

UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS – EM
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS

JOÃO PEDRO MILAGRES CARDOSO

**CENTROS DE MONITORAMENTO GEOTÉCNICO EM BARRAGENS DE
REJEITO: REVISÃO DAS ABORDAGENS MANUAIS E AUTOMATIZADAS**

Ouro Preto – MG

2025

JOÃO PEDRO MILAGRES CARDOSO

**CENTROS DE MONITORAMENTO GEOTÉCNICO EM BARRAGENS DE
REJEITO: REVISÃO DAS ABORDAGENS MANUAIS E AUTOMATIZADAS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Engenharia de Minas da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de graduação em Engenharia de Minas.

Orientador: Hernani Mota de Lima

Ouro Preto – MG

2025

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

C268c Cardoso, Joao Pedro Milagres.
Centros de monitoramento geotécnico em barragens de rejeito
[manuscrito]: revisão das abordagens manuais e automatizadas. / Joao
Pedro Milagres Cardoso. - 2025.
48 f.: il.: color., tab..

Orientador: Prof. Dr. Hernani Mota de Lima.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola
de Minas. Graduação em Engenharia de Minas .

1. Geotecnia. 2. Minas e recursos minerais. 3. Barragens de rejeitos.
4. Geotécnica- Instrumentação. I. Lima, Hernani Mota de. II. Universidade
Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 624.13

Bibliotecário(a) Responsável: Soraya Fernanda Ferreira e Souza - SIAPE: 1.763.787



FOLHA DE APROVAÇÃO

João Pedro Milagres Cardoso

Centros de monitoramento geotécnico em barragens de rejeito: Revisão integrativa das abordagens manuais e automatizadas

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

Aprovada em 11 de abril de 2025

Membros da banca

Dr. Hernani Mota de Lima - Orientador - (Universidade Federal de Ouro Preto)
MSc. Filipe Guarnieri Xavier - (WSP)
Engenheiro de Minas Pedro Henrique Gazolla Côbo - (MecRock)

Hernani Mota de Lima, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 14/04/2025.



Documento assinado eletronicamente por **Hernani Mota de Lima, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 14/04/2025, às 14:27, 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 **0895926** e o código CRC **AD43F046**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me ajudar a chegar até aqui.

Obrigado Pai e Mãe pelo amor e carinho.

Aos meus amigos por todo apoio.

A República Reino de Baco por ser meu lar durante esse anos.

Ao meu orientador, Professor Hernani pela ajuda necessária na conclusão deste trabalho.

A grandiosa Escola de Minas e seus professores pela formação não apenas de um aluno, mas pela formação de vida.

RESUMO

A segurança de barragens de rejeito tem sido alvo de atenção crescente no cenário nacional e internacional, em virtude dos recorrentes desastres associados à instabilidade dessas estruturas, com impactos socioambientais de larga escala. No contexto da engenharia de mineração, destaca-se a importância do monitoramento piezométrico como ferramenta essencial para a avaliação da estabilidade hidráulica de taludes. Esta pesquisa teve como objetivo analisar as operações dos centros de monitoramento geotécnico na coleta de dados piezométricos em barragens de rejeito, com foco na comparação entre processos manuais e automatizados. A metodologia adotada consistiu em uma revisão de literatura técnico-científica, por meio da qual foram examinados os princípios de funcionamento dos principais tipos de piezômetros, os procedimentos de calibração e leitura, as variáveis críticas analisadas e as rotinas operacionais dos centros responsáveis pela gestão dos dados. Os resultados evidenciaram que os métodos manuais, ainda amplamente utilizados, apresentam limitações relacionadas à frequência de coleta e à suscetibilidade a falhas humanas, enquanto os sistemas automatizados oferecem maior precisão, resolução temporal e capacidade de resposta, embora demandem maior investimento e manutenção técnica especializada. Constatou-se que a integração entre ambas as abordagens, por meio de sistemas híbridos, tende a otimizar a confiabilidade das informações e a eficácia das ações preventivas. Conclui-se que a adoção de práticas de monitoramento piezométrico tecnologicamente robustas, aliadas à formação técnica continuada e à governança institucional, constitui condição essencial para a mitigação de riscos em empreendimentos minerários.

Palavras-chave: Piezometria. Monitoramento. Barragens de Rejeito. Sistemas Automatizados.

ABSTRACT

The safety of tailings dams has garnered increasing attention both nationally and internationally, due to recurring disasters associated with the instability of these structures, which often result in large-scale socio-environmental impacts. Within the context of mining engineering, piezometric monitoring stands out as a fundamental tool for evaluating the hydraulic stability of embankments. This research aimed to analyze the operations of geotechnical monitoring centers in the collection of piezometric data from tailings dams, focusing on the comparison between manual and automated processes. The methodology employed consisted of a comprehensive review of technical and scientific literature, through which the functioning principles of the main types of piezometers, calibration and reading procedures, critical variables monitored, and the operational routines of data management centers were examined. The results indicated that manual methods, although still widely used, present limitations regarding data collection frequency and susceptibility to human error, whereas automated systems offer higher precision, temporal resolution, and responsiveness, albeit requiring greater investment and technical maintenance. It was found that the integration of both approaches, through hybrid systems, tends to enhance data reliability and the effectiveness of preventive actions. The study concludes that the adoption of technologically robust piezometric monitoring practices, combined with continuous technical training and institutional governance, is essential for risk mitigation in mining operations.

Keywords: Piezometry. Monitoring. Tailings Dams. Automated Systems.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Piezômetro do tipo standpipe	29
Figura 2 – Piezômetro pneumático: detalhe do equipamento, princípio de leitura e instalação	30
Figura 3 – Piezômetro de corda vibrante	31
Figura 4 - Piezômetros baseados em fibra óptica	31
Figura 5 - Características globais dos piezômetros	32

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	8
2 OBJETIVOS	10
2.1 Objetivo geral	10
2.2 Objetivos específicos	10
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	11
3.1 Barragens de rejeito em empreendimentos minerários	11
3.1.1 Caracterização de barragens de rejeito	11
3.1.2 Principais riscos estruturais e socioambientais associados ao armazenamento de rejeitos.....	13
3.1.3 Legislação e normas técnicas aplicáveis à construção, manutenção e descaracterização	16
3.2 Fundamentos de Monitoramento Geotécnico	19
3.2.1 Conceitos e parâmetros essenciais para a avaliação da estabilidade.....	19
3.2.2 Instrumentos de medição e técnicas de sensoriamento adotadas na geotecnia	21
3.2.3 Procedimentos de calibração, frequência de coleta e análise de variáveis críticas..	23
3.3 Piezometria em Barragens de Rejeito	26
3.3.1 Definição de pressão intersticial e sua influência na estabilidade de taludes	26
3.3.2 Tipos de piezômetros (<i>standpipe</i> , <i>pneumático</i> , <i>elétrico</i>) e seus princípios de funcionamento	28
4 METODOLOGIA	33
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	35
5.1 Características dos métodos manuais: equipamentos, periodicidade e atuação do centro de monitoramento geotécnico	35
5.2 Sistemas automatizados: infraestrutura, registros em tempo real e demandas de manutenção	37
5.3 Possibilidade de integração entre o manual e automático: vantagens e limitações	39
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	41
REFERÊNCIAS	43

1 INTRODUÇÃO

A indústria extrativa mineral apresenta dimensão global e abrange um conjunto de atividades direcionadas ao fornecimento de matérias-primas para setores como construção civil, metalurgia e geração de energia. Pesquisas em nível internacional indicam que a maior parte dos depósitos minerais de interesse econômico encontra-se distribuída em continentes variados, impulsionando a circulação de capitais, a expansão de cadeias de suprimentos e o desenvolvimento de tecnologias de prospecção. A evolução desses empreendimentos tem gerado debates técnicos em congressos e fóruns especializados, especialmente no que se refere à mitigação de riscos e à adoção de parâmetros de sustentabilidade (Cardozo, 2019).

O incremento das operações de lavra em diferentes regiões do planeta tem sido acompanhado pela necessidade de armazenamento de subprodutos resultantes do beneficiamento de minérios. Barragens destinadas a conter rejeitos constituem estruturas projetadas para receber resíduos sólidos e líquidos, cuja composição varia de acordo com o tipo de minério, o método de extração e as substâncias aplicadas na etapa de concentração. Embora a comunidade acadêmica investigue métodos de disposição a seco e outras soluções potencialmente menos suscetíveis a incidentes, a construção de estruturas com reservatórios de lama ou pasta ainda persiste em numerosos empreendimentos, motivando estudos sobre fatores de estabilidade e possíveis cenários de falha (Caetano et al., 2012).

No cenário mundial, relatórios técnicos e artigos científicos apontam ocorrências de instabilidades em barragens de rejeitos ao longo das últimas décadas, levando instituições reguladoras e associações profissionais a revisarem normas e metodologias de monitoramento. Alguns episódios provocaram deslocamento de populações, impacto em cursos d'água e prejuízos à biodiversidade, impulsionando a evolução de protocolos de segurança. A análise desses acontecimentos tem destacado a relevância de investigações geotécnicas preliminares, acompanhadas de monitoramento contínuo e de ações corretivas em estágios iniciais de anomalia (Silva et al., 2023).

No Brasil, incidentes envolvendo barragens de rejeito direcionaram a atenção de pesquisadores e gestores públicos para a adequação de instrumentos de fiscalização e para a adoção de tecnologias de medição de parâmetros geotécnicos. A região central do país, caracterizada por intensa atividade de mineração, concentrou esforços de mapeamento das condições estruturais de barragens já existentes e de aprimoramento de processos construtivos

em novos projetos. Leis e resoluções de órgãos competentes passaram a exigir relatórios técnicos periódicos, bem como a instalação de equipamentos que registram parâmetros como pressão intersticial, nível de água e deslocamentos de superfície (Silva et al., 2023).

Neste sentido, o problema desta pesquisa contempla a verificação da forma como os centros de monitoramento geotécnico operam na coleta de dados piezométricos, considerando a coexistência de métodos manuais e de sistemas automatizados. A literatura especializada apresenta estudos que abordam a precisão das leituras, as dificuldades de calibração e a comunicação dos resultados em tempo hábil, mas não há consenso sobre as limitações e as vantagens de cada abordagem em diferentes cenários operacionais. A variabilidade dos ambientes de deposição de rejeitos, a heterogeneidade geológica e as distinções na tipologia de barragens influenciam a escolha dos equipamentos e das rotinas de inspeção, indicando a necessidade de uma análise sistematizada que reúna dados já produzidos por distintos grupos de pesquisa (Santos; Mendonça, 2016).

Partindo dessas premissas, a justificativa desta investigação baseia-se na demanda por sistematizar informações que auxiliem o planejamento de estratégias de vigilância e a escolha de dispositivos de medição de parâmetros de pressão intersticial. Ao privilegiar a revisão integrativa de artigos científicos, publicações técnicas e relatórios de entidades fiscalizadoras, pretende-se consolidar conhecimentos acerca das soluções disponíveis e do grau de confiabilidade alcançado pelos métodos de monitoramento. Dessa maneira, o resultado poderá subsidiar aperfeiçoamentos futuros em regulamentações, desenvolvimento de equipamentos, formação de equipes de operação e revisão de boas práticas no contexto de barragens de rejeito.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Analisar as operações dos centros de monitoramento geotécnico na coleta de dados piezométricos em barragens de rejeito, considerando particularmente as especificidades de processos manuais e automatizados, a fim de verificar potencialidades e limitações entre o modelo automático e manual.

2.2 Objetivos específicos

- Investigar, em publicações científicas e documentos normativos, a evolução histórica dos centros de monitoramento geotécnico e as diretrizes regulamentares aplicáveis às estruturas de contenção de rejeitos.
- Identificar, com base na análise de estudos de caso, as características técnicas e funcionais dos diferentes tipos de piezômetros utilizados em processos de coleta de dados manuais e automatizados.
- Comparar os resultados apresentados na literatura quanto à precisão, à confiabilidade e ao custo operacional associados às leituras de dados piezométricos realizadas por meio de métodos manuais e sistemas automatizados.
- Avaliar, por meio da síntese dos achados, a possibilidade de integração entre o manual e automático quanto às vantagens e limitações.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Barragens de rejeito em empreendimentos minerários

3.1.1 Caracterização de barragens de rejeito

As barragens de rejeito (BsR) consistem em estruturas de engenharia destinadas ao confinamento e disposição final dos resíduos sólidos e líquidos gerados nos processos de beneficiamento mineral. Estes resíduos, denominados rejeitos, correspondem a frações minerais não aproveitadas economicamente, contendo partículas finas associadas a água de processo e, por vezes, compostos químicos residuais (Cardozo, 2019). No âmbito da indústria extrativa, essas estruturas são concebidas para garantir a continuidade operacional das plantas de beneficiamento, ao mesmo tempo em que possibilitam o manejo sistemático de grandes volumes de material com características físico-químicas específicas.

As tipologias construtivas adotadas na edificação das BsR variam conforme fatores geotécnicos, hidrológicos, topográficos e econômicos. Três métodos são predominantes no cenário internacional e nacional: o método de alteamento a montante, o método de alteamento a jusante e o método de linha de centro (Thomé; Passini, 2018). Cada técnica apresenta configurações estruturais distintas, implicando em diferentes graus de complexidade em termos de estabilidade, monitoramento e planejamento.

O alteamento a montante é caracterizado pela elevação sequencial do maciço utilizando o próprio rejeito previamente lançado como fundação para os degraus subsequentes. Essa configuração, embora implique em menores custos de construção inicial, requer atenção redobrada à integridade do material de suporte, que tende a possuir baixa capacidade drenante e elevada susceptibilidade à liquefação, especialmente em condições de saturação prolongada (Cardozo, 2019). O histórico de rupturas catastróficas envolvendo barragens construídas por este método, como nos casos de Fundão (2015) e Brumadinho (2019), levou à intensificação do debate técnico e regulatório em torno de sua viabilidade (Thomé; Passini, 2018).

Em contraste, o método de alteamento a jusante consiste na ampliação progressiva da barragem em direção ao extravasor, ou seja, no sentido oposto ao reservatório de rejeito. Essa técnica utiliza materiais selecionados e compactados, bem como rejeitos, para cada novo nível do maciço, sendo os degraus construídos sobre fundações competentes. Tal arranjo proporciona maior resistência ao cisalhamento e capacidade drenante, reduzindo o risco de instabilidade estrutural em cenários de carregamento hidrostático (Thomé; Passini, 2018). No entanto, requer

maior área disponível e investimento inicial mais elevado, o que pode ser limitador em regiões de relevo acidentado ou com restrições ambientais.

O método de linha de centro, por sua vez, representa uma configuração intermediária entre os dois anteriores. Nesse modelo, o eixo da barragem permanece estático ao longo dos sucessivos alteamentos, com os degraus construídos parcialmente sobre o corpo do maciço existente e parcialmente sobre o rejeito consolidado (Cardozo; Pimenta; Zingano, 2016). Essa técnica permite conciliar, em certa medida, os aspectos econômicos do alteamento a montante com os critérios de estabilidade característicos do alteamento a jusante, embora exija controle rigoroso de compactação e avaliação contínua das condições geotécnicas dos rejeitos depositados.

Independentemente do método adotado, a funcionalidade das barragens de rejeito está intrinsecamente vinculada à dinâmica do processo industrial de lavra e beneficiamento. Além da contenção segura de resíduos sólidos, essas estruturas viabilizam a separação por decantação de sólidos e líquidos, permitindo a recuperação e recirculação de água, fator estratégico em operações situadas em regiões de escassez hídrica (Brito-Junior, 2016). O acúmulo contínuo de rejeitos ao longo da vida útil da mina demanda planejamento detalhado do ciclo de alteamento e avaliação sistemática das condições operacionais, em especial no tocante à evolução dos parâmetros de percolação, poropressão e deformabilidade do material depositado (Cardozo; Pimenta; Zingano, 2016).

No que diz respeito aos materiais dispostos nas barragens, estes apresentam propriedades físico-mecânicas heterogêneas, variando em função da natureza do minério beneficiado e das etapas envolvidas no seu processamento. Rejeitos provenientes da exploração de minério de ferro, por exemplo, tendem a apresentar baixa permeabilidade, alta capacidade de retenção hídrica e granulometria predominantemente fina, fatores que interferem significativamente na drenagem interna da estrutura e no comportamento *tenso-deformacional* do maciço (Cardozo; Pimenta; Zingano, 2016).

Outro aspecto determinante na caracterização dessas estruturas refere-se à seleção do local para sua implantação, sendo que aspectos como estabilidade do solo de fundação, regime hidrológico, existência de comunidades próximas, zonas de preservação ambiental e rotas de acesso logístico compõem o conjunto de variáveis consideradas nas análises de viabilidade técnica e ambiental (Leão; Santiago, 2022). Neste sentido, o local escolhido deve atender aos requisitos normativos definidos por órgãos reguladores e observar critérios de segurança compatíveis com o porte da instalação e com os potenciais impactos em caso de falha.

O projeto e a operação das barragens de rejeito inserem-se em um contexto normativo dinâmico, pautado por legislações nacionais e internacionais, que estabelecem parâmetros para sua concepção, monitoramento, manutenção e descomissionamento – estes serão discutidos mais adiante. De qualquer forma, a existência dessas estruturas é, muitas vezes, condição indispensável para o licenciamento ambiental de empreendimentos minerários de médio e grande porte (Cardozo; Pimenta; Zingano, 2016). A sua gestão, portanto, deve considerar os aspectos técnicos de engenharia civil e geotécnica, bem como os condicionantes legais, os riscos à saúde humana e os potenciais efeitos socioambientais da operação ao longo do tempo.

Assim, a caracterização das barragens de rejeito, sob a ótica da engenharia aplicada à mineração, evidencia sua centralidade como dispositivos estruturais que asseguram a operacionalidade do setor extrativo, ao mesmo tempo em que demandam um robusto aparato técnico-normativo para garantir a estabilidade e a mitigação de riscos associados ao seu funcionamento.

3.1.2 Principais riscos estruturais e socioambientais associados ao armazenamento de rejeitos

O armazenamento de rejeitos oriundos da atividade minerária é uma das etapas mais sensíveis no ciclo produtivo do setor extrativo, tanto sob o ponto de vista da engenharia quanto das implicações socioambientais. As barragens de rejeito, ao acumularem volumes expressivos de material particulado saturado, apresentam vulnerabilidades intrínsecas associadas à estabilidade física da estrutura, à evolução temporal dos processos internos de deformação e à interação com os sistemas ecológicos e sociais circundantes (Caetano et al., 2012).

Dentre os riscos estruturais, destaca-se a possibilidade de instabilização do maciço da barragem em decorrência de processos de liquefação dos rejeitos. A liquefação consiste em um fenômeno físico no qual um material granular saturado, quando submetido a esforços dinâmicos ou variações abruptas de poropressão, perde momentaneamente sua resistência ao cisalhamento, comportando-se como um fluido (Santos; Mendonça, 2016). Este mecanismo pode ser desencadeado por fatores como infiltração excessiva de água, eventos sísmicos, falhas de drenagem interna ou deposição inadequada de camadas de rejeito. A ocorrência de liquefação pode culminar na ruptura progressiva ou abrupta da barragem, com escoamento de rejeitos em alta velocidade e com elevado potencial destrutivo (Silva et al., 2023).

Outra forma recorrente de instabilidade é a ruptura por deslizamento, caracterizada pelo colapso de porções do talude da barragem devido a esforços cortantes superiores à resistência do solo ou do material depositado. Este tipo de falha pode ocorrer em condições drenadas ou

não drenadas, e está fortemente associado ao grau de compactação do material, à geometria do talude e à presença de fraturas ou zonas de fraqueza interna. A presença de lençol freático elevado, drenagem ineficiente, recalques diferenciais e erosão interna (*piping*) agravam o risco de instabilização, exigindo monitoramento geotécnico contínuo (Cruz, 2024).

O *piping*, especificamente, está relacionado à erosão interna de partículas finas por percolação da água através de fissuras ou zonas porosas na estrutura da barragem, podendo evoluir para a formação de canais preferenciais que comprometem a integridade do núcleo impermeável e, conseqüentemente, a estabilidade geral do maciço (Santos; Mendonça, 2016). Trata-se de um processo progressivo e, por vezes, silencioso, que exige medidas de prevenção como a instalação de filtros graduados, sistemas de drenagem eficientes e inspeções periódicas com instrumentação de precisão.

Em relação aos aspectos socioambientais, os riscos decorrentes do armazenamento de rejeitos extrapolam os limites da infraestrutura física da barragem e atingem, de forma ampla, comunidades humanas, corpos hídricos, fauna, flora e áreas de preservação. A ruptura de barragens de rejeito pode resultar na liberação súbita de lama com alto teor de sólidos suspensos, metais pesados e compostos tóxicos, impactando drasticamente a qualidade da água em rios e nascentes, além de causar mortalidade de espécies aquáticas e assoreamento de cursos d'água (Caetano et al., 2012).

Os impactos sobre a saúde humana são igualmente significativos, especialmente quando há contaminação por substâncias como arsênio, chumbo, manganês e mercúrio, elementos frequentemente associados aos rejeitos de mineração. A exposição prolongada a esses contaminantes pode gerar efeitos adversos sobre o sistema nervoso, renal, respiratório e reprodutivo, além de aumentar o risco de desenvolvimento de neoplasias (Silva et al., 2023). Comunidades ribeirinhas e populações tradicionais, cuja subsistência está vinculada ao uso de recursos hídricos, tendem a ser mais vulneráveis às conseqüências de acidentes desse tipo, enfrentando deslocamentos forçados, perda de meios de vida e ruptura de vínculos culturais.

Sob a ótica ecológica, o avanço da pluma de rejeitos sobre áreas naturais leva à degradação irreversível de ecossistemas, com extinção local de espécies, alteração na composição de habitats e perda de biodiversidade. Áreas úmidas, por exemplo, exercem papel fundamental na regulação hidrológica e na filtragem de nutrientes e contaminantes, sendo altamente sensíveis à deposição de sedimentos provenientes de falhas em barragens (Silva et al., 2023). A cobertura de vegetação nativa por rejeitos inviabiliza a regeneração natural, e demanda projetos complexos de recuperação ambiental com horizonte de longo prazo.

Além dos danos materiais e ambientais, as consequências psicossociais dos desastres envolvendo barragens de rejeito também são objeto de crescente atenção na literatura. Estudos indicam o surgimento de transtornos como estresse pós-traumático, ansiedade generalizada, depressão e distúrbios de adaptação em indivíduos expostos a eventos de ruptura de barragens, especialmente em contextos nos quais a reparação socioeconômica é lenta ou insuficiente (Santos; Mendonça, 2016). A percepção de insegurança e a perda de confiança nas instituições responsáveis pelo licenciamento e fiscalização das estruturas aumentam os impactos subjetivos do desastre, perpetuando ciclos de vulnerabilidade social.

Importa salientar ainda que o dimensionamento dos riscos socioambientais deve considerar o cenário de ruptura, bem como os impactos cumulativos da operação regular da barragem. A emissão contínua de efluentes, a geração de poeira fina em áreas de disposição seca e a ocupação de grandes extensões territoriais para a construção de estruturas auxiliares — como diques, canais de drenagem e áreas de contenção — podem comprometer a qualidade do ar, do solo e da água, ainda que não haja colapso estrutural (Caetano et al., 2012). Esses efeitos requerem avaliações de impacto ambiental abrangentes, com foco preventivo e participativo.

Os riscos associados ao armazenamento de rejeitos são, também, amplificados pela ausência ou ineficácia de sistemas de monitoramento e controle. Em muitos casos, a instrumentação geotécnica disponível é insuficiente para detectar variações críticas em tempo hábil, ou encontra-se desativada por falhas operacionais e administrativas. A carência de profissionais capacitados, a negligência na leitura e interpretação de dados e a fragmentação institucional entre os entes responsáveis pela fiscalização contribuem para a criação de um cenário de risco sistêmico (Silva; Silva, 2020).

Já a classificação de risco das barragens, conforme estabelecida pela legislação brasileira — particularmente pela Política Nacional de Segurança de Barragens (Lei nº 12.334/2010) e pela Resolução nº 13/2019 da Agência Nacional de Mineração — considera critérios técnicos como categoria de risco (CRI), dano potencial associado (DPA) e volume total armazenado. A CRI é determinada a partir da análise de aspectos técnicos e operacionais da estrutura, como o estado de conservação, existência e funcionamento de dispositivos de segurança, regularidade da documentação técnica e desempenho de sistemas de monitoramento. O DPA, por sua vez, corresponde à severidade dos impactos socioeconômicos e ambientais que podem ocorrer em caso de ruptura, abrangendo a presença de comunidades a jusante, existência de áreas ambientalmente protegidas, proximidade de infraestruturas críticas e potencial para perda de vidas humanas. O volume total armazenado é utilizado como parâmetro adicional para

definir a complexidade e o porte da barragem, influenciando diretamente o nível de exigência para o seu acompanhamento técnico-operacional (Silva et al., 2023).

A Lei nº 12.334/2010 também estabelece diretrizes para a elaboração do Plano de Segurança da Barragem (PSB), do Plano de Ação de Emergência (PAE), e da Declaração de Condição de Estabilidade (DCE), exigindo que os empreendedores adotem práticas sistemáticas de inspeção, manutenção e auditoria técnica independente. Ademais, a referida norma define responsabilidades claras para os órgãos fiscalizadores e empreendedores, sendo exigido que os dados referentes às barragens sejam atualizados anualmente no Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB), coordenado pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). A Resolução nº 13/2019 da ANM, por sua vez, especifica os critérios técnicos e prazos para entrega dos documentos obrigatórios por parte das mineradoras, além de instituir sanções administrativas para os casos de descumprimento ou omissão (Silva et al., 2023).

Não obstante os avanços regulatórios, a recorrência de acidentes demonstra que o arcabouço legal, embora consistente em teoria, carece de eficácia plena em sua implementação. A ausência de fiscalização presencial contínua, a morosidade na análise de documentos técnicos e a limitação orçamentária dos órgãos reguladores colaboram para fragilizar os mecanismos de controle previstos na legislação. Adicionalmente, lacunas na articulação entre esferas federal, estadual e municipal dificultam a adoção de estratégias integradas de prevenção e resposta a desastres. Assim, evidencia-se a necessidade de revisões periódicas e do fortalecimento institucional dos órgãos envolvidos, de modo a assegurar a efetividade dos dispositivos normativos e a integridade das estruturas de contenção de rejeitos no território nacional (Silva; Silva, 2020).

3.1.3 Legislação e normas técnicas aplicáveis à construção, manutenção e descaracterização

A Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB), instituída pela Lei nº 12.334/2010, constitui o principal instrumento jurídico que estabelece as diretrizes gerais para garantir a segurança dessas estruturas, definindo critérios para a classificação, fiscalização e gestão dos riscos associados. Conforme já mencionado, essa legislação introduz os conceitos de Categoria de Risco (CRI), Dano Potencial Associado (DPA) e Volume Total Armazenado como parâmetros fundamentais para a caracterização e priorização da fiscalização das barragens. A Lei determina que o empreendedor é o responsável direto pela segurança da barragem, incumbido de elaborar e manter atualizados documentos técnicos como o Plano de

Segurança da Barragem (PSB), o Plano de Ação de Emergência (PAE) e a Declaração de Condição de Estabilidade (DCE), além de atender às exigências de monitoramento e comunicação de riscos às autoridades competentes (ANA, 2020).

No que se refere à etapa de construção, é exigido o cumprimento de uma série de normas técnicas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), bem como a observância de critérios estabelecidos pelos órgãos licenciadores e reguladores, tais como o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA), as secretarias estaduais de meio ambiente e, no caso específico da mineração, a Agência Nacional de Mineração (ANM). A NBR 13028:2017, por exemplo, trata especificamente do projeto, construção e operação de barragens de contenção de rejeitos, estabelecendo diretrizes técnicas relativas à seleção do método construtivo, caracterização dos materiais, dimensionamento hidráulico, estabilidade do maciço e sistemas de drenagem. A norma orienta, ainda, quanto à necessidade de estudos geotécnicos detalhados, investigações hidrogeológicas e modelagens numéricas que subsidiem a definição dos parâmetros de projeto.

Durante a fase operacional da barragem, os marcos legais e normativos exigem a realização de inspeções periódicas de segurança, o registro sistemático de dados instrumentais e a realização de auditorias externas independentes, especialmente para barragens classificadas como de alto risco ou com alto dano potencial associado. A Resolução nº 13/2019 da ANM estabeleceu prazos rigorosos para a entrega de documentos técnicos, incluindo relatórios de inspeção regular, atualização dos PAEs e envio da DCE, com penalidades administrativas em caso de descumprimento. O monitoramento contínuo deve contemplar aspectos como deformações estruturais, pressão intersticial, nível do reservatório, vazões percoladas e integridade dos sistemas de drenagem e vertedouros, sendo fundamental para a detecção precoce de anomalias.

Com a intensificação das preocupações públicas e institucionais acerca da segurança das barragens, foi editada a Lei nº 14.066/2020, que alterou substancialmente dispositivos da PNSB. Dentre as principais mudanças, destaca-se a vedação da construção de barragens pelo método de alteamento a montante em território nacional, bem como a exigência do descomissionamento de estruturas existentes que utilizem esse método, em consonância com cronogramas estabelecidos pelos órgãos competentes. A nova legislação também ampliou o escopo de responsabilização civil, administrativa e penal dos empreendedores, prevendo sanções mais severas em caso de omissão ou negligência.

O processo de descaracterização, etapa frequentemente negligenciada nos planejamentos originais das barragens, passou a ser tratado com maior rigor normativo. Trata-

se do fechamento definitivo da estrutura, compreendendo a interrupção do aporte de rejeitos, a reabilitação geotécnica do maciço, o tratamento das águas residuais, a revegetação da área e a adoção de medidas para prevenir erosão, infiltração e reativação de processos instáveis. A Resolução Conjunta SEMAD/FEAM/IEF/IGAM nº 02/2019, de caráter estadual (Minas Gerais), detalha as fases do descomissionamento, estabelecendo a necessidade de licenciamento específico, monitoramento pós-fechamento e elaboração de plano de recuperação ambiental. O não cumprimento dessas etapas implica em responsabilidade técnica e jurídica do empreendedor, inclusive após a paralisação das atividades minerárias.

Ademais, a Resolução nº 95/2022 da ANM estabelece critérios adicionais para a desativação de barragens sob jurisdição da mineração, incluindo exigências relativas à gestão documental, comunicação com as comunidades do entorno, apresentação de cronogramas executivos e demonstração de segurança durante e após o processo de descaracterização da estrutura. O plano de descaracterização deve ser submetido à aprovação do órgão regulador e executado por profissionais legalmente habilitados, com previsão de auditoria externa e relatórios periódicos de acompanhamento.

Cabe destacar que, além da legislação e das normas técnicas de caráter nacional, os empreendimentos minerários estão sujeitos a convenções internacionais e às boas práticas recomendadas por instituições como o *International Council on Mining and Metals* (ICMM), o *International Commission on Large Dams* (ICOLD) e a Organização Internacional do Trabalho (OIT), especialmente no que tange à governança corporativa, direitos das comunidades atingidas, transparência na comunicação de riscos e sustentabilidade da cadeia produtiva mineral (ICMM, 2019; ICOLD, 2016). Essas diretrizes têm sido progressivamente incorporadas às políticas de responsabilidade socioambiental das empresas do setor, muitas vezes como exigência de investidores ou como requisito para certificações ambientais.

Portanto, o conjunto normativo aplicável à construção, manutenção e descomissionamento de barragens de rejeito evidencia a complexidade que envolve o gerenciamento dessas estruturas. O cumprimento rigoroso dos dispositivos legais e das diretrizes técnicas é condição *sine qua non* para a prevenção de acidentes, a proteção dos recursos naturais e a preservação dos direitos das populações potencialmente afetadas. Nesse contexto, o fortalecimento institucional dos órgãos fiscalizadores, o investimento contínuo em tecnologia de monitoramento e a capacitação de profissionais especializados são elementos estratégicos para a implementação efetiva das normas em vigor.

3.2 Fundamentos de Monitoramento Geotécnico

3.2.1 Conceitos e parâmetros essenciais para a avaliação da estabilidade

A avaliação da estabilidade de barragens de rejeito requer o domínio de um conjunto de conceitos fundamentais da engenharia geotécnica, cuja aplicação sistemática permite a interpretação do comportamento mecânico e hidráulico das estruturas ao longo do tempo. A estabilidade, no contexto geotécnico, é compreendida pela capacidade de uma estrutura de contenção resistir aos esforços atuantes sem apresentar deslocamentos, deformações ou rupturas que comprometam sua integridade funcional. No entanto, esse conceito não é absoluto, mas condicionado a variáveis como propriedades dos materiais, condições de carregamento, presença de água, atuação de agentes externos e alterações induzidas pelas atividades operacionais (Massad, 2010)

Um dos parâmetros fundamentais para a análise de estabilidade é o fator de segurança (FoS – *Factor of Safety*), definido como a razão entre a resistência mobilizada ao cisalhamento dos materiais constituintes da estrutura e os esforços efetivos atuantes. Em termos simplificados, um fator de segurança maior que 1,0 indica condição de estabilidade, embora, na prática, valores entre 1,3 e 1,5 sejam adotados como referência mínima para situações de projeto, conforme as normas técnicas e boas práticas da engenharia (Mendes, 2008). Este parâmetro é sensível a variações nos índices de resistência ao cisalhamento, ao estado de tensões no maciço e ao tipo de análise empregada, podendo ser estimado por métodos analíticos, empíricos ou numéricos.

A resistência ao cisalhamento do solo ou do rejeito é regida, principalmente, pelos parâmetros de coesão (c) e ângulo de atrito interno (ϕ), definidos com base na teoria da resistência ao cisalhamento de Mohr-Coulomb. A determinação desses parâmetros exige ensaios laboratoriais e de campo, como os ensaios de cisalhamento direto, triaxial e de palheta, em que a representatividade depende da amostragem adequada do material *in situ* e da correta interpretação dos dados (Silva Filho; Fernandes, 2010). Além disso, o comportamento dos rejeitos pode ser influenciado por características específicas, como teor de umidade, granulometria, grau de compactação e presença de finos argilosos, o que reforça a necessidade de campanhas geotécnicas rigorosas e modelagens calibradas.

Outro conceito central à avaliação da estabilidade é a pressão neutra ou poropressão (u), que representa a pressão exercida pela água intersticial sobre as partículas sólidas em uma matriz porosa. A poropressão exerce papel decisivo na redução da resistência efetiva dos

materiais, sendo frequentemente associada à ocorrência de fenômenos como liquefação e ruptura progressiva. O monitoramento desse parâmetro, por meio de piezômetros e sensores de pressão, permite avaliar o grau de saturação dos materiais e a resposta da estrutura a eventos hidrológicos extremos, como chuvas intensas e elevação do nível do reservatório (Massad, 2010).

A tensão efetiva, por sua vez, representa a porção da tensão total que é efetivamente suportada pela estrutura esquelética do solo, sendo obtida pela subtração da poropressão da tensão total. Esse conceito é a base da teoria da mecânica dos solos, pois a resistência e a deformabilidade dos materiais estão diretamente associadas ao estado de tensões efetivas (Massad, 2010). Alterações no balanço entre tensões efetivas e poropressões, mesmo que graduais, podem levar à instabilização de taludes, recalques diferenciais e propagação de fraturas internas.

O grau de saturação (S_r), a condutividade hidráulica (k) e a permeabilidade dos materiais são parâmetros hidrodinâmicos igualmente relevantes na análise de estabilidade, pois essas variáveis determinam a capacidade de drenagem da estrutura e influenciam o tempo de dissipação da poropressão e a possibilidade de acúmulo de água em zonas críticas do maciço. Rejeitos com baixa permeabilidade tendem a reter elevados volumes de água, o que pode favorecer a geração de pressões neutras excessivas, comprometendo a segurança da estrutura em condições de carregamento rápido, como em casos de enchentes ou sismos (Silva Filho; Fernandes, 2010).

A deformabilidade dos materiais, mensurada por parâmetros como o módulo de elasticidade (E) e o coeficiente de Poisson (ν), também deve ser considerada, especialmente quando se avaliam deslocamentos diferenciais, recalques e possíveis processos de colapso estrutural. Embora a maioria das análises de estabilidade em barragens de rejeito seja conduzida com base em critérios de resistência última, a avaliação dos deslocamentos e deformações acumuladas pode antecipar a ocorrência de falhas lentas, progressivas ou por fluência (Silva Filho; Fernandes, 2010).

O conceito de linha de fluxo ou superfície de ruptura provável também é fundamental nas análises de estabilidade de taludes, sendo empregado em modelos como os de Bishop, Janbu e Morgenstern-Price. Esses métodos permitem calcular o fator de segurança considerando a forma circular, distribuições de tensões e critérios de resistência. O uso de softwares especializados para análise de estabilidade, como *Slide*, *GeoStudio*, *FLAC* e *Plaxis*, tem se tornado prática recorrente nos estudos de engenharia geotécnica, viabilizando análises mais

precisas e tridimensionais, com incorporação de cenários probabilísticos e simulações de longo prazo (Silva Filho; Fernandes, 2010).

Ainda no âmbito conceitual, destaca-se a relevância do estado crítico, regime no qual o solo ou rejeito atinge uma condição de equilíbrio entre deformação contínua e tensão constante. A teoria do estado crítico auxilia na modelagem do comportamento de materiais não consolidados e na previsão do ponto de colapso sob carregamento monotônico ou cíclico (Mendes, 2008). Em barragens de rejeito, o conhecimento do comportamento em estado crítico contribui para o delineamento de critérios de operação segura, particularmente em estruturas que utilizam rejeito como material de construção.

Finalmente, o conceito de estabilidade residual remete à capacidade de uma estrutura manter-se funcional após sofrer algum tipo de perturbação ou degradação parcial (Massad, 2010). Esse parâmetro é essencial em análises de risco e modelagens de falhas progressivas, e implica a adoção de estratégias de redundância estrutural, planos de resposta a emergências e margens adicionais de segurança nas fases de projeto e operação (Mendes, 2008).

Desta forma, a aplicação dos conceitos e parâmetros exige uma abordagem integrada, envolvendo tanto aspectos determinísticos quanto probabilísticos, além da consideração das incertezas inerentes aos materiais naturais e às condições operacionais. A avaliação da estabilidade não se resume a um cálculo pontual, mas constitui um processo contínuo de análise, monitoramento e revisão técnica, cuja eficácia depende da confiabilidade dos dados, da competência técnica dos profissionais envolvidos e da robustez dos modelos empregados.

3.2.2 Instrumentos de medição e técnicas de sensoriamento adotadas na geotecnia

Os instrumentos de medição empregados na engenharia geotécnica permitem quantificar parâmetros físicos e mecânicos relacionados ao comportamento dos solos, rejeitos e estruturas de contenção, de forma contínua ou pontual, em regime manual ou automatizado. Sua correta aplicação possibilita o acompanhamento da integridade estrutural das barragens e a antecipação de cenários críticos que possam comprometer sua estabilidade (Silva et al., 2020).

Dentre os instrumentos mais amplamente utilizados no monitoramento de barragens de rejeito, destacam-se os piezômetros, dispositivos destinados à medição da pressão de poro ou poropressão. Os piezômetros podem ser de diversos tipos, incluindo os de tubo aberto (Casagrande), pneumáticos e elétricos (*vibrating wire*), sendo estes últimos os mais empregados em programas de instrumentação modernos devido à sua maior precisão e à possibilidade de integração com sistemas automatizados de aquisição de dados (Geokon, 2019). A leitura da

poropressão permite a avaliação da variação do nível freático ao longo do tempo, sendo fundamental para a análise de estabilidade sob diferentes regimes hidrológicos.

Os inclinômetros são instrumentos utilizados para mensurar deslocamentos horizontais em subsuperfície, permitindo a detecção de movimentações internas no maciço e a identificação de superfícies potenciais de ruptura. A instalação desses dispositivos é realizada em tubos verticais encamisados, permitindo a introdução de uma sonda que registra, em diferentes profundidades, a inclinação relativa das paredes do tubo, a partir da qual se calcula o deslocamento acumulado. Os dados inclinométricos são fundamentais na modelagem de taludes, na interpretação de fenômenos de fluência e na avaliação da eficácia de medidas de reforço estrutural (RST *Instruments*, 2020).

As células de carga são dispositivos utilizados para medir tensões em estruturas ou em pontos específicos do solo, geralmente aplicadas em fundações, tirantes, paredes diafragma e estruturas de contenção. Elas registram o esforço axial exercido sobre um elemento estrutural, permitindo avaliar o desempenho mecânico ao longo do tempo. Em barragens de rejeito, essas células são frequentemente utilizadas em combinação com outros instrumentos para validar hipóteses de projeto e aferir a redistribuição de tensões após eventos hidrológicos ou alterações operacionais (Geokon, 2019).

Outro instrumento relevante é o extensômetro, empregado para a medição de deslocamentos verticais ou horizontais entre dois pontos fixos. Em sua aplicação geotécnica, pode ser utilizado tanto em superfície quanto em profundidade, sendo eficiente para o monitoramento de recalques diferenciais e deformações localizadas em regiões críticas da barragem. Sua utilização permite avaliar a evolução de processos de adensamento, expansão ou colapso estrutural, sobretudo em áreas com rejeitos de elevada compressibilidade (Geosense, 2021).

Os medidores de vazão e os sistemas de coleta de água percolada complementam o conjunto de instrumentos voltados à avaliação do desempenho hidráulico da barragem, sendo essenciais para a detecção de anomalias no sistema de drenagem interna, como obstruções, perda de eficiência dos filtros ou início de processos de erosão interna (*piping*). O monitoramento da qualidade da água percolada também pode fornecer indícios de reações geoquímicas indesejadas, como acidificação ou solubilização de metais pesados, que, além de comprometerem a estabilidade, impõem riscos ambientais severos (Jardini et al., 2023).

A integração desses instrumentos a sistemas de aquisição automática de dados marca o advento de uma nova geração de técnicas de sensoriamento aplicadas à geotecnia, baseadas nos princípios da engenharia 4.0. Os sistemas SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*)

e os *dataloggers* permitem a coleta, o armazenamento e a análise contínua de grandes volumes de dados em tempo real, reduzindo a dependência de intervenções humanas para leituras pontuais e aumentando a capacidade de resposta frente a eventos críticos. Essa automação possibilita o monitoramento remoto de parâmetros geotécnicos, além de permitir a emissão de alertas e alarmes com base em limites predefinidos (Affonso; Sayão, 2020).

Além dos instrumentos convencionais, o sensoriamento remoto tem se consolidado como técnica complementar de grande valor na geotecnia. Imagens de satélite, drones com câmeras multiespectrais e sistemas de radar interferométrico (InSAR) vêm sendo utilizados para detecção de deformações milimétricas em taludes e estruturas, monitoramento de subsidência e mapeamento de áreas de instabilidade. A tecnologia InSAR, em particular, permite análises comparativas entre imagens adquiridas em diferentes momentos, possibilitando a identificação de tendências de deslocamento com alta acurácia e ampla cobertura espacial, mesmo em áreas de difícil acesso (GEO-Instruments, 2023).

O uso de fibras ópticas como sensores distribuídos também tem ganhado espaço na instrumentação geotécnica de precisão. Tais sistemas possibilitam o monitoramento contínuo de temperatura, deformação e vibração ao longo de grandes extensões lineares, sendo particularmente úteis para detecção precoce de eventos como infiltração, delaminação e falhas localizadas. Essa tecnologia apresenta potencial significativo para aprimorar a gestão de riscos em barragens de rejeito, especialmente quando integrada a modelos preditivos e sistemas de inteligência artificial (Silva et al., 2021).

A eficácia da instrumentação geotécnica, contudo, depende da escolha apropriada dos dispositivos, combinada à adequada concepção do plano de monitoramento, da calibração periódica dos instrumentos, da frequência de coleta de dados e da correta interpretação dos resultados. A gestão integrada dessas variáveis, associada à formação técnica dos profissionais responsáveis e à robustez dos protocolos operacionais, constitui condição indispensável para garantir a segurança das estruturas e a confiabilidade do sistema de monitoramento (Affonso; Sayão, 2020).

3.2.3 Procedimentos de calibração, frequência de coleta e análise de variáveis críticas

A eficácia dos sistemas de instrumentação e monitoramento geotécnico em barragens de rejeito depende, de forma indissociável, da correta calibração dos instrumentos instalados, da definição criteriosa da frequência de coleta de dados e da interpretação acurada das variáveis monitoradas. A negligência em qualquer uma dessas etapas pode comprometer a confiabilidade

dos dados gerados e, por conseguinte, afetar adversamente a capacidade preditiva e preventiva do sistema de controle de estabilidade.

Em linhas gerais, a calibração consiste no procedimento técnico que visa ajustar os instrumentos de medição para garantir que seus registros correspondam com exatidão aos valores reais dos parâmetros físicos monitorados. Trata-se de uma etapa indispensável que deve ocorrer antes da instalação do equipamento, mas que também requer reavaliações periódicas ao longo do ciclo de operação, especialmente em ambientes sujeitos a variações térmicas, presença de umidade, agentes corrosivos ou deformações estruturais. A confiabilidade metrológica dos dados depende da rastreabilidade dos padrões utilizados na calibração, da qualificação dos técnicos responsáveis e da manutenção de registros documentais auditáveis (Gens & Alonso, 2006).

Instrumentos como piezômetros de corda vibrante, inclinômetros eletrônicos e células de carga demandam procedimentos específicos de calibração, realizados em condições controladas, com a utilização de padrões certificados. No caso dos piezômetros, por exemplo, a calibração é executada mediante a aplicação de pressões conhecidas, permitindo construir curvas de resposta que correlacionam a frequência de vibração do sensor ao valor da poropressão. De modo semelhante, em inclinômetros digitais, são utilizados bancos de inclinação calibrados para aferir a precisão angular dos sensores em diferentes profundidades. A ausência de calibração, ou sua realização inadequada, pode induzir a interpretações equivocadas de estabilidade, mascarando sinais precursores de deformações críticas ou acúmulo anômalo de poropressão (Poulos, 2001).

Tão relevante quanto a calibração é a definição da frequência de coleta de dados. A periodicidade com que os dados são registrados deve ser compatível com a criticidade da estrutura monitorada, a sensibilidade do parâmetro em questão e os regimes hidrometeorológicos predominantes. Estruturas classificadas como de alto risco e alto dano potencial associado requerem monitoramento com frequência diária ou mesmo contínua, viabilizada por sistemas automatizados integrados a centrais de aquisição remota. Já em barragens com menor complexidade operacional e histórico estável, a frequência pode ser semanal ou mensal, desde que justificada tecnicamente no plano de segurança da barragem.

Em contextos de operação normal, a definição da frequência de coleta considera fatores como a fase construtiva ou operacional da barragem, o regime de disposição de rejeitos, a variação do nível do reservatório e as características geotécnicas do material. No entanto, em situações de alerta, como durante períodos de chuvas intensas, abalos sísmicos, movimentações anômalas detectadas ou alterações nos padrões de drenagem, é imperativo que a frequência de

leitura seja intensificada, com mobilização de equipes técnicas para inspeções in loco e acionamento de protocolos de emergência, se necessário (Fernandes et al., 2016).

A coleta de dados, por sua vez, não se resume ao ato técnico de leitura dos instrumentos. Ela exige um planejamento meticuloso que compreenda a validação dos dados obtidos, a verificação de coerência entre os valores registrados e os modelos preditivos adotados, e a análise histórica de tendências. Para isso, os dados devem ser armazenados em sistemas confiáveis, com versionamento, backup e rastreabilidade, permitindo a reconstrução de séries temporais e a identificação de padrões de comportamento da estrutura.

A análise de variáveis críticas constitui a etapa mais sensível do processo de monitoramento, pois demanda conhecimento técnico específico e capacidade analítica para distinguir oscilações naturais de indícios de instabilização. Dentre as variáveis com maior relevância estão os deslocamentos horizontais e verticais do maciço, a evolução da poropressão, a variação do nível do reservatório, a deformação dos taludes, a taxa de percolação e as mudanças na condutividade hidráulica. A simples variação isolada de um desses parâmetros pode não ser suficiente para caracterizar um risco iminente, mas o conjunto de dados, analisado de forma integrada, permite construir modelos prognósticos com elevado grau de confiabilidade (Morgenstern et al., 2016).

Técnicas de análise multivariada, métodos estatísticos e algoritmos de aprendizado de máquina vêm sendo progressivamente incorporados à rotina da engenharia de barragens, permitindo identificar padrões ocultos nos dados e antecipar a ocorrência de cenários críticos. Modelos baseados em lógica *fuzzy*, redes neurais artificiais e análise de séries temporais são aplicados para detectar correlações não lineares entre variáveis geotécnicas e antecipar o comportamento da estrutura em diferentes cenários de carregamento (Silva et al., 2020). Tais abordagens, entretanto, não dispensam a validação por especialistas, tampouco substituem a interpretação técnica baseada em princípios da engenharia do solo.

A comunicação dos resultados da análise também deve ser estruturada de modo eficiente. Nesse contexto, os relatórios técnicos gerados a partir da análise dos dados instrumentais devem conter os valores medidos, assim como os gráficos de tendência, mapas de risco, tabelas de comparação com limites de segurança e recomendações objetivas para intervenção, caso necessário. Em barragens de grande porte, é prática recomendada que tais relatórios sejam auditados por consultores independentes e compartilhados com os órgãos fiscalizadores, em conformidade com os dispositivos legais vigentes, como o Plano de Segurança da Barragem (PSB) e o Plano de Ação de Emergência (PAE).

É imprescindível ressaltar que a análise das variáveis críticas deve ser concebida como um processo contínuo, retroalimentado por novas medições, inspeções visuais e reinterpretação dos modelos geotécnicos. O monitoramento eficaz não é estático, mas adaptativo, exigindo constante revisão dos parâmetros de referência e atualização dos modelos de previsão em função de novos dados e alterações nas condições operacionais da barragem. O descompasso entre a geração de dados e sua interpretação constitui, historicamente, uma das falhas mais recorrentes nos sistemas de segurança de barragens, motivo pelo qual a governança técnica e a integração entre setores são elementos estruturantes para a eficácia do monitoramento.

Dessa forma, os procedimentos de calibração, frequência de coleta e análise das variáveis críticas se apresentam como um tríplice eixo que sustenta a confiabilidade dos sistemas de monitoramento geotécnico. Quando conduzidos com rigor técnico, base científica e supervisão especializada, os processos tornam-se instrumentos eficazes.

3.3 Piezometria em Barragens de Rejeito

3.3.1 Definição de pressão intersticial e sua influência na estabilidade de taludes

Como mencionado brevemente nas seções anteriores, a pressão intersticial, também denominada poropressão, representa um dos elementos mais críticos na avaliação da estabilidade de taludes em barragens de rejeito, sendo caracterizada como a pressão exercida pelo fluido (geralmente água) presente nos poros ou vazios entre as partículas sólidas do solo ou rejeito. Neste sentido, é uma variável intrinsecamente ligada ao regime hidráulico da estrutura. Sua correta compreensão e monitoramento auxiliam na previsão do comportamento *tenso-deformacional* do maciço, a identificação de estados críticos de saturação e a antecipação de processos de instabilização que possam comprometer a integridade estrutural da barragem (Craig, 2004).

Do ponto de vista da mecânica dos solos, a resistência ao cisalhamento de um material geotécnico é função da tensão efetiva, ou seja, da diferença entre a tensão total aplicada e a pressão intersticial. A tensão efetiva (σ') é expressa pela equação clássica $\sigma' = \sigma - u$ na qual σ representa a tensão total e u a poropressão. Dessa forma, o aumento da pressão intersticial, sem a correspondente variação da tensão total, resulta em uma diminuição da tensão efetiva, reduzindo a resistência ao cisalhamento do material e aumentando a probabilidade de ocorrência de falhas geotécnicas (Craig, 2004). Em barragens de rejeito, essa condição é especialmente preocupante, dado que os materiais depositados tendem a apresentar baixa

permeabilidade, alta compressibilidade e significativa heterogeneidade física, dificultando a dissipação espontânea da poropressão.

Em linhas gerais, a pressão intersticial pode ser classificada em estática, quando está associada ao equilíbrio hidrostático do fluido nos poros, e dinâmica, quando resulta de processos transientes, como recarga por precipitação, variação do nível do reservatório, vibrações sísmicas ou recalques diferenciais. A influência dessas pressões na estabilidade de taludes é determinada por sua magnitude, distribuição espacial e variação temporal. Elevações súbitas da poropressão, sobretudo em zonas críticas do talude, podem desencadear liquefação estática, colapso por ruptura progressiva ou escorregamentos superficiais e profundos, conforme a geometria da estrutura e as propriedades dos materiais envolvidos (Duncan & Wright, 2005).

No caso específico das barragens de rejeito, os taludes estão sujeitos a condições hidrogeológicas complexas, que variam com o tempo e com as práticas operacionais de disposição de resíduos. A saturação de camadas internas por infiltração ascendente ou descargas hidropiezométricas mal controladas pode gerar zonas de tensão efetiva reduzida, vulneráveis à formação de superfícies de ruptura circulares ou planas, especialmente em taludes com inclinação acentuada ou em presença de materiais finos com comportamento sensível à umidade (Poulos, 2001). Além disso, o acúmulo de água não drenada no corpo da barragem pode gerar gradientes hidráulicos ascendentes, favorecendo a ocorrência de *piping*, fenômeno erosivo interno que, além de comprometer a drenagem, pode induzir a ruptura hidráulica.

É relevante observar que os efeitos da poropressão não são homogêneos ao longo do maciço, sendo dependentes da posição relativa do ponto analisado em relação ao nível d'água, à presença de barreiras impermeáveis, ao histórico de carregamento e às propriedades hidráulicas do rejeito. Em razão disso, a instrumentação piezométrica deve ser estrategicamente distribuída, contemplando zonas propensas ao acúmulo de pressão, interfaces litológicas, áreas de recarga e pontos de potencial instabilidade, como ombreiras e zonas de junção entre diques e o corpo principal da barragem (Mikkelsen, 2003).

A análise do regime de poropressão em taludes deve considerar também a curva de dissipação da pressão intersticial ao longo do tempo, sobretudo após eventos pluviométricos intensos ou durante os estágios de alteamento. Ensaios laboratoriais, como o de adensamento consolidado-drenado (CD), e simulações numéricas transientes auxiliam na predição do tempo necessário para o retorno ao equilíbrio hidrodinâmico, fornecendo subsídios importantes para a definição de intervalos seguros entre etapas construtivas e para a avaliação do desempenho do sistema de drenagem interna (Gens & Alonso, 2006).

Em situações em que o material da barragem apresente características altamente compressíveis, como os rejeitos finos provenientes do beneficiamento de minério de ferro, a poropressão tende a permanecer elevada por períodos prolongados, o que impõe desafios significativos ao projeto geotécnico. Nessas condições, a adoção de filtros verticais, drenos horizontais e materiais de transição se mostra fundamental para promover a dissipação da água intersticial e minimizar o risco de instabilidade. Em todo o caso, o monitoramento contínuo da poropressão, por meio de piezômetros elétricos ou pneumáticos, permite a construção de modelos hidromecânicos calibrados, capazes de reproduzir a resposta real da estrutura e subsidiar ações de mitigação (Craig, 2004).

A influência da pressão intersticial na estabilidade de taludes se manifesta de forma mais evidente em análises de equilíbrio limite, nas quais a variação do fator de segurança pode ser diretamente atribuída à presença ou ausência de poropressão nos segmentos da superfície de ruptura considerada. Em modelos mais sofisticados, como os baseados no método de elementos finitos, a distribuição da poropressão é incorporada ao modelo de material por meio de relações constitutivas, permitindo a simulação de processos transientes e não lineares com maior fidelidade.

Importante destacar que a caracterização da influência da poropressão na estabilidade não se limita à análise de rupturas macroscópicas. Pequenas deformações localizadas, variações nas leituras piezométricas e anomalias nos padrões de drenagem podem constituir indícios precoces de processos de instabilização em curso. Por essa razão, a leitura e interpretação dos dados piezométricos requerem conhecimento especializado, metodologia sistemática e capacidade de articulação entre os dados instrumentais, os modelos teóricos e as observações empíricas do comportamento da estrutura (Gens & Alonso, 2006).

Sendo assim, a pressão intersticial representa uma variável geotécnica de natureza crítica na estabilidade de taludes em barragens de rejeito, influenciando diretamente os estados de tensão, a resistência ao cisalhamento, o comportamento deformacional e a resposta hidráulica da estrutura. Seu monitoramento sistemático, por meio da piezometria, constitui prática indispensável para a gestão técnica e preventiva de riscos, exigindo elevada acurácia na instalação dos instrumentos, rigor na leitura dos dados e profundidade na análise das informações obtidas.

3.3.2 Tipos de piezômetros (*standpipe*, *pneumático*, *elétrico*) e seus princípios de funcionamento

A piezometria, enquanto técnica de monitoramento geotécnico, fundamenta-se na medição da pressão intersticial em subsuperfície, sendo operacionalizada por meio de instrumentos denominados piezômetros. Esses dispositivos, ao registrarem variações no conteúdo de água presente nos poros do solo ou dos rejeitos, fornecem dados à análise da estabilidade hidráulica e estrutural de barragens de contenção. A seleção do tipo de piezômetro a ser empregado em um sistema de monitoramento considera critérios como profundidade da instalação, sensibilidade requerida, frequência de leitura, tipo de análise desejada (pontual ou contínua) e as características hidrogeotécnicas do meio investigado (Ferreira & Albuquerque, 2018).

Os piezômetros são tradicionalmente classificados em três categorias principais: *standpipe* (ou tubo aberto), pneumáticos e elétricos (comumente denominados de corda vibrante). Cada tipo apresenta princípios de funcionamento distintos, vantagens e limitações específicas, o que impõe ao projetista a necessidade de análise contextualizada para sua adequada aplicação em barragens de rejeito.

O piezômetro do tipo *standpipe*, também conhecido como tubo aberto ou piezômetro de Casagrande, é o modelo mais simples – Figura 1. Trata-se de um tubo perfurado na extremidade inferior, revestido por filtro granular e inserido em um furo de sondagem preenchido com material filtrante e selos de bentonita, de forma a isolar a zona de interesse. O nível de água no interior do tubo reflete a pressão intersticial na porção monitorada do maciço. A leitura é feita manualmente por meio de fita medidora ou sonda eletrônica de nível, o que confere ao equipamento uma natureza passiva e dependente de inspeção física periódica (Craig, 2004).

Figura 1 - Piezômetro do tipo *standpipe*

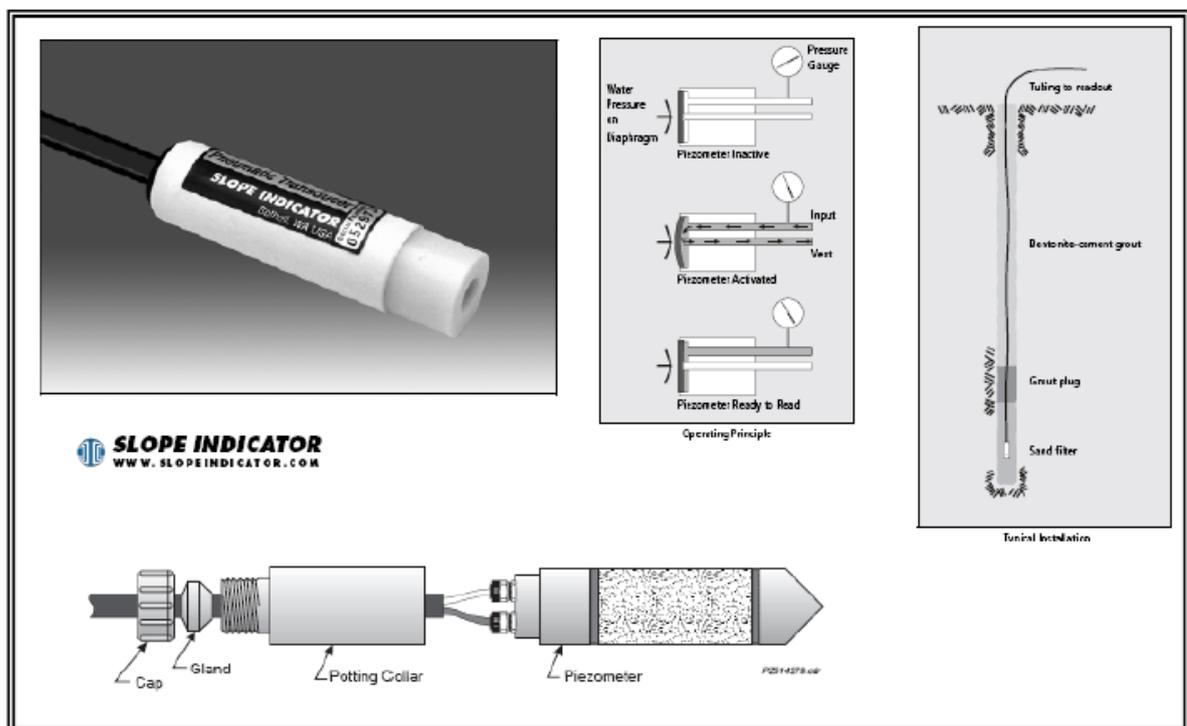


Fonte: <<https://geothra.com.br/wp-content/uploads/2023/07/instrumentacao-piezometro-casagrande-p.webp>>

Os piezômetros pneumáticos (Figura 2), por sua vez, operam por meio da pressurização de um compartimento interno instalado no ponto de interesse geotécnico. A extremidade ativa

do sensor é composta por uma cápsula porosa conectada a dois tubos: um para injeção de gás (geralmente ar comprimido ou nitrogênio) e outro para a medição da pressão necessária para expelir a água acumulada no interior da cápsula. O valor da pressão manométrica requerida para esse processo é diretamente proporcional à pressão da água no entorno do sensor, permitindo sua quantificação com relativa precisão. Após cada leitura, o sistema retorna à condição de repouso, o que reduz o consumo de energia e evita a saturação do sensor (Ferreira & Albuquerque, 2018).

Figura 2 – Piezômetro pneumático: detalhe do equipamento, princípio de leitura e instalação



Fonte: *Slope Indicator Company* (2007).

Os piezômetros elétricos, também conhecidos como piezômetros de corda vibrante (*vibrating wire piezometers*), representam o estado da arte em monitoramento piezométrico automatizado. Seu princípio de funcionamento baseia-se na variação da frequência de ressonância de um fio tensionado, cuja extremidade está acoplada a uma membrana sensível à pressão. À medida que a poropressão varia, a membrana se deforma, alterando a tensão do fio e, conseqüentemente, sua frequência de vibração. Essa frequência é registrada por um sistema eletrônico, que a converte em unidades de pressão por meio de uma curva de calibração previamente estabelecida (Silva et al., 2020) – Figura 3.

Figura 3 – Piezômetro de corda vibrante



Fonte: *Slope Indicator Company* (2007).

Para situações que exigem monitoramento distribuído em grande escala, vêm sendo desenvolvidas tecnologias complementares, como os piezômetros baseados em fibra óptica (Figura 4) e os sensores *piezoresistivos*, que, embora ainda em fase de consolidação operacional no contexto brasileiro, oferecem possibilidades promissoras em termos de resolução espacial e capacidade de integração com sistemas de análise preditiva (Dias et al., 2021).

Figura 4 - Piezômetros baseados em fibra óptica



Fonte: < <https://g5instrumentos.com.br/automacao-de-piezometros/> >.

A escolha do tipo de piezômetro a ser utilizado deve considerar a natureza dos rejeitos, os objetivos específicos do monitoramento, as condições de acessibilidade e a criticidade da estrutura. Em muitos casos, a combinação de diferentes tipos de piezômetros no mesmo maciço é a estratégia mais eficaz, permitindo a redundância dos dados e a complementaridade entre métodos com tempos de resposta, resoluções e metodologias de leitura distintos.

De modo a visualizar globalmente as características e potencialidades de cada um, a Figura X apresenta um resumo.

Figura 5 - Características globais dos piezômetros

Característica	Casagrande	Standpipe (Tubo Aberto)	Pneumático	Corda Vibrante (Vibrating Wire)
Princípio de funcionamento	Célula porosa que permite entrada de água; leitura por nível no tubo	Tubo aberto até zona filtrante, leitura do nível d'água	Pressão medida com gás comprimido (geralmente nitrogênio)	Mede a pressão pela variação da frequência de uma corda metálica
Leitura	Manual (nível d'água com fita)	Manual (nível d'água com fita)	Com manômetro e bomba manual	Automática (datalogger) ou manual
Tipo de medição	Pressão neutra pontual	Nível fraático médio	Pressão de poro pontual	Pressão de poro pontual
Tempo de resposta	Lento (em solos de baixa permeabilidade)	Lento	Rápido	Rápido
Indicação de tendência	Simple, com atraso	Muito geral, pouca precisão em argilas	Boa, mais responsivo	Excelente, permite análise em tempo real
Aplicação ideal	Solos argilosos ou de baixa permeabilidade	Solos arenosos ou altamente permeáveis	Ambientes onde se exige resposta rápida e mobilidade	Monitoramento de longo prazo com alta precisão
Instalação	Exige ponteira porosa + coluna selada com areia/bentonita	Tubo perfurado + filtro ao redor	Sensor com tubo e mangueira de ar	Sensor com cabo elétrico e célula selada
Durabilidade	Alta, se bem instalado	Alta	Média (componentes mecânicos delicados)	Alta
Necessidade de manutenção	Baixa	Baixa	Moderada (checar pressão, mangueiras)	Baixa
Custo relativo	Baixo a médio	Muito baixo	Médio	Alto
Automação	Não	Não	Limitada (com datalogger específico)	Sim – fácil integração com sistemas automáticos

4 METODOLOGIA

A presente pesquisa adota uma abordagem de revisão da literatura, sendo de caráter qualitativo, fundamentado em métodos de análise documental e bibliográfica, que visa compilar, comparar e interpretar os dados extraídos de fontes científicas e técnicas relevantes, permitindo a identificação de lacunas, tendências e contribuições para a gestão de riscos geotécnicos em empreendimentos de mineração.

A natureza deste estudo é predominantemente descritiva e exploratória, tendo em vista que o foco recai sobre a sistematização do conhecimento já produzido acerca dos métodos manuais e automatizados de medição piezométrica, bem como suas implicações operacionais e estratégicas para os centros de monitoramento. A abordagem adotada é dedutiva, na medida em que o arcabouço teórico orienta a análise dos dados secundários, permitindo a formulação de inferências sobre as potencialidades e limitações dos modelos de coleta de dados em diferentes contextos operacionais.

Para a realização da revisão, foram utilizadas bases de dados internacionais e nacionais especializadas em engenharia, geotecnia e mineração, tais como *Scopus*, *Web of Science*, *Google Scholar*, e repositórios institucionais de universidades brasileiras. As palavras-chave empregadas incluíram termos como “monitoramento geotécnico”, “barragens de rejeito”, “piezometria manual”, “piezometria automatizada”, “centros de monitoramento”, “gestão de riscos”, “segurança de barragens” e “mineração”. Os operadores booleanos “AND”, “OR” e “NOT” foram utilizados para aprimorar a busca e refinar os resultados, permitindo combinar termos e excluir conteúdos irrelevantes. Por exemplo, a expressão “piezometria AND barragens de rejeito AND monitoramento” foi combinada com “NOT hidrelétricas” para excluir estudos que se referiam a outros tipos de barragens, garantindo a pertinência dos resultados.

Os critérios de inclusão foram estabelecidos considerando-se a relevância temática, a atualidade das publicações (priorizando estudos dos últimos dez anos, mas sem desconsiderar contribuições clássicas fundamentais para a área), a qualidade metodológica e a disponibilidade dos textos na íntegra. Foram incluídos artigos científicos, dissertações, teses, anais de congressos e manuais técnicos de órgãos reguladores, desde que tivessem como foco principal a instrumentação e o monitoramento de barragens de rejeito. Em contrapartida, os critérios de exclusão abrangeram estudos que abordassem monitoramento de barragens de água para fins de geração de energia, trabalhos de caráter meramente opinativo ou desprovidos de fundamentação empírica, bem como aqueles que não apresentassem informações técnicas detalhadas sobre os métodos de coleta de dados piezométricos.

Além disso, o processo de seleção das referências envolveu uma triagem inicial por título e resumo, seguida de uma leitura crítica dos textos completos para verificar a adequação ao escopo da pesquisa. Esse procedimento foi complementado pela análise de citações e referências cruzadas, a fim de identificar estudos relevantes que pudessem não ter sido detectados nas buscas eletrônicas iniciais. A análise dos dados foi conduzida por meio da extração sistemática de informações, organização em matrizes temáticas e, posteriormente, a síntese dos principais achados, possibilitando a elaboração de uma narrativa coerente e integrada sobre os métodos de monitoramento piezométrico em barragens de rejeito.

A rigorosidade metodológica foi garantida pela utilização de um protocolo de revisão que envolveu etapas de definição dos objetivos, delimitação dos termos de busca, aplicação dos critérios de inclusão e exclusão, e análise crítica dos estudos selecionados. Essa sistematização permitiu a identificação de convergências e divergências entre os autores, bem como a construção de um panorama atual das tecnologias de monitoramento, destacando suas potencialidades operacionais, os desafios enfrentados na implementação e as implicações para a gestão de riscos geotécnicos em empreendimentos de mineração. A análise também considerou os aspectos normativos e as recomendações de órgãos reguladores, como a Agência Nacional de Mineração (ANM) e a Agência Nacional de Águas (ANA), que contribuem para a definição dos parâmetros operacionais e dos requisitos de segurança aplicáveis às barragens de rejeito.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Características dos métodos manuais: equipamentos, periodicidade e atuação do centro de monitoramento geotécnico

No âmbito do monitoramento geotécnico aplicado a barragens de rejeito, os métodos manuais de coleta de dados piezométricos compõem um conjunto consolidado de práticas instrumentais baseadas na medição direta do nível da água nos poros do solo, por meio de dispositivos de observação estática instalados em pontos específicos do maciço. A técnica mais representativa desse conjunto é a piezometria do tipo *standpipe*, também denominada tubo aberto ou piezômetro de Casagrande, cujo funcionamento se baseia na observação da altura da coluna d'água que se estabiliza dentro de um tubo vertical, conectado à zona de interesse geotécnico por meio de uma seção filtrante.

O sistema *standpipe* é estruturado por um tubo de PVC ou PEAD (polietileno de alta densidade), de diâmetro interno compatível com a profundidade e as características do terreno, frequentemente entre 19 mm e 50 mm, que é instalado verticalmente em um furo de sondagem. No entanto, usualmente são 4 para posterior automatização. A extremidade inferior desse tubo é posicionada precisamente na profundidade em que se deseja monitorar a pressão intersticial. Nessa região, o tubo pode ser perfurado ou conectado a uma ponteira porosa, composta por materiais como cerâmica ou malha metálica, envolta por um anel de material filtrante granular — normalmente areia lavada de granulometria controlada. Acima desse ponto, o furo é selado com materiais de baixa permeabilidade, como bentonita, cimento-bentonita ou argamassa, garantindo o isolamento hidráulico entre as camadas e assegurando que a medição reflita exclusivamente a pressão da zona selecionada (Castro, 2008; Bragioni, 2022).

A instalação do piezômetro exige uma sequência controlada de procedimentos. Inicialmente, executa-se a perfuração por meio de trado manual, percussão ou perfuração rotativa, conforme a profundidade necessária e as condições do terreno. Em seguida, realiza-se a montagem do conjunto de filtragem e o lançamento da coluna do tubo. O entorno da zona de interesse é preenchido com o filtro granular, seguido pelas camadas selantes e, por fim, pelo preenchimento superior com solo recompatado ou brita. A boca do tubo é protegida com caixa de concreto armado ou estrutura metálica com tampa de travamento, frequentemente equipada com identificação técnica e registro topográfico para posterior correlação com os dados de campo (Timóteo et al., 2009; Santos, 2019).

As medições nos piezômetros *standpipe* são realizadas com auxílio de sondas elétricas ou mecânicas. A mais empregada no meio técnico é a sonda elétrica de nível d'água, composta por uma fita milimetrada de aço ou material sintético, contendo condutores elétricos conectados a um sensor localizado na extremidade inferior. Quando o sensor entra em contato com a superfície da água, o circuito se fecha e aciona um sinal acústico ou luminoso, indicando a profundidade do nível d'água. Esse valor, associado à cota topográfica da boca do tubo, permite calcular a cota piezométrica por diferença aritmética. Alternativamente, em ambientes menos exigentes, pode-se utilizar trenas com flutuadores calibrados, ainda que estas apresentem menor precisão metrológica (Silva, 2019).

O processo de leitura é padronizado segundo procedimentos técnicos estabelecidos por manuais de inspeção, normas da ABNT (como a NBR 13028) e orientações específicas de órgãos fiscalizadores. Cada medição deve ser realizada em condições estáveis, com verificação prévia da integridade do tubo e remoção de eventuais detritos na coluna de acesso. As sondas são higienizadas antes e depois da leitura, garantindo a continuidade dos registros e evitando a contaminação da água subterrânea. Após a leitura, os dados são anotados em planilhas específicas, com registro da hora, data, operador, identificação do ponto e observações adicionais sobre as condições do entorno. Esses dados são posteriormente sistematizados em plataformas de controle técnico, com produção de gráficos de evolução piezométrica, perfis verticais e correlações com parâmetros hidrometeorológicos e operacionais da barragem (Azevedo, 2019).

A periodicidade das medições manuais é determinada a partir da criticidade da barragem, da sensibilidade geotécnica da área instrumentada e das diretrizes estabelecidas nos Planos de Segurança da Barragem (PSB). Em estruturas estáveis ou em fase de operação regular, adota-se geralmente frequência semanal ou quinzenal. Em situações de monitoramento de longo prazo, como em estruturas desativadas ou em fase de pós-operacionalização, é comum a adoção de periodicidades mensais. Há também a prática de intensificação das leituras em períodos de maior influência hidrológica, como durante ou após eventos pluviométricos expressivos. A programação das leituras pode ser manual (via cronograma físico de campo) ou vinculada a sistemas digitais de gestão, ainda que o processo em si — leitura, anotação e interpretação — permaneça realizado manualmente, sem automação (Bragioni, 2022; Santos, 2019).

Nos centros de monitoramento geotécnico, os pontos com instrumentação manual são organizados em malhas espaciais que visam cobrir as zonas mais críticas do maciço, como ombreiras, taludes de jusante, áreas de transição de material, fundações e regiões com histórico

de recalque diferencial. A escolha dos pontos de instalação é orientada por análises geotécnicas prévias, resultados de sondagens e modelagens computacionais que indicam as zonas de maior sensibilidade hidráulica. Os dados coletados são utilizados para o controle operacional da estrutura, bem como insumo técnico para auditorias independentes, revisões do fator de segurança e atualização de modelos preditivos de estabilidade (Timóteo et al., 2009).

A consistência metodológica dos procedimentos manuais assegura que, mesmo sem os recursos de automação, os piezômetros *standpipe* permaneçam como instrumentos válidos e amplamente reconhecidos nos programas de instrumentação geotécnica de barragens. A articulação entre a engenharia de campo, os registros metroológicos e a sistematização dos dados permite a manutenção de uma base confiável de observações, cuja utilização se estende desde a fase construtiva até o encerramento definitivo das atividades da barragem.

5.2 Sistemas automatizados: infraestrutura, registros em tempo real e demandas de manutenção

A infraestrutura de um sistema automatizado de monitoramento geotécnico é composta por diversos componentes interconectados que garantem a aquisição, transmissão, armazenamento e análise dos dados coletados. Os principais elementos incluem os sensores de medição, os sistemas de aquisição de dados (*dataloggers*), os meios de comunicação e as plataformas de gestão e visualização das informações.

Os sensores são dispositivos responsáveis por captar as variáveis físicas de interesse, como pressão de poros, deslocamentos, inclinações e níveis d'água. Dentre os sensores utilizados, destacam-se os piezômetros elétricos de corda vibrante, que convertem a pressão da água intersticial em sinais elétricos de frequência, permitindo medições precisas e confiáveis. Esses sensores são instalados em pontos estratégicos da barragem, conforme o plano de instrumentação definido pelos engenheiros responsáveis.

Os sistemas de aquisição de dados, ou *dataloggers*, são equipamentos eletrônicos programáveis que recebem os sinais dos sensores, realizam a conversão dos dados para unidades de engenharia e armazenam as informações coletadas. Eles são configurados para realizar leituras em intervalos regulares, que podem variar de minutos a horas, dependendo das necessidades do monitoramento. Além disso, os *dataloggers* possuem interfaces de comunicação que permitem a transmissão dos dados para os centros de monitoramento.

A transmissão dos dados pode ser realizada por diferentes meios, como cabos de fibra óptica, redes sem fio (rádio, Wi-Fi) ou comunicação via satélite, dependendo da localização da

barragem e da infraestrutura disponível. A escolha do meio de comunicação é fundamental para garantir a integridade e a confiabilidade dos dados transmitidos, especialmente em locais remotos ou de difícil acesso.

Nos centros de monitoramento geotécnico, os dados recebidos são processados e analisados por meio de softwares especializados que permitem a visualização em tempo real das condições da barragem. Essas plataformas possibilitam a configuração de alarmes e alertas baseados em limiares pré-definidos, facilitando a identificação de comportamentos anômalos e a tomada de decisões rápidas e assertivas.

A coleta de dados em tempo real é uma das principais vantagens dos sistemas automatizados, permitindo o acompanhamento contínuo das variáveis monitoradas e a detecção imediata de alterações que possam indicar riscos à integridade da barragem. Essa capacidade é fundamental para a implementação de planos de ação emergenciais e para a mitigação de possíveis danos.

A integração dos dados coletados com sistemas de informação geográfica (SIG) e outras ferramentas de análise permite a correlação entre diferentes variáveis e a visualização espacial dos dados, facilitando a compreensão do comportamento da barragem e auxiliando no planejamento de intervenções e manutenções preventivas.

A operação e manutenção dos sistemas automatizados requerem uma equipe técnica especializada, responsável pela calibração dos sensores, verificação da integridade dos componentes e atualização dos softwares de gestão. A manutenção preventiva é essencial para garantir a confiabilidade dos dados e a longevidade dos equipamentos, incluindo inspeções periódicas, testes de funcionalidade e substituição de componentes desgastados.

Além disso, é fundamental estabelecer procedimentos para a gestão dos dados coletados, incluindo políticas de armazenamento, backup e segurança da informação, assegurando a disponibilidade e a integridade dos dados históricos para análises futuras e conformidade com regulamentações vigentes.

De qualquer forma, a infraestrutura necessária para a operação desses sistemas envolve a integração de sensores avançados, sistemas de aquisição e transmissão de dados confiáveis e plataformas de análise eficientes. A manutenção adequada e a gestão eficaz dos dados são essenciais para garantir o desempenho e a confiabilidade do sistema, contribuindo para a prevenção de acidentes e a preservação do meio ambiente e das comunidades adjacentes.

5.3 Possibilidade de integração entre o manual e automático: vantagens e limitações

Conforme a literatura de base, a integração entre sistemas de monitoramento manual e automático em barragens de rejeito representa uma das frentes mais promissoras no campo da instrumentação geotécnica contemporânea. Essa sinergia, quando planejada e executada com rigor técnico, pode combinar as virtudes da confiabilidade histórica dos sistemas manuais com a precisão e a reatividade dos instrumentos automatizados. Autores como Castro (2008) e Santos (2019) destacam que os piezômetros do tipo standpipe (ou Casagrande), apesar de seu caráter manual, apresentam uma robustez singular e uma vida útil compatível com a longevidade da estrutura da barragem, constituindo, assim, uma base confiável para leituras de longo prazo.

Por outro lado, Silva (2019) enfatiza que os piezômetros elétricos de corda vibrante representam o ápice da sofisticação tecnológica no campo da instrumentação geotécnica, permitindo leituras automatizadas de alta frequência e integração com sistemas de aquisição remota como SCADA e dataloggers. Essa capacidade de coleta contínua e de emissão de alertas em tempo real representa uma vantagem substancial em contextos de elevada criticidade estrutural, como em barragens com alto dano potencial associado.

No entanto, as limitações de cada sistema também se evidenciam de forma significativa quando avaliados isoladamente. O sistema standpipe, embora confiável, apresenta um elevado *time lag* (tempo de resposta), especialmente em solos de baixa permeabilidade, e exige intervenções humanas periódicas, o que compromete sua eficiência operacional em contextos de difícil acesso ou em situações emergenciais. Em contraste, o sistema automático, embora eficaz na detecção precoce de variações piezométricas, demanda um alto custo de implantação, maior complexidade de manutenção e uma dependência crítica de fontes energéticas e conectividade.

Nesse cenário, autores como Azevedo (2019) e Bragioni (2022) propõem a adoção de sistemas híbridos que combinem os dois tipos de instrumentação, de modo a maximizar a cobertura e a redundância dos dados coletados. Essa abordagem permite que os piezômetros manuais sejam utilizados em zonas estáveis ou com acessibilidade garantida, enquanto os instrumentos automatizados são instalados em regiões críticas, sujeitas a variações rápidas de pressão intersticial. A própria disposição espacial dos sensores pode ser planejada para gerar complementaridade: piezômetros de tubo aberto em pontos mais profundos, e piezômetros de corda vibrante nas zonas de transição hidráulica.

Timóteo (2009) corrobora essa perspectiva ao apresentar o sistema PiezoSys, que integra piezômetros a módulos de aquisição de dados e radiocomunicação, com possibilidade de inserção de sensores adicionais, como pluviômetros e inclinômetros. O autor defende que a integração de dados de diferentes instrumentos, seja de natureza manual ou automática, proporciona maior acurácia na tomada de decisão e otimiza a resposta em cenários extremos.

Além disso, a literatura aponta que a leitura manual pode desempenhar um papel estratégico complementar em sistemas automáticos, especialmente no tocante à validação e à auditoria dos dados gerados. Silva (2019) menciona a utilização de interfaces como o Geokon GK404, que permitem a verificação pontual da acurácia dos sensores automatizados, funcionando como instrumento de controle de qualidade no monitoramento de campo.

Não obstante, essa integração exige planejamento meticuloso e conhecimento técnico elevado. Azevedo (2019) observa que, mesmo em sistemas híbridos, a correta interpretação dos dados requer a uniformização das bases de referência, curvas de calibração compatíveis e rastreabilidade metrológica, sob pena de gerar incongruências na análise histórica das variáveis monitoradas.

Bragioni (2022), por sua vez, reforça que a adoção de sistemas híbridos deve estar associada a uma gestão documental rigorosa, à definição de cartas de risco para cada seção monitorada e ao desenvolvimento de protocolos integrados de resposta, otimizando a sinergia entre as leituras periódicas manuais e os alertas em tempo real fornecidos pelos sensores automatizados.

Nesse sentido, a integração entre sistemas de monitoramento manual e automático pode ser compreendida não como uma sobreposição redundante, mas como uma arquitetura instrumental complementar e estratégica. A combinação inteligente dessas tecnologias, alinhada a práticas robustas de análise multivariada e modelagem hidromecânica, pode elevar significativamente a confiabilidade das ações preventivas em barragens de rejeito, reduzindo riscos, otimizando recursos e consolidando uma cultura de segurança estrutural embasada em dados de alta qualidade.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A investigação demonstrou que, embora os métodos manuais de monitoramento ainda representem a base operacional de diversos empreendimentos minerários — sobretudo em estruturas de pequeno porte ou localizadas em áreas remotas —, observa-se uma tendência crescente de transição para sistemas automatizados, os quais proporcionam maior frequência de coleta, acesso em tempo real e integração com plataformas analíticas baseadas em inteligência artificial. Essa transformação tecnológica, no entanto, não se efetiva de forma homogênea, sendo condicionada por fatores como investimento, capacitação técnica, infraestrutura disponível e grau de maturidade institucional das organizações responsáveis.

No tocante à comparação entre os sistemas manuais e automatizados, a análise revelou que ambos apresentam vantagens e limitações que os tornam complementares em muitos casos. Os sistemas manuais, embora mais suscetíveis a erros operacionais e à descontinuidade de registros, apresentam menor custo de instalação e manutenção, além de permitirem maior flexibilidade em situações que demandam interpretação *in loco* por profissionais experientes. Já os sistemas automatizados, ao garantirem registros em alta resolução temporal e possibilitarem o acionamento de alertas automáticos, configuram-se como ferramentas de alta eficiência na gestão de riscos geotécnicos, exigindo, contudo, investimentos maiores e manutenção técnica contínua.

A integração entre essas duas abordagens, conforme evidenciado na literatura analisada, desponta como uma alternativa promissora para o aprimoramento dos protocolos de segurança em barragens de rejeito. A adoção de sistemas híbridos — nos quais piezômetros *standpipe* são utilizados em conjunto com sensores elétricos ou pneumáticos conectados a *dataloggers* — permite não apenas a redundância na coleta de dados, como também a validação cruzada das informações obtidas, incrementando significativamente a confiabilidade das análises.

Nesse contexto, os centros de monitoramento geotécnico assumem papel estratégico na operação segura de barragens, configurando-se como núcleos de tomada de decisão fundamentada em evidências técnicas. A eficácia desses centros depende, entre outros fatores, da adoção de protocolos metrológicos rigorosos, da atualização contínua das bases de dados, da manutenção preventiva dos equipamentos e, principalmente, da formação técnica e ética dos profissionais responsáveis pela interpretação dos dados. A capacitação permanente das equipes, aliada ao fortalecimento institucional dos órgãos fiscalizadores e à democratização do acesso às tecnologias de monitoramento, figura como elemento estruturante de uma governança efetiva em segurança de barragens.

Como perspectiva futura, recomenda-se que novos estudos sejam conduzidos com foco na análise de desempenho comparativo de diferentes modelos de piezômetros em cenários operacionais variados, incluindo aspectos como sensibilidade à saturação, durabilidade, acurácia sob diferentes regimes de tensão e respostas a eventos extremos. Além disso, investigações sobre o uso de técnicas avançadas de sensoriamento distribuído, como sensores baseados em fibra óptica e tecnologias integradas a redes neurais e modelos preditivos, podem contribuir substancialmente para o avanço da instrumentação geotécnica de alta performance. Outras linhas de pesquisa promissoras envolvem a avaliação de estratégias de descaracterização de estruturas construídas pelo método a montante, à luz das novas exigências legais e do acervo de dados instrumentais acumulados ao longo dos ciclos operacionais.

Por fim, destaca-se que a segurança de barragens de rejeito é uma temática que transcende os limites da engenharia, demandando abordagem interdisciplinar que articule aspectos técnicos, jurídicos, ambientais e sociais. A robustez dos sistemas de monitoramento, nesse sentido, deve ser compreendida como componente indissociável de um modelo de mineração responsável, sustentável e transparente, comprometido com a integridade das estruturas, com a proteção da vida humana e a preservação dos ecossistemas afetados.

REFERÊNCIAS

- AFFONSO, H. M. M.; SAYÃO, A. S. F. J. **Instrumentação para medir deslocamentos em barragens de enrocamento**. Rio de Janeiro: ABGE, 2020.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). **Segurança de barragens no Brasil: relatório 2020**. Brasília: ANA, 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/ana>. Acesso em: 9 abr. 2025.
- AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM). **Resolução nº 13, de 8 de agosto de 2019**. Estabelece critérios para a classificação, declaração e fiscalização da segurança de barragens de mineração. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 12 ago. 2019. Disponível em: <https://www.in.gov.br>. Acesso em: 9 abr. 2025.
- AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM). **Resolução nº 95, de 7 de fevereiro de 2022**. Estabelece diretrizes e procedimentos para a descaracterização de barragens de mineração construídas pelo método a montante ou consideradas alteradas. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 8 fev. 2022. Disponível em: <https://www.in.gov.br>. Acesso em: 9 abr. 2025.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 13028:2017: Elaboração e apresentação de projeto de barragem para disposição de rejeitos de mineração**. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.
- AZEVEDO, Luiz Carlos Rodrigues de. **Instrumentação de barragens de rejeitos: critérios para instalação e análise de dados de piezômetro tipo standpipe**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2016.
- BRAGIONI, D. DE O. **Aplicação dos níveis de controle no monitoramento piezométrico em um estudo de caso em barragem de mineração**. [s.l.] Universidade Federal de Ouro Preto, 2022.
- BRAGIONI, Pedro; SANTOS, Paulo Henrique dos; MARTINS, João Paulo. Análise comparativa do desempenho de piezômetros elétricos e piezômetros do tipo standpipe instalados em barragens de rejeito. **Revista Brasileira de Geotecnia Aplicada**, v. 4, n. 2, p. 45–61, 2022.
- BRASIL. **Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010**. Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 21 set. 2010. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br>. Acesso em: 9 abr. 2025.
- BRASIL. **Lei nº 14.066, de 30 de setembro de 2020**. Altera a Lei nº 12.334, de 2010, para dispor sobre segurança de barragens. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 1º out. 2020. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br>. Acesso em: 9 abr. 2025.
- CAETANO, T. R. et al. Análise dos usos e potenciais de risco das barragens de rejeito de Minas Gerais. **66º Congresso Anual da ABM**, p. 4382–4389, 2012.
- CARDOZO, F. A. C. **Barragens de Rejeito de Mineração: considerações gerais e aspectos geotécnicos**. [s.l.] Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2019.
- CARDOZO, F. A. C.; PIMENTA, M. M.; ZINGANO, A. C. Métodos construtivos de barragens de rejeitos de mineração – uma revisão. **Holos**, v. 8, p. 77–85, 2016.

CASTRO, Frederico de Castro. **A instrumentação em barragens de contenção de rejeitos de mineração**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2008.

CASTRO, L. V. P. de. **Avaliação do comportamento do nível d'água em barragem de contenção de rejeito alteada a montante**. [s.l.] Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2008.

CONSELHO INTERNACIONAL DE MINAS E METAIS (ICMM). **Global industry standard on tailings management**. London: ICMM, 2019. Disponível em: <https://www.icmm.com>. Acesso em: 9 abr. 2025.

CRAIG, R. F. **Mecânica dos solos**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2004.

CRUZ, C. O. **Classificação das barragens de rejeito baseada no risco de eventos indesejáveis utilizando dados do SIGBM – Sistema Integrado de Gestão de Barragens de Mineração da ANM**. [s.l.] Universidade Federal de Ouro Preto, 2024.

DIAS, L. M.; FERREIRA, V. R.; GUIMARÃES, R. S. Aplicação de sensores piezométricos baseados em fibra óptica para o monitoramento de barragens de rejeito. **Revista Brasileira de Geotecnologia**, v. 12, n. 2, p. 155–174, 2021.

DUNCAN, J. M.; WRIGHT, S. G. **Soil strength and slope stability**. Hoboken: John Wiley & Sons, 2005.

FERNANDES, M. M. et al. Diretrizes técnicas para o monitoramento geotécnico de barragens de rejeito. **Revista Brasileira de Geotecnia Aplicada**, v. 4, n. 2, p. 85–103, 2016.

FERREIRA, V. R.; ALBUQUERQUE, M. T. D. Avaliação comparativa de piezômetros para monitoramento geotécnico de barragens de rejeitos. **Revista Engenharia Geotécnica**, v. 26, n. 3, p. 233–248, 2018.

GENS, A.; ALONSO, E. E. Aznalcóllar dam failure. Part 2: Stability conditions and failure mechanism. **Géotechnique**, v. 56, n. 3, p. 185–201, 2006. DOI: 10.1680/geot.2006.56.3.185.

GEO-INSTRUMENTS. **Monitoring Mines & Tailings Dams**. Disponível em: <https://www.geo-instruments.com/expertise/monitoring-mines-and-tailings-dams/>. Acesso em: 9 abr. 2025.

GEOKON. **Tailings Dams Instrumentation**. Lebanon, NH: Geokon Inc., 2019. Disponível em: <https://www.geokon.com>. Acesso em: 9 abr. 2025.

GEOSENSE. **Geotechnical Instruments and Data Acquisition Systems**. Suffolk: Geosense Ltd., 2021. Disponível em: <https://www.geosense.co.uk>. Acesso em: 9 abr. 2025.

INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS (ICOLD). **Tailings dams: risk of dangerous occurrences: lessons learnt from practical experiences**. Bulletin 121. Paris: ICOLD, 2016. Disponível em: <https://www.icold-cigb.org>. Acesso em: 9 abr. 2025.

JARDINI, J. A.; REIS, D. F.; MIRANDA, L. B. Avaliação da drenagem interna em barragens de rejeito e suas implicações na segurança estrutural. **Revista Engenharia Civil em Debate**, v. 15, n. 2, p. 95–118, 2023. Disponível em: <https://www.ecdebate.org>. Acesso em: 9 abr. 2025.

LEÃO, S. R.; SANTIAGO, A. M. Cenário das barragens de rejeito: conhecer para evitar novas catástrofes. **Ambiente e Sociedade**, v. 25, 2022.

MASSAD, F. A. N. **Geotecnia: princípios e práticas**. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

MENDES, M. **Comportamento geotécnico de uma barragem de rejeitos alteada para montante**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

MIKKELSEN, P. E. Field instrumentation in geotechnical engineering. In: *FMGM 2003: Field Measurements in Geomechanics. Proceedings*. Oslo: A.A. Balkema, 2003. p. 3–23.

MINAS GERAIS. Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável (SEMAD); Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM); instituto estadual de florestas (ief); instituto mineiro de gestão das águas (igam). Resolução Conjunta nº 02, de 8 de fevereiro de 2019. Estabelece procedimentos e critérios para o processo de descaracterização de barragens a montante em Minas Gerais. **Diário do Executivo**, Belo Horizonte, MG, 9 fev. 2019. Disponível em: <https://www.meioambiente.mg.gov.br>. Acesso em: 9 abr. 2025.

MORGENSTERN, N. R. et al. **Report on Mount Polley Tailings Storage Facility Breach**. Independent Expert Engineering Investigation and Review Panel. British Columbia: Government of British Columbia, 2016. Disponível em: <https://www.mountpolleyreviewpanel.ca>. Acesso em: 9 abr. 2025.

POULOS, H. G. Methods of analysis of slope stability. **Geotechnical and Geological Engineering**, v. 19, n. 3–4, p. 197–209, 2001. DOI: 10.1023/A:1013139715246.

RST INSTRUMENTS. **Inclinometer systems: principles and practice**. Maple Ridge, BC: RST Instruments Ltd., 2020. Disponível em: <https://www.rstinstruments.com>. Acesso em: 9 abr. 2025.

SANTOS, F. A.; MENDONÇA, M. B. DE. A percepção de risco associado à barragem de rejeito de mineração por parte da população. **I Congresso Brasileiro de Redução de Riscos de Desastres**, p. 1–13, 2016.

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

SILVA, E. L. E.; SILVA, M. A. DA. Segurança de barragens e os riscos potenciais à saúde pública. **Saúde em Debate**, v. 44, n. spe2, p. 242–261, 2020.

SILVA, L. A. et al. Aplicação de sensores de fibra óptica na instrumentação geotécnica de barragens. **Revista Brasileira de Geotecnia Aplicada**, v. 9, n. 3, p. 210–226, 2021. DOI: 10.1590/2359-6643. 2021. v9n3. Acesso em: 9 abr. 2025.

SILVA, M. C. et al. Segurança de barragens de rejeitos e impactos ambientais: uma revisão sobre a mineração de caulim em uma região amazônica. **MultiDebates**, v. 7, n. 4, p. 64–78, 2023.

SILVA, Márcio Flávio Sousa. **Sistema de monitoramento online de barragens de mineração**. 2019. Monografia (Graduação em Engenharia de Controle e Automação) – Universidade Federal de Ouro Preto, Escola de Minas, Ouro Preto, 2019.

SILVA, T. M.; OLIVEIRA, C. A.; LOPES, R. T. Monitoramento automatizado em barragens de rejeito: uma abordagem baseada em sistemas SCADA. **Revista Engenharia & Tecnologia Ambiental**, v. 8, n. 1, p. 32–48, 2020.

SLOPE INDICATOR COMPANY. **Installation procedures and technical manual for vibrating wire and pneumatic piezometers**. Seattle: Slope Indicator, 2007.

THOMÉ, R.; PASSINI, M. L. 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 - UNIOESTE/MCR**, v. 18, n. 34, p. 49–65, 2018.

TIMOTEO, Leonardo Geraldo Megre; DELBEM, Itamar Daniel; GARCIA, Carlos Roberto Pereira; GALERY, Roberto. PiezoSys: sistema de monitoramento de bacias de rejeito em tempo real. In: **Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-Primas e Seminário Brasileiro de Minério de Ferro**, 39., 2009, Ouro Preto. Anais [...]. Ouro Preto: [s.n.], 2009.