XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.1/17

Avaliação da propagação de onda em rejeitos de minério de ferro sob o efeito das vibrações em superfície produzidas por atividades de terraplenagem

Jhon Tiga Entralgo
Engenheiro Geotécnico, Walm Engenharia, Belo Horizonte, Brasil, jhon.entralgo@walmengenharia.com.br

Lucas Almeida Campos
Engenheiro Geotécnico, Walm Engenharia, Belo Horizonte, Brasil, lucax.civil@live.com

Wanerson Luna Barroso
Engenheiro Geotécnico, Walm Engenharia, Belo Horizonte, Brasil, wanderson.barroso @walmengenharia.com.br

Demetrius Chianello Cancella
Engenheiro Geotécnico, Walm Engenharia, Belo Horizonte, Brasil, demetriuschianello@outlook.com

Renata Mattos Sampaio de Araujo Andrade
Engenheira Geotécnica, VALE S.A, Belo Horizonte, Brasil, renata.mattos.sampaio@vale.com

Ana Luiza Resende Leal
Engenheira Geotécnica, VALE S.A , Belo Horizonte, Brasil, ana.leal@vale.com

RESUMO: Em atividades com potencial de geração de vibrações, uma das avaliações fundamentais consiste em analisar o modo de propagação das ondas no meio. As propriedades geotécnicas e físicas do material atravessado influenciam significativamente esse comportamento, podendo resultar em fenômenos de amplificação ou atenuação das vibrações. Na comunidade científica, há inúmeros trabalhos com avaliações do efeito das vibrações geradas por explosivos durante o processo de desmonte em cavas. Entretanto, em função da necessidade de eliminação de barragens de rejeito alteadas a montante (Resolução 13 – ANM) no Brazil, houve a necessidade de estudar o impacto dos equipamentos de terraplanagem durante a remoção de rejeitos, já que os equipamentos podem ter capacidade de geração de vibração e, consequentemente, geração de poropressões. Dessa forma, o presente estudo consistiu na avaliação das vibrações provocadas por equipamentos de terraplanagem durante atividades comuns em escavações de reservatórios de rejeitos de minério de ferro, dispostos hidraulicamente. A partir de ensaios de campo foi possível construir curvas de atenuação de vibrações para as diferentes atividades. Em geral, os resultados mostraram que as atividades apresentaram atenuações significativa ao longo da distância, não sendo identificado valores superiores a 5 mm/s a partir de 20 metros de distância.

PALAVRAS-CHAVE: Barragem, Rejeitos, Liquefação, Vibração.

ABSTRACT: During excavation activities with potential to generate vibrations, one of the fundamental evaluations consists of analyzing the wave propagation mode in the corresponding area. The geotechnical and physical properties of the crossed material significantly influence this behavior, potentially resulting in phenomena of amplification or attenuation of vibrations. In the scientific community, there are numerous studies evaluating the effect of vibrations generated by explosives during the blasting process in pits. However, due to the need to decharacterization upstream-raised tailings dams (Resolution 13 – ANM) in Brazil, it was necessary to study the impact of earthmoving equipment during the removal of tailings, as the equipment can generate vibrations and excess pore water pressures. Thus, the present study consisted of evaluating the vibrations caused by earthmoving equipment during common activities in excavations of hydraulically disposed iron ore tailings dams. Field tests allowed to construct vibration attenuation curves for different activities. In general, the results showed that the activities presented significant attenuation over distance,

presenting values not above 5 mm/s beyond 20 meters. These findings are essential to ensure the safety and efficiency of tailings removal operations, minimizing environmental and structural impacts. In addition, they contribute to the development of safer and more sustainable practices in the mining industry, in line with current regulations.

KEYWORDS: Dam, Tailings, Liquefaction, Vibration.

1 INTRODUÇÃO

A liquefação de materiais siltosos e arenosos de comportamento contrátil pode ser desencadeada por processos estáticos ou dinâmicos. O processo estático está relacionado, principalmente, a carregamentos ou descarregamentos que promovem a redução das tensões efetivas no solo.. Já os processos dinâmicos são aqueles que tem a capacidade de gerar vibrações no meio.

Em atividades na área da engenharia, o efeito das vibrações pode ser avaliado por meio de testes de campo experimentais com o auxílio de sismográfos de engenharia e piezômetros, em superfície e em profundidade.

As pesquisas realizadas ao longo dos anos em relação ao efeito das vibrações e seus impactos em estruturas de rejeito tiveram um foco principal nos impactos de sismos naturais ou nas detonações de explosivos, uma vez que é comum se ter essa atividade em minas, como abordado por Veyera (1985) e Larson-Robl (2016). Entretanto, as ações dinâmicas podem ser bastante distintas, uma vez que o tipo de atividade influência nas características da onda e do meio.

Dada a necessidade de descaracterização de barragens alteadas a montante no Brazil, desde 2019 vem sendo realizados estudos do impacto das vibrações dos equipamentos de terraplanagem durante as atividades de remoção de rejeito, como abordado por Jardim et. al (2020) e Sanchez (2024).

Por isso, o presente estudo teve como objetivo avaliar o efeito da atenuação das vibrações provenientes da operação de máquinas durante atividades comuns de terraplenagem em uma região de reservatório saturado de uma barragem de rejeitos de minério de ferro. As avaliações foram realizadas por meio de sismógrafos de engenharia instalados em uma área de teste.

1 METODOLOGIA

As avaliações foram realizadas em considerando a movimentação de material com uma (1) escavadeira hidráulica, uma (1) motoniveladora e (1) trator de esteira, além do carregamento e trânsito de até quatro (4) caminhões basculantes, sendo avaliadas durante a construção e remoção de pistas experimentais (aterros) com espessura de 60, 120 e 180 centímetros.

Os testes foram conduzidos diretamente na área do reservatório de forma a reproduzir fielmente as características e condições reais do processo de remoção do rejeito, assegurando que os dados obtidos refletissem as situações encontradas durante a execução das obras.

O teste consistiu no monitoramento de uma área do reservatório com nível saturado próximo da superfície, iniciando-se a partir de aproximadamente 2,5 metros de profundidade. Para isso, foram utilizados sete (7) sismógrafos instalados na superfície, posicionados nas distâncias de 15, 20, 30, 40 e 60 metros em relação ao sismógrafo 1 (S01)

A instalação dos sismógrafos foi realizada em linha reta, com o objetivo de verificar a curva de atenuação das vibrações geradas pela fonte (equipamentos), buscando estabelecer correlações e auxiliar na interpretação dos resultados obtidos.". A Figura 1 ilustra o arranjo do local dos testes e a localização dos sensores utilizados.

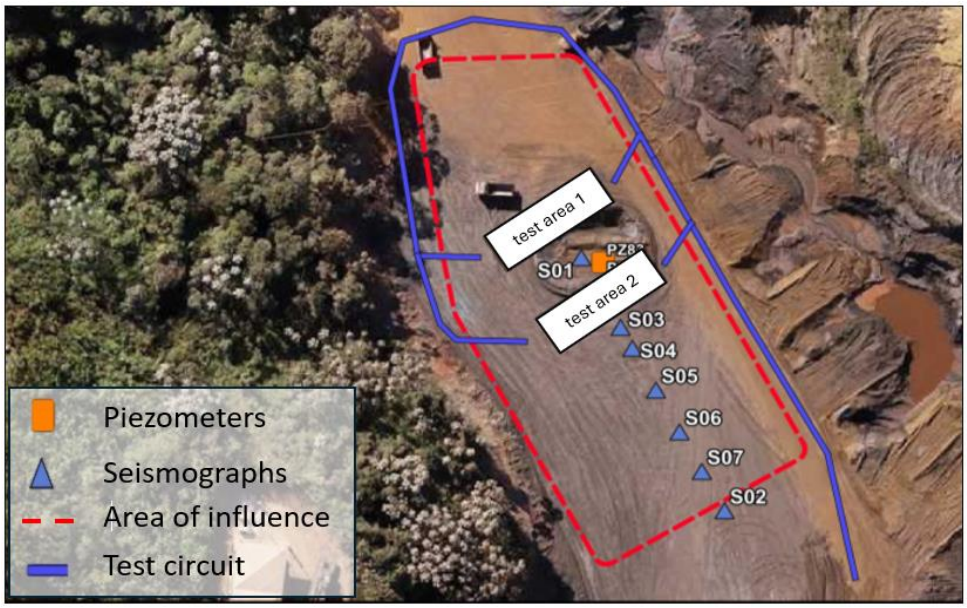


Figura 1 Arranjo dos testes.

Os testes de campo contaram com o uso de sete (7) sismógrafos de engenharia para a aquisição de dados em superfície (modelo Vibracord FX e Vibracord Tellus). Os sensores apresentam 3 eixos ortogonais, representando os eixos transversal, vertical e longitudinal. Esses equipamentos têm a capacidade de registrar dados em dois modos: contínuo (Waveform), que define uma taxa de amostragem, ou discreto (Histogram), que define uma janela de tempo na qual é registrado o maior valor. Nos testes realizado, os sensores funcionaram no modo discreto, que é mais simples e requer menos capacidade de armazenamento de dados, e foram configurados para registrar o maior valor a cada 30 segundos.

O teste experimental utilizou quatro tipos de veículos, sendo até quatro Caminhões Basculantes (Mercedez 4144), uma Escavadeira Hidráulica (CAT 336), um Trator de Esteira (D6T) e uma Motoniveladora (CAT 12M). Na Figura 2 são ilustrados os equipamentos utilizados durante os testes.



Figura 2 Imagem dos veículos utilizados nos testes.

Com base nos resultados obtidos, os dados foram organizados e classificados de acordo com distintas características das s atividades executadas durante os testes. O objetivo foi atribuir características sistemáticas a cada atividade, possibilitando a avaliação e comparação dos resultados por meio de filtros, como tipo de equipamento, tipo de atividade, área de teste, entre outros.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir dos ensaios de campo realizados no reservatório, foi possível construir curvas de atenuação de vibrações para diferentes atividades executadas nas atividades de terraplanagem.

Os ensaios de campo foram conduzidos sob uma variedade de condições operacionais (e.g., escavação, golpes de pá, transporte de material, etc.), com o objetivo de capturar a propagação das vibrações em diferentes cenários. A partir dos registros obtidos por sensores posicionados estrategicamente, foram construídas curvas de atenuação que relacionam a distância da fonte geradora (eixo x) aos níveis de vibração registrados (eixo y). Essas curvas permitem quantificar como a energia vibratória se dissipa no meio geotécnico, sendo fundamentais para prever impactos em estruturas críticas e definir protocolos de segurança.

Para cada atividade, os dados coletados formam um conjunto de pares (distância, vibração), que são ajustados a um modelo matemático, ou lei de atenuação.

As leis de atenuação são específicas para cada tipo de evento vibratório e meio de propagação. Por exemplo, a atenuação durante a operação contínua de uma escavadeira não pode ser descrita pela mesma lei aplicada a eventos impulsivos, como golpes da pá. Isso ocorre porque a natureza da fonte (frequência, energia, duração) e as propriedades do solo influenciam diretamente a forma como as ondas se propagam.

Em geral, o campo da geotecnia, é comum a utilização de modelos de ajuste baseados em funções potenciais (Lei de Potência) para representar a atenuação das vibrações. A energia cinética ou mecânica da fonte é convertida em deformação, calor, som e ondas vibratórias, que se propagam através do solo. A vibração não tende ao infinito, como descrito por uma lei de Potência, mesmo no ponto de contato ou extremamente próximo à fonte do impacto. Em vez disso, ela atinge um valor finito, determinado pelas propriedades físicas do sistema, como rigidez, amortecimento e dissipação de energia por absorção e calor.

Para superar essa limitação, este estudo adotou um modelo exponencial, conforme apresentado na equação a seguir. Esse modelo não apenas explica a atenuação das vibrações no solo, mas também permite de forma prática estimar valores de vibração em pontos muito próximos à fonte geradora:

$$y = a*e^{bx} \quad (1)$$

onde:
a é o coeficiente que representa a amplitude estimada das vibrações na fonte (x = 0);
b é a taxa de atenuação no meio.

Para realizar este ajuste entre o modelo exponencial e os dados medidos, foi utilizado o método de Gauss-Newton, um algoritmo iterativo que minimiza erros em modelos não lineares sem exigir transformações nos dados.

Em contraste, a transformação logarítmica (ln y = ln a + bx), embora simplifique o ajuste via Mínimos Quadrados, introduz distorções estatísticas se os dados originais possuírem ruído aditivo, pois penaliza desvios de forma assimétrica. O Gauss-Newton evita esse problema, trabalhando diretamente na escala original dos dados.

Os critérios de avaliação do ajuste incluem os seguintes parâmetros:

I. SQE (Soma dos Quadrados do Erro): Mede o erro absoluto entre os valores observados e previstos.
II. GLE (Graus de Liberdade do Erro): Indica a quantidade de informação disponível para estimar os parâmetros.
III. MSE (Erro Quadrático Médio): Representa a variabilidade dos erros. Normaliza o SQE pelo número de observações (MSE = SQE/n).
IV. S (Desvio-Padrão Residual): Reflete a dispersão média dos dados em torno da curva ajustada (S = √MSE). Valores baixos em relação à faixa das medições indicam alta precisão.

Para avaliar a qualidade do ajuste, foi comparado MSE e S com a variabilidade dos dados. Um erro considerado aceitável deve ser pequeno em relação ao intervalo de variação dos dados.

A Figura 3 apresenta os resultados dos testes, mostrando a relação entre a distância da fonte e a vibração em termos de PVS máximo. Nota-se que, aproximadamente após 30 metros, as vibrações se dissipam para valores inferiores a 5 mm/s, independentemente do tipo de atividade ou da intensidade da vibração na origem. No entanto, dentro da faixa crítica de 30 metros, onde há risco de geração de excesso de poropressão e fenômenos de liquefação, existem o risco constante que as vibrações excedam esse valor, mesmo em atividades rotineiras como a escavação. Se forem excluídas atividades incomuns, como golpes de escavadeira, a distância de referência para vibrações inferiores a 5 mm/s cai para aproximadamente 20 metros.

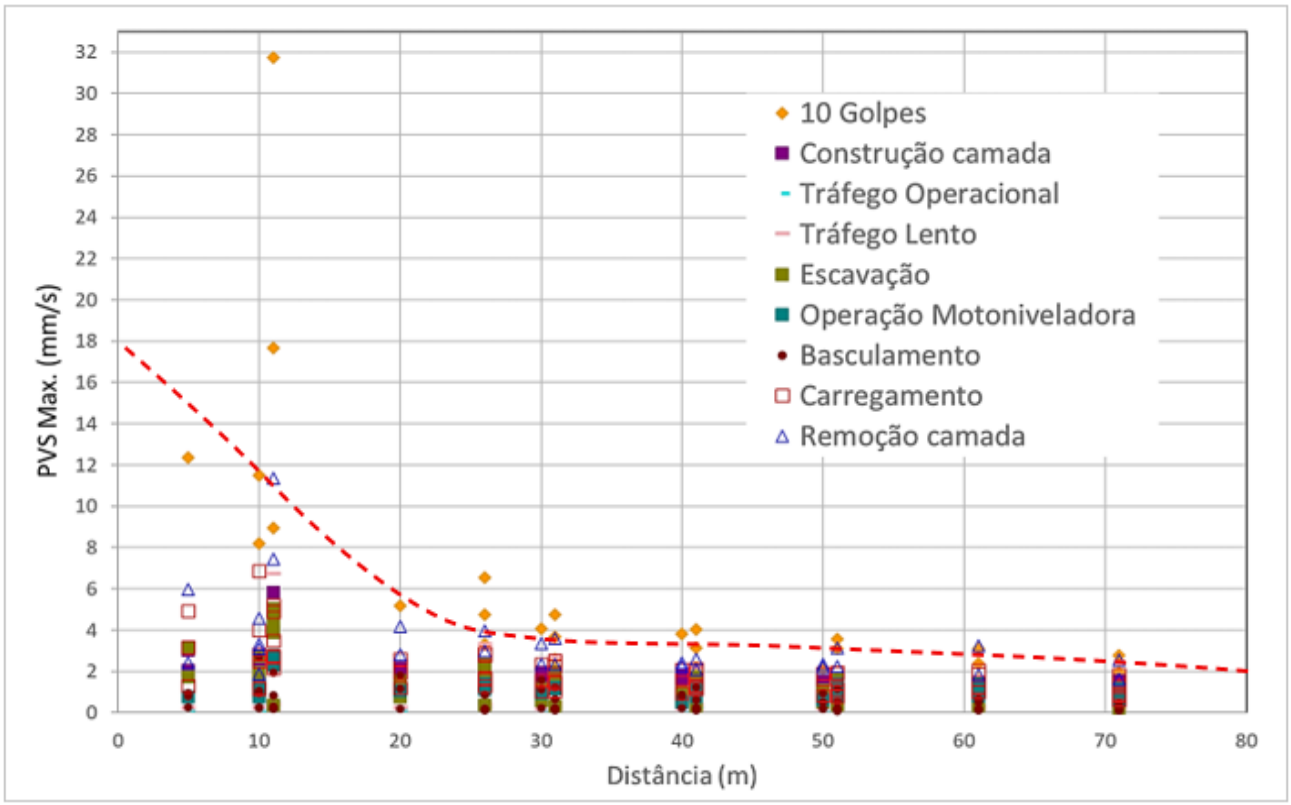


Figura 3 Distância vs. Vibração para todas as atividades.

A partir geração de curvas de atenuação, é possível determinar faixas de variação das vibrações para cada atividade na fonte e numa área determinada. Por exemplo, a atividade "10 Golpes da Pá de Escavadeira", de acordo com o ajuste exponencial dos dados, pode gerar na fonte ou próxima dela, vibrações entre 13,8 mm/s e 32,7 mm/s com 95% de confiança. A Figura 4 ilustra as duas atividades que geraram as maiores vibrações durante a realização do teste. A primeira é referente aos golpes de escavadeira, que é uma atividade atípica, já o segundo gráfico é relativo as atividades de escavação com a escavadeira.

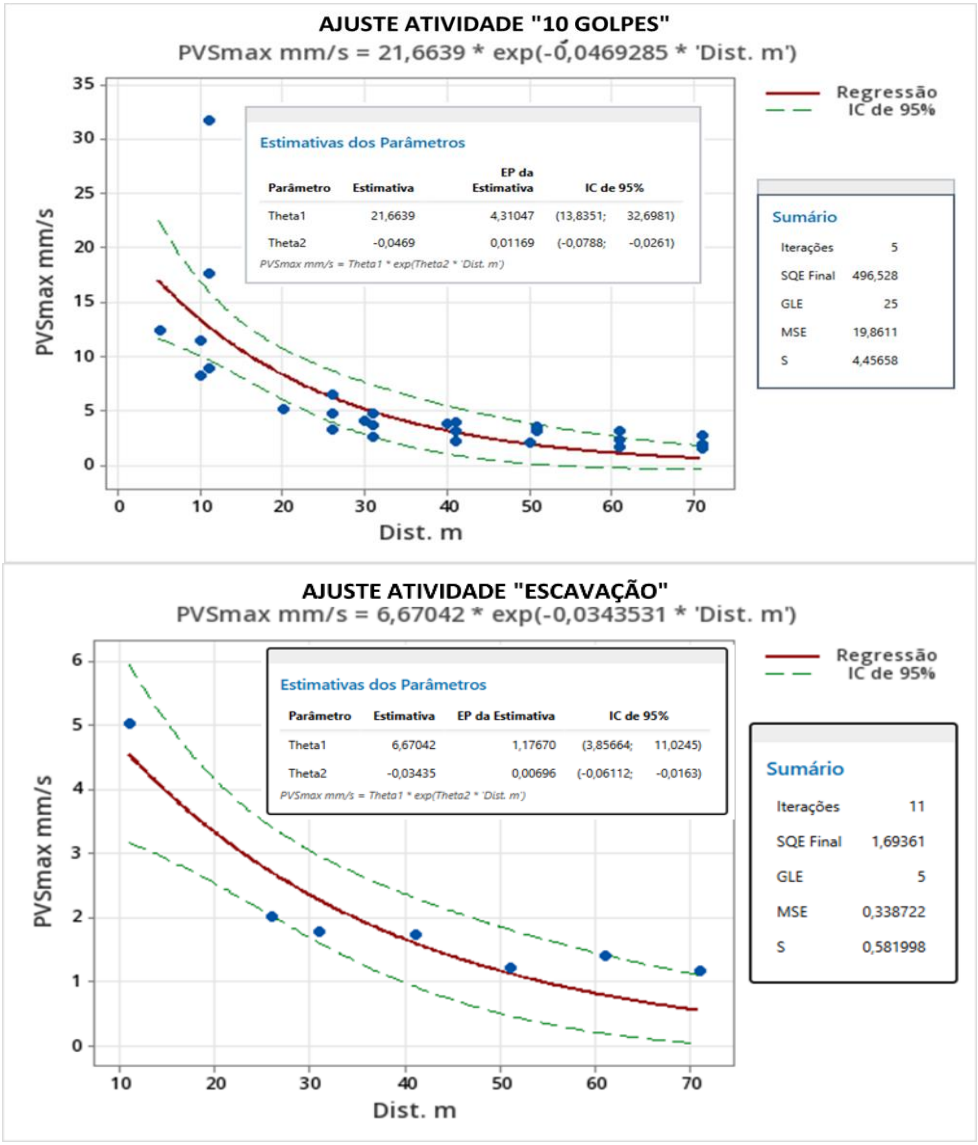


Figura 4 Distância vs. Vibração para todas as atividades.

A Tabela 1 resume os resultados obtidos para cada atividade em pontos muito próximo da fonte, com intervalo de confiança de 95%.

Tabela 1 Ajuste exponencial e Vibrações esperadas próximo da fonte por tipo de atividade

Atividade	a	b	Vibrações na fonte (95%) (mm/s)	S (mm/s)	Faixa dos dados (mm/s)	Erro relativo do ajuste
10 golpes	21,67	-0,05	13,84 a 32,7	4,46	30,26	14,7%
Basculamento	0,95	-0,02	0,62 a 1,35	0,50	2,62	19,1%
Escavação	6,67	-0,03	3,86 a 11,02	0,58	4,78	12,1%
Motoniveladora	3,74	-0,03	2,57 a 5,28	0,24	2,27	10,6%
Construção camada	3,12	-0,02	2,37 a 3,99	0,79	4,62	17,1%
Remoção camada	10,22	-0,04	5,68 a 17,73	0,89	9,70	9,2%
Carregamento	3,61	-0,026	2,95 a 4,36	0,32	6,23	5,1%
Tráfego lento	0,27	-0,004	0,24 a 1,89	0,10	0,44	22,7%
Tráfego operacional	0,32	-0,01	0,28 a 0,37	0,02	0,35	5,7%

Esse tipo de informação permite estabelecer valores de referência para monitoramento e controle operacional. Para cada atividade, pode-se extrapolar as faixas de vibrações na fonte ou em pontos muito próximos a ela mostradas.

Essas estimativas têm aplicações práticas importantes, pois possibilitam a definição de limites de controle para as operações. Se, por exemplo, durante uma escavação forem registradas vibrações significativamente superiores aos valores esperados, isso pode indicar problemas operacionais ou situações atípicas que demandam investigação. Esse monitoramento contribui para a prevenção de falhas e para a segurança da operação, permitindo intervenções rápidas e eficazes, como ajustes na execução da atividade ou mesmo a paralisação temporária das operações, caso necessário.

Os resultados apresentados, portanto, fornecem uma base quantitativa para avaliar e monitorar as vibrações geradas pelas atividades de remoção de rejeitos em Barragem de rejeitos, contribuindo para o gerenciamento seguro e eficiente das operações.

3 CONCLUSÕES

Os testes de vibrações avaliaram onze (11) atividades típicas realizadas durante os trabalhos de remoção de rejeito. Algumas dessas atividades são comuns, como a escavação de rejeito, construção de aterros de acesso e carregamento de caminhões. Outras são atípicas, mas de grande impacto e possíveis de ocorrer por acidente ou desconhecimento, como os golpes com a pá de escavadeira.

A partir dos ensaios de campo foi possível construir curvas de atenuação de vibrações para diferentes atividades executadas no processo de remoção de rejeitos. Foi adotado um modelo de ajuste exponencial dos dados, que não apenas explica a atenuação das vibrações no solo, mas também permite de forma prática estimar valores de vibração em pontos muito próximos à fonte geradora. A partir dessas estimativas, é possível determinar faixas esperadas das vibrações para cada atividade em pontos muito próximos da fonte.

A atividade que gerou os maiores níveis de vibração a 5 metros da fonte foram os golpes da escavadeira, atingindo valores máximos de 32 mm/s. A remoção de camadas de aterro apresentou o seguinte nível importante de vibrações, alcançando até 12 mm/s. O tráfego operacional e lento apresentou os menores níveis de vibração, com valores abaixo de 1 mm/s.

Os dados de atenuação mostraram que, aproximadamente após 30 metros, as vibrações se dissipam para valores inferiores a 5 mm/s, independentemente do tipo de atividade ou da intensidade da vibração na origem avaliadas nos testes. No entanto, dentro da faixa crítica de 30 metros, onde há risco de geração de excesso de poropressão e fenômenos de liquefação, existe o risco constante de que as vibrações excedam esse valor, mesmo em atividades rotineiras como a escavação. Se forem excluídas atividades incomuns, como golpes de escavadeira, a distância de referência para vibrações inferiores a 5 mm/s diminui para aproximadamente 20 metros

Os resultados forneceram uma base quantitativa para avaliar e monitorar as vibrações geradas pelas atividades de remoção de rejeitos, contribuindo para o gerenciamento seguro e eficiente das operações.
Ainda, considera-se que o estudo apresentado contribui para o entendimento do fenômeno analisado e pode ser utilizado para orientar e prever condições seguras de trabalhos de campo em obras com tipos de materiais e equipamentos semelhantes, sempre com instrumentação e monitoramento adequados.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a VALE e a WALM Engenharia pela execução dos testes e disponibilização dos dados para a comunidade científica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Jardim, E.C, et al. (2020) Avaliação de Potencial de Liquefação Cíclica por Vibrações de Obra de Descaracterização de Barragem de Rejeitos. COBRAMSEG, 8p.

Larson-Robl, K. M. (2016). Pore Pressure Measurement Instrumentation. Response To Blasting. Theses and Dissertations-Mining Engineering. University of Kentucky.

Pereira, E. L. (2005).” Estudo do potencial de liquefação de rejeitos de minério de ferro sob carregamento estático”. Magister Degree. Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP).

Sachez, F. P. Análise de vibrações, poropressões e potenciais de liquefação Induzidos por ações dinâmicas de equipamentos de construção em rejeitos de mineração (2024). Tesis. Universidade Federal do Parana (UFP), 259.

Veyera, G. E. (1985) “Transient Porewater Pressure Response and Liquefaction" In a Saturated Sand”. Ph.D. Dissertation, Department of Civil Engineering, Colorado State University.