

A importância da instrumentação e do monitoramento geotécnico para garantir a segurança de estruturas de barragens de rejeito.

Ivana Carine de Oliveira Pinheiro, Luma Gabriela Pereira de Souza
ivanacarine80@gmail.com, luma.16g@gmail.com

Professora orientadora: Ma. Tatiana Spinola

Professora de curso de Engenharia Civil

Resumo

Motivado pelos acidentes em barragens de mineração que ocorreram no Brasil e no mundo, o presente artigo foi elaborado por meio de pesquisas bibliográficas com o tema relacionado às barragens de rejeito e seu monitoramento, e tem por finalidade revisar e contribuir com conhecimento atualizado sobre contenção de rejeito, enfatizando a importância e a necessidade de melhoria contínua das condições de segurança e o acompanhamento das barragens brasileiras. Visto que na cidade de Brumadinho e Mariana, em Minas Gerais, ocorreram acidentes em barragens que causaram danos à população à sua volta, bem como danos ambientais e econômicos ao empreendedor, a pesquisa mostra os objetivos básicos da instrumentação e suas características técnicas, traz a metodologia construtiva de estruturas de rejeitos e seu monitoramento através da auscultação e inspeções visuais regulares com propósito de acompanhar e identificar previamente possíveis comportamentos que impactam negativamente a segurança da estrutura das barragens. Por fim, conclui-se que a pesquisa contribuiu com o conhecimento técnico voltado à segurança de barragens de rejeito.

Palavras-chave: Barragem. Inspeção. Instrumentação. Monitoramento. Segurança.

1. INTRODUÇÃO

De acordo com o Manual de Segurança e Inspeção de Barragens (BRASIL 2002), o conceito de barragem consiste em uma estrutura que tem por finalidade criar um reservatório de água oriunda de rio ou qualquer outro fluído. A barragem de rejeito tem o objetivo de conter rejeito e/ou materiais estéreis provindos de processos industriais de mineração, inclusive a água utilizada no beneficiamento.

No decorrer dos anos, com a crescente alta na produção da indústria mineira, notou-se um aumento significativo no volume de materiais gerados através das extrações dos minerais, resultando na necessidade de construções de estruturas para a estocagem destes. O armazenamento dos resíduos deve ser realizado a partir de projetos contendo informações e estudos sobre características geotécnicas, viabilidade de lançamentos do material, questões hidrológicas, geológicas, ambientais, topográficas, sociais, etc. Mediante isso, entende-se que, os resíduos gerados, quando mal gerenciados, podem ocasionar acidentes que resultam em impactos financeiros, ambientais e sociais negativos e até mesmo perda de vidas, como ocorreu no Brasil, com o rompimento das barragens em Minas Gerais, na cidade de Mariana em 2015 e em Brumadinho no ano de 2019.

Diante de tais acontecimentos, entende-se que é necessário haver um foco maior e a atenção direcionada especificamente para o tratamento, armazenamento e principalmente, controle do sistema de monitoramento e inspeções geotécnicas das

estruturas que armazenam o rejeito de minério, visando assim maximizar a segurança não só da barragem, mas, de todos que estão próximo a ela e assim, evitando possíveis falhas estruturais (FRANÇA 2023).

Segundo Nelson et al. (2021), para compreender melhor o comportamento estrutural no período pré - construção, operacional e no processo de fechamento e descaracterização da estrutura, a existência do monitoramento possui um papel essencial para mitigar os riscos impostos à barragens, dessa forma, ao projetá-las, vários parâmetros devem ser assumidos e a equipe técnica responsável precisa compreender e interpretar como está seu comportamento através da ajuda de vários instrumentos inseridos em seu corpo e também a partir de inspeções visuais geotécnicas realizadas. O objetivo maior da instrumentação é adaptar as premissas do projeto ao método construtivo; a ela assume características de controle de segurança, identificando previamente possíveis comportamentos estranhos que impactam negativamente a segurança da estrutura das barragens ao longo da sua vida útil.

Em consideração a isso, o artigo tem por objetivo apresentar as finalidades básicas da instrumentação e suas características técnicas, bem como a metodologia construtiva da barragem de rejeitos e seu monitoramento através da auscultação da instrumentação, a fim de identificar previamente possíveis comportamentos estranhos que impactam negativamente a segurança da estrutura das barragens.

2. DESENVOLVIMENTO

Ao longo dos anos, a população brasileira tem aumentado a cada dia, e é imprescindível que a economia do país acompanhe este crescimento. Dentre as diversas áreas que compõem a economia brasileira tem-se a exportação de minério. Para Thomé e Passini (2018), o sistema financeiro brasileiro gira em torno da indústria mineradora. Conforme ocorre o aumento na produção de minérios, há um crescimento econômico brasileiro, ou seja, a extração de minérios, agrega positivamente em aspectos econômicos, pois contribui com diversos pilares econômicos como o PIB nacional, geração de empregos diretos e indiretos, arrecadação de impostos, entre outros.

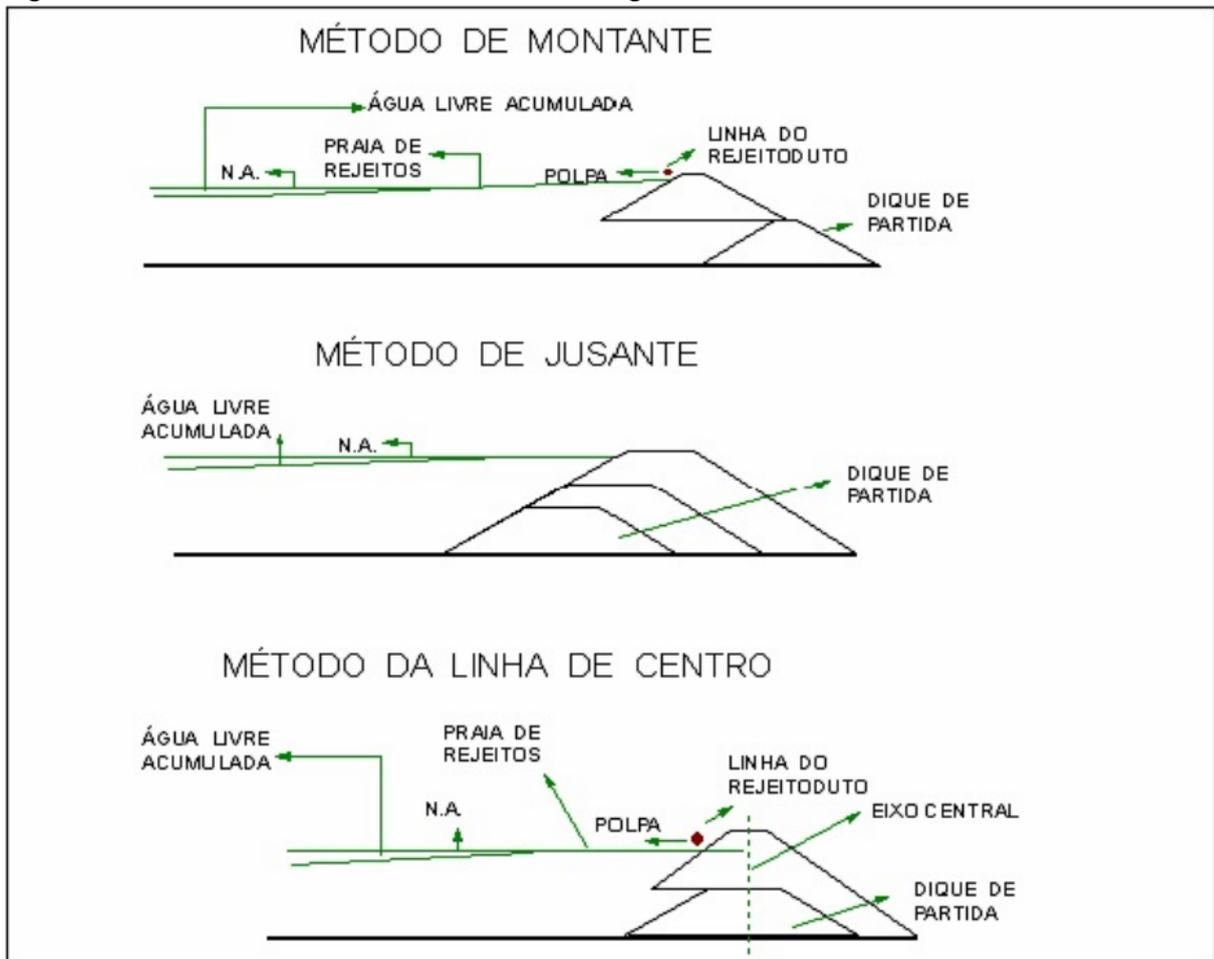
As atividades da indústria de mineração são responsáveis pelo surgimento das barragens de rejeito no Brasil, as quais tiveram seu início há cerca de 300 anos com a Mina de Passagem, uma mina que tem referência histórica no Brasil e está localizada sob o Ribeirão do Carmo, a sudoeste da capital do estado de Minas Gerais, entre a estrada de Ouro Preto e Mariana. Vale ressaltar que as atividades da Mina de Passagem ocorriam até antes da corrida do ouro no oeste americano (ÁVILA E SAWAYA, 2011).

Barragem de rejeito consiste em uma estrutura de barramento para estocagem de materiais sólidos e água oriundos do beneficiamento de minérios. A estrutura serve também para conter água formando um reservatório que retorna para o tratamento do minério, formando um processo cíclico (PINHEIRO, 2011). Há várias características de rejeito e elas podem variar conforme o tipo mineral que está sendo tratado e suas características químicas, físicas e geotécnicas. A extração pode ser de ouro, ferro, cobre, entre outros minérios. O armazenamento correto desse material é de suma importância pois garante segurança à estrutura, à população próxima a ela e evita danos ambientais.

Sabe-se que a disposição de rejeitos pode ocorrer de diversas formas e a sua construção é realizada em etapas, seguindo o ritmo de lavra conforme é produzido o

rejeito, é realizado o empilhamento deste (Cardozo et. al, 2016). Há três métodos construtivos que diferenciam as barragens: (I) Método a Jusante, (II) Método a Montante e (III) Método a Linha de Centro. Vale ressaltar que está proibida a construção de barragens de mineração através do método a montante, bem como determina sua descaracterização em diferentes prazos a partir da Lei 14.066/2020 que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB). Para entendermos melhor cada tipo de empilhamento mencionado anteriormente, veremos na figura a seguir o que os diferencia:

Figura 01: Métodos de alteamento em barragens.



Fonte: Espósito, 2000.

Para todos os métodos construtivos de barragens que estão em operação, construção ou descaracterização, é extremamente relevante que a equipe técnica responsável pelo empreendimento realize o acompanhamento severo da estrutura para identificar, previamente, possíveis modos de falhas que, se não tratados e corrigidos, levariam à ruptura iminente de uma barragem.

Além disso, ressalta-se que deve haver atendimento aos requisitos legais, impostos por leis, normas e pela Agência Nacional de Mineração - ANM, o órgão responsável por fiscalizar barragens de mineração. A agência realiza inspeções com periodicidade, variando de acordo com a classificação da barragem e seu Dano Potencial Associado, exigindo anualmente as declarações de conformidade e operacionalidade. A documentação que consolida os atos de serviços voltados à segurança de barragens está dividida em cinco volumes, conforme a resolução nº

95: O Volume I deve conter informações gerais da estrutura; O Volume II, os planos e procedimentos; Volume III, registros e controles; Volume IV Plano de Ação de Emergência para Barragens de Mineração (PAEBM); e Volume V, o Processo de Gestão de Risco (PGRBM).

Através dos registros e controles presentes no Volume III, há o acompanhamento dos instrumentos, e a partir dessa avaliação, é possível se obter a análise de estabilidade dos taludes. Para (Henryk, 2020 p. 03) “A estabilidade de um talude está ameaçada quando as forças que tendem mover a estrutura são maiores que as forças que tendem mantê-lo em estado de inércia.” Diante disto, faz-se necessário estudar e aplicar a instrumentação em barragens, pois é através dela que conseguimos realizar a investigação dos taludes internamente, verificando se há percolação de água ou deslocamento.

Além do monitoramento por intermédio da instrumentação, existem as inspeções visuais que, de acordo com Menescal et al., (2005), permitem detectar possíveis anomalias que afetam diretamente a segurança da barragem através do acompanhamento de desempenho das estruturas, fundação, construção e operação. Caso encontre irregularidades, se identificadas precocemente, é possível garantir que ocorra o tratamento delas através de ações corretivas, conforme a necessidade de cada uma delas. Vale ressaltar que, perante a Lei nº 14066, cabe ao empreendedor elaborar o Plano de Segurança de Barragem, mantê-lo atualizado e disponível para garantir que o controle e a segurança da barragem esteja ocorrendo de forma correta. Diante disso, veremos a seguir, alguns tipos de instrumentação, sua importância, e como é indispensável a inspeção visual regular.

2.1 Instrumentação

A instrumentação geotécnica surgiu entre 1930 e 1940. Para Marcus (2017), a instrumentação permite a coleta e a realização do registro e processamento dos dados por intermédio das leituras dos instrumentos instalados em locais estudados e pré-determinados por pontos específicos na barragem, comumente, estão nas fundações ou em aterros.

Santos, (2017) cita em sua obra que o registro mais antigo do uso da instrumentação para monitorar os movimentos de terra aconteceu em 1853, quando foram anotadas as medições topográficas na barragem em Catarina de Grobois, na França, para observar os deslocamentos da crista. Contudo, em 1970, o Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo (IPT) e o Laboratório Central da Companhia Energética de São Paulo (CESP) dentre outros passaram a criar uma diversidade de instrumentos substituindo muitos instrumentos que eram importados, possibilitando à instrumentação com melhores padrões de qualidade, das muitas barragens construídas na época.

Silveira, (2006) ressaltar que a instrumentação é utilizada para medição, e que em cada medida coletada podem ocorrer erros e incertezas. CADETE, Ana et al. (2023) pesquisaram sobre a instrumentação e concluíram que é fundamental a presença dela em cada etapa da barragem e no processo de descaracterização, pois através da análise de dados e leituras dos instrumentos instalados é possível obter as ações relacionadas ao plano de descaracterização de maneira mais assertiva, como também possibilita um comparativo do comportamento real da obra com modelo teórico mostrado em projeto, alcançando o projeto final de forma otimizada e evitando gerar danos econômicos ao meio ambiente e à população.

Através do Manual de Segurança e Inspeção de Barragens (BRASIL, 2002) foi possível entender que toda barragem deve possuir instrumentos de acordo com o seu porte e sua classificação quanto ao risco. A realização das leituras tem de acontecer periodicamente. Mesmo que todos os instrumentos possuam valores calculados de controle ou limites vinculados a qualquer sistema de aquisição, processamento e transmissão dos dados, os mesmos devem ser mantidos em boas condições de funcionamento.

Sabe-se que existem diferentes tipos de instrumentos capazes de medir nível de água e deslocamento, por exemplo. Os principais utilizados são os Indicadores de Nível de Água (INA's), Piezômetros, Tiltmeters, Marcos Superficiais, Inclinômetros, Medidores de Vazão e Pluviômetros. Será apresentado a seguir a funcionalidade, características, especificações técnicas e manuseio destes equipamentos.

2.1.1 Medidores de nível de água:

Comumente utilizado em barragens, os medidores de nível de água são instrumentos responsáveis por captar o nível de água que está presente tanto na estrutura quanto em lençóis freáticos, bem como realiza o monitoramento piezométrico da poropressão. Para Cruz (2004), o processo de instalação de um medidor de nível de água é simples, após os furos de sondagens ou de poços, deve-se realizar a instalação de um tubo de PVC perfurado, coberto por material drenante e filtrante e deve ser realizada a vedação entre o espaço existente entre o furo e tubo, para finalizar, aplica-se uma proteção em torno do instrumento com campanas, por exemplo, para evitar danos ao instrumento instalado. Segundo Cerqueira (2017), tais instrumentos podem ser nomeados de Piezômetros e Indicadores de Nível de Água (INA'S). Sua leitura ocorre por meio de um "Pio", um cabo elétrico com medidas e ao descer pelo tubo e encostar na água, emite um som. Conforme a imagem a seguir:

Figura 02: Modelo de Indicador de Nível de Água.



Fonte: Autoras, 2023.

2.1.2 Piezômetros:

Os piezômetros têm como função principal determinar a pressão neutra em maciços de terra ou rochas. Ele está entre os instrumentos mais importantes para a segurança de barragens, e apresenta diferentes modelos, tendo como objetivo atender a cada circunstância diferente. Santos, (2019) cita em sua obra que dentre os principais modelos, estão o piezômetro tubo aberto, pneumático, hidráulico, elétrico de resistência e o elétrico de corda vibrante. A escolha do modelo a ser utilizado vai ocorrer de acordo com as necessidades especificadas no projeto.

O piezômetro tubo aberto pode também ser conhecido como Casagrande e suas principais vantagens estão relacionadas à confiabilidade, durabilidade, sensibilidade, possibilidade de verificação do seu desempenho por meio de ensaios de recuperação do nível d'água e estimativa do coeficiente de permeabilidade do solo em que se encontra instalado o instrumento. Além disso, este piezômetro apresenta vantagens econômicas e facilidade na instalação, no entanto, algumas desvantagens deste instrumento associa-se ao alto tempo de resposta em relação a materiais com baixo valor de permeabilidade e também pode possuir algumas interferências na praça de construção, o que não o torna indicado para a determinar as poro-pressões no período de construção pois não permite a medição de pressões negativas (SANTOS 2019).

A operação dos pneumáticos ocorre pelo equilíbrio das pressões atuantes em um diagrama flexível. De um lado age a água que tem sua pressão mensurada, e do outro atua um gás que tem pressão variável, conhecida por um manômetro. Sua vantagem é não sofrer interferências na área onde está implantado, com leitura centralizada, simples e rápida, não havendo limitações de área de localização (MARTINS 2016). Contudo Santos, (2019) enfatiza que os pneumáticos têm insensibilidade a descargas atmosféricas, gerando um curto tempo de resposta comparado aos outros. Assim, outra limitação está na necessidade de recarregamento periódico das ampolas de gás comprimido e a menor confiabilidade para medidas de pressões neutras negativas.

Silveira, (2006) descreve que os piezômetros hidráulicos foram elaborados para instalação na fundação e no aterro de barragens de terra durante a construção. Em pesquisas realizadas por Santos, (2019) esses piezômetros são indicados por vários profissionais da engenharia como os mais eficientes para realizar medições de poro-pressão, tanto na etapa da construção como na fase operacionalidade. Os pontos positivos desse instrumento é a simplicidade para manuseio, alto índice de confiabilidade, possui tempo ágil de resposta, mesmo presente em solos de baixa permeabilidade, e as desvantagens estão atreladas a limitações em lugares onde há pressão subatmosférica. Além disso, não é indicado para cotas de instalação distantes da que está instalada o terminal de leitura.

Martins, (2016) ressalta por meio de pesquisas realizadas que os piezômetros elétricos tem por finalidade a obtenção das pressões neutras e subpressões em maciços de terra, bem como em taludes e fundações. O corda vibrante também é um piezômetro elétrico, que tem em seu funcionamento a medição da pressão intersticial da água que onde passa por uma pedra porosa direto para um diafragma interno, assim sendo medido por um transdutor a deflexão, um ponto interessante sobre o instrumento é que ele vem substituindo o de piezômetros de Casagrande (SANTOS 2019). Nas figuras a seguir, veremos um exemplo de piezômetro manual e elétrico, respectivamente.

Figura 03 E 04: Modelo de Piezômetro e Piezômetro Elétrico.



Fonte: Autoras, 2023.

2.1.3 Marcos Superficiais:

Outro tipo de instrumento capaz de realizar o monitoramento de barragens, é o marco superficial, este é responsável pela medida de deslocamentos da estrutura. De acordo com Silveira, (2006) a leitura desse instrumento é realizada a partir da instalação de marcos de referências topográficas fixas e a partir deste ponto inicial é realizada a captura de possível instabilidade dos taludes, deslocamentos e recalques. Vale ressaltar que, suas leituras devem ser feitas minuciosamente para que haja precisão. No entanto, há alguns fatores que impactam diretamente na captura do comportamento da estrutura, como a extensão da distância, experiência da equipe topográfica, proteção em torno dos instrumentos, como por exemplo, há na figura abaixo.

O Sistema Nacional de Informações Sobre Segurança de Barragens - SNISB, ressalta a importância do cuidado no processo de instalação dos marcos superficiais para evitar que haja deslocamento no tubo, e conste na leitura a presença de recalque, ou seja, deve-se atestar que o tubo está fixo, sem haver movimentação.

Figura 05: Modelo de Marco Superficial.



Fonte: Autoras, 2023.

2.1.4 Tiltmeters:

Embora pouco utilizados em monitoramento geotécnico, os "tiltmeters" possuem sensores de deslocamento e têm características simples que medem a inclinação em relação ao campo gravitacional, podendo ser uniaxiais, biaxiais ou triaxiais, a depender da forma que for aplicado. Unindo-os com os marcos superficiais, são capazes de reportar alertas de deslocamento e convocar equipes de levantamento topográfico, por exemplo (CAMPOS 2020). A figura a seguir, mostra um exemplo de tiltmeter instalado em uma barragem da Bahia:

Figura 06: Modelo de Tiltmeter.



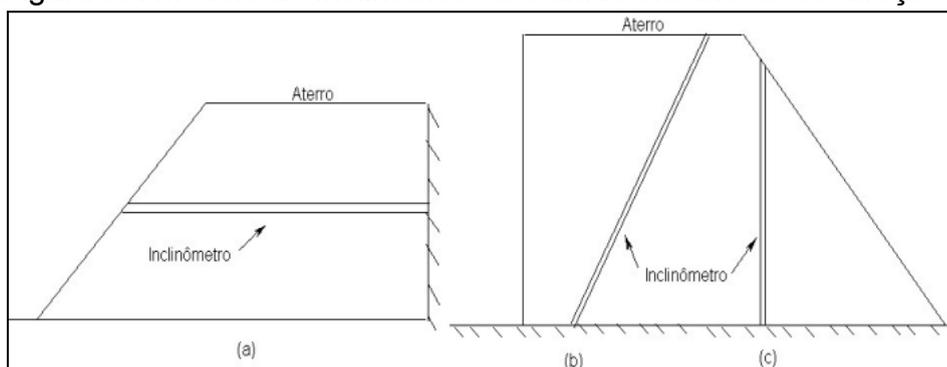
Fonte: Autoras, 2023.

2.1.5 Inclínômetro:

Os inclinômetros são instrumentos utilizados para monitorar a magnitude, taxa, direção e profundidade de deslocamentos dos taludes, e são frequentemente utilizados no monitoramento de barragens. Os novos lançamentos desse instrumento foram desenvolvidos a partir de um aparelho idealizado em 1952 por S. D. Wilson, na Universidade de Harvard, e sua comercialização teve início no final da década de 1950 pela Slope Indicator Company (BRANCO et al.,2023).

Silveira (2006), descreve-o de maneira simples, sendo um torpedo à prova d'água, dotado de um pêndulo interno, o qual é abaixado dentro de um tubo-guia aproximadamente vertical, medindo os deslocamentos angulares a intervalos igualmente espaçados e segundo direções preestabelecidas. Os torpedos ficam localizados dentro de tubos guias, que podem possuir diferentes diâmetros. Na instalação dos tubos deve prestar atenção para que sejam instalados da forma mais verticalmente possível, tornando suas leituras com maior precisão. Já o tubo guia pode ser instalado na vertical ou horizontal (conforme a figura 07), inclinado ou não, que não interfere no fornecimento dos dados, pode haver diferença na forma como a leitura é feita (SANTOS 2019).

Figura 07: Modelo de Inclínômetro instalado em diferentes direções.



Fonte: Fonseca, 2003.

2.1.6 Medidores de vazão:

Godke, (2014) cita que os medidores de vazão são instrumentos com o objetivo de medir as vazões de drenagem através da fundação e as infiltrações através do concreto, podendo ser do tipo triangular (com ângulo de vértice igual a 60° ou 90°) ou trapezoidal .

Silveira, (2006) ressalta que existem aproximadamente três tipos de medidores de vazão: o face plana largamente empregados, medidor triangular ou normalmente conhecido como passagem em V, o medidor retangular e o medidor Cipolletti (trapezoidal). Esses medidores variam somente no modelo da abertura do vertedouro. Sua instalação é feita através de uma placa metálica, com o formato escolhido, é instalada no final de um canal, sendo posicionada em sentido normal ao fluxo. Diante da instalação o líquido deve atingir a velocidade inferior a 15 cm/s ao se aproximar do medidor, o canal deve ter um comprimento 10 vezes a largura do líquido no medidor.

Algumas características do medidor é que ele deve possuir acabamento liso do lado da entrada do líquido, assim o canal de aproximação deve estar livre de sólidos e sedimentos. É recomendado também que a espessura da parede da placa do medidor não seja superior a 3,0 mm. A base de abertura do medidor deve estar

acima da superfície líquida máxima possível, do lado de jusante, para evitar que o medidor fique submerso ou trabalhe afogado (SILVEIRA, 2006). A figura 08 mostra o modelo do relógio de um medidor de vazão a ser instalado.

Figura 08: Modelo de Relógio de Medidor de Vazão.



Fonte: Autoras, 2023.

2.1.7 Pluviômetro:

Segundo Moreira, (2022) os pluviômetros (figura 09) são instrumentos que monitoram a precipitação e auxiliam nas leituras dos instrumentos devido ao seu comportamento mediante a chuva. Eles são instalados em pontos estratégicos e tem por finalidade capturar e medir a quantidade de chuva, e assim auxiliar na análise do comportamento da instrumentação.

Figura 09: Modelo de Pluviômetro.



Fonte: Autoras, 2023.

2.1 Automação dos Instrumentos

Como bem nos assegura Silveira (2006), várias recomendações foram sugeridas pelos americanos visando melhores resultados no processo de implantação de automação de instrumentos após a experiência de 20 anos que tiveram uma série de fracassos ao aplicar o sistema de automação, como foi citada na publicação do U.S Committee on Large Dams 1995. Entende-se que tornar os instrumentos automatizados requer cautela, pois, embora haja uma resposta da instrumentação em tempo real capaz de realizar todas as tarefas de medição e de controle, pode apresentar defeitos que causam interferências nos dados resultantes.

A manutenção destes equipamentos eletrônicos têm um custo elevado, e cabe ao empreendedor definir a automação da estrutura conforme as suas necessidades operacionais e ao valor gasto em aquisição de instrumentos, melhoria na coleta e transmissão de dados, visto que, a partir dessa automação, tem-se a necessidade de implantar um Centro de Controle, onde é realizado o gerenciamento dos dados recebidos através dos instrumentos automáticos, sendo capaz de emitir alertas sonoros, visuais e por meio de celulares.

2.2 Danos à Instrumentação

Vale ressaltar a relevância da proteção em volta da instrumentação instalada em uma barragem, tendo em vista que, quando ocorrem impactos diretos ao instrumento, conseqüentemente o mesmo pode apresentar erros na precisão das leituras e até mesmo a perda total do instrumento. Os danos ocasionados podem estar relacionados a diversos fatores, dentre eles, o vandalismo, o climático, o transporte, estocagem e manuseio incorreto dos equipamentos e veículos de terraplanagem presentes no processo de construção da estrutura, entre outros.

Portanto, toda a equipe de operação deve saber da importância dos instrumentos para a segurança da barragem, tendo consciência que deve haver uma

cautela ao se aproximar deles, garantindo que o mesmo reporte dados confiáveis e sem interrupções.

2.3 Inspeções visuais

Visto que uma estrutura de barragem pode oferecer riscos ao meio ambiente, à população a jusante e às propriedades circunvizinhas, se faz necessário aplicar métodos que minimizem tais perigos durante o processo de construção, operação e descaracterização, sendo estes o monitoramento através de instrumentação e inspeção visual. Quando há problemas oriundos de, principalmente, operacionalidade e estrutural, considera-se que tais acontecimentos sejam vistos em inspeções visuais (TANUS, 2018).

Para Pereira (2021), a avaliação do desempenho de uma barragem, pode ocorrer através de inspeções visuais regulares realizadas na estrutura e em torno da mesma. Alguns meios utilizados para a inspeção visual é a análise da superfície, com o objetivo de verificar a vegetação, se há ravinas ou erosões, abaulamento, depressões e orifícios, nível da água, infiltração, superfície da praia e surgências, ou seja, ocorre a avaliação não só do barramento em si, mas dos dispositivos e acessos que compõem a estrutura. Os parâmetros de fiscalização devem ser escolhidos, cujos responsáveis técnicos podem avaliar (MARTINS 2016). Entende-se que é de suma importância que ocorra a avaliação frequente.

Além disso, vale ressaltar que, as inspeções visuais regulares e análises criteriosas dos dados obtidos através das leituras devem ocorrer em conjunto e durante a vida útil da barragem (CBDB, 1996). As duas em conjunto, são um marco importante na avaliação do comportamento do barramento com seus resultados relatados e reportados, ainda que não detecte nenhuma anomalia.

2.4 Interpretação de instrumentos e inspeções.

Os instrumentos instalados no corpo da barragem possuem sensibilidade aos movimentos e à presença de água em seu entorno, portanto, é de suma importância que seja realizada a interpretação destes minuciosamente. Para Silveira (2006), a análise e interpretação das leituras dos instrumentos deve ser realizada sob responsabilidade do empreendedor, projetista ou especialista em instrumentação, ou seja, apenas os especialistas técnicos têm maior propriedade para análise e resultados dos dados coletados a partir da leitura dos instrumentos.

Para evitar alardes incoerentes, como por exemplo, após uma chuva significativa, o instrumento irá responder entrando em nível de alerta, mas não significa que a estrutura está comprometida. Silveira (2006), orienta a realizar relatórios com os dados da instrumentação e contendo suas especificações, a fim de facilitar a análise.

Este cuidado também se aplica nas inspeções visuais realizadas em campo. Um especialista em barragem, ao se deparar com uma ravina, por exemplo, não a interpreta como uma ruptura iminente, mas como uma patologia que pode e deve ser tratada.

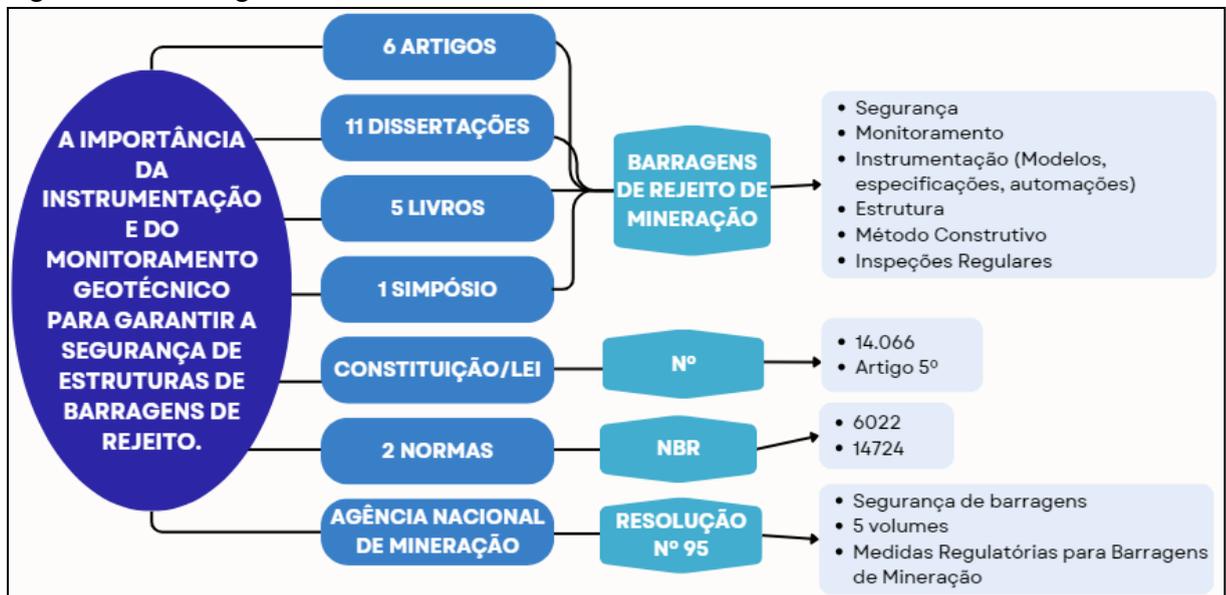
Sabe-se que, assim como deve haver o cuidado com alardes, também deve haver cautela sobre as interpretações que de fato estão indicando um futuro colapso e não estão sendo levadas em consideração. Sendo assim, vale ressaltar a importância do cuidado com a análise da estrutura e interpretação dos dados obtidos.

3. METODOLOGIA

Este artigo foi produzido por meio do estudo de pesquisas bibliográficas através de consultas a artigos, livros, simpósios e leis relacionadas ao acompanhamento de barragens de rejeito, a fim de destacar o ponto principal: a importância da utilização de instrumentação para o monitoramento geotécnico bem como das inspeções regulares visuais garantindo que haja, de fato, segurança das estruturas de barragens de rejeito.

Além disso, a partir das informações teóricas em bases científicas, obteve-se informações relacionadas aos principais instrumentos utilizados pelas indústrias de mineração, destacando seus benefícios e particularidades modo de uso. Veremos a na figura 10 o resumo dos arquivos que foram utilizados para a elaboração deste artigo:

Figura 10: Fluxograma de material de estudo.



Fonte: Autoras, 2023.

4. DISCUSSÕES

A partir dos estudos feitos, foi possível revisar, aprimorar e contribuir com o conhecimento técnico em métodos de construção, operação e segurança de barragens de rejeito de mineração, visto que há uma grande necessidade de aplicar medidas preventivas a acidentes em barragens, mitigando impactos mediante a um possível episódio. Tais impactos seriam: poluição de rios e destruição de áreas de reprodução de peixes, perda da biodiversidade, degradação de paisagem, desestabilização da fauna e flora, perda de vidas, pessoas desabrigadas e prejuízos econômicos, principalmente ao empreendedor.

Para auxiliar na segurança de contenções de rejeito em operação, ou descaracterização, além de conhecer as normas e requisitos legais que garantem a seguridade dessas estruturas, têm-se os instrumentos de monitoramento estrutural. Sabe-se que há uma particularidade em cada equipamento bem como sua funcionalidade em uma estrutura de barragem. Além disso, destaca-se o quão importante é o acompanhamento assíduo da estrutura através do monitoramento e

inspeções visuais regulares, realizadas por especialistas geotécnicos. Diante disso, foi possível obter os seguintes resultados:

Com a realização da busca científica sobre instrumentos, entende-se que há variedades de instrumentos com diferentes funcionalidades; sendo estas capazes de monitorar a posição do nível freático, a pressão da água sobre a barragem, os deslocamentos e suas tensões aplicadas ao eixo vertical e horizontal dos taludes, em profundidade e também em superfície. Caso as leituras estejam fora da faixa de nível normal, deverá ser realizado um acompanhamento rigoroso da região.

Os marcos superficiais, tiltmeters e inclinômetros são capazes de acompanhar e medir o deslocamento da estrutura em centímetros ou milímetros, ou seja, apenas a inspeção visual não seria capaz de mensurar a medida exata do deslocamento. Já os instrumentos pluviômetros, piezômetros, INA'S e medidores de vazão, realizam o rastreamento de águas presente na estrutura, oriundas da chuva, drenagem do rejeito e possíveis contribuições à sua volta.

O acompanhamento e interpretação dos dados obtidos através da instrumentação devem ser realizados de forma cautelosa e por pessoas tecnicamente especializadas, garantindo que os resultados estejam adequados e dentro dos parâmetros de segurança para o funcionamento adequado da estrutura.

As inspeções de segurança regular têm o papel de acompanhar visualmente as estruturas, com o intuito de detectar e corrigir possíveis anomalias presentes in loco que, se não tratadas corretamente, levariam ao rompimento da barragem. Essas anomalias seriam, recalques, ravinas, erosões, tocas de animais, presença de arbustos e vegetações profundas, surgências de água, etc. Quando detectadas e analisadas previamente, a equipe operacional atua no tratamento das áreas afetadas realizando correções visando o aumento da estrutura. Por isso é importante que as inspeções ocorram em conjunto com o monitoramento através da instrumentação e sejam realizadas por pessoas com conhecimento técnico.

As leis de segurança de barragens também têm uma grande importância para o aumento da estabilidade da estrutura e através delas foi possível aprender que, além do monitoramento geotécnico, o processo de construção tem um papel relevante à segurança. Com os métodos construtivos “a jusante” e “linha de centro” sendo os mais seguros e permitidos pela lei no Brasil, fica proibida a utilização do método “a montante”, sendo necessário desativar, descaracterizar este tipo de barragem e ainda assim, mantê-la monitorada durante e após esse processo.

Acrescentado-se a isso, a legislação brasileira deixa sob responsabilidade do proprietário da estrutura, assegurar e executar medidas de segurança, como o monitoramento e inspeção para análise do comportamento das barragens. Além disso, ressalta-se que, a presença da instrumentação em barragens não anula a inspeção visual regular, ambos devem ocorrer em conjunto prevendo o comportamento das barragens.

CONCLUSÕES

A segurança de barragem é um tema extremamente relevante para a indústria de mineração, portanto, é importante que haja conscientização quanto ao cuidado no processo de construção e operação de contenções de rejeitos a fim de prevenir acidentes que causam impactos sociais, econômicos e ambientais.

Com isso, o presente trabalho trouxe uma revisão detalhada sobre os tipos de instrumentações presentes em barragens de mineração, bem como seus objetivos e finalidades para a estrutura. A busca também mostrou a importância da realização

de inspeção regular geotécnica. Acrescentando-se a isso, foi possível perceber que o uso da instrumentação facilita e uniformiza os dados obtidos a partir das leituras, sendo capaz de identificar em tempo hábil possíveis eventos que comprometam a segurança da estrutura, emitindo um alerta para que haja a análise específica e, se necessário, inicie procedimentos de correção.

Também houve a descrição das principais características e utilidades de cada instrumento, sua particularidade e aplicação de acordo com a sua necessidade da área, tornando possível facilitar o processo de seletividade dos instrumentos e seus projetos de instrumentação. Conclui-se que, embora seja cauteloso, o manuseio desses equipamentos são simples devido a facilidade que os responsáveis pela atividade em campo tem, por isso, há uma boa qualidade de informações, mitigando possíveis erros.

Atualmente, há um crescente número de barragens de rejeito no Brasil, devido ao aumento da extração de minérios, demonstrando sua importância para garantir que o processo de construção, operação e reintegração ambiental ocorra de maneira segura, com o auxílio da instalação de instrumentos de monitoramento, inspeções, métodos construtivos, atendimento ao plano de segurança de barragem, etc.

O estudo também nos forneceu a compreensão sobre a evolução dos instrumentos com o passar dos anos. A tecnologia permite a resultados em tempo real, a partir da automação da instrumentação geotécnicas mostrando suas vantagens como também possíveis falhas.

Diante disso, pode-se concluir que é de suma importância realizar o estudo e a implantação de instrumentos de monitoramento em barragens de rejeito. Além disso, vale ressaltar que realizar o acompanhamento rigoroso de estruturas de disposição de rejeitos através de inspeções visuais geotécnicas e auscultação, mas não se limitando a isso, garante a segurança não somente da barragem, mas da população adjacente, assegurando que está sendo cumprido o que afirma o artigo 5º da Constituição Federal Brasileira, que garante ser um direito inviolável a proteção à vida. Por fim, acredita-se que a junção da instrumentação e a realização de inspeções visuais em estruturas de contenção de rejeito aumentam a segurança de todos os envolvidos na localidade onde as barragens encontram-se instaladas.

AGRADECIMENTOS

Queremos agradecer primeiramente a Deus, pois sem Ele nada somos e nada disso seria possível. Em diversos momentos a nossa fé nEle nos sustentou, Ele foi nosso companheiro nessa estrada difícil e segurou a nossa mão em cada um deles. Obrigada meu Deus por todo o apoio e força que nos deste.

Eu Luma, sou grata aos meus pais Josy e Claudio, por todo apoio e incentivo durante a minha caminhada de estudos, por nunca terem desistido de mim e acreditado no meu potencial. Agradeço ao meu irmão Luiz e a minha cunhada Debora, vocês foram o meu maior exemplo de dedicação e perseverança nos estudos. Também externo minha gratidão aos meus avós Davino, Renilde, Maria Virginia e Lourdes Maria que de várias formas, também contribuíram para que esse sonho se tornasse realidade e ao meu avô Jose Anchieta (in memorian), que não pôde estar presente fisicamente neste momento tão incrível da minha vida. Sou grata pela vida da minha dupla Ivana, obrigada por tamanha dedicação e apoio durante a nossa trajetória de estudo que foi repleta de muitos desafios, e com certeza, ter você como amiga fez com que esses cinco anos fossem mais leves e divertidos.

Eu Ivana, quero agradecer a minha mãe Iraci Carolina pelas palavras sábias de apoio, incentivo e por não me deixar desanimar nesse momento, aos meus irmãos Ivone, Natanael e Adalberto pelo companheirismo e por acreditarem sempre no meu melhor. Agradeço também a Luma Gabriela pela parceria e total empenho nesse trabalho, fazendo a trajetória de criação se tornar divertida e prazerosa como também por sua fiel amizade nesses anos de estudo, e por me fortalecer nos momentos de tristeza me fazendo acreditar que tudo daria certo.

Agradecemos ainda todos professores pelos ensinamentos prestados a nós, a nossa orientadora Tatiana por nos auxiliar na produção deste artigo, aos nossos colegas acadêmicos que se esforçaram juntamente conosco nessa trajetória. E a empresa mineradora da Bahia que nos permitiu conhecer pessoalmente os instrumentos instalados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO. **Resolução nº 95, de 7 de fevereiro de 2022**: consolida os atos normativos que dispõem sobre segurança de barragens de mineração. Brasília, DF: ANM, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/ptbr/assuntos/barragens/legislacao/resolucao-95-2022.pdf>. Acesso em: 14 nov. 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6022**: informação e documentação - artigo em publicação periódica técnica e/ou científica - apresentação. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14724**: informação e documentação - trabalhos acadêmicos - apresentação. 3. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

ÁVILA, J.P. SAWAYA M. As barragens de rejeitos no Brasil: sua evolução nos últimos anos, In: MELLO, M.F (Coord.). **A história das barragens no Brasil, Séculos XIX, XX e XXI**: cinquenta anos do Comitê Brasileiros de Barragens. Rio de Janeiro: CBDB, 2011. p,374-400.

BARRAGENS, COMITÊ BRASILEIRO DE GRANDES. **Auscultação e Instrumentação de Barragens no Brasil**. II Simpósio sobre instrumentação de Barragens, v. 1, 1996.

BRANCO, Rafael et al. **MONITORAMENTO DE TALUDE ROCHOSO NA UHE SINOP UTILIZANDO INCLINÔMETROS**, 2023.

BRASIL. Presidente da República. **Lei nº 14.066, de 30 de setembro de 2020**. Cria a Agência Nacional de Mineração (ANM); extingue o Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM); Altera a Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010, que estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), a Lei nº 7.797, de 10 de julho de 1989, que cria o Fundo Nacional do Meio Ambiente (FNMA), a Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, e o Decreto-Lei nº 227, de 28 de fevereiro de 1967 (Código de Mineração). Brasília, DF: Presidência da República, 2020. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/lei/l14066.htm. Acesso em: 21 nov. 2023.

Brasil. [Constituição (1988)]. **Constituição da República Federativa do Brasil** [recurso eletrônico] : texto constitucional promulgado em 5 de outubro de 1988, com as alterações adotadas pelas Emendas constitucionais nºs 1/1992 a 128/2022, pelo Decreto legislativo nº 186/2008 e pelas Emendas constitucionais de revisão nºs 1 a 6/1994. -- 62. ed. -- Brasília : Câmara dos Deputados, Edições Câmara, 2023. -- (Série legislação ; n. 1).

CADETE, Ana et al. **PROJETO DE INSTRUMENTAÇÃO COMPLEMENTAR NA DESCARACTERIZAÇÃO DE BARRAGENS DE REJEITO**—ESTUDO DE CASO.

CAMPOS, Renan Landim et al. **Estado da Arte em Monitoramento Geotécnico de Deslocamento para Barragens e Estruturas de Mineração.**

CARDOZO, F. A. C. Cordova, D. P., Zingano, A.C., Galli, B., & Penâ, F. P. (2016) **Métodos Construtivos de Barragens de Rejeito: Crítica ao Método de Montante.** Anais do Congresso Brasileiro de Geologia, Porto Alegre, RS Brasil, 48.

CERQUEIRA. **Critérios de Projeto para Instrumentação Piezométrica de Diversas Estruturas Geotécnicas em Mineração.** Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, p. 3. 2017. DISSERTAÇÃO

CRUZ, Paulo Teixeira da. **100 Barragens brasileiras.** 2. ed. [S. l.]: Oficina de textos, 2004.

DIAS, Marcus Vinícius Lima. **Avaliação da Segurança de Barragens por meio da Análise de Instrumentação Geotécnica.** 2017. 60p. (Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017. DISSERTAÇÃO

ESPÓSITO, T. Metodologia Probabilística e Observacional aplicada a Barragens de Rejeito construídas por Aterro Hidráulico – Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Brasília, Brasília, DF, 2000.
FRANÇA, Thainá Rainho do Sacramento. **Monitoramento geotécnico em estruturas de disposição de rejeitos.** 2023. 88 f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2023.

FONSECA, Alessandra da Rocha. **Auscultação por instrumentação de barragens de terra e enrocamento para geração de energia elétrica - Estudo de caso das barragens da UHE São Simão.** 2003. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Universidade Federal de Ouro Preto, [S. l.], 2003.

GODKE, Bruna. **Proposta de processo de monitoramento do comportamento das fissuras térmicas em barragens de concreto gravidade:** um estudo de caso. 2014.

MARTINS, Luís Fernando. **Barragens de rejeitos de mineração no Brasil: principais tipos de barragens, instrumentação e monitoramento.** Orientadora: Gisele Ribeiro de Barros Yamanouth. 2016. 98 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Geologia de Minas e Técnicas de Lavra a Céu aberto) -

Faculdade de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2016.

Manual de Segurança Inspeção de Barragens - Brasília: Ministério da Integração Nacional, 2002. 148p.

MOREIRA, IARA FERNANDES; NEUTRA, MENSURAÇÃO E. **AVALIAÇÃO DA PRESSÃO; BARRAGENS, E. M. UNIDADE ARAXÁ ENGENHARIA DE MINAS.**

PEREIRA, João Marcelino Lacerda. **Análise sobre a Política Nacional de Segurança de Barragens com ênfase nos critérios de monitoramento/instrumentação.** 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Guarapuava, 2021. Disponível em: http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/26071/1/GP_COECI_2021_1_15.pdf. Acesso em: 15 nov. 2023.

PINHEIRO, Mário Cicareli. **Diretrizes para Elaboração de Estudos Hidrológicos e Dimensionamentos Hidráulicos em Obras de Mineração.** Minas Gerais. 2011.

RASKOVISCH, Henryk Cassio dos Santos. Conceitos, Causas, Análise de Estabilidade e Risco com Possíveis Soluções para Obras de Contenção. **Boletim do Gerenciamento**, [S.l.], v. 16, n. 16, p. 1-9, jul. 2020. ISSN 2595-6531. Disponível em: <<https://nppg.org.br/revistas/boletimdoGerenciamento/article/view/419>>. Acesso em: 15 nov. 2023.

SANTOS, Laryssa Cortes. **Estudo sobre a instrumentação de barragens de terra e rejeitos.** 2019. 60 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019.

SILVA, M. B. F. A.; FILHO, F. C. da S. Avaliação de segurança em barragem por inspeção visual: estudo de múltiplos casos no Estado do Ceará. **Revista Tecnologia**, [S. l.], v. 34, n. 1/2, p. 33–45, 2013. Disponível em: <https://ojs.unifor.br/tec/article/view/4490>. Acesso em: 15 nov. 2023.

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

SNISB. **Sistema Nacional de Informações Sobre Segurança de Barragens.** [S. l.]. Disponível em: <http://www.snisb.gov.br/portal/snisb>. Acesso em: 16 nov. 2023.

TANUS, H. M. **Importância da inspeção na prevenção de falhas em barragens: estudo de caso.** Monografia de Conclusão de Curso – Escola Politécnica – Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ, 2018. Orientado pelo Prof. Jorge Santos.

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

ZUCHERATTO JÚNIOR, Nelson Luiz. **Revisão bibliográfica sobre segurança em barragens de terra por meio de instrumentação geotécnica.** 2021. 46 f. Monografia (Graduação em Engenharia de Controle e Automação) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2021.