



Monitoramento microssísmico de vibrações em barragens de rejeitos

Dias, L. S. O., Tetra Tech; Braga, M. A., UFRJ; Cunha, A. S., UFRJ; Almeida, L. A. P., Mosaic Fertilizantes; Telles, R. L. T., Mosaic Fertilizantes; Leite, P. H., Mosaic Fertilizantes; Silva, T. H., Silva, Mosaic Fertilizantes

Copyright 2022, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica.

Este texto foi preparado para a apresentação no IX Simpósio Brasileiro de Geofísica, Curitiba, 4 a 6 de outubro de 2022. Seu conteúdo foi revisado pelo Comitê Técnico do IX SimBGf, mas não necessariamente representa a opinião da SBGf ou de seus associados. É proibida a reprodução total ou parcial deste material para propósitos comerciais sem prévia autorização da SBGf.

Resumo

As barragens de rejeitos podem sofrer impactos físicos negativos oriundos das vibrações geradas por desmontes ou pela sismicidade induzida pela mina. O monitoramento microssísmico pode auxiliar os geotécnicos na gestão de riscos de barragens, com a medição das velocidades de partículas e acelerações que chegam na estrutura e a comparação com critérios definidos pela DIN 4150 e Eletrobrás. Um sistema microssísmico comissionado na Mina de Cajati, estado de São Paulo, permitiu a análise das vibrações que chegam na barragem B1, que fica a uma distância de aproximadamente de 2 km de uma cava de mina. Observou-se que os valores de velocidade e acelerações medidos são muito baixos, com frequência dominante inferior a 10 Hz e baixo potencial de causar impacto físico na barragem, devido à menor capacidade de se gerar altos valores de deslocamentos.

Introdução

A sociedade moderna é dependente da extração de bens minerais e os rejeitos dessa produção são armazenados em barragens. As barragens de rejeitos são erguidas com materiais de empréstimo ou os próprios rejeitos, passando por diversos alteamentos para aumentar o volume de armazenamento.

Devido a suas condições operacionais, essas estruturas estão expostas a falhas e rompimentos, como os ocorridos em 2015 (barragem do Fundão) e 2019 (Barragem I da Mina de Córrego do Feijão).

As barragens de rejeitos podem sofrer impactos na sua integridade física, quando submetidas a níveis críticos de vibração (velocidade de partícula e aceleração), seja por liquefação ou instabilização do maciço.

Nesse contexto, a geotecnia pode se beneficiar do monitoramento microssísmico em barragens de rejeitos, para o monitoramento contínuo da sismicidade de estas estruturas estão expostas.

Um sistema de monitoramento microssísmico com 16 sensores foi comissionado no Complexo Minerológico de Cajati (CMC), no estado de São Paulo, com geofones triaxiais instalados no entorno de uma cava de mina e sensores uniaxiais instalados na crista de uma barragem que fica a aproximadamente 2 km de distância do centro da cava (Figura 1).

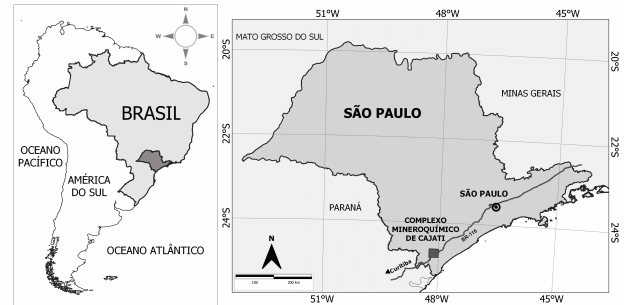


Figura 1 – Mapa de localização do Complexo Minerológico de Cajati (CMC).

No período de 24 de abril de 2018 até 31 de dezembro de 2019, o sistema registrou com uma boa relação sinal-ruído, 450 desmontes de rocha e 2.972 eventos sísmicos induzidos, permitindo se obter os valores de PGV (*Peak Ground Velocity*), PGA (*Peak Ground Acceleration*) e frequência dominante, medidos na crista da barragem.

Geologia local

O CMC está localizado entre as cidades de São Paulo e Curitiba, sendo lavrado desde a década de 1940, onde se extrai o carbonatido mineralizado em apatita (Faria Junior et al., 2010).

Segundo Martinho (2014), o CMC é o único complexo de sua classe no país e opera de forma totalmente verticalizada, sendo o maior produtor nacional de fosfato bicálcico, atendendo aos mercados do Brasil e internacional.

Os principais elementos estruturais dos carbonatitos, como juntas, falhas, diques e estruturas dúcteis, estão dispostos de forma radial e concêntrica, sugerindo um corpo intrusivo a partir de 5 intrusões sucessivas que originaram cinco tipos diferentes de carbonatitos (Figura 2), conforme as características estruturais, mineralógicas e feições petrográficas (Barros, 2001; Alves, 2008).

Os carbonatitos são caracterizados pela coloração esbranquiçada e presença de minerais acessórios como magnetita e apatita, apresentando um grau de faturamento variando de médio a baixo, com um alto grau de consistência (BVP, 2011).

A zona de xenólitos é uma zona de carbonatito caracterizado pela presença de blocos de jacupitanguito (Figura 3), se localizando nas proximidade dos carbonatitos foliados e circundando os carbonatitos norte e dolomítico, além do foscrito da zona norte.

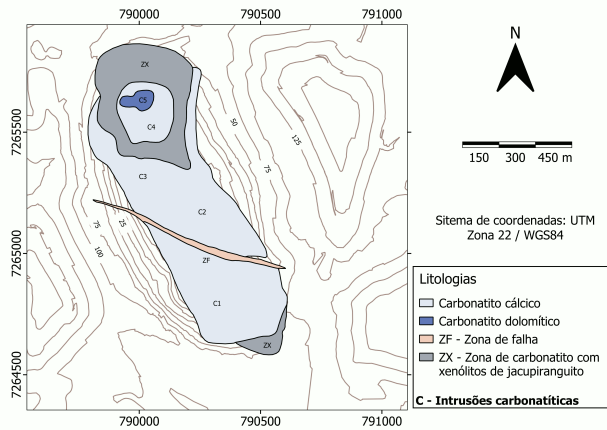


Figura 2 – Modelo geológico simplificado da Mina de Cajati apresentando 5 fácies carbonatíticas (Alves, 2008).

A cava foi desenvolvida em rocha ígnea são composta por carbonatitos calcíticos e dolomíticos (coloração esbranquiçada e presença de minerais acessórios como magnetita e apatita) e jacupiranguitos (termo que define um piroxenito constituído essencialmente por augita titânica, magnetita e nefelina, tendo como acessórios a biotita e olivina, sendo a presença do piroxênio na rocha uma característica fundamental para sua definição).



Figura 3 – Zona de xenólito com blocos escuros de jacupiranguito (BVP, 2011).

Estruturas geotécnicas e arranjo de sensores

As principais estruturas monitoradas em CMC correspondem a cava Morro da Mina e a barragem B1, sendo que a barragem opera desde 1973 e já passou por 9 alteamentos que levaram a estrutura até a altura final de 44 m e volume de 1.258.444,56 m³ (Silva, 2019; Oliveira, 2021).

Na cava foram instalados 12 geofones de 14Hz, em 6 furos com inclinação média de 70°, contendo 2 sensores em profundidades diferentes. Na barragem foram instalados 4

geofones de 4,5Hz ao longo da crista da barragem (Figura 4).

Para todas as vibrações identificadas pelo sistema, só foram armazenados no banco de dados, apenas os registros que atenderam às regras de associação.

Para ser considerado um evento válido, no mínimo 4 geofones têm que ser acionados dentro de uma janela de 0,1 segundos. Os acionamentos são alcançados quando a relação entre STA (*Short-Time Averages*) / LTA (*Long-Time Averages*) é superior a 8.

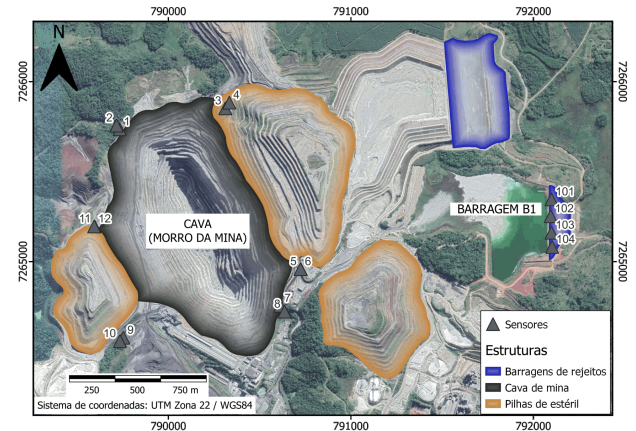


Figura 4 – Arranjo mostrando a localização dos sensores da cava (1 até 12) e da barragem B1 (101 até 104).

Crítérios de vibração

Engenheiros e geólogos geotécnicos costumam analisar as barragens de rejeitos, em relação à definição de determinados critérios de vibração (velocidade de partículas ou acelerações) que estas estruturas possam suportar, sem serem observados impactos físicos que possam levar a uma condição de risco da estrutura.

Como critérios para os valores de velocidade e aceleração, têm sido utilizadas a norma alemã DIN 4150 e os valores de coeficiente sísmico definidos pela ELETROBRÁS (2003).

Segundo Tripathy & Shirke (2010) não existe nenhum critério específico para barragens de rejeito e, por seu caráter mais restritivo, as mineradoras vêm adotando a norma alemã DIN 4150 para análises de velocidade (mm/s) que chegam na estrutura.

De acordo com Schnaid et al. (2020) as recomendações da Eletrobrás para critérios de sismicidade têm sido frequentemente utilizadas para barragens de rejeitos no Brasil, como coeficientes sísmicos (valores de aceleração nas componentes horizontais e verticais).

A DIN 4150 tem foco no grau de segurança das estruturas frente aos efeitos da velocidade e frequência dominante de uma determinada fonte, com base em três limites definidos como: L1 (estruturas reforçadas), L2 (estruturas moderadas) e L3 (estruturas consideradas delicadas como monumentos e construções históricas).

Para as estruturas L3, a DIN define um limite mínimo de 3 mm/s para frequências de até 10Hz (Figura 5).

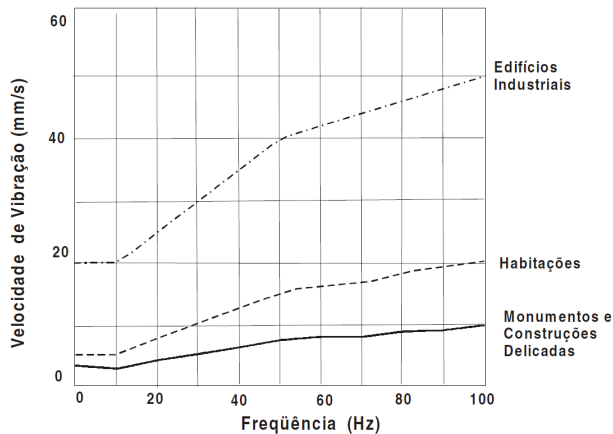


Figura 5 – Norma alemã DIN 4150 mostrando os valores de velocidade de vibração (mm/s) em função da frequência (Hz) e das características estruturais das edificações (Bacci et al., 2003).

Análises de estabilidade sísmica são comumente utilizadas na geotécnia e a abordagem pseudo-estática, que emprega um coeficiente sísmico horizontal e vertical, é a técnica mais usual.

Segundo Silva et al. (2017), as análises pseudo-estática representam o efeito de um evento sísmico por meio da aplicação de acelerações estáticas horizontais e verticais a uma massa de solo potencialmente instável, onde as forças inerciais induzidas por essas acelerações pseudo-estáticas, aumentam as forças motrizes e podem diminuir as forças resistentes que atuam sobre o solo.

A ELETROBRÁS (2003) define os valores de 0,03g (3% de g) para componentes verticais (kv.g) e 0,05g (5% de g) para componentes horizontais (kv.h) (Figura 6), para se obter um fator de segurança superior a 1, na análise pseudo-estática.

Monitoramento microssísmico

A microssísmica deriva dos conceitos da sismologia, para eventos de pequenas magnitudes (de -2 a 0 de magnitude local M_L), com foco no monitoramento contínuo de eventos gerados por detonações e induzidos, permitindo a localização espacial desses eventos, determinação dos parâmetros de fonte, análise de vibrações (PGV e PGA), elaboração de *shake maps* e avaliação estatística.

O monitoramento microssísmico representam uma solução de registro contínuo de vibrações, que permite o acompanhamento, em tempo quase-real, da integridade física de estruturas geotécnicas, por meio do estabelecimento de um banco de dados que contempla a localização dos eventos sísmicos e suas propriedades.

A aplicação dessa tecnologia de monitoramento em barragens de rejeitos visa quantificar as vibrações que a estrutura se encontram expostas, oriundas das

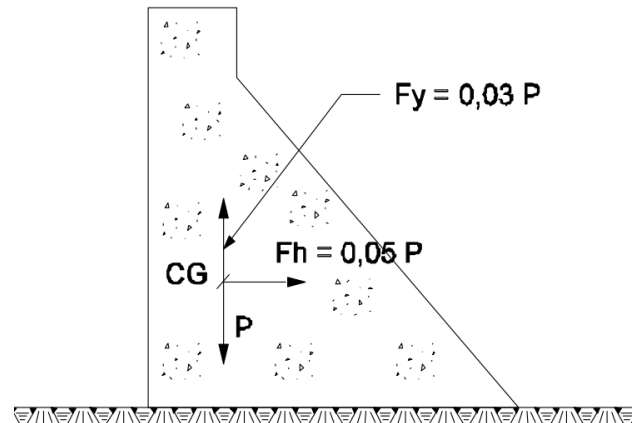


Figura 6 – Forças sísmicas em uma barragem onde F_h e F_y correspondem aos carregamentos horizontal e vertical, P representa o vetor peso (cargas inerciais) e CG é o carregamento total da estrutura (ELETROBRÁS, 2003).

detonações da mina ou eventos sísmicos induzidos, para que se possa verificar se as vibrações medidas na estrutura apresentam algum risco à manutenção de sua condição de estabilidade.

Um sistema de monitoramento microssísmico permanente, que registra os eventos sísmicos de forma contínua, permite medir a exposição de uma estrutura geotécnica à sismicidade, fornecendo uma ferramenta para orientar ações de prevenção, classificação de riscos sísmicos e alertas (Mendecki et al., 2010).

Esses sistemas correspondem a um arranjo de sensores, sendo os geofones mais adequados para as condições de mina (Lynch & Malovichko, 2006), que registram eventos sob a forma de sismogramas (Figura 7) que representam a variação de deslocamento, velocidade e aceleração.

Segundo Mendecki (1997), os sistemas microssísmicos devem registrar com precisão a amplitude e o horário de qualquer vibração significativa, em uma ampla faixa de amplitudes, frequências e durações, além de reunir os registros em um ponto central para processamento, dentro de um tempo razoavelmente curto, para que uma ação possa ser tomada em resposta.

Vibrações medidas na barragem B1

Para o período analisado foram selecionadas as detonações e os eventos induzidos que acionaram simultaneamente os sensores da cava e da barragem B1.

Foram registrados 176 desmontes que geraram 463 sismogramas e 109 eventos induzidos que geraram 41 sismogramas. Para cada sismograma registrado pelos geofones foram obtidos os valores de PGV e PGA, conforme apresentado na Tabela 1.

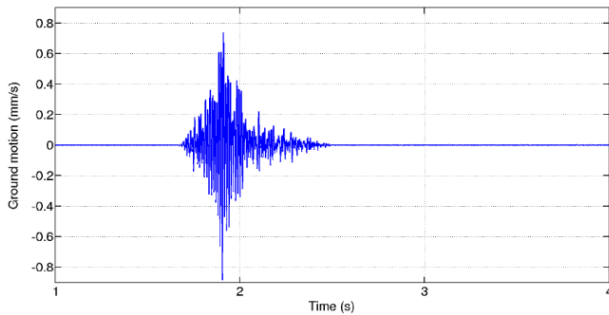


Figura 7 – Sismograma obtido de uma detonação que gerou um pico de vibração de 0,9 mm/s (Dias et al., 2016).

Tabela 1 – Vibrações máximas medidas pelos desmontes e eventos induzidos na crista da barragem B1 (% de g, para g = 9,78 m/s²).

Tipo	PGV [mm/s] [max]	PGA [m/s ²] [max]
Desmontes	0,4938	0,0847 (0,9% de g)
Induzidos	0,0892	0,0135 (0,1% de g)

Para os valores de velocidade dos desmontes, a média foi de 0,0871 mm/s e a mediana foi de 0,0673 mm/s, enquanto que para os eventos induzidos, a média foi de 0,0275 mm/s e a mediana foi de 0,0202 mm/s.

Quando observados os valores de aceleração, a média foi de 0,0155 m/s² (0,2% de g) e a mediana foi de 0,0113 m/s² (0,1% de g), enquanto que para os eventos induzidos, a média da amostra foi de 0,0041 m/s² (0,04% de g), a mediana foi de 0,0028 m/s² (0,03% de g).

A frequência dominante dos desmontes variou entre 4,27 Hz e 38,46 Hz, onde a média e mediana ficaram em 19,29 Hz e 19,23 Hz, sendo que menos de 10% das detonações apresentaram valores de frequência inferiores a 10 Hz.

Para os eventos sísmicos induzidos, a frequência dominante variou entre 4,27 Hz e 31,25 Hz, sendo a média e mediana em 16,97 Hz e 17,86 Hz, onde 15% dos eventos apresentaram valores de frequência inferiores a 10 Hz.

Discussões

Para as vibrações registradas nos sensores da barragem B1, observou-se que as vibrações causadas pelos desmontes da lavra, causaram os maiores picos de velocidade e aceleração percebidos, apresentando também valores médios superiores aos eventos sísmicos induzidos.

Apesar dos eventos sísmicos induzidos serem mais frequentes, eles acionaram menos os geofones da barragem e geraram valores de vibração inferiores aos medidos pelos desmontes.

O impacto físico potencial, que as vibrações geradas pelas detonações e eventos sísmicos induzidos podem causar na barragem, é condicionado pela velocidade das partículas (pico de vibração) e pela porção de baixa

frequência das ondas sísmicas. A norma de vibração alemã DIN 4150 considera críticos os valores de vibração acima de 3 mm/s e frequências dominantes menores que 10 Hz.

A Figura 8 mostra que as distribuições das velocidades registradas na barragem por frequência dominante, com o limite L3 da DIN 4150, se encontram em patamares baixos.

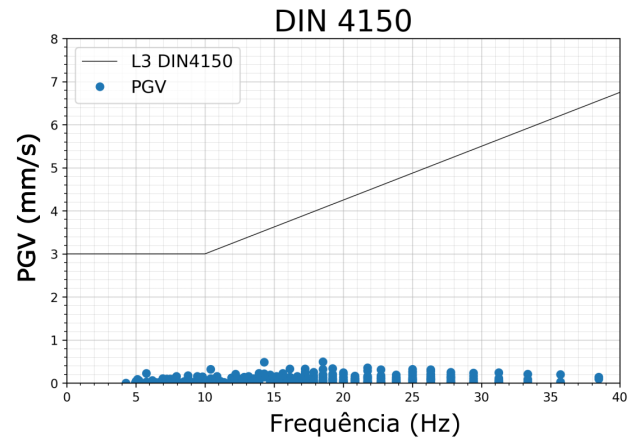


Figura 8 – Distribuição das velocidades das vibrações por frequência dominante em relação ao limite L3 da DIN 4150.

Com base nos coeficientes sísmicos definidos pela ELETROBRÁS (2003) e normalmente usado como critério para a análise de estabilidade pseudo-estática para barragens de rejeitos, 3% de g na vertical e 5% de na horizontal, observou-se que o maior valor medido na estrutura corresponde a 30% do valor máximo definido para o coeficiente sísmico vertical.

As acelerações registradas pelos eventos sísmicos induzidos é bem inferior às observadas pelas detonações.

Conclusões

O sistema de monitoramento microssísmico instalado em CMC, permitiu a medição das vibrações que chegaram na barragem B1 e mostraram o potencial desse tipo de tecnologia no auxílio a gestão de riscos geotécnicos de barragens de rejeitos, complementando o conjunto de dados que atualmente é obtido pelo monitoramento geotécnico vigente.

Analisando-se a os dados obtidos para o período analisado, pôde-se observar que as vibrações observadas são valores inferiores aos critérios de vibração apresentados nesse trabalho, sendo que mais de 90% dos valores possuem frequência dominante superior a 10 Hz, reduzindo o potencial de impacto físico na barragem B1, devido a menor capacidade de se produzir altos valores de deslocamentos.

Concluí-se que um sistema de monitoramento microssísmico permanente se mostrou adequado para o monitoramento de estruturas geotécnicas como cava de mineração e barragens de rejeitos, sendo recomendado como complementação do que vem sendo executado na geotecnia.

Referências

- Alves, P. R., 2008. The carbonatite-hosted apatite deposit of Jacupiranga, SE Brazil: styles of mineralization, ore characterization and association with mineral processing, Dissertação de mestrado, Missouri University of Science and Technology, Missouri.
- Bacci, D. L. C., Landim, P. M. B., Eston, S. M. & Iramina, W. S., 2003. Principais normas e recomendações existentes para o controle de vibrações provocadas pelo uso de explosivos em áreas urbanas: Parte I, Rem: Revista Escola de Minas, vol. 56(1): 51–57, doi: 10.1590/s0370-44672003000100010.
- Barros, G., 2001. Reavaliação Geoestatística dos Recursos/Reservas de Fosfato da Mina de Cajati, SP, Dissertação de mestrado, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- BVP, 2011. Relatório de Técnico Final, Relatório técnico BG 035-10-E-CA-RT-16-002, Vale Fertilizantes, Cajati, SP.
- Dias, L. S. O. et al., 2016. A microseismic monitoring pilot project of natural caves in Carajás – PA, in: Proceedings of the 7 Simpósio Brasileiro de Geofísica, Sociedade Brasileira de Geofísica, 1–4, doi:10.22564/7simbgf2016.073.
- ELETROBRÁS, 2003. Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas, Relatório Técnico, Eletrobrás, Rio de Janeiro.
- Faria Junior, A., Tomi, G., Sant'Agostino, L. M. & Costa, J. F. C. L., 2010. O impacto do tipo de amostragem no controle de qualidade na lavra, Rem: Revista Escola de Minas, vol. 63(2): 385–392, doi:10.1590/S0370-44672010000200025.
- Lynch, R. A. & Malovichko, D. A., 2006. Seismology and slope stability in open pit mines, in: International Symposium on Stability of Rock Slopes, Southern Africa Institute of Mining and Metallurgy Johannesburg, 375–389.
- Martinho, H. M., 2014. Avaliação da efetividade de arranjos tecnológicos e processuais na melhoria do desempenho ambiental da produção de fosfato bicálcico, Dissertação de mestrado, Universidade de São Paulo, São Paulo, doi: 10.11606/D.3.2014.tde-18032015-170100.
- Mendecki, A., 1997. Seismic monitoring in mines, first edition ed., Chapman & Hall, London New York.
- Mendecki, A. J., Lynch, R. A. & Malovichko, D. A., 2010. Routine micro-seismic monitoring in mines, in: Australian Earthquake Engineering Society 2010, Perth, Western Australia, 33.
- Oliveira, L. A., 2021. Caracterização e monitoramento de barragens de rejeito através de métodos geofísicos, Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Schnaid, F., Mello, L. G. F. S. & Dzialoszynski, B. S., 2020. Guidelines and recommendations on minimum factors of safety for slope stability of tailings dams, Soils and Rocks, vol. 43(3): 369–395, doi:10.28927/SR.433369.
- Silva, J., Sainato, P., Lusk, B. & Eltschlager, K., 2017. Blasting effects on coal refuse impoundment structures, Final Report S12AC20021, University of Kentucky, Lexington, KY.
- Silva, R. A., 2019. Geofísica aplicada à caracterização da barragem de rejeito de mineração B1, Cajati, São Paulo, Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Tripathy, G. R. & Shirke, R. R., 2010. Assessment of safety of earthen dams against ground vibrations due to mining blasts, in: Proceedings of "MineTECH'10" - Seminar on Mining Technology - Extraction, Beneficiation for Safe and Sustainable Development, The Indian Mining and Engineering Journal, Bhubaneswar, India, 202–209.