

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/557

## Potencial do Monitoramento Microsísmico na Localização de Máquinas Operando sobre Barragens de Rejeitos

Bruno Barauna

Geofísico, Tetra Tech, Belo Horizonte - MG, Brasil, bruno.barauna@tetrattech.com

Felipe Jesus

Geofísico, Tetra Tech, Belo Horizonte - MG, Brasil, felipe.jesus@tetrattech.com

Alonso Nolasco

Engenheiro Geotécnico, Vale S.A., Nova Lima - MG, Brasil, alonso.nolasco@vale.com

Carlos Gomes

Engenheiro Geotécnico, Vale S.A., Nova Lima - MG, Brasil, carlos.eduardo.gomes@vale.com

Luciano Assis

Engenheiro Geólogo, Vale S.A., Nova Lima - MG, Brasil, luciano.assis@vale.com

**RESUMO:** O sistema de monitoramento microsísmico se mostra como uma ferramenta para detectar e caracterizar vibrações geradas por máquinas em barragens de rejeitos durante obras de descaracterização. Simulações com uma escavadeira hidráulica, controlada remotamente, sobre o reservatório de uma barragem de rejeitos comprovaram a eficiência desse sistema. As amplitudes de vibração durante os golpes da pá do equipamento evidenciaram um contraste significativo nos períodos com e sem atividade (background), permitindo sua identificação e localização. Além disso, devido à assinatura sismográfica característica de pulso dos golpes com a pá, o sistema de monitoramento microsísmico permitiu a extração de parâmetros epicentrais dos testes, considerando um modelo de velocidade específico para a região da barragem previamente definido. Notou-se uma proximidade entre a posição real do teste de golpes, controlada por marcos topográficos previamente cadastrados na área de teste, e a localização epicentral estimada a partir dos dados microsísmicos considerando as incertezas de localização. Destaca-se que a utilização desse sistema não se restringe apenas à detecção de atividades operacionais de máquinas, mas também oferece um nível adicional de controle para garantir a segurança da barragem podendo ser utilizada para detectar e localizar outras fontes de vibração no ambiente minerário.

**PALAVRAS-CHAVE:** Monitoramento microsísmico; Barragem de rejeitos; Operação de máquinas

**ABSTRACT:** The microseismic monitoring system is a tool for detecting and characterizing vibrations generated by machines in tailings dams during decharacterization works. Simulations with a remotely controlled hydraulic excavator on the reservoir of a tailings dam proved the efficiency of this system. The vibration amplitudes during the blows of the equipment's blade showed a significant contrast in periods with and without activity (background), allowing its identification and location. Furthermore, due to the characteristic seismographic signature of the blade strike pulse, the microseismic monitoring system allowed the extraction of epicentral parameters from the tests, considering a previously defined specific velocity model for the dam region. A proximity was noted between the real position of the blow test, controlled by topographic landmarks previously registered in the test area, and the epicentral location estimated from microseismic data considering location uncertainties. It is noteworthy that the use of this system is not restricted only to the detection of operational activities of machines, but also offers an additional level of control to guarantee the safety of the dam and can be used to detect and locate other sources of vibration in the mining environment.

**KEYWORDS:** Microseismic Monitoring; Tailings Dam; Machine Operation

## 1 INTRODUÇÃO

O monitoramento microssísmico consiste no acompanhamento, em tempo real, dos registros das variações das amplitudes de vibração percebidas pelos sensores de um sistema microssísmico. Para o caso de barragens de rejeitos, esses sensores são estrategicamente posicionados ao longo do maciço da barragem e do reservatório, permitindo que o sistema monitore a exposição aos níveis de vibração decorrentes das atividades no ambiente minerário. Além disso, por meio do monitoramento, é possível identificar eventos microssísmicos que podem sinalizar possíveis anomalias na estrutura e regiões ao redor, servindo de subsídio para tomada de decisão sobre possíveis intervenções na estrutura e nas operações minerárias próximas.

No contexto minerário e geotécnico, verifica-se que a técnica é aplicada para monitorar as vibrações oriundas de máquinas e detonações, bem como atividades antrópicas relacionadas a esse contexto (PINNOCK, 2015; HE et al., 2023; ZHU et al., 2023). Também se verifica que, a técnica é utilizada para monitorar eventos microssísmicos que acontecem durante a injeção do fluido, no contexto de captura e armazenamento de  $CO_2$ , a fim de evitar a ocorrência ou expansão de vazamentos. Portanto, o monitoramento microssísmico já é uma ferramenta inserida em protocolos de segurança no contexto de controle de fenômenos de atividades antrópicas.

Ainda no contexto minerário e geotécnico, após as recentes falhas de estruturas geotécnicas ocorridas no Brasil, as mineradoras estão realizando obras de descaracterização de diversas barragens de rejeitos, as quais consistem na remoção parcial ou integral dessas estruturas, principalmente as construídas pelo método à jusante. Nesse cenário de descaracterização, nos últimos anos, a microssísmica passou a integrar parte dos sistemas de monitoramento dessas estruturas, contribuindo com a interferometria do ruído ambiente para a identificação de anomalias de variação de velocidade de onda de cisalhamento na estrutura e com o monitoramento de microssísmos e desmontes com explosivos. Esse trabalho demonstra, adicionalmente, o potencial da microssísmica para a localização de atividades de máquinas durante essas obras.

## 2 OBJETIVOS

Esse trabalho tem como objetivos principais: (i) localizar a posição de uma máquina operando no reservatório de uma barragem de rejeitos utilizando o sistema de monitoramento microssísmico; e (ii) demonstrar o potencial do sistema como uma ferramenta adicional de controle para identificação de fontes de vibração relacionadas ou não às operações na estrutura monitorada, expandindo sua utilidade na segurança e gestão da barragem de rejeitos.

## 3 METODOLOGIA

### 3.1 Estudo controlado

Em outubro de 2022, conduziu-se um estudo controlado envolvendo uma escavadeira hidráulica (modelo CAT336) sobre o reservatório de uma barragem de rejeitos instrumentada com um sistema de monitoramento microssísmico. O teste consistiu em aplicar golpes com a pá do equipamento em um ponto específico do terreno, conforme é ilustrado na Figura 1.

### 3.2 Sistema de monitoramento microssísmico

O sistema microssísmico da barragem de rejeitos, composto por onze (11) geofones, sendo oito (8) uniaxiais e três (3) triaxiais (Figura 1), foi calibrado para registrar vibrações de baixa amplitude induzidas no terreno, da ordem de  $10^{-7}$  m/s, em cada eixo de medida. Essa sensibilidade permite um monitoramento preciso das vibrações induzidas no terreno.

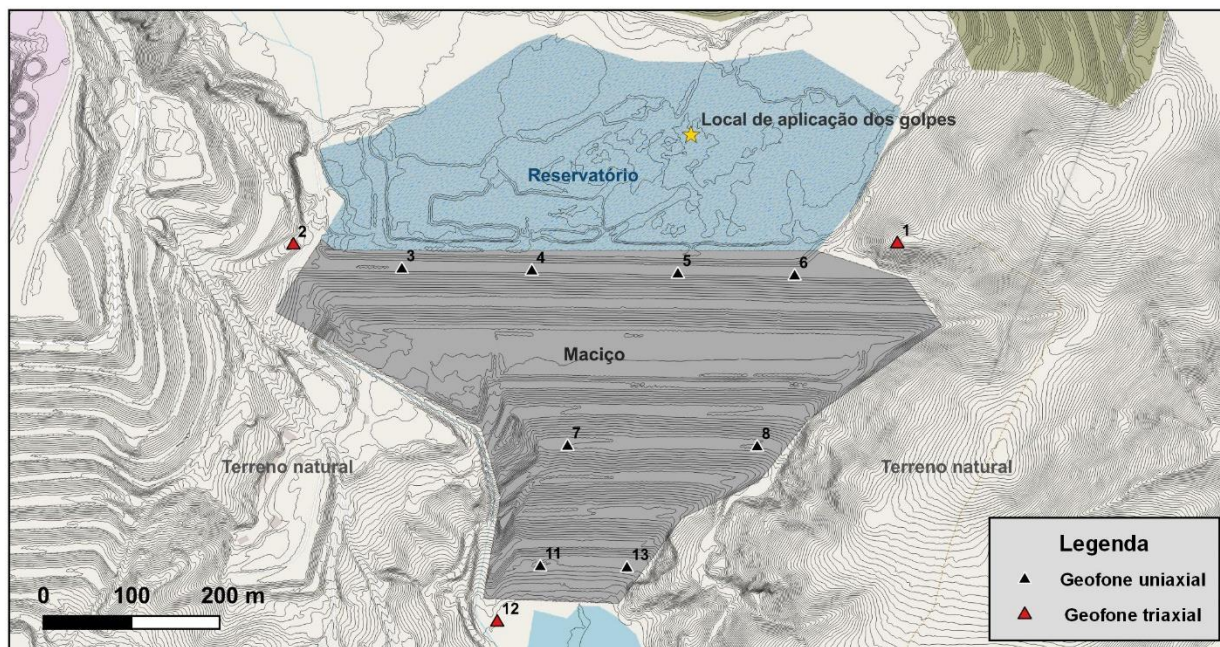


Figura 1. Esquema do sistema de monitoramento microssísmico na barragem de rejeitos. Sensores uniaxiais em cinza e triaxiais em vermelho.

### 3.3 Localização epicentral com o arranjo microssísmico

A localização de epicentro no sistema microssísmico da barragem de interesse utiliza o método de Geiger (GEIGER, 1912), usualmente aplicado nesse tipo de problema, que descreve uma solução para determinar as coordenadas do hipocentro de um sismo, isto é, o local de origem desse evento. Para realizar esse procedimento, identifica-se os tempos de chegada das ondas compressivas (P) e cisalhantes (S) em cada sensor do sistema microssísmico. Com os tempos de chegada conhecidos para as ondas P e S, torna-se possível calcular a distância de cada sensor até o epicentro do evento. Ao considerar os fatores de: (i) meio de velocidade homogênea, ou seja, com velocidades constantes das ondas P e S ( $V_P$  e  $V_S$ ), (ii) uma propagação linear dos raios e (iii) que a diferença entre os tempos de chegada das ondas S e P se relaciona ao tempo que a onda leva para viajar do hipocentro até o sensor; determina-se a distância hipocentral. Repetindo esse procedimento para todos os sensores do sistema de monitoramento microssísmico, obtemos um conjunto de linhas imaginárias que se cruzam em um ponto no espaço. Esse ponto consiste na estimativa do hipocentro do sismo.

Para aumentar a precisão da estimativa, o método de Geiger utiliza um processo iterativo. Nesse processo, as linhas imaginárias são ajustadas para minimizar a soma dos quadrados das distâncias entre cada linha e o ponto de interseção. O processo termina quando a estimativa do hipocentro converge para uma solução estável. Após determinar o hipocentro, calcula-se a distância epicentral de um evento específico. A distância epicentral é a distância entre o sensor e a projeção em superfície do hipocentro. Essa distância é essencial para a localização de eventos gerados por máquinas nas obras de descaracterização, visto que essas operam diretamente na superfície do terreno.

A Figura 2 ilustra o processo de identificação das chegadas de ondas P e S em um sismograma genérico. As ondas P têm maior velocidade, sendo as primeiras a serem registradas, e se distinguem pelo alto conteúdo de frequência. Por outro lado, as ondas S têm menor velocidade quando comparadas com as ondas P, e apresentam menor conteúdo de frequência e maiores amplitudes.

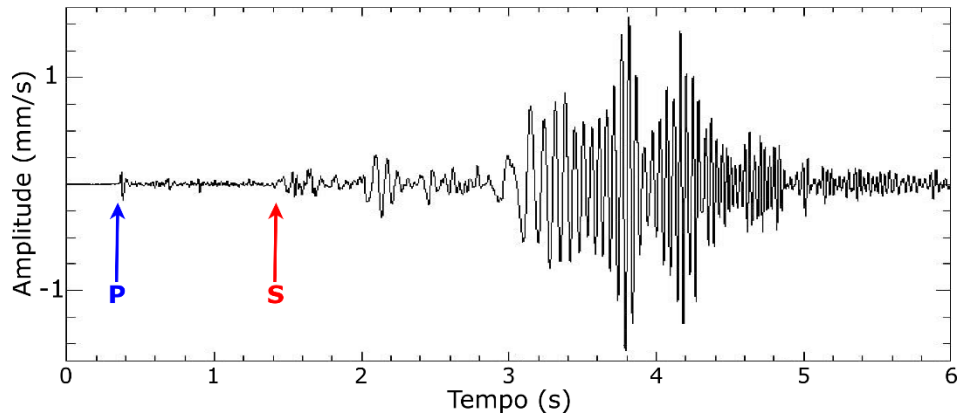


Figura 2. Identificação das chegadas das ondas P e S em um sismograma.

#### 4 RESULTADOS

Nesta seção, apresentam-se os resultados obtidos após ajustar os parâmetros epicentrais do teste de golpes, com base nos registros do sistema de monitoramento microssísmico de uma barragem de rejeitos. Na Figura 3, apresenta-se uma comparação entre as chegadas teóricas (linha inclinada), derivadas do controle de posição da fonte, e as chegadas estimadas (linhas retas) durante o processo de identificação das ondas P e S. Destaca-se que as características do conjunto de pulsos, o contraste de amplitude desses eventos e a sincronização temporal dos sensores, realizada pelo Sistema de Posicionamento Global (GPS) em tempo real, permitiram a extração dos parâmetros por meio do método de identificação das ondas P e S nos dados do sistema microssísmico, conforme detalhado na seção anterior.

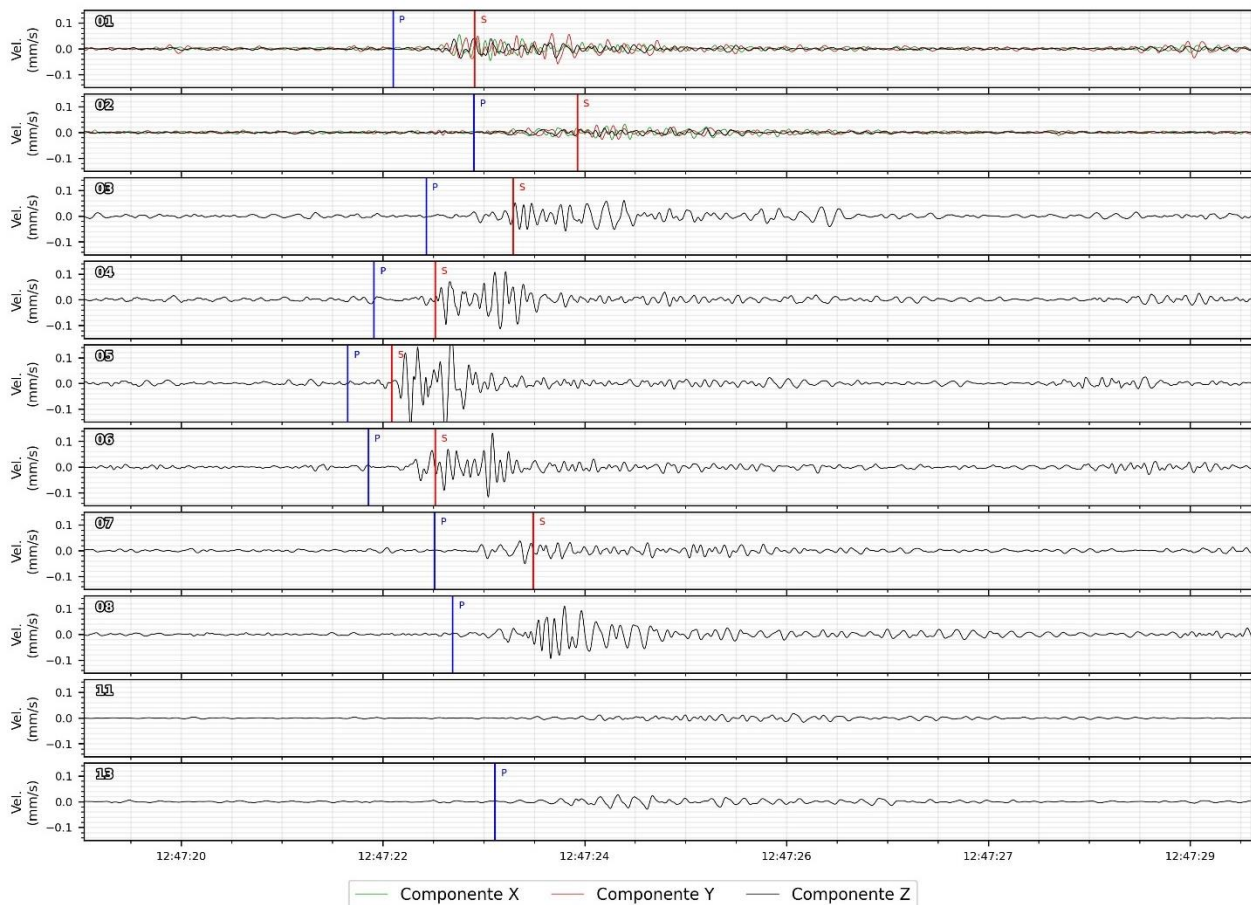


Figura 3. Processo de identificação das chegadas das ondas P e S durante o teste de golpes, que foi realizado entre as 12h46min50 e 12h47min55.

A Figura 4 apresenta a localização obtida para o golpe da pá da escavadeira por meio do sistema microssísmico. Salienta-se que o ajuste utilizou o modelo de velocidade calibrado para essa barragem de rejeitos. As velocidades de ondas P e S adotadas foram de 314 m/s e 184 m/s, respectivamente. O erro de localização encontrado foi de 15,2 m em ambos os eixos de coordenadas (X e Y).

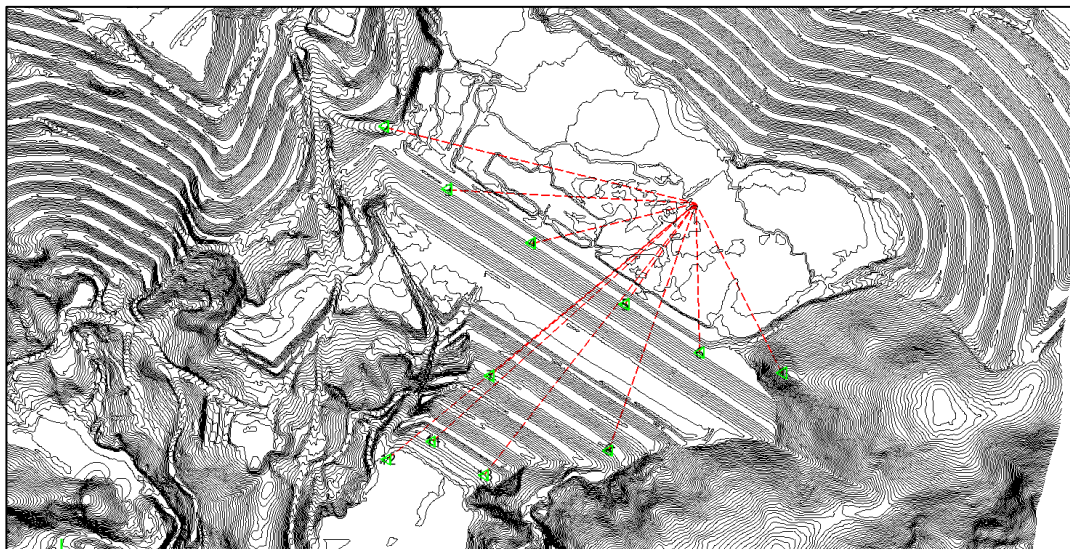


Figura 4. Localização estimada do golpe da pá da escavadeira, por meio do sistema de monitoramento microssísmico da barragem de rejeitos.

Na Figura 5, é exibida a comparação entre a posição de referência real do teste de golpes e a localização estimada por meio do sistema microssísmico. Nota-se a proximidade entre a posição real do teste e a localização estimada, com uma distância da ordem de 32 m (podendo chegar até 16 m, considerando o erro de localização). As discrepâncias podem ser atribuídas às incertezas inerentes ao processo de identificação das chegadas de ondas nos sismogramas, aos valores de velocidade de propagação de ondas assumidos no ajuste e na localização hipocentral, que leva em consideração os ajustes da profundidade.

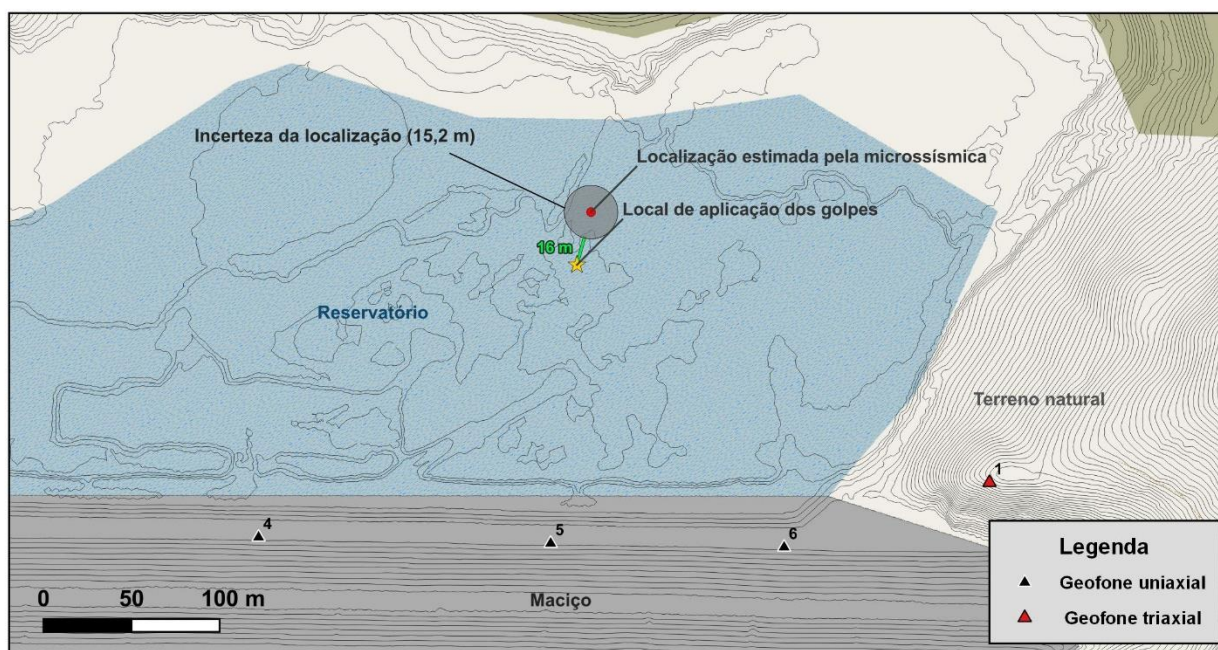


Figura 5. Comparação entre a posição do teste de golpes e a localização estimada pelo sistema de monitoramento microssísmico.

## 5 CONCLUSÕES

Esse trabalho demonstrou o potencial do sistema de monitoramento microssísmico de uma barragem de rejeitos para a localização de máquinas operando sobre o seu reservatório. A localização foi possível por meio da identificação das ondas P e S nos sismogramas registrados durante o teste de golpes com a escavadeira hidráulica, devido à natureza do sinal em forma de pulsos, conhecimento da posição dos sensores e da sua sincronização por sistema GPS.

Com o modelo de velocidade assumido para a estrutura, considerando valores de 314 m/s para  $V_P$  e 184 m/s para  $V_S$ , foi obtida uma margem de erro de localização da ordem de 15 m nos eixos das coordenadas X e Y. Em relação à posição real da fonte, encontrou-se uma diferença de 32 m quando comparada com a localização epicentral estimada. Considerando a margem de erro, essa diferença poderia chegar até 16 m. A diferença observada entre a localização real e a localização epicentral do teste de golpes pode ser atribuída aos fatores: (i) incertezas inerentes ao processo de identificação das chegadas de ondas P e S; (ii) modelo de velocidade de propagação de ondas assumido no ajuste; e (iii) algoritmo de localização hipocentral adotado, que leva em consideração eventos que ocorrem em profundidade.

Portanto, com os resultados apresentados nesse trabalho, reforçou-se que os sistemas de monitoramento microssísmico de barragens de rejeitos têm potencial para identificar e localizar eventos relacionados a ações antrópicas, mas, nesse caso, abrangendo operações de máquinas pesadas durante obras de descaracterização. Ressalta-se que os resultados partiram da premissa de tratamento de eventos com assinaturas sismográficas em formato de pulso, o que favorece a identificação de chegadas de ondas P e S, essenciais para a localização de eventos. Para trabalhos futuros, recomenda-se que sejam desenvolvidos testes focados em diferentes fontes de vibração no contexto de monitoramento de estruturas geotécnicas dentro do ambiente minerário, reforçando o potencial desses sistemas como mais de uma ferramenta para o controle de operações seguras em obras de descaracterização.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- GEIGER, Ludwig. Probability method for the determination of earthquake epicentres from the arrival time only. Bull. St. Louis Univ., v. 8, p. 60, 1912.
- HE, Zhengxiang; JIA, Mingtao; WANG, Ligan. UACNet: A universal automatic classification network for microseismic signals regardless of waveform size and sampling rate. Engineering Applications of Artificial Intelligence, v. 126, p. 107088, 2023.
- PINNOCK, I. et al. The use of microseismic acquisition for vibration monitoring applications. In: FMGM 2015: Proceedings of the Ninth Symposium on Field Measurements in Geomechanics. Australian Centre for Geomechanics, 2015. p. 581-587.
- ZHU, Quanjie et al. Research on feature vector construction and classification recognition of typical mine microseismic waveforms. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, v. 86, p. 105183, 2023.