisando a piezometria a partir do maior valor apresentado pelo instrumento no devido período, por conservadorismo, apresentaram variações entre as máximas leituras abordadas de cada período, afetando diretamente a cota das leituras dos instrumentos. A leitura da cota diminui à medida que as chuvas se reduzem. Isso é evidenciado nos dados analisados, onde o período de 2023-2024 registrou o menor volume de precipitações, resultando em leituras gerais baixas, conforme mostrado na Tabela 5.

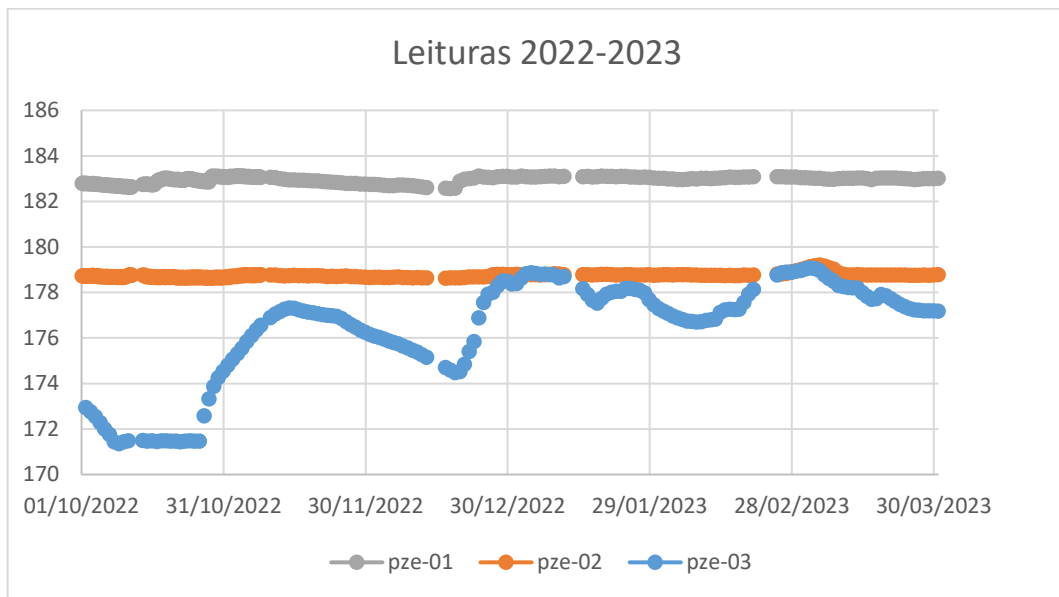
As Figuras 20, 21 e 22, apresentam, respectivamente, as leituras dos piezômetros dos anos 2021-2022, 2022-2023, 2023-2024. A Tabela 5 apresenta as maiores leituras dos piezômetros, correspondente aos períodos de chuva, de outubro a março, dos períodos analisados.

Figura 20 – Leitura dos instrumentos no período de chuva 2021-2022.



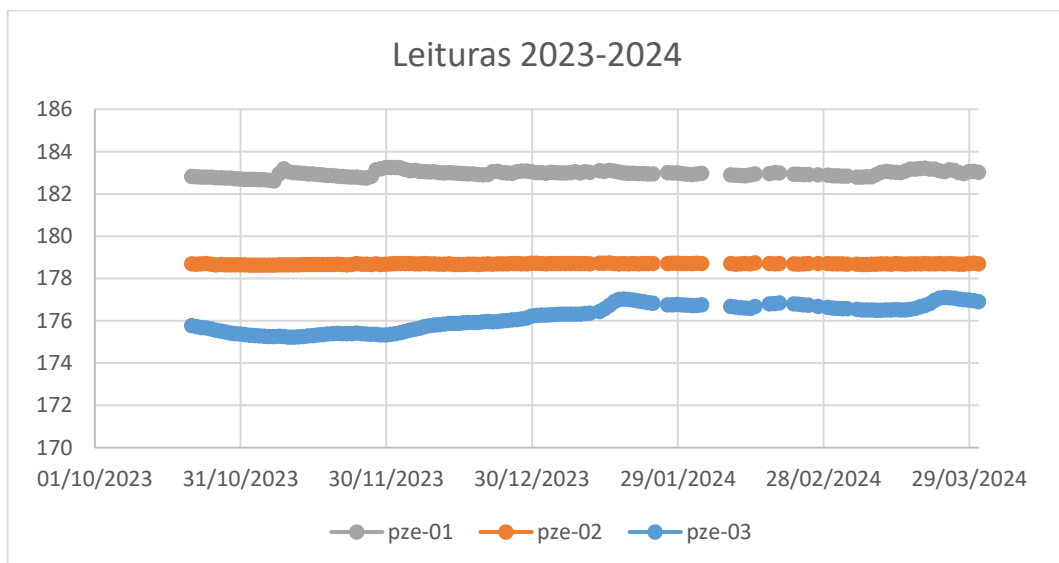
Fonte: Autor.

Figura 21 – Leitura dos instrumentos no período de chuva 2022-2023.



Fonte: Autor.

Figura 22 – Leitura dos instrumentos no período de chuva 2023-2024.



Fonte: Autor.

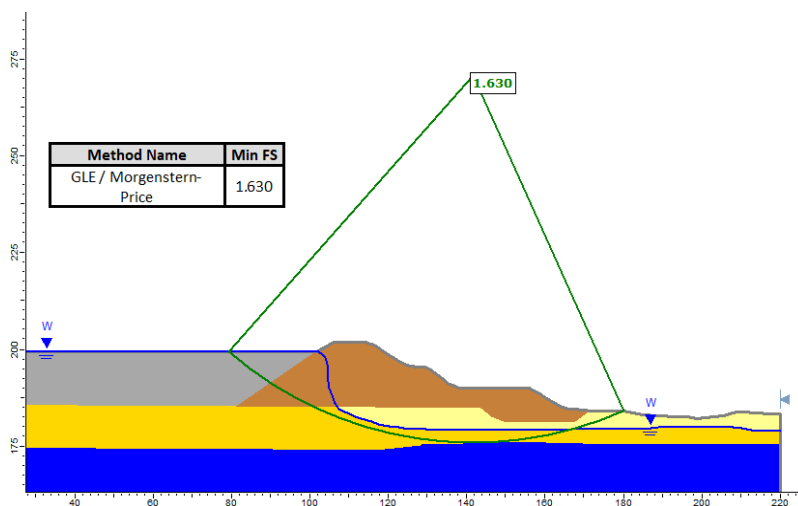
Tabela 6 – Leitura máxima dos instrumentos nos períodos de referência.

| Instrumento | Cota de instalação | Leituras (m) | | |
|-------------|--------------------|--------------|-----------|-----------|
| | | 2021-2022 | 2022-2023 | 2023-2024 |
| PZE-01 | 182 | 183,4899 | 183,1215 | 183,2551 |
| PZE-02 | 179 | 179,5839 | 179,1958 | 178,734 |
| PZE-03 | 172 | 179,5136 | 179,0658 | 177,1081 |

Fonte: Autor.

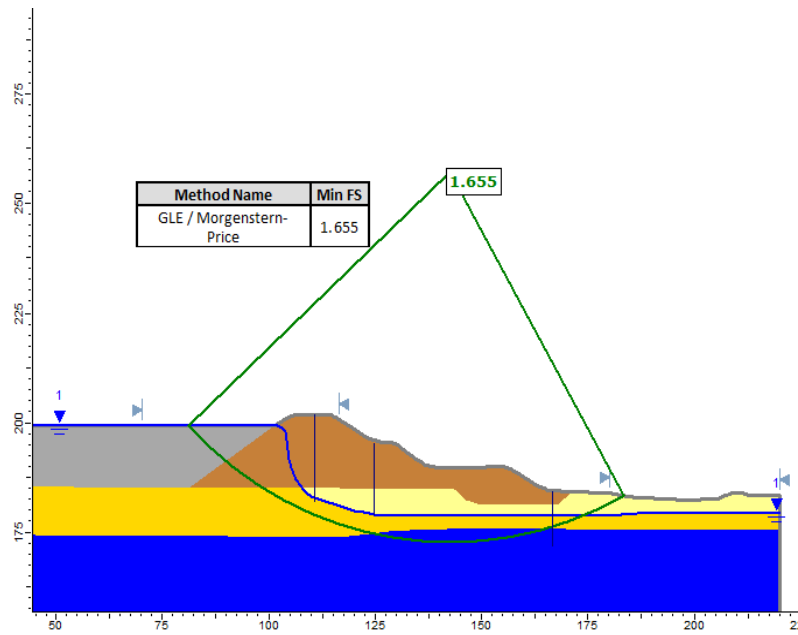
Como observado na Tabela 6, a coleta das maiores leituras referentes aos anos de 2021-2022, 2022-2023 e 2023-2024, visando o período de chuva entre outubro e março, realizando assim a definição da linha piezométrica que alinhada com o nível do reservatório padronizado como 199,46 metros, demonstra o nível de pressão e a posição do nível da água no solo, sendo crucial para avaliar a estabilidade da estrutura. Após a definição da piezometria, foi realizado as análises de estabilidade dos três períodos, Figura 23, Figura 24 e Figura 25.

Figura 23 – Análise de estabilidade referente ao período de 2021-2022.



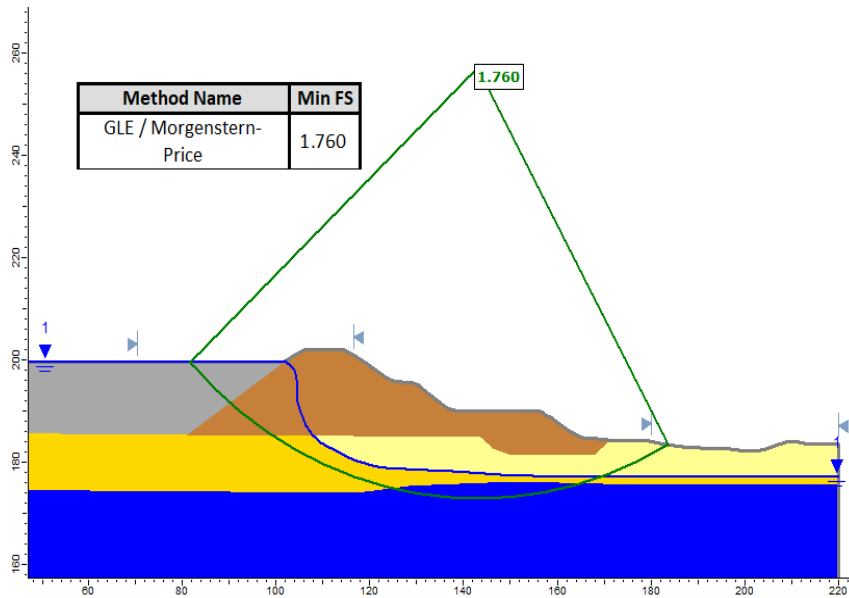
Fonte: Autor.

Figura 24 – Análise de estabilidade referente ao período de 2022-2023.



Fonte: Autor.

Figura 25 – Análise de estabilidade referente ao período de 2023-2024.



Fonte: Autor.

Realizando as análises comparativas foi possível identificar fatores de segurança dos dois primeiros períodos de chuva (2021-2022, 2022-2023), muito próximos, de 1,630 para 1,655, Figura 23 e Figura 24, havendo a pequena variação pela mudança de volume da pluviometria, que conseqüentemente ao apresentar menor volume, referente aos anos de 2022-2023, gera aumento no fator de segurança simulado, como pode ser observado na análise de 2023-2024, pois é o período avaliado com menor volume de chuva, que conseqüentemente causa menor infiltração na quantidade de água no solo, reduzindo a pressão nos poros, resultando em uma maior resistência ao cisalhamento, demonstrando um fator de segurança maior, de 1.760, Figura 25.

Sendo assim, de acordo com os resultados, percebe-se um comportamento favorável da estrutura, com resultados acima do esperado por norma. Além disso, como a análise de estabilidade está sendo feita comparando a leitura dos instrumentos, foi possível observar que os resultados acompanharam as leituras, que variavam de acordo com a pluviometria, assim como o fator de segurança.

5 CONCLUSÃO

O presente estudo teve como objetivo principal analisar a estabilidade de uma barragem de contenção de rejeitos utilizando dados de instrumentação piezométrica, em comparação com dados pluviométricos coletados entre 2021 e 2024. As análises foram realizadas de forma a avaliar o comportamento da estrutura ao longo dos períodos de chuva.

Os resultados obtidos indicaram um comportamento estável da barragem durante os três períodos analisados. Foi possível identificar que o fator de segurança apresentou variações diretamente relacionadas ao volume de precipitação pluviométrica. Nos períodos com maior volume de chuvas (2021-2022 e 2022-2023), o fator de segurança foi ligeiramente inferior, devido ao aumento da pressão nos poros e à consequente diminuição da resistência ao cisalhamento do solo. Em contrapartida, no período de menor precipitação (2023-2024), o fator de segurança foi mais elevado, alcançando 1,760, o que reflete uma maior resistência ao cisalhamento devido à menor infiltração de água no solo.

O fator de segurança, calculado para os períodos de 2021-2022, 2022-2023 e 2023-2024, manteve-se superior ao mínimo normativo de 1,5, conforme estabelecido pela NBR 13.028 (ABNT, 2017), confirmando a estabilidade da barragem. As leituras piezométricas apresentaram valores baixos, próximos às cotas de instalação dos instrumentos, o que reflete uma condição normal de operação, sem indicar situações de alerta ou risco iminente de falha estrutural.

Por fim, percebe-se a importância das leis e órgãos especializados no acompanhamento e fiscalização das barragens, demonstrando de forma clara e objetiva as necessidades exigidas para haver segurança e mitigar os riscos ao meio ambiente e a sociedade. Os resultados destacam a importância do acompanhamento piezométrico para a avaliação contínua da estabilidade, evidenciando a importância do monitoramento frequente.

REFERENCIAS

ÁVILA, J. P.; BRASIL, L. S. S.; LIMA, L. M. K. **Plano de Ações Emergenciais Aplicados a Barragens de Rejeitos**. In: COBRAMSEG 2008, Curitiba. XIV Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2008.

ÁVILA, J. P.; ESPÓSITO, T.J. **Programa de Implementação de Procedimentos de Gestão e Segurança das Barragens de Rejeitos**. Curso para gerentes/engenheiros de operação. Belo Horizonte: IBRAM e Pimenta de Ávila Consultoria Ltda, 2008.

Agência Nacional de Mineração (ANM). **Resolução ANM Nº 143, de 10 de julho de 2012**. Estabelece critérios gerais de classificação de barragens por categoria de risco e dano potencial associado. Diário Oficial [da República Federativa do Brasil], Brasília, DF, 15 setembro, 2024.

_____**Resolução ANM Nº 144, de 10 de julho de 2012**. Estabelece critérios para implementação da Política Nacional de Segurança de Barragens. Diário Oficial [da República Federativa do Brasil], Brasília, DF. 10 jun. 2012. Disponível em: https://sistemas.anm.gov.br/publicacao/mostra_imagem.asp?IDBancoArquivoArquivo=7234. Acesso em: 15 setembro, 2024.

_____**Portaria ANM nº 70.389, de 17 de maio de 2017**. Estabelece diretrizes e procedimentos para o monitoramento e a fiscalização das atividades de mineração. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/barragens/portaria-dnpm-no-70-389-de-17-de-maio-de-2017>. Acesso em: 15 setembro, 2024.

_____**Resolução ANM Nº 13, de 18 de janeiro de 2019**. Dispõe sobre a gestão de recursos minerais. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 21 jan. 2019. Disponível em: <https://www.in.gov.br/web/dou/-/resolucao-n-13-de-8-de-agosto-de-2019-210037027>. Acesso em: 15 set. 2024.

_____ **Resolução ANM nº 95, de 10 de agosto de 2022.** Estabelece diretrizes e procedimentos para o licenciamento de atividades de pesquisa mineral. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 11 ago. 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/barragens/legislacao/resolucao-no-95-2022.pdf>. Acesso em: 15 set. 2024.

_____ **Relatório de Segurança de Barragens 2012-2013.** Este relatório apresenta a avaliação da segurança das barragens no Brasil. Disponível em: <https://www.snisb.gov.br/relatorio-anual-de-seguranca-de-barragem/anteriores/2013>. Acesso em: junho 2024.

ARNEZ, F. I. Vasquez. **Avaliação das principais causas de acidentes em barragens de contenção de rejeito devido a fatores geológicos e geotécnicos.** 72 p. Dissertação de Mestrado Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Minas, São Paulo, 1999.

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: ABNT, 2017.

BERRONES, R. F.; ACOSTA, N. P. L. (2011). **Internal Erosion due to Water Flow Through Earth Dams and Earth Structures. Soil erosion studies.** Chapter 14. InTech.

BHERING C. **Contribuição ao Estudo do Comportamento de Barragens de Rejeito de Mineração de Ferro.** Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

BRASIL. **Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010.** Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens. Brasília, DF: Casa Civil, 2010. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2010/Lei/L12334.htm. Acesso em: 10 set. 2024.

_____ **Lei nº 14.066, de 30 de setembro de 2020.** Institui normas para a segurança de barragens, estabelece diretrizes para a fiscalização e a gestão de riscos

associados, e altera dispositivos da legislação mineral. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/aceso-a-informacao/legislacao/leis/lei-n-14-066-2020.pdf/view>. Acesso em: 10 set. 2024.

_____**Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB). Relatório de Segurança de Barragens 2021.** O documento apresenta a análise da segurança das barragens no Brasil, abordando a condição estrutural, o monitoramento e as medidas de mitigação de riscos. Disponível em: <https://www.snisb.gov.br/relatorio-anual-de-seguranca-de-barragem/2021/rsb-2021.pdf>. Acesso em: 10 ago. 2024.

CANTINI, Fernando; MARTINEZ, Carlos. **Entenda o que é a liquefação.** Infográfico. UFOP; Ministério da Integração; Samarco, 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: 25 jun. 2024.

CERQUEIRA, H.; **Critérios de projeto para instrumentação piezométrica de diversas estruturas geotécnicas em mineração.** Dissertação (Mestrado Profissional) – Engenharia Geotécnica, Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2017.

CHAVES, J.C. **Controle de Deformações em Barragens: Métodos de Monitoramento e Viabilidade de Utilização do GPS.** 197 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Carlos, 1994.

COSTA, W. D. **Geologia de Barragens.** São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

CRUZ, P. T. **100 Barragens Brasileiras.** São Paulo: Oficina de Textos, 1996.

DUNNICLIFF, J. **Geotechnical instrumentation for monitoring field performance.** New York: Wiley-Interscience, 1988.

ESPÓSITO, T. J.; DUARTE, A. P. **Classificação de barragens de contenção de rejeitos de mineração e de resíduos industriais em relação a fatores de risco.**

Rem: Revista Escola de Minas, 2010, 63 (abril-junho). Disponível em: <https://www.smarh.eng.ufmg.br/defesas/502M.PDF>. Acesso em: 05 maio 2024.

ESPÓSITO, T.J. **Metodologia probabilística e observacional aplicada a barragens de rejeito construída por aterro hidráulico**. 363 p. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF. 2000.

FONSECA, Alessandra da Rocha. **Auscultação por Instrumentação de Barragens de Terra e Enrocamento Para a Geração de Energia Elétrica – Estudo de Caso das Barragens da UHE São Simão**. 158 p. Dissertação de Mestrado – Curso de Engenharia Civil com ênfase em Geotecnia, Departamento de Engenharia Civil da Escola de Minas, UFOP, Ouro Preto, (2003).

FROEHLICH, D.; DHAWAN, D. **Guidelines for Instrumentation of Large Dams**. 1. ed. **Índia**: Dam Rehabilitation and Improvement Project, 2017.

GERSCOVICH, D. M. S. **Estabilidade de Taludes**. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

GUIMARÃES, N.C. **Filtragem de Rejeitos de Minério de Ferro Visando a sua Disposição em Pilhas**. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2011. p. 6-31.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO (IBRAM). **Informações e Análises da Economia Mineral Brasileira**. Brasília, DF: Instituto Brasileiro de Mineração, 2012. Disponível em: <https://ibram.org.br/wp-content/uploads/2020/12/informacoes-sobre-a-economia-mineral-2017.pdf>. Acesso em: 05 mai. 2024.

_____. **Produção Mineral Brasileira (PMB): série histórica**. Brasília, DF: Instituto Brasileiro de Mineração, 2016. Disponível em: <https://ibram.org.br/wp-content/uploads/2021/02/Gestao-e-Manejo-de-Rejeitos-da-Mineracao-2016.pdf>. Acesso em: 05 mai. 2024.

_____. **Gestão e Manejo de Rejeitos da Mineração**. 1. ed. Brasília: IBRAM, 2016. Disponível em: <https://ibram.org.br/wp-content/uploads/2021/02/Gestao-e-Manejo-de-Rejeitos-da-Mineracao-2016.pdf>. Acesso em: 05 mai. 2024.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA (IPEA). **Plano de Trabalho**. Brasília, 2012. 520 p. Disponível em: <https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/>

839/1/120202_planotrabalhoipea2012.pdf. Acesso em: 05 maio 2024.

Kanji, M. A.; Figueira, P. C. da S. **Quantificação tentativa do uso de instrumentação em barragens**. 119-128 p. Simpósio sobre Instrumentação Geotécnica de Campo – SINGEO'90", ABMS, Rio de Janeiro, 1990.

LADD, C. C.; FOOT, R. **New design procedure for stability of soft clays**. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*. ASCE, vol. 100, 1974. pp. 763-786.

LADEIRA, J. E. R. **Avaliação de Segurança em Barragem de Terra, Sob o Cenário de Erosão Tubular Regressiva, por Métodos Probabilísticos. O Caso UHE São Simão**. 2007. 230 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) Escola de Engenharia. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2007.

LIMA, L. M. K. **Retroanálise da formação de um depósito de rejeitos finos de mineração construído pelo método subaéreo**. 90 p. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2006.

MACHADO, William Gladstone de Freitas. **Monitoramento de barragens de contenção de rejeitos da mineração**. 155p. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Minas, São Paulo, 2007.

SAMPAIO, Valéria Nader. **Desastres em barragens e o novo marco na mineração**. Synergia Consultoria, 17 set. 2021. Disponível em: <https://www.synergiaconsultoria.com.br/fique-por-dentro/desastres-em-barragens-e-o-novo-marco-na-mineracao/>. Acesso em: 8 ago. 2024.

SECRETARIA DE ESTADO DE MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL. **Deliberação Normativa COPAM nº 62**, de 17 de dezembro de 2002. 62. ed. Estabelece diretrizes para o gerenciamento de resíduos sólidos. Minas Gerais, 2002. 4 p. Disponível em: <https://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNor>

ma=5008. Acesso em: 05 maio 2024.

SLIDE2. Versão 9.034. [S. l.]: Rocscience, 2023. 1 CD.

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

SOARES, E. P. – **Análise de Estabilidade de um Talude da Mina de Águas Claras – MBR: Uma Visão Probabilística**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, 1996, 66p.