DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.1/47

Influência das vibrações produzidas por atividades de terraplenagem na geração de poropressão em barragens de rejeitos de minério ferro

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

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

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

Andreatta Gomes Costa
Engenheira Geotécnica, VALE S.A , Belo Horizonte, Brasil, Andreatta.Costa@vale.com

Amanda de Sales Marotta da Silva
Engenheira Geotécnica, PROGEN, 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: A liquefação de rejeitos finos e arenosos pode ser desencadeada por processos estáticos ou dinâmicos. No Brazil, em função da necessidade de eliminação de barragens de rejeito alteadas a montante (Resolução 13 – ANM), houve a necessidade de estudar o potencial de liquefação dinâmica dos rejeitos frente às diferentes atividades de terraplanagem, já que a operação de equipamentos pode ter a capacidade de geração de vibração e poropressões com potencial de liquefação. Essa avaliação pode ser realizada a partir de testes de campo que medem o comportamento das atividades oriundas do processo de descaracterização com o auxílio de instrumentos como sismográfos de engenharia e piezômetros. Portanto, o presente estudo consistiu na avaliação da relação entre a velocidade de pico da partícula (PPV) medida em superfície e a geração de excesso de poropressão em profundidade, de modo a estabelecer diretrizes para o monitoramento e controle durante a operação de equipamentos. Os resultados mostraram para diferentes atividades de terraplanagem uma relação direta entre as vibrações e a geração de poropressão. Entretanto, a faixa de vibração produzidas pelos equipamentos não foi capaz de gerar excesso de poropressão significativos do ponto de vista geotécnico.

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

ABSTRACT: The liquefaction of fine and sandy tailings can be triggered by static or dynamic processes. In Brazil, due to the need to eliminate upstream-raised tailings dams (Resolution 13 – ANM), it was necessary to study the dynamic liquefaction potential of the tailings in relation to the decharacterization activities, once the operation of unmanned and manned equipment can generate vibrations and excess pore water pressures. This evaluation can be performed through field tests that measure the behavior of activities arising from decharacterization process, with the aid of instruments such as engineering seismographs and piezometers. Therefore, the present study consisted of evaluating the relationship between the peak particle velocity (PPV) measured on the surface and the generation of excess pore water pressure at depth, in order to establish guidelines for monitoring and control during equipment operation. For different earthmoving activities, the results showed a direct relationship between vibrations and pore pressure generation. However, the range of vibrations produced by the equipment was not capable of generating geotechnically significant excess pore pressure.

KEYWORDS: Dam, Tailings, Liquefaction, Vibration.

1 INTRODUÇÃO

O carregamento cíclico é uma das causas que podem instabilizar uma barragem de terra, já que ele apresenta a capacidade de reduzir a resistência dos materiais devido ao excesso de poropressão cumulativo em materiais contráteis e suscetíveis à liquefação, sob condição não drenada.

A liquefação pode ser entendida como o fenômeno que provoca a alteração do estado sólido do material para o estado fluido. Em rejeitos de mineração, além da alteração do estado do material seu comportamento está ligado a uma perda resistência repentina a pequenas deformações (PEREIRA, 2005).

A liquefação de materiais finos e arenosos contráteis podem ser desencadeadas por processos estáticos ou dinâmicos. O processo estático pode ser provocado, por exemplo, pelo carregamento imposto pelas fundações, construção de aterros conquista, escavações, ou qualquer outro evento capaz de alterar as tensões efetivas do solo. Por outro lado, o processo dinâmico pode estar ligado aos eventos sísmicos naturais, ou por vibrações geradas por detonação de explosivos ou equipamentos de construção, como tratores de esteira, rolo compactadores, escavadeiras etc.

As avaliações do efeito das vibrações na geração de poropressão podem ser realizadas em laboratório ou campo. Em laboratório é possível simular em ensaios triaxiais cíclicos, com modelos de grande escala e centrífugas. Já em campo é possível verificar o efeito das vibrações na geração de poropressão a partir da realização de praças experimentais instrumentadas com sismográfos e piezômetros, em superfície e em profundidade.

Uma das vantagens em se realizar testes de campo é a garantia de avaliação dos resultados considerando a real condição do meio, uma vez que os rejeitos hidráulicos apresentam estrutura de disposição típica de sedimentação, tendo características lamelares de distintos comportamentos, que, por vezes, o efeito escala não é possível de ser representado em laboratório. Além disso, os ensaios de campo permitem avaliar a relação entre apenas uma atividade ou de diferentes atividades em conjunto, permitindo entender os seus impactos em termos de geração de vibração, geração de poropressão e atenuação/ampliação das vibrações no meio.

Em relação aos instrumentos comumente adotados, os sismógrafos de engenharia são instrumentos compostos por até 3 (três) sensores capazes de medir a velocidade de vibração de partículas e as suas frequências em três direções ortogonais. Segundo a NBR 9653:2018, a velocidade de vibração de partículas é a oscilação de uma determinada partícula em torno do seu ponto de repouso devido à passagem de uma onda sísmica. A Peak Particle Velocity (PPV) é o valor máximo instantâneo da velocidade de vibração da partícula numa direção em um ponto durante um intervalo de tempo e a Velocidade de Vibração de Partícula resultante de pico (PVS) consiste no valor máximo obtido pela soma vetorial das três componentes ortogonais simultâneas de PPV. Por fim, a frequência de vibração da partícula corresponde ao número de oscilações por segundo que o meio físico vibra pela passagem da onda.

Já os piezômetros elétricos de corda vibrante têm o objetivo de medir as poropressões utilizando um diafragma com um componente de corda vibrante sensível o suficiente para causar deflexões pelas pressões proporcionalmente aplicadas.

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, 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 na geração de poropressão 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 das vibrações na geração de poropressão provenientes da operação de máquinas durante atividades comuns de terraplenagem em uma região saturada do reservatório de uma barragem de rejeitos de minério de ferro. As avaliações foram realizadas por meio de sismógrafos de engenharia e piezômetros instalados em uma área de teste.

2 METODOLOGIA

A avaliação da potencial geração de poropressão devido às atividades de terraplanagem foram realizadas em duas (2) fases de atividades:

(1) A primeira fase teve como objetivo avaliar o comportamento do rejeito durante a execução de escavações no entorno do ponto monitorado por um (1) sismógrafo e dois (2) piezômetros, tendo sido realizado atividades simultâneas com um conjunto de equipamentos:

a. Consistiu na adequação da área para a construção dos aterros, incluindo atividades como remoção de material e nivelamento da superfície, tendo duração de sete (7) dias seguidos. Nesta fase, foram contempladas atividades de movimentação de material com uma (1) escavadeira hidráulica e uma (1) motoniveladora, além do carregamento e trânsito de até quatro (4) caminhões basculantes.

(2) A segunda fase teve como objetivo avaliar com sete (7) sismógrafos e dois (2) piezômetros o comportamento das principais atividades previstas de forma isolada, ou conjunta, pelos equipamentos, de modo a identificar as potenciais vibrações geradas e seus impactos na geração de poropressão, seja por carregamento estático ou dinâmico. Foram contempladas atividades de movimentação de material com uma (1) escavadeira hidráulica, uma (1) motoniveladora e um (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 saturada com o uso de dois (2) piezômetros, instalados a 2,5 e 5,0 metros de profundidade, e de 7 (sete) sismográfos instalados na superfície, a 0, 15, 20, 30, 40 e 60 metros da ilha de controle dos piezômetros.

A instalação dos sismográfos adicionais em linha visou, além da avaliação da poropressão, verificar a curva de atenuação das vibrações provocadas pela fonte (equipamentos) de modo a tentar correlacionar e auxiliar na avaliação dos resultados. A Figura 1 ilustra o arranjo do local dos testes e a localização dos sensores utilizados.

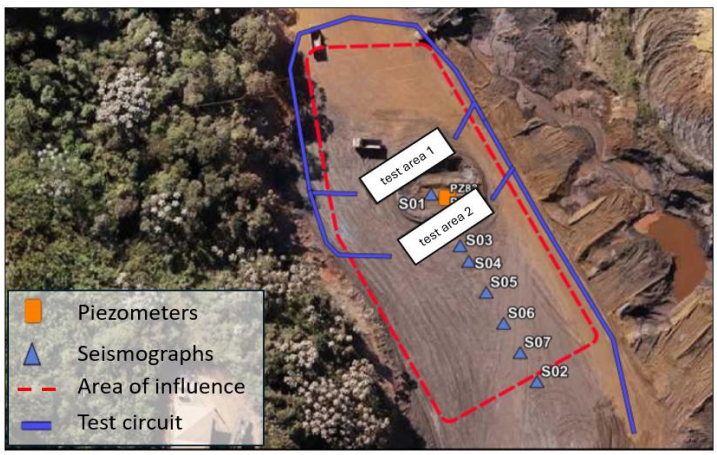


Figura 1. Arranjo dos testes

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 realizados, 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.

Além dos sismógrafos foram instalados dois piezômetros de corda vibrante do tipo push-in, em profundidades de 2,5 e 5,0 metros, abaixo do sismógrafo de engenharia mais próximo às fontes de interesse do estudo (S01). A instalação foi realizada por cravação com o auxílio do equipamento de execução de ensaios CPTu.

A definição do intervalo de medição dos piezômetros automáticos deve levar em consideração a natureza dos fenômenos que influenciam a variação dos níveis piezométricos. No caso de eventos vibratórios, como tráfego pesado e operação de equipamentos, as variações de pressão no meio saturado são instantâneas ou apresentam uma resposta rápida.

Se o intervalo de medição for muito elevado, há o risco de que essas variações não sejam registradas adequadamente, pois o piezômetro pode captar apenas os níveis estabilizados, sem registrar os picos transitórios de aumento ou diminuição do nível d'água. Isso compromete a sensibilidade da instrumentação na identificação de oscilações rápidas e a correlação com eventos externos. Por isso, os testes de campo foram conduzidos com leituras em intervalos de um (1) minuto, permitindo a detecção precisa das respostas dos piezômetros às vibrações.

Além disso, 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 e na Figura 3 são ilustradas algumas atividades realizadas durante os testes.



Figura 2 Imagens durante a realização do teste.

Com base nos resultados obtidos e no tratamento dos dados brutos dos testes de campo, os dados foram organizados e com base nas informações das 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

Ao longo da execução dos testes, os piezômetros apresentaram uma tendência geral de redução dos níveis piezométricos, o que pode estar associado a processos naturais de drenagem, intensificados pelo fato de os ensaios terem sido realizados durante o período seco, além dos efeitos da retirada de material e das melhorias recentes no sistema de drenagem do reservatório e seu entorno.

O piezômetro PZ83, situado a uma cota inferior, apresentou variações mais expressivas em comparação ao PZ82, sugerindo uma maior sensibilidade às operações realizadas. Esse comportamento contraria a expectativa inicial, uma vez que o PZ82, mais superficial, deveria apresentar maiores variações nas leituras, devido à sua proximidade com as fontes de vibração e às menores tensões de confinamento. Essa resposta inesperada pode estar associada às diferenças nas condições geotécnicas das camadas onde os piezômetros foram instalados ou pela condição do PZ82 estar em uma região limiar entre a superfície freática.

Observou-se também que o PZ83 apresentou as maiores variações de poropressão, com picos de aumento de aproximadamente 0,3 m e reduções de até 0,7 m em relação à tendência geral. Por outro lado, o PZ82 exibiu oscilações menos expressivas, com incrementos máximos em torno de 0,15 m e reduções de cerca de 0,1 m, exceto por um aumento anômalo, que será abordado adiante. Esses valores indicam que, apesar da tendência decrescente dos níveis piezométricos ao longo do período seco, os piezômetros responderam pontualmente às vibrações geradas pelas atividades de remoção, demonstrando sua sensibilidade às condições dinâmicas impostas pela obra.

Além disso, a atividade que gerou as maiores vibrações registradas nos ensaios foi o impacto da pá da escavadeira contra a superfície. Na FASE 1, os golpes da pá resultaram em valores de PVS Max. inferiores a 10 mm/s. Estes eventos ocorreram em momentos isolados e não geraram impactos significativos nas leituras piezométricas.

Já na FASE 2, a mesma atividade apresentou um comportamento distinto, com PVS Max. inferiores a 18 mm/s, atingindo picos próximos a 32 mm/s. Além disso, observou-se que os piezômetros PZ82 e PZ83 registraram oscilações nas pressões intersticiais durante esses eventos, refletindo uma resposta do solo às vibrações geradas.

Excluindo os golpes da pá da escavadeira, que representam uma atividade incomum durante as escavações, a atividade que mais gerou vibrações foi a remoção de camadas de aterro com escavadeira, atingindo valores máximos de PVS próximos a 12 mm/s. Essa atividade apresentou vibrações significativas e consistentes ao longo dos ensaios, com registros distribuídos ao longo da Fase 2 dos ensaios. Os valores de PVS indicam que a remoção de camadas gerou impactos dinâmicos relevantes no terreno, embora inferiores aos observados nos golpes da escavadeira.

A Figura 3 ilustra no eixo horizontal a data de realização dos testes para 11 atividades, no eixo vertical esquerdo a máxima vibração registrada (PVS Max.) e no eixo vertical direito a variação dos níveis em dois piezômetros de corda vibrante (PZ82 e PZ83).

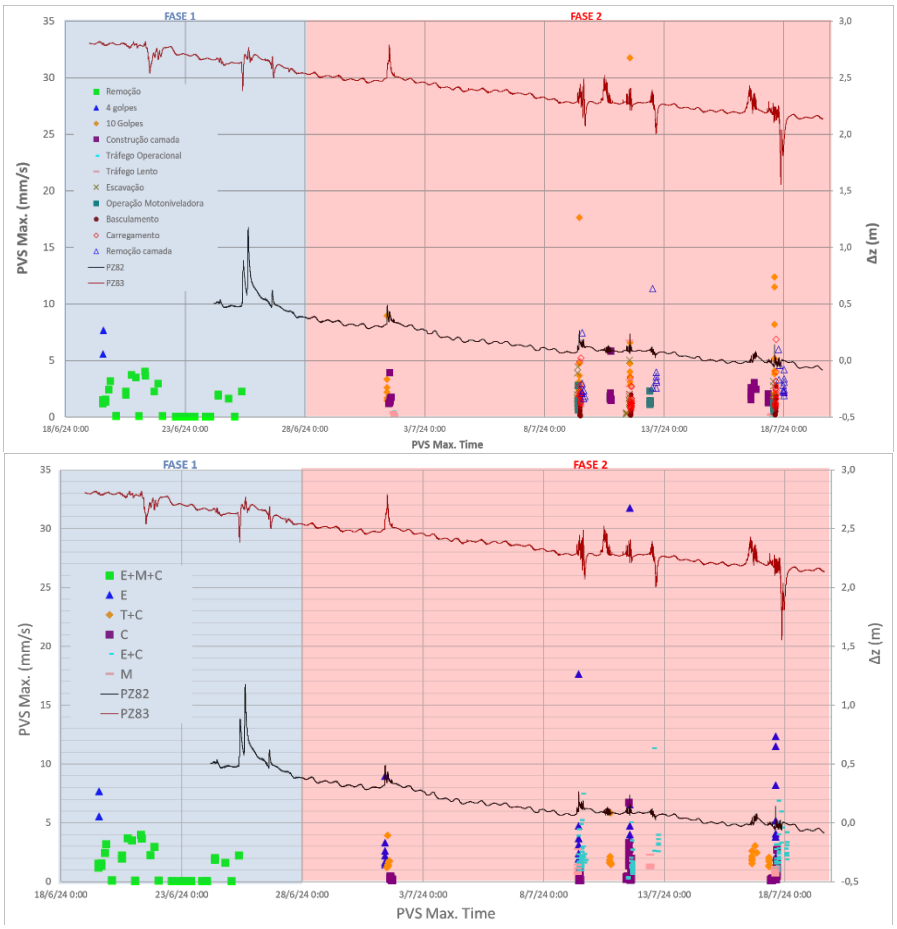


Figura 3 Vibrações em termos de PVS e carga hidráulica dos PZ82 e PZ83 de acordo com as atividades executadas durante todos os testes de campo.

Observou-se que o equipamento que gerou as maiores vibrações nos ensaios foi a escavadeira (E), seja operando isoladamente ou em conjunto com outros equipamentos. Além disso, combinações envolvendo o trator (T) e o caminhão (C) também demonstraram gerar vibrações relevantes, especialmente quando operando sobre os aterros compactados da Fase 2.

A Figura 4 apresenta os ensaios realizados na Fase 2, classificados de acordo com a espessura da camada de aterro sobre a qual foram realizados. Destaca-se a relação direta das atividades com a geração de poropressão, mantendo incrementos semelhantes independentemente da espessura da camada.

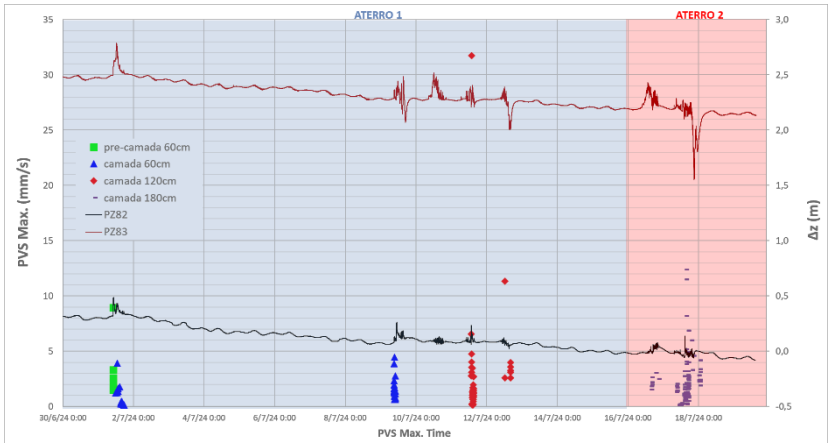


Figura 4 Vibrações em termos de PVS de acordo com a espessura das camadas e carga piezométrica (Leitura – cota do fundo do instrumento) dos PZ82 e PZRESULTADOS FASE 2 ATERRO 1 (01/07/2024).

A Figura 5 ilustram os resultados obtidos para diferentes atividades. O golpes da pá da escavadeira diretamente sobre o rejeito foi responsável pelos maiores valores de vibração registrados, chegando a aproximadamente 9 mm/s, com uma clara atenuação das vibrações nos outros sensores à medida que a distância da fonte aumentava. Além das vibrações elevadas, os impactos resultaram em geração de poropressão nos piezômetros PZ82 e PZ83, com elevações da ordem de 16 cm (≈1,6 kPa), demonstrando uma resposta hidrodinâmica do rejeito a esse tipo de solicitação.

Na sequência, iniciou-se a construção da camada de 60 cm do aterro com o uso de trator e caminhão. Essa etapa apresentou vibrações inferiores a 5 mm/s, bem menores do que as geradas pelos impactos da escavadeira.

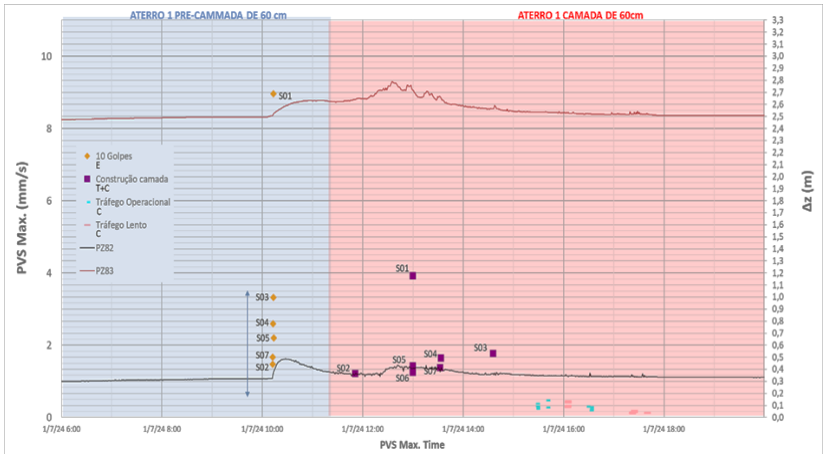


Figura 5 Vibrações em termos de PVS, de acordo com as diferentes atividades da Fase 2 dos testes, e carga hidráulica dos PZ82 e PZ83.

A construção da camada de 60 cm de aterro, com o uso de trator e caminhão, apresentou vibrações inferiores a 5 mm/s. Entretanto, apesar dos menores níveis de vibração, os piezômetros continuaram registrando um acúmulo de poropressões da atividade anterior. Como o tempo entre os golpes da escavadeira e a construção da camada foi curto, a dissipação completa das pressões ainda não havia ocorrido completamente.

Durante a construção da camada, o PZ82 mostrou um aumento de 8 cm (0,8 kPa) associado a uma vibração de 4 mm/s, enquanto o PZ83 aumentou 15 cm (1,5 kPa). O aumento durante os golpes da escavadeira

foi de aproximadamente 16 cm (1,6 kPa) em ambos os piezômetros, mostrando uma relação direta entre a poropressão e a vibração.

Por fim, o gráfico exibe a resposta do solo ao tráfego do caminhão, tanto em velocidade operacional quanto em velocidade lenta. Os dados indicam que ambas as condições geraram vibrações baixas, inferiores a 1 mm/s, e praticamente nenhuma variação nos piezômetros, sugerindo um efeito desprezível na geração de poropressões.

Isso reforça a hipótese de que a velocidade do caminhão tem pouca influência na geração de vibrações e poropressões, sendo um fator de menor impacto em comparação com os golpes da escavadeira ou mesmo a construção da camada.

O tráfego de caminhão, tanto lento quanto operacional, gerou vibrações muito menores do que as atividades anteriores. No entanto, além disso, também é perceptível que as vibrações da construção (T + C) são significativamente maiores do que as do tráfego, indicando que a compactação mecânica influencia muito mais a transmissão de energia ao solo do que o simples peso de um veículo em movimento. Além disso, espera-se que a atividade de um conjunto de caminhões transitando na mesma frequência tenha impactos mais significativos na geração de poropressão.

A tabela 1 e Figura 6 é apresentado um registro dos incrementos em cada piezômetro gerados pelas vibrações de cada atividade em diferentes espessuras de aterro. Os resultados mostram que o nível de vibração durante os testes gerou incrementos na piezometria máximos da ordem de 2,5 kPa, com a maioria dos registros apresentando poropressões abaixo de 1,0 kPa.

Tabela 1 Acréscimo de poropressão observado nos piezômetros para cada atividade e espessura de aterro.

Superfície	Atividade	PVS (mm/s) Máximo	Poropressão PZ 82-2,5m (kPa)	Poropressão PZ 83-5,0m (kPa)
Sobre rejeito	Golpes	9	1,6	1,5
Aterro 60 cm	Construção	4	0,8	-
Aterro 60 cm	Tráfego	0,5	0,3	0,2
Aterro 60 cm	Escavação	5	0,5	1
Aterro 60 cm	Regularização	3	0,1	0,2
Aterro 60 cm	Golpes	18	1,6	1,2
Aterro 60 cm	Carregamento	5,3	0,1	1,2
Aterro 60 cm	Remoção	7,5	0,8	1,8

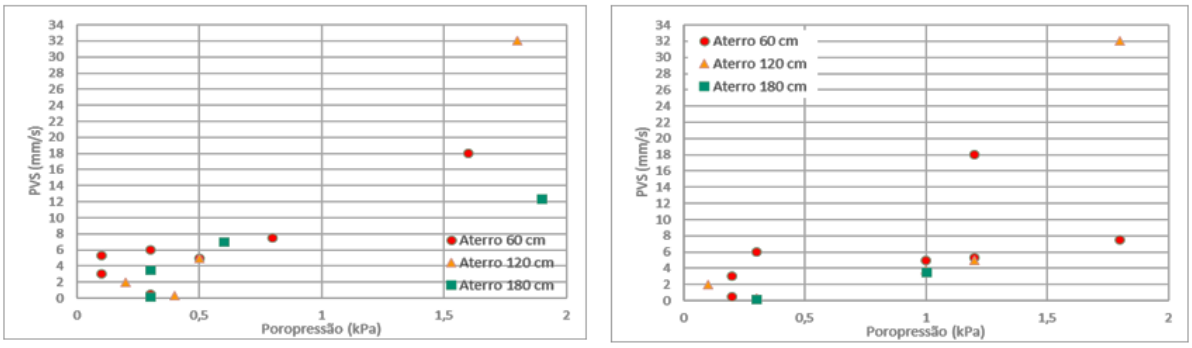


Figura 6 Incremento de Poropressão Máximo versus PVS para todas as atividades.

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.

De forma geral, ao longo da execução dos testes os piezômetros apresentaram uma tendência geral de redução dos níveis piezométricos, associada possivelmente a processos naturais de drenagem, intensificados

pelo fato dos ensaios terem sido realizados durante o período seco, além dos efeitos da retirada de material e das melhorias recentes no sistema de drenagem do reservatório e seu entorno. Especificamente, nos momentos de execução dos testes, observou-se que as pressões intersticiais foram sensíveis às atividades executadas, registrando incrementos ou decréscimos pontuais em resposta às vibrações geradas. Isto reforça a necessidade de monitoramento contínuo para avaliar os impactos da execução das atividades no comportamento hidromecânico do meio.

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 registros dos incrementos em cada piezômetro gerados pelas vibrações de cada atividade em diferentes espessuras de aterro mostram que os níveis de vibração durante os testes geraram incrementos na piezometria máximos da ordem de 2,5 kPa, com a maioria dos registros apresentando poropressões inferiores a 1 kPa.

Além disso, o intervalo de 1 minuto utilizado nos testes demonstrou ser altamente preciso para caracterizar a resposta do sistema, servindo como referência para validar a escolha do intervalo operacional da instrumentação. O intervalo de 6 minutos representa, assim, um equilíbrio entre precisão e eficiência operacional, proporcionando um monitoramento eficaz das variações piezométricas sem gerar um excesso de dados desnecessários.

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

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO - ANM. Resolução nº 13, de 8 de agosto de 2019. Revoga a Resolução nº 4, de 15 de fevereiro de 2019. Estabelece medidas regulatórias objetivando assegurar a estabilidade de barragens de mineração, notadamente aquelas construídas ou alteadas pelo método denominado "a montante" ou por método declarado como desconhecido e dá outras providências. <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/resolucaon-13-de-8-de-agosto-de-2019-210037027>.

Charlie, W. A.; Bretz T. E.; Schlee, L.A.; Doring, D. O. (2013). “BlastInduced Pore Pressure and Liquefaction of Saturated Sand,” Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 139, No. 8, August 2013, pp.

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.