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/COBRAMSEG2026.1/13

Aterro Experimental com rejeito underflow visando a descaracterização de diques de mineração

Ricardo Cabette Ramos
Engenheiro Geotécnico, VALE S.A., Belo Horizonte/MG, Brasil, ricardo.cabette@vale.com

Gustavo Henrique Nogueira
Engenheiro Geotécnico, WALM, Belo Horizonte/MG, Brasil, gustavo.nogueira@walmengenharia.com.br

Allisson Fernandes Assunção
Engenheiro Geotécnico, VALE S. A., Belo Horizonte/MG, Brasil, allissonassuncao@hotmail.com

Keitiane Fátima Coimbra
Engenheiro Geotécnico, VALE S.A., Itabira/MG, Brasil, keitiane.coimbra@vale.com

Alessandro Lage de Castro
Engenheiro Geotécnico, VALE S. A., Belo Horizonte/MG, Brasil, alessandro.castro@vale.com

Artur Moreira Morais Mansur Gomes
Engenheiro Geotécnico, WALM, Belo Horizonte/MG, Brasil, artur.gomes@walmengenharia.com.br

RESUMO: O estudo apresenta a concepção, execução e avaliação de um aterro experimental com rejeito underflow, desenvolvido para subsidiar as diretrizes adequadas para execução de uma berma de reforço de um dique de mineração e viabilizar sua futura descaracterização. O objetivo central foi definir parâmetros construtivos e de controle que permitissem o uso seguro do rejeito em obras de reforço, com monitoramento em tempo real para gestão de riscos operacionais. A metodologia envolveu a construção do aterro em camadas, variando a umidade em torno da ótima determinada pelo ensaio Proctor Normal, com controle de densidade e umidade in situ e ensaios laboratoriais conforme normas ABNT/ASTM. Foram utilizados rolo liso (modo não vibratório) e diferentes equipamentos previstos para as obras, além de instrumentação com geofones e piezômetros elétricos para registrar velocidades de vibração e poropressões durante as passadas dos equipamentos e o carregamento do aterro. Os critérios de aceitação basearam-se em limites de velocidade de partícula e incrementos de poropressão com dissipação rápida, complementados por retroanálise de curvas de atenuação distância-fonte e verificação do grau de compactação. Os resultados indicaram predominância da componente vertical das vibrações, com sensores laterais dentro dos limites estabelecidos, e picos de vibração próximos à fonte para o trator de esteiras e combinação de equipamentos, atenuando para valores admissíveis a partir de 2 a 3 metros de distância. Os excessos máximos de poropressão foram de poucos quilopascais, retornando rapidamente aos níveis de base após a interrupção do estímulo, sem evidência de acúmulo progressivo nas condições testadas. Os testes permitiram definir a umidade ideal, o número de passadas e a velocidade de translação do rolo, além de recomendar afastamentos mínimos entre fontes de vibração e regiões sensíveis, e diretrizes para o sequenciamento construtivo. Em conclusão, o programa experimental demonstrou a viabilidade técnica do uso do rejeito underflow com compactação controlada e monitoramento contínuo, habilitando decisões de engenharia para o avanço de obras de reforço, promovendo melhoria da estabilidade local e redução do risco operacional, o que possibilitou a futura descaracterização da estrutura.

PALAVRAS-CHAVE: Aterro experimental; rejeitos; compactação; instrumentação; vibrações.

ABSTRACT: The study presents the conception, execution, and evaluation of an experimental embankment with underflow tailings, developed to support the appropriate guidelines for the execution of a reinforcing berm for a mining dike and to enable its future decharacterization. The main objective was to define

construction and control parameters that would allow the safe use of the tailings in reinforcement works, with real-time monitoring for operational risk management. The methodology involved the construction of the embankment in layers, varying the moisture content around the optimum determined by the Standard Proctor test, with in situ density and moisture control and laboratory tests according to ABNT/ASTM standards. A smooth drum roller (non-vibratory mode) and different equipment planned for the works were used, in addition to instrumentation with geophones and electrical piezometers to record vibration velocities and pore pressures during equipment passes and embankment loading. The acceptance criteria were based on particle velocity limits and pore pressure increments with rapid dissipation, complemented by back-analysis of distance-source attenuation curves and verification of the degree of compaction. The results indicated predominance of the vertical component of vibrations, with lateral sensors within the established limits, and vibration peaks close to the source for the bulldozer and the combination of equipment, attenuating to admissible values from 2 to 3 meters of distance. The maximum excess pore pressures were a few kilopascals, returning rapidly to baseline levels after the interruption of the stimulus, with no evidence of progressive accumulation under the tested conditions. The tests made it possible to define the ideal moisture content, the number of passes, and the roller travel speed, in addition to recommending minimum offsets between vibration sources and sensitive regions, and guidelines for the construction sequence. In conclusion, the experimental program demonstrated the technical feasibility of using underflow tailings with controlled compaction and continuous monitoring, enabling engineering decisions for the advancement of reinforcement works, promoting improvement in local stability and reduction of operational risk, which made possible the future decharacterization of the structure.

KEYWORDS: Experimental embankment; tailings; compaction; instrumentation; vibrations

1 INTRODUÇÃO

A descaracterização de diques de mineração exige soluções de reforço que conciliem segurança geotécnica, controle executivo e viabilidade operacional. Nesse contexto, o uso de rejeito underflow como material de construção pode representar alternativa relevante, desde que seu comportamento seja adequadamente conhecido e que a execução seja acompanhada por instrumentação capaz de identificar respostas indesejáveis durante a obra.

Ensaios em escala real e aterros experimentais instrumentados têm sido empregados justamente para reduzir incertezas de projeto e construção em depósitos de rejeitos, permitindo avaliar deformações, resposta de fundação e comportamento hidráulico sob carregamento controlado (Ortigão et al., 2013). De forma complementar, revisões recentes ressaltam que sistemas de monitoramento integrados, com acompanhamento contínuo de poropressões, deslocamentos e vibrações, constituem elemento importante de gestão de risco em estruturas de rejeitos e em etapas construtivas potencialmente sensíveis (Zare et al., 2024).

O aterro experimental objeto deste trabalho foi concebido a montante do reservatório da estrutura alvo, de modo que sua operação não apresentasse riscos geotécnicos à nenhuma estrutura do complexo de mineração. Sua finalidade foi subsidiar a futura execução de uma berma de reforço a jusante de um dique de mineração, com foco na definição de parâmetros construtivos e limites operacionais. O programa foi estruturado para avaliar compactação, umidade de trabalho, resposta vibratória e geração de poropressões durante a circulação e operação de equipamentos pesados, permitindo reduzir incertezas e aumentar a segurança da futura intervenção.

Os ensaios com máquinas pesadas foram realizados em aterro experimental instrumentado, com geofones, piezômetros elétricos e placa de recalque. O foco principal esteve na atuação do trator de esteiras D6, identificado como a principal fonte de vibração, e na combinação de equipamentos e carregamento durante a construção. Os critérios de referência adotados consideraram limite de vibração de 5 mm/s e incremento de poropressão de 5 kPa em relação às condições iniciais da obra. A partir do aterro experimental, também foram extraídas informações relevantes quanto ao comportamento geomecânico do material após a operação do aterro, o que foi determinante para garantia do comportamento dilatante do reforço quando cisalhado.

Assim, este trabalho apresenta o contexto do estudo, uma breve caracterização do material underflow, a metodologia executiva do aterro experimental e, principalmente, os resultados de instrumentação,

desempenho e critérios de aceitação que embasaram o uso do material em obras de reforço e a futura descaracterização da estrutura.

2 CONTEXTO DO ESTUDO E CONCEPÇÃO DO ATERRO EXPERIMENTAL

O aterro experimental foi concebido para fornecer parâmetros apropriados à execução da berma de reforço a jusante do dique, minimizando incertezas construtivas e permitindo avaliar a resposta do maciço a diferentes equipamentos de obra. O programa foi planejado para representar, em escala controlada, as condições executivas previstas para a futura intervenção, com monitoramento simultâneo de vibrações e poropressões.

A configuração final do aterro atingiu altura máxima de 2,4 m, distribuída em nove camadas, sendo três camadas de regularização da fundação, com 0,2 m cada, e seis camadas de aterro controlado, com 0,3 m cada. A evolução do aterro foi acompanhada ao longo do período de construção, permitindo relacionar os registros instrumentais às diferentes alturas e etapas executivas.

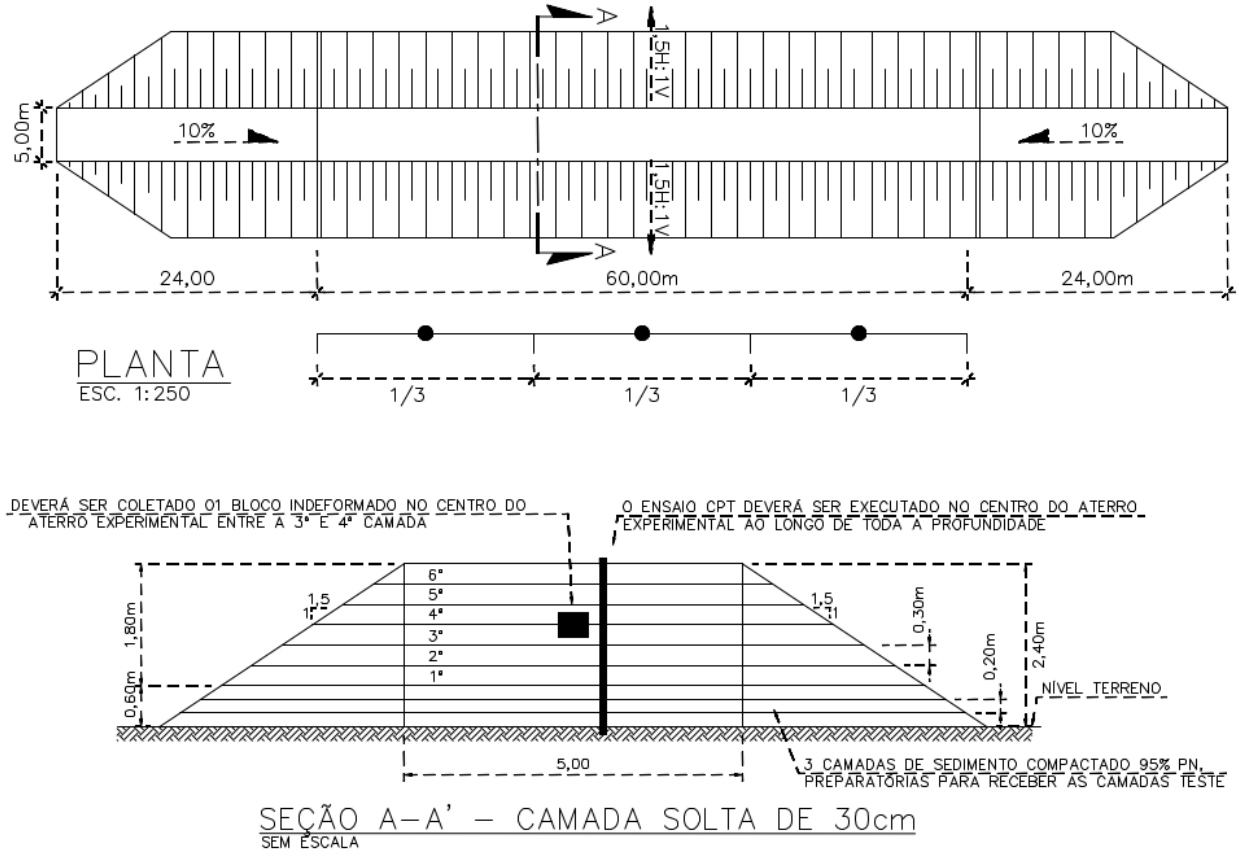


Figura 01. Evolução do aterro experimental ao longo da execução.

Antes do início do aterro experimental propriamente dito, foi executada uma plataforma preparatória para reduzir a influência da diferença de rigidez entre o terreno natural e o aterro compactado. Essa etapa foi importante para tornar mais representativa a avaliação do comportamento do material e dos efeitos induzidos pelos equipamentos.

3 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL UNDERFLOW

O material de empréstimo utilizado no aterro experimental correspondeu ao rejeito underflow proveniente de pilha localizada a montante do dique. A campanha de caracterização incluiu amostras simples e compostas, com ensaios de granulometria com sedimentação, densidade dos grãos, limites de consistência, teor de umidade, Proctor Normal e compressão triaxial consolidada não drenada com medição de poropressão.

Os resultados indicaram material predominantemente areno-siltoso, sem plasticidade, classificado como areia siltosa, com curvas granulométricas convergentes, sugerindo boa homogeneidade das amostras ensaiadas. A umidade ótima variou entre 10,2% e 12,0%, com média de 11,30%, e o peso específico seco máximo variou entre 20,44 e 21,17 kN/m³, com média de 20,70 kN/m³. A densidade dos grãos apresentou média de 3,35.

4 METODOLOGIA EXECUTIVA DO ATERRO EXPERIMENTAL

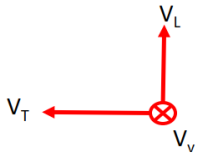
A execução do aterro experimental foi realizada em etapas sucessivas de lançamento, espalhamento, ajuste de umidade e compactação. O material foi disposto em camadas soltas de 30 cm, com variação do teor de umidade em três condições de trabalho: umidade ótima, ótima mais 2% e ótima menos 2%. A espessura das camadas, a umidade e o grau de compactação foram controlados em campo.

A compactação foi executada com rolo liso em modo não vibratório, com velocidade de translação entre 4,0 e 4,5 km/h. A partir da segunda passada eram realizados ensaios de densidade seca e umidade in situ, permitindo calcular o grau de compactação e ajustar o encerramento da compactação em cada camada. A metodologia também contemplou verificação do gradiente de compactação, coleta de amostras e identificação das interfaces entre camadas.

Além do rolo liso, foram avaliados outros equipamentos representativos da futura obra, como trator de esteiras, escavadeira, motoniveladora, trator agrícola e caminhões, tanto em passagens isoladas quanto em condição combinada com carregamento. Essa abordagem foi importante porque o desempenho do aterro não dependia apenas da compactação, mas também da resposta do maciço às fontes de vibração presentes na futura rotina construtiva.

5 INSTRUMENTAÇÃO, DESEMPENHO E CRITÉRIOS DE ACEITAÇÃO

A instrumentação do aterro experimental foi composta por quatro geofones e três piezômetros elétricos automatizados. Os geofones GEO-01A e GEO-01B foram instalados no centro do aterro a profundidades de 0,50 m e 1,46 m, respectivamente, enquanto GEO-02 e GEO-03 foram instalados na borda, a 10 cm de profundidade. Os piezômetros PZ-01, PZ-02 e PZ-03 foram instalados a 5,00 m, 3,00 m e 1,60 m.



Geofone	Número de Série	Data da Instalação	Profundidade de Instalação em Relação à Superfície da Fundação (m)
GEO-01-A	UM16337	09/07/2020	0.50
GEO-01-B	UM16336	09/07/2020	1.46
GEO-02	UM16326	09/07/2020	0.10
GEO-03	UM16327	09/07/2020	0.10

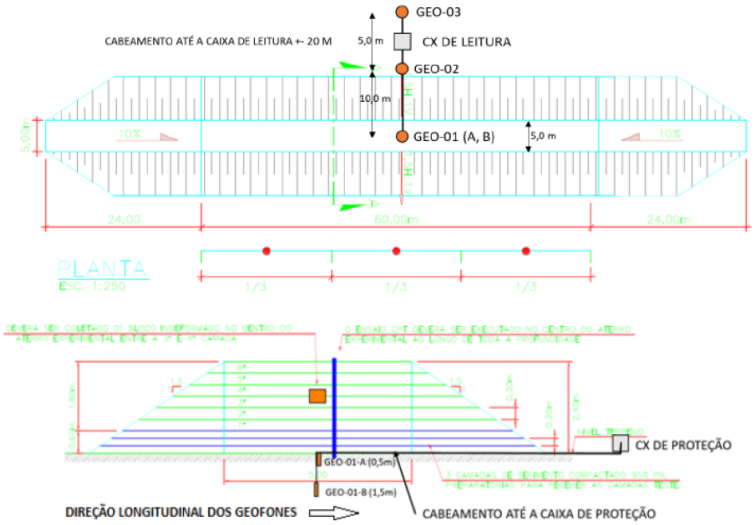


Figura 02. Locação dos geofones no aterro experimental.

PZE	Número de Série	Profundidade de Instalação (m)	Data da Instalação	N.A. (m)
PZ-01	100D1905037	5,00	09/07/2020	1,57
PZ-02	100D1905010	3,00	09/07/2020	1,76
PZ-03	100D1905020	1,60	09/07/2020	1,52

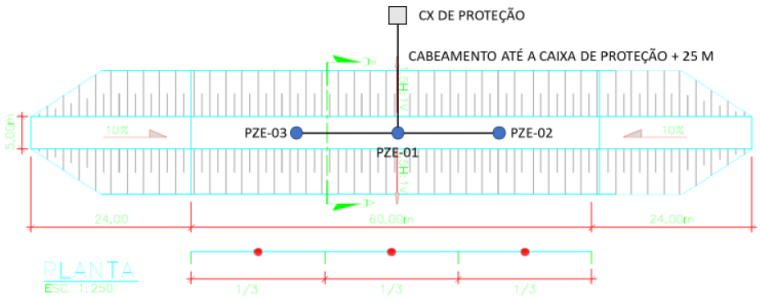


Figura 03. Locação dos piezômetros no aterro experimental.

Os resultados da instrumentação mostraram que a resposta do aterro experimental foi fortemente condicionada pela posição do sensor em relação à fonte de vibração, pelo tipo de equipamento em operação e pela altura progressiva do aterro ao longo da obra. As leituras indicaram predominância sistemática da componente vertical das vibrações em todos os geofones monitorados. Nos geofones laterais de superfície, GEO-02 e GEO-03, as velocidades permaneceram inferiores a 5 mm/s em todas as direções avaliadas, indicando comportamento satisfatório nas regiões periféricas do aterro. Em contrapartida, os maiores registros concentraram-se nos sensores centrais GEO-01A e GEO-01B, instalados em profundidade sob a região de maior solicitação, evidenciando que a zona central do aterro foi a mais sensível à passagem e à combinação de equipamentos. A Figura 4 sintetiza esse comportamento ao relacionar os picos de vibração à evolução da altura do aterro, mostrando que as maiores amplitudes ocorreram nas condições de combinação de equipamentos e carregamento, especialmente nos geofones centrais.

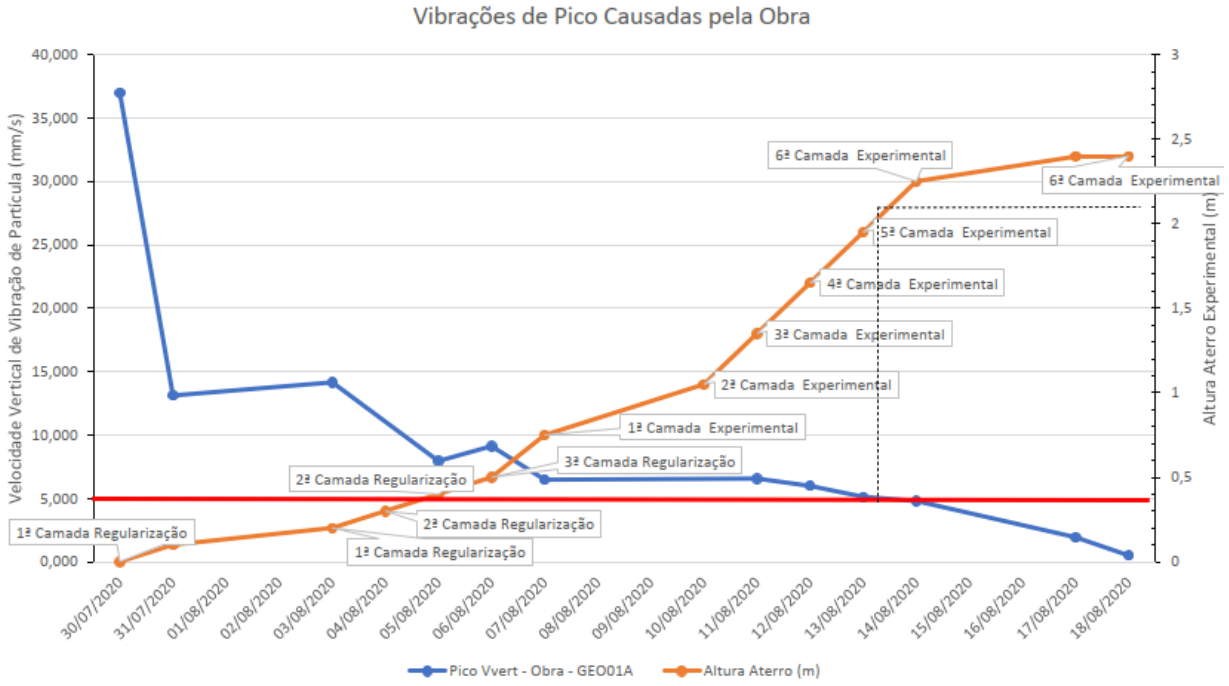


Figura 04. Vibrações de pico da obra em função da altura do aterro experimental.

Entre os equipamentos avaliados, a placa vibratória gerou as maiores amplitudes, com PVS da ordem de 12 mm/s no centro do aterro e menos de 1 mm/s a 15 m da fonte. Entre os equipamentos de obra, o trator de esteiras apresentou PVS da ordem de 9 mm/s no centro e cerca de 3 mm/s a 15 m, enquanto a escavadeira atingiu cerca de 8 mm/s no centro e 2 mm/s a 15 m.

No que se refere à atenuação, os resultados mostraram que a redução para 5 mm/s ocorreu a distâncias relativamente curtas em relação à fonte. Para a condição geral de obra, a atenuação observada ficou da ordem de 2,5 m, enquanto, para o trator de esteiras, a distância equivalente foi próxima de 2,1 m, conforme apresentado na Figura 06. O comportamento medido nos sensores centrais confirma que a combinação entre equipamentos e carregamento representa a condição mais crítica, devendo orientar o estabelecimento de afastamentos mínimos na futura obra

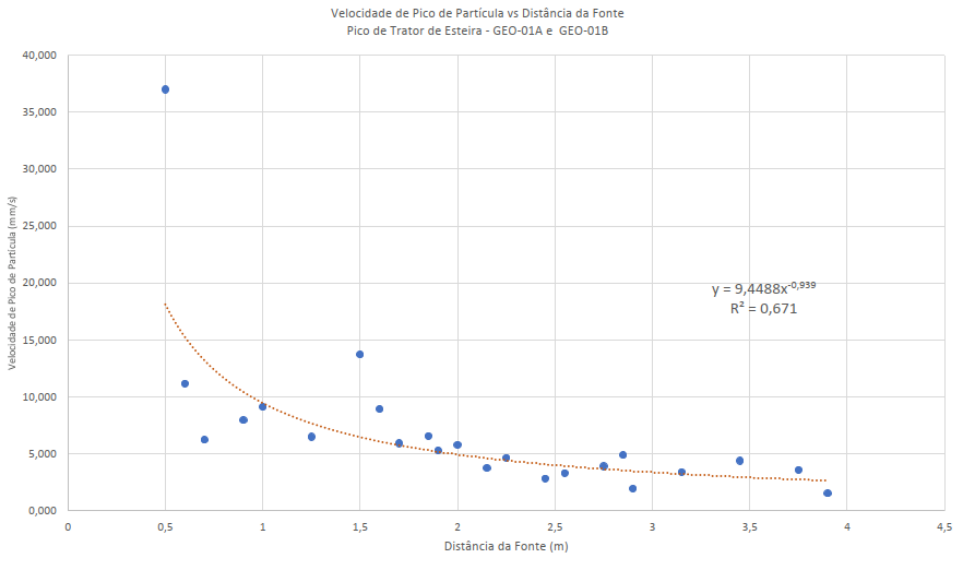


Figura 6. Velocidade de pico de partícula em função da distância da fonte para o trator de esteiras.

No que tange aos piezômetros, estes registraram incrementos de poropressão de baixa magnitude e com dissipação rápida, sem indicação de acúmulo progressivo ao longo das condições testadas. O maior incremento observado foi de aproximadamente 5,26 kPa no piezômetro PZ-02, enquanto PZ-01 e PZ-03 apresentaram variações máximas inferiores, respectivamente da ordem de 3,33 kPa e 2,01 kPa. A resposta temporal mostra que os picos de poropressão coincidem com os eventos de maior vibração e carregamento e retornam rapidamente aos níveis próximos da condição inicial após a interrupção do estímulo, evidenciando comportamento transitório e controlado nas condições avaliadas. A Figura 07 apresenta esta correlação temporal entre o pico de vibrabração induzida e o aumento de poropressão.

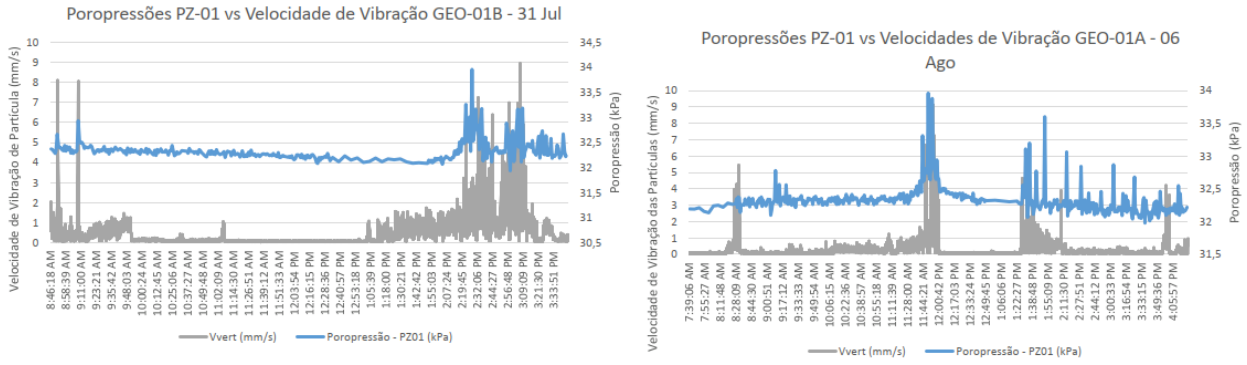


Figura 07. Poropressões medidas em piezômetro e velocidade de vibração associada durante a execução do aterro experimental.

Em conjunto, os resultados mostram que o desempenho do aterro experimental foi satisfatório sob as condições testadas, desde que mantidos o controle executivo e os limites operacionais observados durante o programa. A região central do aterro e as situações de combinação de equipamentos e carregamento configuraram os cenários mais críticos, enquanto as regiões laterais permaneceram dentro dos critérios de aceitação. Assim, a instrumentação não apenas confirmou a viabilidade do uso do rejeito underflow em aterros compactados de reforço, como também forneceu base objetiva para definir afastamentos mínimos, controle de operação e sequenciamento construtivo da futura obra.

Por fim, foram coletadas amostras indeformadas do aterro experimental, para verificação da resistência geomêcanica do material quando cisalhado de maneira não-drenada. Como resultado, obteve-se um comportamento dilatante, o que trouxe ainda maior segurança para operação do reforço da estrutura. Importante destacar que, finalizadas as obras de reforço, as amostras indeformadas da estrutura implantadas corroboraram o comportamento identificado no aterro experimental.

6 CONCLUSÕES

O aterro experimental com rejeito underflow mostrou-se tecnicamente adequado para subsidiar a futura execução de uma berma de reforço associada à descaracterização de dique de mineração. O programa permitiu transformar incertezas executivas em parâmetros objetivos de compactação, umidade, velocidade operacional e controle instrumental, com foco simultâneo em produtividade e segurança.

A caracterização do underflow indicou material areno-siltoso, não plástico, com umidade ótima média próxima de 11,3% e peso específico seco máximo médio de 20,7 kN/m³. Esses resultados, associados ao controle em camadas de 30 cm e à compactação com rolo liso não vibratório, forneceram base consistente para o uso do material em aterros compactados de reforço.

O principal resultado do estudo foi a confirmação, por meio da instrumentação, de que as vibrações se concentraram na componente vertical e se mantiveram dentro dos limites nas regiões laterais do aterro, enquanto as maiores amplitudes ocorreram junto às fontes mais severas, especialmente placa vibratória, trator de esteiras e escavadeira. Os excessos de poropressão foram baixos e dissiparam rapidamente. Em conjunto, esses resultados demonstram que o rejeito underflow pode ser empregado com segurança em obras de reforço,

desde que associado a compactação controlada, monitoramento contínuo e sequenciamento executivo compatível com a resposta do material.

Por fim, a segurança geotécnica foi corroborada pelo comportamento dilatante do material, que foi identificado ainda na etapa do aterro experimental e, posteriormente, confirmado pós finalização da estrutura.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ortigão, J.A.R.; Paiva, P.; Fahel, A.; Landi, A.; Souto, R. (2013). Trial Embankment on Gold Mine Tailings. Soils and Rocks, 36(1), 3–19.

Zare, M.; et al. (2024). A Review of Tailings Dam Safety Monitoring Guidelines and Emerging Monitoring Systems. Minerals, 14(6), 551.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7181. Solo – Análise granulométrica.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6508. Solo – Determinação da massa específica dos grãos.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6459 e NBR 7180. Solo – Determinação dos limites de liquidez e plasticidade.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7182. Solo – Ensaio de compactação.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 9813. Solo – Determinação da massa específica aparente in situ com cilindro de cravação.