

Instrumentação Geotécnica em Estruturas de Disposição de Rejeitos: Aplicações e Relevância

Thainá Rainho do Sacramento França
Engenheira Geotécnica, Pimenta de Ávila Consultoria, Belo Horizonte, Brasil,
thaina.franca@pimentadeavila.com.br

Jéssica Pereira Duarte
MSc. em Geotecnia, Pimenta de Ávila Consultoria, Belo Horizonte, Brasil,
jessica.duarte@pimentadeavila.com.br

RESUMO: Atualmente, várias ferramentas são utilizadas no controle da segurança de barragens nas fases de execução, operação e manutenção. O monitoramento por meio da instrumentação geotécnica é uma dessas ferramentas e assume diversas finalidades, a depender da etapa da obra. O presente estudo explora a relevância do monitoramento geotécnico em estruturas de disposição de rejeitos na mineração, proporcionando uma análise da aplicação, limitações e importância dos sistemas de monitoramento geotécnico. Além disso, correlaciona as variáveis de medição com os instrumentos, os principais modos de falha e a evolução e as tendências da instrumentação geotécnica. A metodologia empregada inclui uma revisão bibliográfica abrangente da instrumentação, bem como das legislações e normas brasileiras relacionadas ao monitoramento e aos modos de falha. Por fim, a pesquisa apresenta a correlação entre os modos de falha, as medidas de controle e a instrumentação geotécnica. Assim sendo, possibilita entender o propósito da instrumentação no monitoramento geotécnico, com o intuito de demonstrar a importância na segurança e na prevenção de acidentes, compreendendo a relação entre os tipos de instrumentos, as variáveis a serem monitoradas e os modos de falha.

PALAVRAS-CHAVE: Monitoramento Geotécnico; Instrumentação Geotécnica; Barragens; Modos de Falha.

ABSTRACT: Currently, several tools are used to control dam safety during the construction, operation, and maintenance phases. Monitoring using geotechnical instrumentation is one of these tools and serves various purposes, depending on the stage of the project. This study explores the relevance of geotechnical monitoring in mining tailings disposal structures, providing an analysis of the application, limitations and importance of geotechnical monitoring systems. In addition, it correlates the measurement variables with the instruments, the main failure modes and the evolution and trends of geotechnical instrumentation. The methodology employed includes a comprehensive bibliographic review of instrumentation, as well as Brazilian legislation and standards related to monitoring and failure modes. Finally, the research presents the correlation between failure modes, control measures and geotechnical instrumentation. Therefore, it allows understanding the purpose of instrumentation in geotechnical monitoring, aiming to demonstrate its importance in safety and accident prevention, comprehending the relationship between instrument types, monitored variables, and failure modes.

KEYWORDS: Geotechnical Monitoring; Geotechnical Instrumentation; Dams; Failure Modes.

1 INTRODUÇÃO

A instrumentação geotécnica desempenha um papel fundamental no controle da segurança de barragens, assumindo variadas finalidades conforme a etapa da obra. Segundo Silva (2022), durante a construção, visa ajustar as premissas do projeto ao método construtivo, verificar e validar os pressupostos do projeto e aferir se o desempenho das estruturas projetadas está conforme o esperado. Posteriormente, assume um caráter de controle de segurança, identificando variações no comportamento estrutural, hidráulico, geotécnico e operacional ao longo da vida útil e fechamentoda barragem.

Segundo Silveira (2013), os parâmetros a serem medidos em uma barragem englobam a pressão da água nos poros, a pressão da água na rocha de fundação, as pressões totais, os recalques, os deslocamentos horizontais, as cargas e a tensão nos elementos estruturais, a temperatura, as vazões de drenagem, entre outros.

A norma brasileira NBR 13028 (ABNT, 2017) determina que os projetos de estruturas de disposição de rejeitos devem incluir a instalação de instrumentos para controlar os níveis de água e poropressão no interior do maciço da barragem, suas fundações e deformações, além de monitorar as vazões da drenagem interna. Por conseguinte, ao projetar barragens de rejeitos, diversos fatores e parâmetros devem ser considerados.

Cavalcante (2023), aborda em sua pesquisa que a instrumentação geotécnica é parte essencial da engenharia geotécnica, sendo fundamental para a análise, monitoramento e controle de estruturas e ambientes subterrâneos. Complementa também que a partir de dispositivos específicos, fornece dados críticos sobre estabilidade, deformações, pressões e fluxos, auxiliando na tomada de decisões informadas em projetos de engenharia e na mitigação de riscos. De acordo com Silva (2022), os instrumentos têm a capacidade de alertar previamente sobre possíveis falhas iminentes, permitindo a evacuação segura da área e a implementação oportuna de ações corretivas.

O objetivo deste estudo é apresentar uma revisão bibliográfica de modo a ressaltar a aplicação e a relevância dos sistemas de monitoramento geotécnico em estruturas de disposição de rejeitos para diferentes modos de falha. O estudo explora o papel dos principais instrumentos geotécnicos no monitoramento de vazões, nível d'água, poropressão e deslocamento, enfatizando sua contribuição para o sistema de monitoramento. Além disso, discute como esses instrumentos são aplicados em barragens de rejeito para prevenir falhas, destacando sua relevância na segurança e na prevenção de acidentes.

2 METODOLOGIA

A metodologia empregada neste artigo envolve uma revisão bibliográfica com o intuito de compreender diversos aspectos relacionados ao monitoramento geotécnico em estruturas de disposição de rejeitos, incluindo os principais tipos de instrumentos geotécnicos para medição de vazão, nível d'água, poropressão e deslocamentos, além da legislação e normas brasileiras pertinentes e modos de falha em barragens de rejeitos. O processo de revisão seguiu as seguintes etapas:

- Definição do tema, escopo e objetivo do estudo;
- Busca e seleção de informações em bases de dados acadêmicos, incluindo repositórios de universidades brasileiras, referências de artigos relevantes sobre o assunto, bem como livros, legislação e normas pertinentes;
- Análise e síntese dos dados obtidos durante a pesquisa;
- Apresentação e avaliação dos resultados por meio de resumos e tabela;
- Considerações finais derivadas do estudo realizado.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Legislações e Normas Brasileiras

Barragens representam estruturas com potencial significativo de risco (Brasil, 2020). No Brasil, a primeira norma regulamentadora voltada especificamente para barragens de rejeitos foi a Portaria nº 237, de 18 de outubro de 2001, (DNPM, 2001). Desde então, diversas normas foram desenvolvidas com o intuito de aprimorar a gestão da segurança de barragens em todo o país (Souza, 2019).

Em 2003, iniciou-se a discussão no Congresso Nacional sobre o Projeto de Lei 1.181, visando estabelecer a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB) para o Brasil. Contudo, apenas em 2010 essa política foi aprovada, resultando na promulgação da Lei Nacional 12.334, datada de 20 de setembro de 2010. A PNSB abrange a regulação das barragens destinadas à acumulação de água para diversos fins, além da disposição temporária ou final de rejeitos e resíduos industriais (Brasil, Lei nº 12.334, 2010). Ademais, define quais barragens devem ser regulamentadas, atribui responsabilidades legais aos proprietários das barragens em relação aos requisitos de segurança, estabelece o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB) e confere autoridade regulatória a instituições específicas.

Outrossim, a PNSB (Lei Federal nº 12.334/2010) define os critérios e diretrizes gerais para a segurança de barragens no país. Ela estabelece requisitos para o licenciamento, projeto, construção, operação, manutenção e desativação de barragens, incluindo a necessidade de identificar e avaliar os potenciais modos de falha. Segundo Santos (2019), a PNSB visa reduzir a probabilidade de acidentes e seus impactos, regular as medidas de segurança, além de monitorar e acompanhar as ações de segurança implementadas pelos responsáveis, reunindo informações e verificando conformidades técnicas.

Em maio de 2017, o Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM) emitiu a Portaria 70.389, estabelecendo que as empresas responsáveis por barragens de mineração deveriam implantar um sistema de monitoramento de segurança dentro de 24 meses após a publicação do documento. A complexidade desse sistema de monitoramento varia de acordo com a classificação do Dano Potencial Associado (DPA). Em casos de DPA alto, onde há presença de população e características de construção específicas, o monitoramento deve ser abrangente. A seleção de tecnologias, instrumentos e processos de monitoramento é de responsabilidade da empresa, e o empreendedor é encarregado de monitorar as barragens de mineração, manter registros e reportá-los aos órgãos reguladores competentes.

A norma ABNT NBR 13.028, em sua seção sobre requisitos para elaboração e apresentação de projetos, especificamente no capítulo 5.4.16, item "i", estipula que o manual de operação da estrutura deve incluir procedimentos de inspeção de campo e monitoramento geotécnico. Quanto ao monitoramento, a norma requer a identificação dos elementos a serem monitorados, a frequência das inspeções de campo, a coleta de dados dos instrumentos e os critérios de análise dos dados obtidos.

3.2 Instrumentação Geotécnica

O principal objetivo da instrumentação é fornecer dados que auxiliem na avaliação da segurança de uma estrutura, coletando informações quantitativas sobre seu desempenho e detectando problemas em estágios iniciais, que podem ser evitados (Dhawan al., 2017).

Segundo Silveira (2013), a seleção e instalação de instrumentos em um empreendimento devem atender a objetivos específicos, levando em consideração as questões geotécnicas que podem surgir durante as fases de projeto, construção e operação. Barragens, tanto de grande como de pequeno porte, possuem pontos suscetíveis a problemas na fundação ou estrutura, exigindo instrumentação específica para monitorar o desempenho da estrutura ao longo do tempo.

De acordo com Moura et al. (2018), o monitoramento por meio de instrumentos, como medidores de deslocamento, piezômetros, inclinômetros e marcos topográficos, permite compreender os dados de alerta, facilitando a tomada de decisões a fim de evitar acidentes que possam resultar em perdas de vidas, interrupções nas operações e impactos ambientais, sociais e financeiros.

A seguir são descritos os aspectos gerais referentes aos instrumentos de monitoramento das medidas de vazões, deslocamentos e poropressões, exigidos na NBR 13028 (2017) e focos do presente estudo.

3.2.1 Instrumentos para a Medição da Vazão

Segundo Castro (2013), a medição das vazões de drenagem e das infiltrações pela estrutura de uma barragem de contenção de rejeitos é crucial para garantir a segurança estrutural e deve ser uma das observações iniciais para supervisionar suas condições de segurança. De acordo com a Agência Nacional de Águas - ANA, esses medidores são instrumentos projetados para medir as vazões de drenagem através da fundação e as infiltrações através do aterro.

Medidores de vazão consistem em placas planas, geralmente de metal, instaladas perpendicularmente ao fluxo de água em canais livres de sólidos e sedimentos. Os sistemas de vertedouro desses instrumentos podem ser de seção triangular, trapezoidal ou calhas Parshall, com o fluxo de água à jusante concentrado em galerias metálicas ou de concreto (Silva, 2016). Ademais, acrescenta que para medir a vazão, a altura da coluna d'água passante na seção é aferida com o auxílio de uma régua fixada no equipamento.

Silva (2016) aborda que o medidor de vazão permite uma análise qualitativa da água e a detecção de possíveis locais comprometidos na estrutura. Além disso, ajuda a identificar obstruções de drenos, poropressões excessivas e erosões internas.

3.2.2 Instrumentos para a Medição do Nível de Água

Conforme Santos (2019) aborda em seu estudo, os medidores de nível d'água são os instrumentos mais básicos empregados em barragens, destinados principalmente a indicar o nível do lençol freático em maciços de terra. Através de furos de sondagem ou poços, é viável determinar a cota do nível d'água.

De acordo com Machado (2007), a medição é, normalmente, realizada manualmente, utilizando um dispositivo ou escala para identificar a superfície da água dentro do tubo (nível freático). Oliveira (2020)

acrescenta que a leitura em um medidor de nível d'água pode ser realizada através de um dispositivo equipado com um sensor sonoro que emite som ao entrar em contato com a água, conhecido como pio elétrico (Oliveira, 2020).

Fonseca (2003) destaca a importância de determinar com precisão a posição da linha freática no interior do maciço compactado de uma barragem, visto a relevação na análise de sua estabilidade e para a interpretação dos resultados da piezometria. Além disso, em barragens de terra, os medidores de nível d'água são empregados para avaliar possíveis colmatações e detectar cargas hidráulicas nos sistemas de drenagem interna, ombreiras e áreas a jusante. Esses instrumentos são essenciais para monitorar os riscos potenciais de saturação e de redução das condições de estabilidade do talude a jusante.

3.2.3 Instrumentos para a Medição da Poropressão

Os piezômetros são empregados para aferir a pressão da água (poropressão) em pontos específicos de barragens, fundações e ombreiras. Essas medições piezométricas têm como propósito avaliar a pressão da água em locais determinados dentro de um solo, rocha ou concreto. (Dhawan et al., 2017).

Conforme mencionado por Silveira (2013), os piezômetros demandam algum fluxo de água para dentro ou para fora do dispositivo até que alcance um equilíbrio com a poropressão no solo. Dessa forma, o tempo de resposta do piezômetro diante de variações na poropressão está condicionado à quantidade de água necessária para sensibilizar o instrumento, podendo ser hidráulico, pneumático ou elétrico.

Ainda segundo Silveira (2013), a medição da poropressão é fundamental para compreender a resistência e a deformação dos solos, controladas pela tensão efetiva. Isso é crucial para determinar a posição da superfície freática e da rede de percolação no maciço e na fundação das barragens. Essa medida tem importantes aplicações, como na avaliação dos fatores de segurança dos taludes e no monitoramento do desempenho dos dispositivos de vedação, identificando infiltrações preferenciais que podem comprometer a estrutura.

As informações provenientes dos piezômetros são essenciais para detectar potenciais problemas, como deslocamentos na estrutura ou infiltrações não planejadas (Dhawan et al., 2017).

3.2.4 Instrumentos para a Medição de Deslocamento

Diversos deslocamentos e deformações são comuns em barragens. O deslocamento horizontal pode ocorrer tanto no sentido montante-jusante quanto ao longo do eixo da estrutura. Isso pode abranger desde o deslocamento de toda a barragem em relação às suas ombreiras ou fundação até o deslocamento de uma parte da barragem em relação a outra. Ao avaliar a segurança e o desempenho de uma barragem, é crucial observar minuciosamente esses movimentos (Dhawan et al., 2017).

De acordo com Machado (2007), os deslocamentos horizontais de uma barragem podem desenvolver:

- Fissuras transversais, trincas ou abatimentos no aterro;
- Ocorrência de erosão interna;
- A partir de uma erosão interna, pode induzir superfícies potenciais de ruptura.

Machado (2007) também enfatiza a importância de monitorar regularmente as várias variáveis de projeto, comparando os valores previstos com as leituras "in situ". Além disso, destaca a necessidade de detectar quaisquer fenômenos que possam colocar em risco a estabilidade da barragem.

Diversos instrumentos podem ser utilizados para quantificar os deslocamentos ocorridos em uma estrutura de contenção de rejeitos (Fonseca, 2003). Alguns dos principais citados por Fonseca (2003), são os marcos superficiais e os inclinômetros.

Silveira (2013) destaca que uma abordagem simples e antiga para monitorar os deslocamentos em barragens de terra e/ou enrocamento é a instalação de marcos superficiais ao longo das bermas e da crista. Ainda, Silveira (2013) ressalta que são instrumentos essenciais para acompanhar os recalques da barragem e identificar sinais de possível instabilidade no talude de jusante. Os deslocamentos são medidos por meio de levantamentos topográficos periódicos, em relação aos marcos de referência (fixos) instalados em pontos indeformáveis fora da região de influência da barragem (Fonseca, 2003).

Os inclinômetros são utilizados com o objetivo de mensurar deslocamentos horizontais, em profundidade e superficiais, e de acordo com Dhawan et al. (2017), esses instrumentos consistem em uma placa de base, sensor e dispositivo de leitura. A placa de base é cimentada ou aparafusada a qualquer superfície

horizontal ou vertical e mede a rotação vertical da superfície. Machado (2007), aborda que os inclinômetros podem medir deformações horizontais de massas de solo para detectar regiões de concentração de deformações, ou seja, potenciais superfícies de ruptura.

3.3 Modos de Falha

É fundamental caracterizar adequadamente os modos de falha aos quais uma barragem está exposta para uma gestão eficaz de riscos. O entendimento desses fenômenos é crucial para avaliar o desempenho das estruturas (Roca, 2019).

Portanto, é essencial compreender os principais modos de falha aos quais as estruturas geotécnicas estão sujeitas, os quais são apresentados a seguir.

3.3.1 Erosão Interna (Piping)

A erosão interna ocorre quando as partículas do solo são excessivamente carregadas pelo fluxo de percolação dentro do maciço, geralmente devido à ausência ou ao funcionamento inadequado do sistema de filtros (Pimenta Filho, 2009).

De acordo com Roca et al. (2019), o fenômeno da erosão interna pode ser segmentado em quatro etapas distintas: iniciação, continuação, desenvolvimento para formar um "tubo" e o surgimento de uma brecha.

Materiais heterogêneos ou mal compactados podem propiciar a formação de "tubos" internos na estrutura, criando caminhos preferenciais para o fluxo de água. Isso pode resultar no deslocamento de material dentro do talude. Além disso, o aumento desse fluxo pode gerar poropressões em algumas áreas, levando ao transporte de material através do duto que compõe o talude e/ou a fundação da barragem, aumentando o risco de erosão interna (piping) e possível ruptura (Guimarães Filho, 2021).

3.3.2 Galgamento

Conforme Roca et al. (2019), o galgamento pode manifestar-se de duas formas distintas, dependendo das causas envolvidas: por transbordamento (overtopping) e por galgamento (overflowing). O overtopping acontece quando as ondas atingem a crista da barragem, resultado de ventos fortes, deslizamentos de terra (instabilidade no talude) ou falhas de projeto no dimensionamento da estrutura (Roca, 2019). Por outro lado, segundo Guimarães Filho (2021), o overflowing ocorre quando o transbordamento persiste além da crista da barragem, fazendo com que o nível da água exceda a elevação do aterro e cause a ruptura.

Muitas barragens estão suscetíveis a este modo de falha, seja devido a um sistema de drenagem inadequado ou insuficiente, precipitação pluviométrica descontrolada (excedendo os registros históricos máximos) ou dimensionamento inadequado dos vertedouros de drenagem. Sob tais condições, a pressão hidrostática (e conseqüentemente a carga total) excede a capacidade de resistência da barragem. Conseqüentemente, o talude a jusante torna-se saturado, perde sua resistência e resulta na ruptura da barragem (Guimarães Filho, 2021).

3.3.3 Liquefação Estática e Liquefação Dinâmica

A liquefação, seja estática ou dinâmica, surge devido à perda substancial da resistência ao cisalhamento, desencada por um gatilho, resultando em uma fragilidade elevada, principalmente em solos arenosos saturados (Santos Júnior, 2021). Segundo Castilho (2017), os gatilhos estáticos envolvem carregamentos monotônicos no solo, como o aumento rápido do volume de uma barragem de rejeitos, infiltração de água durante chuvas intensas e deposição de rejeitos. Por outro lado, os gatilhos dinâmicos estão associados a carregamentos cíclicos, como abalos sísmicos, detonações ou tráfego de veículos. Ressalta-se que no caso do Brasil, em que a ocorrência de terremotos não é uma situação frequente, a avaliação do potencial de liquefação estática é mais relevante (Freire Neto, 2009).

De maneira geral, a liquefação pode ser compreendida como um fenômeno no qual um material perde sua resistência devido ao aumento da pressão nos poros, resultando em uma absorção que não permite a drenagem. Esse fenômeno é frequentemente observado em solos finos, de baixa coesão, alta saturação e que tendem a se contrair quando submetidos a esforços de cisalhamento (Silva, 2010). O autor complementa que a liquefação pode representar um risco crítico em depósitos de rejeitos de mineração, pois a construção de

diques ou aterros sobre uma fundação que contém rejeitos fofos e saturados pode resultar em aumentos rápidos nos níveis de tensão em condições não drenadas.

Segundo Guimarães Filho (2021), ao submeter a estrutura a elevadas poropressões e cargas verticais, o material se move de forma repentina, devido a isso, os drenos não conseguem aliviar a pressão a tempo.

3.3.4 Instabilização

A falha por instabilidade do talude acontece quando a tensão de cisalhamento em uma barragem ultrapassa a resistência ao cisalhamento do material da estrutura. Isso geralmente resulta em uma falha rotacional ou deslizamento de uma porção do talude, podendo levar à ruptura local ou global da barragem (Roca, 2019).

É crucial considerar as forças geradas pelos fluxos de água ao avaliar a estabilidade do talude de uma estrutura. Isso ocorre porque o aumento da poropressão reduz as tensões efetivas e, portanto, a resistência do solo ao cisalhamento. Consequentemente, um aumento no fluxo de água pode diminuir o fator de segurança de uma estrutura e provocar falhas (Berrones et al., 2011).

Zonas críticas ao longo da barragem são áreas mais propensas a trincas e fissuras, representando um risco significativo. Essas fissuras, geralmente ocorrendo transversalmente ao eixo da barragem, criam um fluxo concentrado através do núcleo da estrutura, podendo resultar em erosão interna e eventual ruptura. Originadas pelo recalque diferencial entre segmentos adjacentes do maciço, essas fissuras são particularmente perigosas quando não são visíveis na superfície. Portanto, é crucial medir os recalques diferenciais transversais para determinar o máximo tolerável e prevenir a instabilidade do talude (Silveira, 2013).

Ademais, conforme apresentado pela Agência Nacional de Águas (ANA, 2016), as fundações, especialmente as aluvionares, podem experimentar recalques diferenciais no aterro, resultando em zonas de tração e fissuras. Essa movimentação pode levar a deslocamentos no maciço, especialmente se a fundação se mover ou romper.

A Tabela 1 apresenta de forma resumida o estudo da relação entre os instrumentos, as medidas de controle, as justificativas de instalação e os modos de falha apresentados nos itens acima.

Tabela 1. Relação entre modo de falha, medidas de controle, justificativa de instalação e instrumento geotécnico recomendado. Fonte: Autoria Própria.

Modo de Falha	Medida de Controle	Justificativa de Instalação	Tipo de Instrumento
Erosão Interna (Piping)	Vazões	Identificar a vazão permite compreender o fluxo de água subterrânea.	Medidor de Vazão
	Deslocamentos Verticais e Horizontais	Identificar deslocamentos que podem gerar “tubos” no solo, criando espaços vazios que podem ser preenchidos com água.	Marco Superficial / Inclinômetro
	Poropressão	Medir a pressão hidráulica da água que se acumula em camadas mais “fracas” do solo, visto que a força pode arrastar partículas de solo mais finas e leves, criando o canal de tubulação.	Piezômetro
Galgamento	Vazões	Medir o aumento do súbito da vazão.	Medidor de Vazão
	Nível Freático	Medir o nível de água, visto que a água pode se infiltrar no solo e criar uma pressão hidrostática e o fluxo de água pode aumentar a taxa de penetração no solo.	Medidor de Nível d'Água
Liquefação Estática	Vazões	Identificar a quantidade de água que está infiltrando no solo e se há alguma anomalia na distribuição da água.	Medidor de Vazão
	Deslocamentos em Profundidade	Detectar anomalias e variações que podem indicar a presença de água acumulada.	Inclinômetros

	Poropressão	Identificar se houve aumento da pressão da água, pois a resistência do solo pode diminuir	Piezômetro
	Nível Freático	O aumento do volume de infiltração pode indicar uma falha na drenagem ou a presença de uma fonte de água não prevista.	Medidor de Nível d'Água
Instabilização	Deslocamentos Verticais e Horizontais	Detectar deformações significativas que podem indicar a presença de cargas excessivas ou a perda de resistência do solo.	Marco Superficial / Inclinômetro
	Poropressão	Medir as poropressões para auxiliar na avaliação da performance de funcionamento do sistema de drenagem interna.	Piezômetro

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A abordagem metodológica adotada neste estudo possibilitou a identificação dos instrumentos geotécnicos empregados na medição de vazão, nível d'água, poropressão e deslocamento, assim como seus objetivos de monitoramento. Isso facilitou a identificação das variáveis críticas a serem monitoradas em barragens, com o propósito de prevenir potenciais modos de falha.

Portanto, observa-se a importância da segurança em barragens de terra por meio da instrumentação geotécnica, considerando os danos irreversíveis que falhas estruturais podem causar. Nesse contexto, é crucial reconhecer que cada tipo de barragem requer um conjunto específico de requisitos de monitoramento, adaptados às suas características individuais, incluindo a seleção adequada dos instrumentos de monitoramento.

As informações compartilhadas neste estudo, embasadas em sólidos fundamentos da engenharia de barragens, visam enriquecer os estudos relacionados ao monitoramento dessas estruturas e ressaltar a importância do monitoramento geotécnico na prevenção de falhas em estruturas de disposição de rejeitos.

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos à Pimenta de Ávila Consultoria e aos colegas de trabalho pela colaboração, apoio e estímulo. Contribuições fundamentais para o enriquecimento do conhecimento compartilhado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - NBR 13028: Mineração - Elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água - Requisitos. Rio de Janeiro. 2017. Agência Nacional de Mineração. Resolução nº 32, de 11 de maio de 2020. Disponível em: <<https://anmlegis.datalegis.net/action/ActionDatalegis.php?acao>>. Acesso em: 09 abr. 2024

Agência Nacional de Mineração (ANM). Resolução nº 32, de 10 de abril de 2019. Dispõe sobre os procedimentos para a elaboração de planos de fechamento de mina 85 e dá outras providências. Disponível em: <http://www.in.gov.br/web/dou/-/resolucao-n32-de-10-de-abril-de-2019-84736639>. Acesso em: 17 mar. 2024.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). Guia de Orientação e Formulários para Inspeções de Segurança de Barragem. Brasília: ANA, 2016.

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.

BRASIL. Congresso. Senado. Lei Nº 14.066, de 30 de setembro de 2020. Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), Brasília, DF, 30 de Setembro de 2020. Disponível em: <<https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/lei-n-14.066-de-30-de-setembro-de-2020-280529982>>.

- BRASIL. Congresso. Senado. Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010. Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), 20 Setembro 2010. Disponível em: https://www2.camara.leg.br/legin/fed/lei/2010/lei_12334-20-setembro-2010-608607-publicacaooriginal-129691-pl.html.
- CASTILHO, Breno de Matos. Análise dos gatilhos de liquefação dinâmica e modelagem numérica da Barragem do Germano. 2017. 116 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia Geotécnica) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017.
- CASTRO, L. M. A. de; MOREIRA, J. A. L.; GAMA, K. K. da; LIMA, A. A. de; COSTA, T. C. M. T. Avaliação das curvas-chaves de vertedores instalados para monitoramento de vazões de cursos de água de pequeno porte. [S.l.]: [s.n.], 2013. 7 p.
- CAVALCANTE, Karina da Fonseca. Análise de encosta instrumentada com histórico de movimentações. 2023. 96 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 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. 158 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2003.
- FREIRE NETO, João Pimenta. Estudo da liquefação estática em rejeitos e aplicação de metodologia de análise de estabilidade. 2009.
- FROELICH, D.; DHAWAN, D. Guidelines for Instrumentation of Large Dams. 1. ed. Índia: Dam Rehabilitation and Improvement Project, 2017.
- MACHADO, G. de F. Monitoramento de Barragens de Contenção de Rejeitos da Mineração. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.
- MOURA, Juliana Ester Martins; LEÃO, Márcio F. Automatização de instrumentos de monitoramento em barragens de rejeito no Pará–método construtivo, aplicabilidade e custo para mineradoras. In: XX Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas e XVIII Encontro Nacional de Perfuradores de Poços, 2018, Belo Horizonte. São Paulo: Associação Brasileira de Águas Subterrâneas, 2018. p. 1-10. Disponível em: <https://www.abas.org/cbhsf2018trabalhos/194.pdf>. Acesso em: 15 mar. 2024.
- OLIVEIRA, Davidson Miguel Avelar; DA SILVA, Camila Aparecida Lebron Xavier. Estudo da Arte de Instrumentação Geotécnica, Modos de Falha e Recomendações para Auscultação. 2020.
- ROCA, Marta. et al. (2019). A Review of the Risks Posed by the Failure of Tailings Dams. HR Wallingford, Howbery Park, Wallingford, Oxfordshire OX10 8BA, UK SPACE.
- SANTOS, Laryssa Cortes. Estudo sobre a instrumentação de barragens de terra e rejeitos. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade de Uberlândia, Uberlândia, 2019.
- SANTOS JUNIOR, Mauro Pio dos. Avaliação da susceptibilidade à liquefação de um rejeito silto-arenoso com base em ensaio CPTu. 2021.
- SILVA, Lays Capingote Serafim et al. Gestão de resíduos industriais: um estudo do aproveitamento de rejeitos na mineração. Caderno Técnico de Economia e Gestão Ambiental, v. 4, n. 1, pág. 91-104, 2016.
- SILVA, W. P. da. Estudo do potencial de liquefação estática de uma barragem de rejeito alteada para montante aplicando a metodologia de Olson (2001). 2010. 120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010.
- SILVA, Armando Miguel Vieira da. Observação e instrumentação de obras geotécnicas: acompanhamento de um caso prático na região do Porto. Porto: Instituto Superior de Engenharia do Porto, Departamento de Engenharia Geotécnica, 2022.
- SILVEIRA, João Francisco Alves. Instrumentação e segurança de barragens de terra e enrocamento. 2. Ed. [S. l.]: Oficina de textos, 2013.
- SOUSA JÚNIOR, TF; MOREIRA, EB; HEINECK, KS. Barragens de contenção de rejeitos de mineração no Brasil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2018.
- SOUZA, J. C. Avaliação da qualidade da água do Ribeirão Canaã em Uberlândia - MG. 2019. 58 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019.