

Desafios na Implantação de um Sistema de Monitoramento Sísmico em Estruturas Geotécnicas

Luiz Rafael Pereira dos Santos
Geólogo, Vale S.A., Itabira, Brasil, Luiz.santos4@vale.com

Beatriz Saralha Friguetto
Engenheiro Geotécnico, Vale S.A., Belo Horizonte, Brasil, Beatriz.friguetto@vale.com

Luciano Mozer Assis
Gerente, Vale S.A., Belo Horizonte, Brasil, Luciano.assis@vale.com

RESUMO: No monitoramento de fenômenos sísmicos são coletados, registrados e analisados dados relacionados à atividade sísmica a fim de entender, prever e responder esses fenômenos. Na geotecnia há uma abordagem especializada desse tipo de monitoramento que se concentra na avaliação do impacto de eventos sísmicos (terremotos) e vibrações sísmicas (naturas ou antrópicas) na estabilidade e no comportamento de estruturas geotécnicas, tais como barragens, diques, taludes, cavas, fundações e outras obras civis relacionadas ao solo e à geotecnia.

Alguns métodos utilizados no monitoramento sísmico, mais especificamente na sísmica de refração e microssísmica que estão em foco nesse estudo, envolvem a instalação de sensores como acelerômetros, geofones e sensores de pressão acústica nas estruturas geotécnicas bem como a análise de dados coletados de estações sismográficas próximas. Esses dados que abrangem amplitude, frequência, velocidade e aceleração de ondas mecânicas são submetidos a processamento e interpretação, visando avaliar a resposta da estrutura diante de um evento sísmico, e adotar medidas apropriadas para garantir a sua segurança. Entretanto, a implantação de um sistema de monitoramento sísmico, principalmente por ser considerada uma metodologia não convencional no monitoramento de estruturas geotécnicas, se revela uma tarefa bastante desafiadora pelo fato de envolver diversas considerações técnicas, financeiras e operacionais, todavia superar esses desafios é essencial tendo em vista que esse tipo de monitoramento constitui uma ferramenta valiosa para avaliar e mitigar os riscos sísmicos associados a estruturas geotécnicas, bem como garantir que elas sejam projetadas e operadas de maneira segura.

Nesse estudo foram utilizados como base algumas estruturas geotécnicas, preponderantemente barragens de mineração, e demonstrado com detalhes alguns dos principais desafios que envolveram a implantação de um monitoramento sísmico, que requer a aplicação de atividades como site survey, conectividade dos equipamentos com a sala de monitoramento, a interpretação dos dados, demonstrar a importância desse tipo de monitoramento não convencional e disseminá-lo na rotina da geotecnia, aquisição e manutenção dos equipamentos, relação com empresas terceiras e comunidades locais, alto investimento financeiro, entre outros condicionantes.

PALAVRAS-CHAVE: Monitoramento sísmico, estruturas geotécnicas, barragens, desafios, segurança.

ABSTRACT: In monitoring seismic phenomena are collected, recorded, and analyzed data related to seismic activity in order to understand, predict, and respond to these phenomena. In geotechnics there is a specialized approach to this type of monitoring that focuses on evaluating the impact of seismic events (earthquakes) and seismic vibrations (natural or anthropogenic) on the stability and behavior of geotechnical structures, such as dams, dikes, slopes, pits, foundations, and other civil works related to soil and geotechnics.

Some methods used in seismic monitoring, more specifically in refraction seismic and microseismic that are the focus of this study, involve the installation of sensors such as accelerometers, geophones, and acoustic pressure sensors in geotechnical structures as well as the analysis of data collected from nearby seismographic stations. These data, which cover amplitude, frequency, speed, and acceleration of mechanical waves, are subjected to processing and interpretation, aiming to evaluate the structure's response to a seismic event, and adopt appropriate measures to ensure its safety. However, the implementation of a seismic monitoring system,

mainly because it is considered an unconventional methodology in the monitoring of geotechnical structures, proves to be a very challenging task due to the fact that it involves several technical, financial and operational considerations, nevertheless overcoming these challenges is essential having given that this type of monitoring constitutes a valuable tool for evaluating and mitigating seismic risks associated with geotechnical structures, as well as ensuring that they are designed and operated in a safe manner.

In this study, some geotechnical structures, predominantly mining dams, were used as a basis, and demonstrated in detail some of the main challenges that involved the implementation of seismic monitoring, which requires the application of activities such as site survey, connectivity of equipment with the monitoring room, interpreting the data, demonstrating the importance of this type of unconventional monitoring and disseminating it in the geotechnical routine, acquisition and maintenance of equipment, relationships with third-party companies and local communities, high financial investment, among other conditions.

KEYWORDS: Seismic monitoring, geotechnical structures, dams, challenges, safety.

1 INTRODUÇÃO

Fenômenos sísmicos, também conhecidos como terremotos ou sismos, são eventos relacionados ao movimento e à liberação de energia na crosta terrestre. Essa energia é liberada na forma de ondas sísmicas que se propagam pelo solo e podem ser detectadas e medidas por instrumentos chamados sismógrafos. Esses eventos podem ocorrer devido a uma variedade de causas, como atividade tectônica, atividade vulcânica, deslizamentos de terra ou atividades humanas, e podem variar em magnitude e intensidade.

A magnitude de um fenômeno sísmico é uma medida da energia liberada durante o evento. Ela é frequentemente expressa em uma escala, como a escala Richter ou a escala de magnitude de momento (M_w). Fenômenos sísmicos menores têm magnitudes mais baixas, enquanto os maiores têm magnitudes mais altas. Os fenômenos sísmicos de baixas magnitudes podem ser quase imperceptíveis para as pessoas e geralmente não causam danos significativos. Por outro lado, fenômenos sísmicos de altas magnitudes podem ser extremamente destrutivos, causando danos extensos a edifícios, infraestrutura e representando riscos graves para a vida humana.

Nesse contexto, a sísmica e a microssísmica são técnicas utilizadas na engenharia e na geofísica para o estudo dos fenômenos sísmicos. Ambas são fundamentais em projetos que envolvem a interação com o subsolo, como barragens, construções civis e exploração de recursos naturais, mas podem ser usadas de maneiras diferentes e para propósitos distintos.

A Sísmica, especificamente a Sísmica de Refração, envolve a geração de ondas mecânicas que se propagam através do solo e são captadas por sensores (geofones ou acelerômetros). Através da análise dessas ondas, é possível avaliar as características físicas das rochas, como densidade e grau de fraturamento. Esta técnica é amplamente utilizada para localizar aquíferos, realizar estudos geotécnicos e mapeamento geológico, fornecendo informações cruciais para a construção e manutenção de barragens.

Por outro lado, a microssísmica é uma metodologia voltada para o monitoramento contínuo de vibrações em estruturas geotécnicas. Utilizando sensores de alta sensibilidade, é possível acompanhar as vibrações em tempo real, permitindo uma avaliação precisa das condições da estrutura. Isso faz com que o método microssísmico seja extremamente eficaz na detecção e avaliação de riscos sísmicos de determinadas áreas ou estrutura.

Em resumo, enquanto a sísmica é mais utilizada para obter um entendimento profundo das características geológicas e mecânicas do solo e das rochas, a microssísmica é mais voltada para o monitoramento contínuo de vibrações em estruturas geotécnicas, particularmente eventos sísmicos de pequena intensidade. Ambas as técnicas são essenciais para o planejamento, construção e manutenção de estruturas seguras e eficientes.

1.1 Objetivos

Na busca por atender às demandas surgidas nos tempos mais recentes, muito foi feito na implantação de instrumentação para monitoramento de diversas estruturas geotécnicas, especialmente barragens. Dentre esses monitoramentos, destacam-se aqueles que envolvem respostas a fenômenos sísmicos.

Segundo Mendecki et al. (2010), o monitoramento da resposta sísmica tem alguns objetivos específicos. Primeiramente, visa identificar e localizar possíveis danos no maciço causados por eventos sísmicos, a fim de alertar e prevenir potenciais riscos operacionais. Além disso, busca-se comparar as observações reais (sismos sentidos) com as previsões sísmicas esperadas para entender o comportamento do maciço rochoso diante do evento. Também é importante detectar alterações significativas e repentinas nos parâmetros sísmicos, que possam indicar instabilidade e afetar áreas de trabalho imediatamente ou a curto prazo. Por fim, o monitoramento sísmico visa a busca contínua por melhorias na operação, no planejamento da mina e no monitoramento microsísmico, através de uma análise retroativa regular para ajustar as informações iniciais sobre riscos ou microzonificação sísmica.

Esses são alguns dos objetivos que queremos alcançar com o monitoramento de resposta sísmica, mas quais são os desafios para implementar essas tecnologias? Para obter essa resposta, o presente artigo traz um diagnóstico dos principais desafios associados à implementação do monitoramento de resposta sísmica em estruturas geotécnicas.

2 INSTRUMENTAÇÃO SÍSMICA

O monitoramento de resposta sísmica é uma prática crucial para garantir a segurança de estruturas geotécnicas. Através do uso de sismógrafos de engenharia e outros dispositivos de medição, é possível detectar e registrar as vibrações e outros parâmetros que possam afetar a estabilidade da estrutura. O monitoramento contínuo permite a detecção precoce de qualquer sinal de instabilidade na barragem, possibilitando a tomada de medidas corretivas antes que ocorram falhas catastróficas.

Os sismógrafos, por exemplo, são alguns dos principais dispositivos usados para o monitoramento de barragens. Esses instrumentos registram as ondas sísmicas causadas por movimentos sísmicos naturais ou induzidos pela atividade humana, que podem afetar a estabilidade das barragens. Os dados coletados pelos sismógrafos são analisados por nossos especialistas, que podem interpretar corretamente os resultados e tomar as medidas necessárias para garantir a segurança da estrutura.

É importante ressaltar que o monitoramento sismográfico deve ser realizado de forma contínua e em tempo real, para garantir uma detecção precoce de qualquer atividade sísmica que possa indicar riscos para a barragem..

2.1 Sensores

Vários tipos de sensores são utilizados para detectar e medir as vibrações do ambiente. Entre os principais utilizados estão os geofones, acelerômetros, sensores de proximidade, sensores de efeito Hall, sensores de pressão acústica (microfones) e sensores piezoelétricos. Os geofones são sensores que convertem movimentos do solo em tensão elétrica. Eles são comumente usados em exploração sísmica para registrar as ondas de energia, especialmente as de baixa frequência, que são refletidas de volta à superfície. Eles consistem basicamente de uma massa móvel dentro de um campo magnético. Quando a massa se move em resposta a uma vibração, ela gera uma corrente elétrica proporcional à velocidade do movimento.

Os acelerômetros medem a aceleração do movimento com sistema de massa e mola, onde a aceleração da massa é convertida em um sinal elétrico proporcional à aceleração. São mais sensíveis a mudanças lentas na pressão de fluidos no subsolo e são eficazes na detecção de eventos sísmicos de menor magnitude.

Os sensores de proximidade detectam a presença ou ausência de objetos próximos. Eles podem ser do tipo indutivo, capacitivo, ultrassônico ou a laser. Os sensores de efeito Hall medem a magnitude de um campo magnético e podem ser usados para detectar a presença de objetos metálicos, o que pode ser útil em algumas aplicações de microsísmica.

Os sensores de pressão acústica (microfones) são usados para medir a pressão acústica, que é uma medida da energia sonora no ambiente, e os sensores piezoelétricos geram uma tensão elétrica em resposta a uma pressão mecânica e são usados em uma variedade de aplicações, incluindo a detecção de vibrações.

3 PRINCIPAIS DESAFIOS

Cada estrutura geotécnica é única e possui características específicas que exigem cuidado e atenção quanto ao tipo de monitoramento a ser implementado. Pensando nisso, são realizados vários estudos para

compreender as reais necessidades de monitoramento de determinada estrutura geotécnica, pois a implementação de um monitoramento, principalmente os não convencionais, envolve muitos desafios. Por convencional entende-se o uso de métodos tradicionais de monitoramento com o uso de instrumentos como piezômetros, medidores de nível d'água, inclinômetros, régua de reservatórios entre outros; por não-convencional se aplica o uso de novas tecnologias utilizadas nos monitoramentos de estruturas geotécnicas como InSAR (radar de abertura sintética), radar interferométrico terrestre, estações totais robóticas, sismógrafos de engenharia e microssísmica.

Aqui vamos exemplificar os principais desafios que envolvem a implantação de um monitoramento focado em detectar fenômenos sísmicos naturais e/ou induzidos através da utilização de sismógrafos de engenharia e o método microssísmico em estruturas geotécnicas, mais especificamente em barragens de mineração.

3.1 Diagnóstico de Necessidade do Monitoramento

Segundo Silveira et al. (2006), todo instrumento deve ser selecionado e instalado para responder a questões específicas; se não há perguntas, não deve haver instrumentação. Seguindo essa lógica, primeiramente é importante avaliar se os monitoramentos já existentes na estrutura são suficientes para atestar sua estabilidade. A redundância de dados é importante principalmente para verificar e reforçar tendências de monitoramento, bem como fornecer uma fonte de dados substitutos em caso de falha de um sistema. Segundo Sharon et al., 2020, de forma ideal, a redundância de dados deve ser obtida a partir de diferentes tipos de instrumentos. A premissa é que se a manifestação física da alteração é detectada por diferentes sistemas, então a alteração deve ser real.

Por outro lado, a redundância tem um custo adicional com equipamentos, instalações, operação, manutenção e, muito importante, um aumento substancial nos dados gerados, que então precisam ser analisados e gerenciados. Recomenda-se então uma abordagem equilibrada e baseada no risco. O número e tipos de instrumentos devem estar alinhados com os modos de falha esperados e com os recursos apropriados.

Por fim, é necessário avaliar se a detecção de fenômenos sísmicos é relevante para o monitoramento da estrutura. Como exemplo, nas barragens desse estudo em questão são utilizados sismógrafos de engenharia para monitorar as obras de descaracterização de barragens de rejeitos. A instrumentação é instalada nas estruturas e desempenha papel essencial na detecção de movimentação de veículos pesados e vibrações ocasionadas pelas obras desenvolvidas no local. Já a microssísmica, que é um monitoramento contínuo de vibrações de baixa intensidade, é muito utilizada no monitoramento de barragens que possuem método de falha do tipo liquefação, sendo essencial na detecção de problemas de estabilidade que possam estar afetando a estrutura, por exemplo.

3.2 Site Survey

Outra etapa importante é o levantamento do local onde a instrumentação será instalada, comumente chamado de site survey. Na geotecnia, esse termo se refere a uma avaliação detalhada e sistemática de um local onde se deseja implementar determinado tipo de monitoramento. É essencial realizar um estudo criterioso do local onde os geofones ou sensores de pressão acústica serão instalados, por exemplo, pois é necessário que o arranjo esteja bem ajustado para detectar os fenômenos sísmicos de forma consistente.

3.3 Conectividade dos Equipamentos com a Sala de Monitoramento

Um ponto que pode demandar muito tempo e trabalho é realizar o comissionamento da rede dos sistemas sísmicos. São muitos os requisitos que têm que ser atendidos, tanto técnicos e funcionais como também burocráticos, todos esses é claro essenciais para se ter um monitoramento seguro e eficiente.

Muitas estruturas estão localizadas em áreas remotas e de difícil acesso, o que é mais um ponto que traz dificuldade na instalação, conectividade e transmissão dos dados da instrumentação.

Entre os itens necessários para realizar o comissionamento dos equipamentos sísmicos (Figura 1) estão servidores internos e externos, rádios de transmissão, postes de comunicação, criação de arquitetura de sistema, regras de firewall, componentes de segurança de rede para prevenir possíveis invasões ou perda de dados, sistemas de redundância, entre outros requisitos técnicos.



Figura 1. Atividade de campo realizada para comissionamento de rede da instrumentação sísmica presente em uma barragem de mineração. Na imagem é possível notar os componentes eletrônicos do sistema microssísmico que ficam armazenados numa carretinha. (Imagem do autor, 2024).

Só depois do comissionamento de rede, atendendo todos os requisitos citados, os dados chegam à sala de monitoramento e podem ser interpretados e utilizados.

3.4 Interpretação dos Dados

A interpretação de dados sísmicos é um processo fundamental que envolve a análise cuidadosa e minuciosa de conjuntos complexos de informações obtidas a partir de várias fontes. No caso deste estudo, envolve a sísmica de refração e o monitoramento sísmico contínuo (microssísmica). Esses dados revelam uma riqueza de informações sobre riscos sísmicos inerentes à atividade de mineração.

Na interpretação de dados sísmicos, utilizamos uma variedade de técnicas e ferramentas para extrair significado dos padrões, características e relações nos conjuntos de dados. Isso envolve a identificação de reflexões e refrações sísmicas, análise de amplitudes e tempos de chegada de ondas sísmicas, modelagem de velocidades sísmicas, correlação com informações geológicas e geotécnicas existentes, entre outros métodos.

Ao interpretar dados sísmicos, é essencial considerar a complexidade e a incerteza inerentes aos dados, bem como os diferentes modelos e hipóteses que podem explicar os padrões observados. A interpretação geralmente requer uma abordagem integrada, combinando dados de múltiplas fontes e técnicas para obter uma compreensão abrangente da estrutura e dos processos em estudo.

Para analisar e interpretar todos esses dados, fazemos uso de uma equipe de especialistas multidisciplinar, internos e externos, que envolvem geotécnicos, geólogos, geofísicos e engenheiros. Todos esses profissionais trabalham colaborativamente para que as interpretações sejam robustas e bem fundamentadas, levando em conta uma variedade de perspectivas e conhecimentos especializados.

3.5 Aquisição e Manutenção dos Equipamentos

A aquisição e manutenção de equipamentos sísmicos são processos críticos para garantir a qualidade e a confiabilidade dos dados coletados em estudos sísmicos. Ao adquirir equipamentos para nossas estruturas, selecionamos dispositivos apropriados que atendam às necessidades específicas do projeto e sejam fabricados por empresas reconhecidas pela qualidade de seus produtos, pois isso influencia diretamente a precisão e a confiabilidade dos dados obtidos.

Após a aquisição, nossos equipamentos sísmicos são submetidos a procedimentos de calibração e testes para garantir seu correto funcionamento antes de serem utilizados em campo. Esses testes incluem a verificação da sensibilidade dos geofones, a calibração das fontes sísmicas e a integridade dos cabos e unidades de aquisição.

Para manter os equipamentos em bom estado de funcionamento ao longo do tempo, é necessário realizar inspeções regulares para identificar e corrigir problemas potenciais. Isso inclui verificações de limpeza, inspeção visual, testes de funcionamento e ajustes necessários. Manter os equipamentos limpos e bem conservados é fundamental para garantir sua durabilidade e desempenho adequado, incluindo proteção contra poeira, umidade e danos físicos.

A calibração periódica dos equipamentos sísmicos é essencial para garantir a precisão contínua dos dados ao longo do tempo. Isso pode envolver ajustes na sensibilidade dos geofones, verificação da integridade dos cabos e calibração das fontes sísmicas. Além disso, componentes sujeitos a desgaste, como cabos, conectores e elementos de fixação, devem ser substituídos regularmente para garantir o funcionamento adequado dos equipamentos.

Todos esses processos são essenciais para garantir a qualidade dos dados sísmicos coletados. Para suprir essas necessidades, contamos com um contrato de serviços com uma empresa referência em monitoramento sísmico no Brasil, que nos ajudam a manter nossas estruturas bem monitoradas e seguras.

3.6 Relação com Comunidades Locais

Este é um tema muito sensível, que requer cuidado e vai muito além de um simples monitoramento, especialmente considerando o contexto atual envolvendo barragens de mineração no Brasil. Como mencionado anteriormente, muitas estruturas geotécnicas estão localizadas em áreas remotas ou rurais, o que dificulta a segurança e o controle de acesso de pessoas. Por vezes, membros das comunidades locais conseguem acessar essas estruturas, seja para trânsito simples ou para a realização de atividades como pesca, exercícios físicos, recreação, pastoreio de animais, entre outras.

Na Vale, é realizado um forte trabalho de comunicação aberta e transparente com as comunidades locais. Além disso, há a disseminação de informações precisas sobre a gestão das estruturas geotécnicas, especialmente as barragens. Isso inclui a proibição de acesso sem a devida autorização e a conscientização sobre os riscos e cuidados necessários em relação a esses locais. O objetivo principal é sempre garantir o bem-estar, interesses e segurança das pessoas envolvidas.

3.7 Relação com Empresas Terceiras

Possuir uma boa relação com as empresas prestadoras de serviço é fundamental para desenvolver um trabalho eficaz. No monitoramento de fenômenos sísmicos, essa boa relação torna-se ainda mais crucial, considerando que lidamos com equipamentos de alto investimento, manutenções específicas e geração de dados complexos sujeitos a diversas interpretações.

Uma etapa essencial nessa parceria comercial, além do respeito e cordialidade, é estabelecer claramente os papéis e responsabilidades de cada parte. Isso promove um bom fluxo de comunicação e define as competências reais dos profissionais e suas respectivas áreas de atuação (Figura 2).



Figura 2. Processo de instalação (enterramento) de geofones em uma barragem de rejeito para o monitoramento microsísmico. (Imagem do autor, 2023).

Na prática, implementar o que foi teorizado pode enfrentar desafios, por isso é crucial, além do mencionado, contar com um contrato robusto que abranja todos os aspectos e necessidades relacionados às atividades. Isso não se aplica apenas ao monitoramento sísmico ou áreas afins, mas a qualquer tipo de negócio que envolva parcerias comerciais.

3.8 Segurança

Outro aspecto muito sensível é a segurança dos nossos ativos na estrutura. Como mencionado anteriormente, a implementação de um sistema de monitoramento sísmico requer muitos componentes, alguns dos quais possuem um alto valor agregado. Apesar de esses componentes não serem frequentemente visados, ocasionalmente ocorrem casos de vandalismo que podem momentaneamente paralisar o monitoramento.

Itens como baterias e cabos de cobre, que compõem a instrumentação sísmica, apesar de terem um valor agregado menor, são essenciais para o funcionamento do sistema e infelizmente são alvos frequentes em nossas estruturas, resultando em casos de furtos e roubos que afetam o monitoramento.

Como alternativa para aumentar a segurança de nossas estruturas, estamos realizando um substancial investimento em câmeras de segurança de alta tecnologia, além de proteger e cobrir os equipamentos com ferramentas tanto tradicionais quanto inovadoras. Também estamos contratando serviços de segurança patrimonial que realizam rondas, vigilância e registro de ocorrências, entre outras soluções. No âmbito sísmico, estamos atualmente implementando um projeto piloto em uma de nossas barragens que visa aumentar a proteção dos nossos equipamentos. Foi adquirido um cofre bastidor (Figura 3), uma estrutura robusta que comportará a maioria dos componentes da instrumentação do monitoramento microsísmico sendo implantado na barragem, como baterias, netSPs, switches, transmissores, rádios, entre outros componentes. Isso certamente aumentará a segurança dos nossos ativos e conseqüentemente melhorará a qualidade do monitoramento, reduzindo as possíveis interrupções. Já para os sismógrafos de engenharia temos implantadas, em algumas estruturas, gaiolas enclausuradas (Figura 3) com cadeados antifurtos e torres de monitoramento que protegem as estações sismográficas, salvaguardando os equipamentos contra casos de roubo e vandalismo.



Figura 3. Cofre bastidor (1-2) e gaiola (3) que protegem os equipamentos sísmicos. (Imagem do autor, 2023).

3.9 Alto Investimento Financeiro

Os equipamentos sísmicos são projetados com tecnologia avançada para garantir precisão na detecção e registro de atividades sísmicas, sua instalação envolve trabalhos de campo extensivos para garantir uma cobertura adequada da área de interesse. Ainda, é necessário estabelecer uma infraestrutura de comunicação confiável para transmitir os dados coletados em tempo real, softwares especializados e recursos computacionais para análise e o processamento dos dados sísmicos. Além disso, os sistemas de monitoramento sísmico devem estar em conformidade com regulamentações e padrões de segurança estabelecidos pelas autoridades locais e internacionais. Isso pode envolver custos adicionais com auditorias de conformidade, certificações e treinamento de pessoal.

Para tanto que foi citado, é requerido um alto grau de investimento nesse tipo de sistema de monitoramento, o que constitui um grande desafio. Nem sempre todos os recursos estão disponíveis, por isso é importante gerir com eficiência o que se tem à disposição, fazendo com que esse seja um desafio contínuo.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O monitoramento de fenômenos sísmicos em estruturas geotécnicas é uma prática essencial para avaliar e mitigar os riscos inerentes à atividade sísmica. Consiste na instalação de sensores especializados para registrar e analisar as vibrações do solo durante eventos sísmicos naturais ou induzidos. Esses dados são fundamentais para entender o comportamento das estruturas geotécnicas, identificar potenciais danos e tomar medidas preventivas ou corretivas.

No entanto, o presente artigo demonstrou que a implantação da instrumentação em barragens e o subsequente monitoramento desses fenômenos sísmicos enfrentam muitos desafios, alguns bastante complexos como interpretação dos dados, manutenção dos ativos, relação com as comunidades locais, alto investimento financeiro e segurança. Superá-los é crucial para garantir a seguridade e estabilidade das estruturas geotécnicas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Felipe, A. (2023) *O que é: Fenômenos Sísmicos*. Disponível em: <<https://aeroengenharia.com/glossario/o-que-e-fenomenos-sismicos/>>. Acesso em: 10 mar. 2024.
- Mendecki, A.; Lynch, R.; Malovichko, D. (2010) *Routine Micro-Seismic Monitoring in Mines*. Australian Earthquake Engineering Society Conference Perth, Western Australia.
- Mirante, E. (2023) *Exploração Sísmica - Sísmica de Refração e Microsísmica*. Disponível em: <<https://miranteengenharia.com.br/sismica-sismica-de-refracao-microsismica/>>. Acesso em: 7 fev. 2024.
- Sharon, R.; Eberhardt, E. (2020) *Guidelines for Slope Performance Monitoring*. CRC Press.
- Silveira, J. (2006) *Instrumentação e segurança de barragens de terra e enrocamento*. São Paulo: Of. de Textos.