

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DE VIBRAÇÕES, INDUZIDAS POR  
DESMONTES DE ROCHAS, NA ESTABILIDADE DE UMA BARRAGEM DE  
REJEITOS**

Ian Kanji Nunes Yonezawa <sup>1</sup>; Roberto Pasquale da Cruz Trotta <sup>2</sup>; Rafael Mendonça Carvalhais <sup>3</sup>;  
Orlando Faria Prado <sup>4</sup>; Ariel Henrique Pozzobon <sup>5</sup>

**Resumo** – A segurança de barragens no Brasil vem ganhando muito destaque nos últimos anos, principalmente após os acidentes de Mariana em 2015 e Brumadinho em 2019. Nesse contexto, é crescente a preocupação com a estabilidade dos barramentos perante as condições mais adversas e inesperadas, inclusive sismos induzidos por atividades de mineração, tendo em vista que várias dessas estruturas estão situadas bem próximas de cavas ativas, onde ocorrem constantemente desmontes de rochas por explosivos. Apesar de ser um tema de grande importância, poucos estudos podem ser encontrados no país, como o publicado por Dias et al. (2022). Portanto, esse trabalho visa contribuir com esse assunto, apresentando o estudo de caso da Barragem B2 Tico-Tico, pertencente a Mineração Morro do Ipê, que possui quatro sismógrafos instalados em seu talude de jusante para monitorar os sismos gerados pelos desmontes em cavas adjacentes, cujo ponto de detonação mais próximos está situado a cerca de 410 metros.

**Abstract** – Dam safety in Brazil has gained a lot of attention in recent years, especially after the accidents in Mariana in 2015 and Brumadinho in 2019. In this context, there is a growing concern about the stability of dams, in the face of the most adverse and unexpected conditions, including mining induced seismicity, considering that several of these structures are located very close to active pits, where rock blasting occurs constantly. Despite being a topic of great importance, few studies can be found in the country, such as that published by Dias et al. (2022). Therefore, this project aims to contribute to this subject, presenting a case study of B2 Tico-Tico tailings dam of Mineração Morro do Ipê, which has four seismographs installed on its downstream slope, to monitor ground motions generated by blasting in adjacent pits, whose closest detonation point is located about 410 meters.

**Palavras-Chave** – Sismos induzidos, desmonte de rochas; velocidade máxima de partícula; *peak ground acceleration*.

---

<sup>1</sup> Geól, Dam Projetos de Engenharia: Belo Horizonte – MG, (14) 99790-8743, [ian.yonezawa@dam.com.br](mailto:ian.yonezawa@dam.com.br)

<sup>2</sup> Geól, Mineração Morro do Ipê: Brumadinho – MG, (31) 99472-0096, [roberto.trotta@ipemineração.com](mailto:roberto.trotta@ipemineração.com)

<sup>3</sup> Eng, Dam Projetos de Engenharia: Belo Horizonte – MG, (31) 98626-1919, [rafael.carvalhais@dam.com.br](mailto:rafael.carvalhais@dam.com.br)

<sup>4</sup> Geó, Dam Projetos de Engenharia: Belo Horizonte – MG, (48) 99601-4222, [orlando.prado@dam.com.br](mailto:orlando.prado@dam.com.br)

<sup>5</sup> Geó, Dam Projetos de Engenharia: Belo Horizonte – MG, (48) 99137-2043, [ariel.pozzobon@dam.com.br](mailto:ariel.pozzobon@dam.com.br)

## 1. INTRODUÇÃO

Após os acidentes de Mariana em 2015 e Brumadinho em 2019, a preocupação com a segurança de barragens de rejeitos tem se intensificado cada vez mais no Brasil. Desse modo, uma questão de grande importância nessa área é a avaliação da estabilidade de barramentos perante sismos induzidos por desmontes de rochas, tendo em vista que várias dessas estruturas estão próximas de cavas em operação. Tal assunto, apesar de sua grande importância, carece de publicações no Brasil, sendo restrita a poucos artigos como o apresentado por Dias et al. (2022), que avaliou a influência de sismos induzidos por atividades de mineração, em uma barragem de rejeitos situada no estado de São Paulo.

Portanto, esse trabalho visa contribuir com essa lacuna de conhecimento, apresentando um estudo de caso realizado em uma mina situada no quadrilátero ferrífero, local com maior quantidade de barragens e pilhas de rejeitos no país.

## 2. CONTEXTUALIZAÇÃO DO ESTUDO

A mina Tico-Tico, pertencente a Mineração Morro do Ipê, está localizada na interseção dos municípios de Igarapé, São Joaquim de Bicas e Brumadinho, na região metropolitana de Belo Horizonte. A mina possui mais de uma cava e o ponto mais próximo de detonação está a cerca de 410 metros do barramento da Barragem B2, conforme pode ser observado na Figura 1.



Figura 1. – Mapa de localização das cavas com os pontos de detonações mais próximos da Barragem B2 Tico-Tico.

Neste contexto, visando avaliar a influência dos desmontes de rochas na resistência da estrutura, foi decidido realizar análises de estabilidade pseudoestáticas, pelo método de equilíbrio limite, na seção transversal de maior altura do barramento.

No procedimento pseudoestático, a carga sísmica é representada por uma força estática, equivalente ao peso do solo, multiplicado pelo coeficiente sísmico  $K$ , que corresponde a uma fração da aceleração, devido a gravidade, produzida por um terremoto (Duncan et al. 2014).

### 3. ANÁLISES DE ESTABILIDADE

#### 3.1. Geral

As análises de estabilidade, feitas no *software* SLIDE 2, da Rocscience, foram executadas para superfícies de rupturas não circulares, visando obter os limites aceitáveis de aceleração e velocidades induzidas pelos desmontes de rocha, para um fator de segurança igual a 1,1, conforme requisitado pela norma ABNT NBR 13028:2024, em taludes de estruturas sujeitas a solicitação sísmica.

As metodologias utilizadas, Morgenstern-Price e Spencer, satisfazem todas as condições de equilíbrio estático, correspondendo a paridade de forças nas direções vertical e horizontal, além de momentos em qualquer ponto (Duncan et al. 2014).

Os parâmetros de resistência ao cisalhamento utilizados, obtidos de ensaios triaxiais e de piezocone no rejeito do reservatório, são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros de resistência dos materiais utilizados na seção analisada.

Material	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$c'$ (kPa)	$\phi'$ (°)	$c$ (kPa)	$\phi$ (°)	$S_u/\sigma_v'$
Filito pouco alterado	23	200	30	-	-	-
Saprolito de filito	22	60	30	-	-	-
Solo residual de filito	16	25	32	25	28	-
Colúvio	21	26,5	35	-	-	-
Rejeito	28	0	39	-	-	0,25
Aterros da barragem	26	17	33	28	24	-
Encoramento	22	0	40	-	-	-

Onde:  $\gamma$  – peso específico seco;  $c'$  – coesão efetiva;  $\phi'$  – ângulo de atrito efetivo;  $c$  – coesão total;  $\phi$  – ângulo de atrito;  $S_u/\sigma_v'$  – razão de resistência.

#### 3.2. Análises de Sensibilidade

Primeiramente foram feitas análises de sensibilidade, considerando a avaliação na condição pseudoestática avançada (*Advanced Seismic Analysis*), onde é definido o valor mínimo do fator de segurança de 1,1, para obtenção da aceleração horizontal ( $K_y$ ) correspondente.

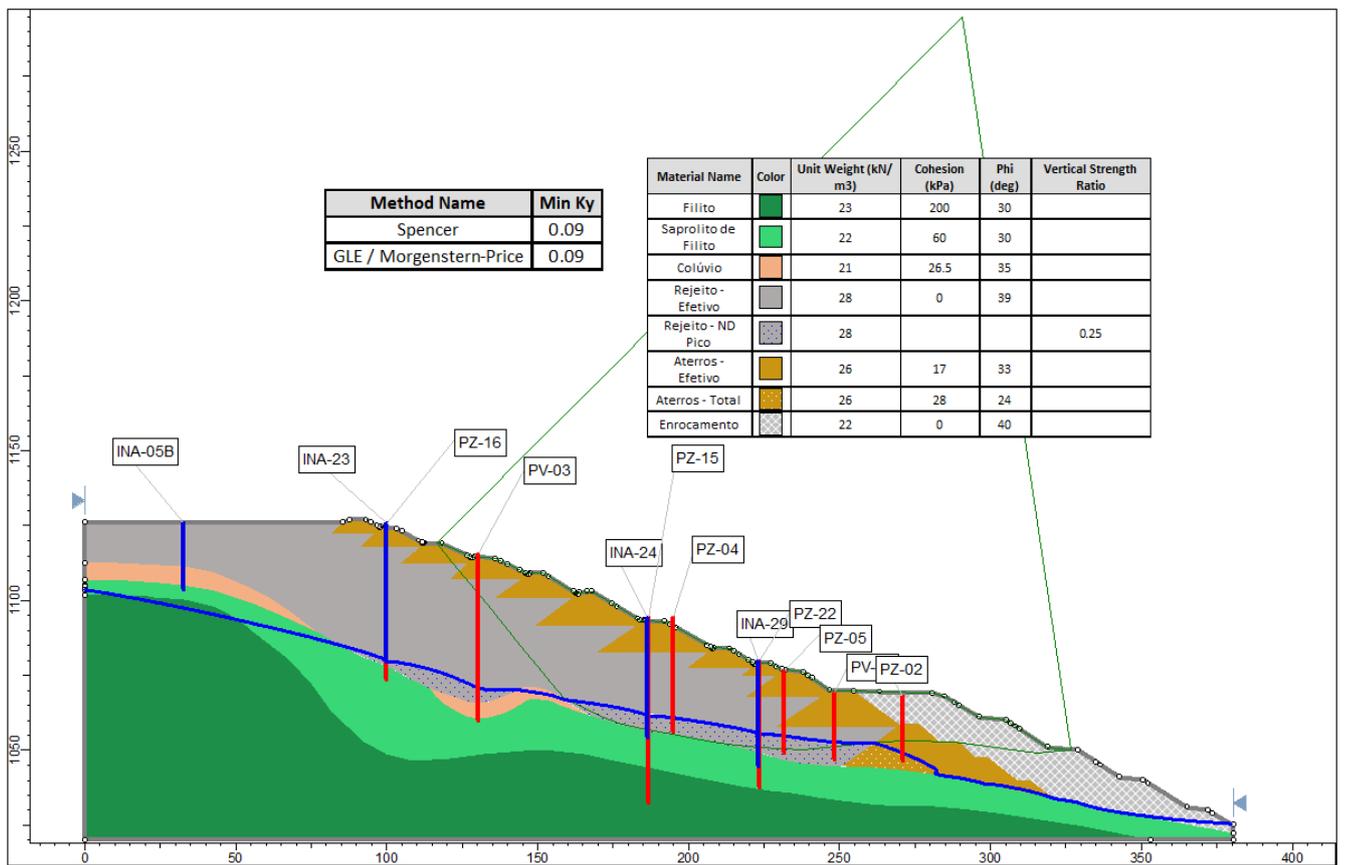


Figura 2. Resultado da análise de sensibilidade, com fator de segurança alvo fixado em 1.1.

Conforme evidenciado na Figura 2, para que uma análise de estabilidade resulte em um fator de segurança igual a 1,1, é necessária a atuação de um sismo no local, que gere uma aceleração horizontal ( $K_y$ ) de 0,09 g na estrutura.

### 3.3. Verificação da Estabilidade

Visando confirmar os valores obtidos no estudo de sensibilidade, foram feitas análises de estabilidade apenas com o valor da aceleração horizontal (0,09), tendo em vista que Duncan et al. (2014) sugere que, de modo geral, as componentes verticais das acelerações sísmicas são negligenciadas. Além disso, Papadimitriou et al. (2014) reforça que tais esforços, em regiões de baixa atividade sísmica como o Brasil, podem ser consideradas desprezíveis ou de baixa relevância.

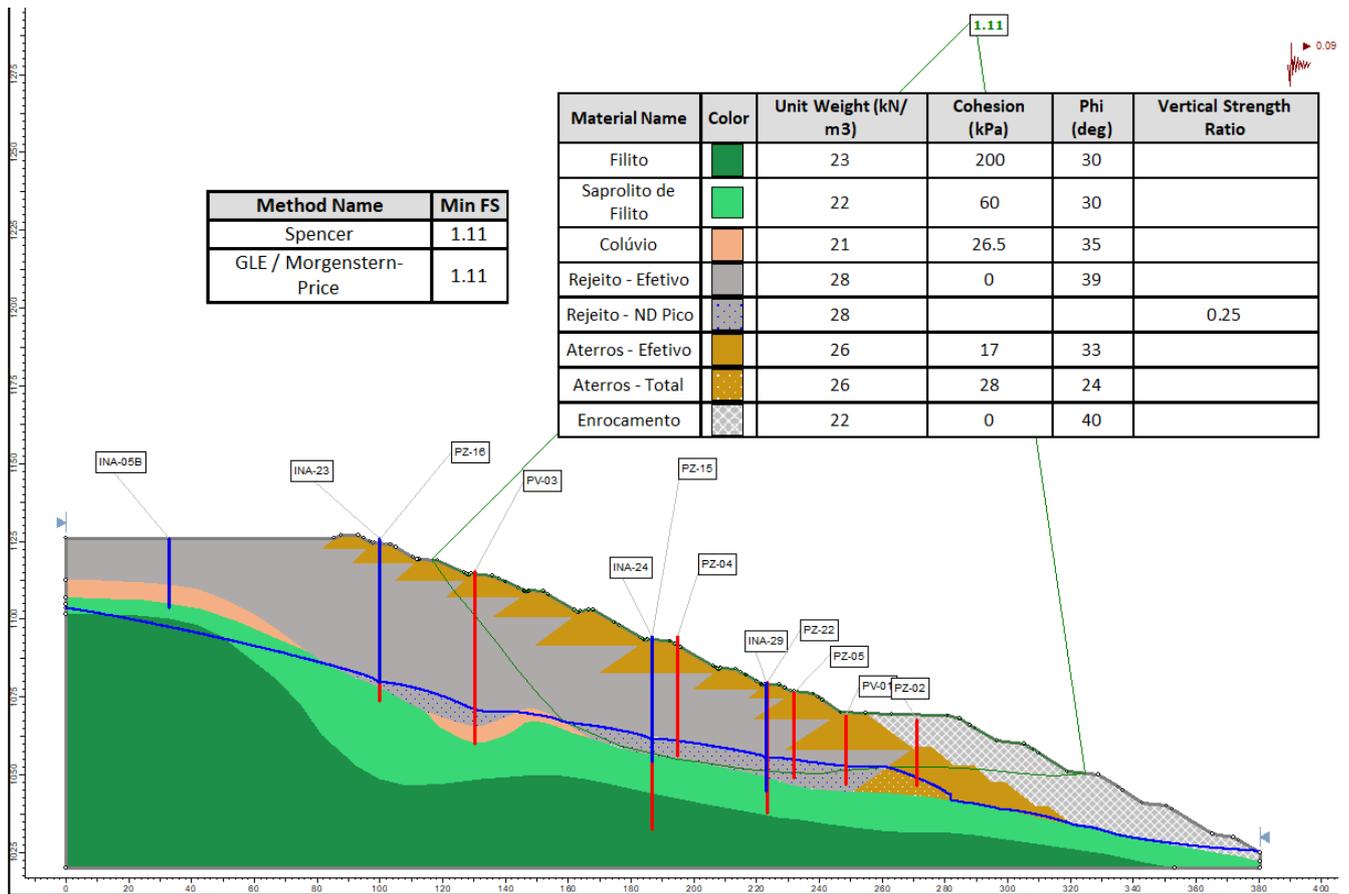


Figura 3. Resultado da análise de estabilidade na seção de maior altura.

Observando o resultado da análise de estabilidade apresentado na Figura 3, é visível que o fator de segurança resultante para o devido sismo, corrobora com o estudo de sensibilidade.

#### 4. ANÁLISE DAS ACELERAÇÕES E VELOCIDADES LIMITES

Visando monitorar as vibrações induzidas na estrutura, principalmente pelos desmontes de rochas nas cavas adjacentes, a Mineração Morro do Ipê instalou 04 (quatro) sismógrafos na estrutura, cujas localizações estão apresentadas na Figura 4.

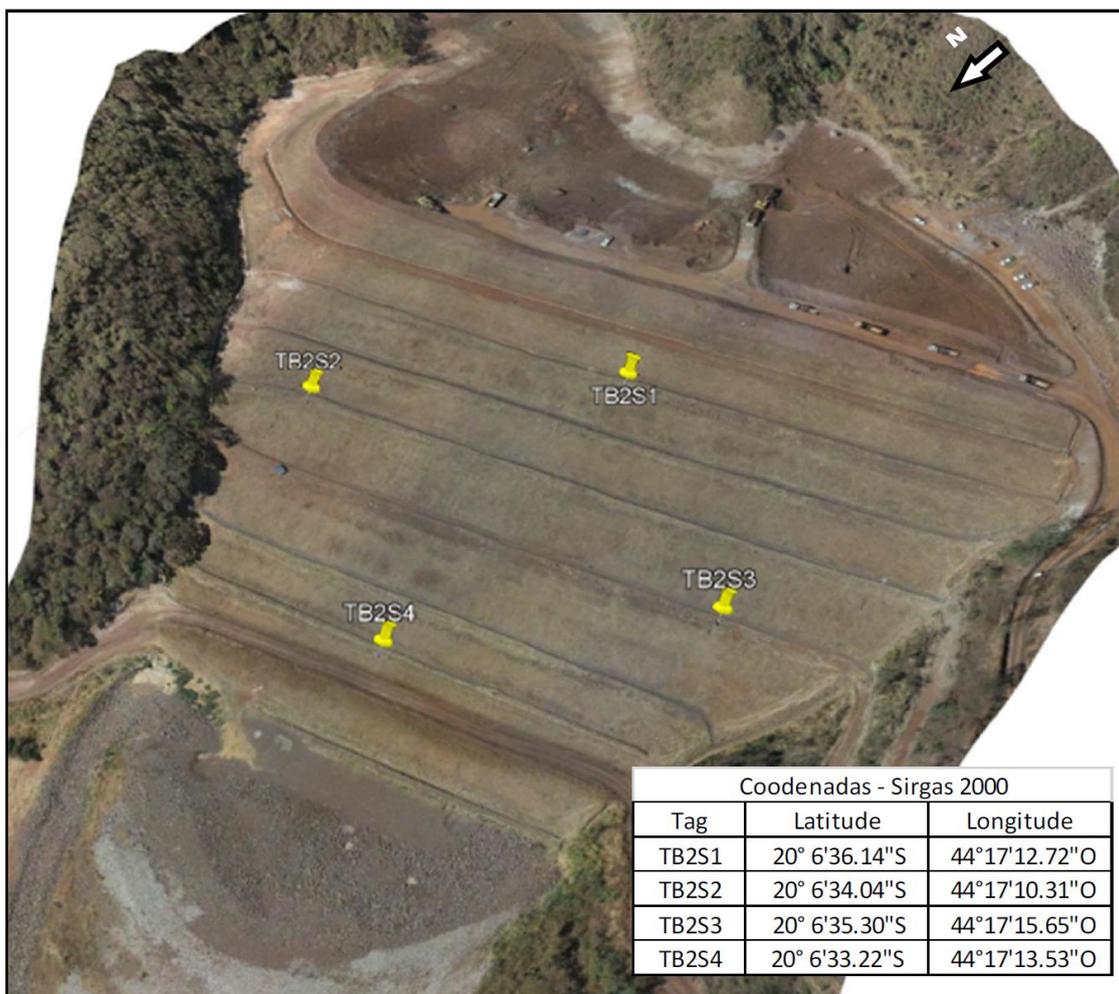


Figura 4. Localização dos sismógrafos na barragem.

Segundo o relatório de Monitoramento de Vibrações, referente ao mês de outubro de 2024, como não existem resultados experimentais aplicáveis ao referido barramento, para os limites admissíveis da velocidade da partícula, o monitoramento é baseado na norma alemã DIN 4150-3 para ações de longa duração em edifícios sensíveis, cujo limite constante estabelecido é de 2,5 mm/s.

Desse modo, utilizando a fórmula proposta pela *International Society of Explosives Engineers* (ISEE) em 2011, cuja equação (1) é exibida logo abaixo, é possível calcular a aceleração máxima em um local por meio da frequência e velocidade máxima da partícula.

$$A = 2\pi fPPV \tag{1}$$

Em que:

A = aceleração (m/s<sup>2</sup>);

f = frequência (Hz)

PPV = velocidade máxima da partícula (m/s)

Com base na avaliação do gráfico da Figura 5, onde são apresentadas as frequências lidas no sismógrafo mais próximo da área de detonação, no mês de outubro/2024, é possível visualizar que os maiores valores registrados são próximos de 20 Hz.

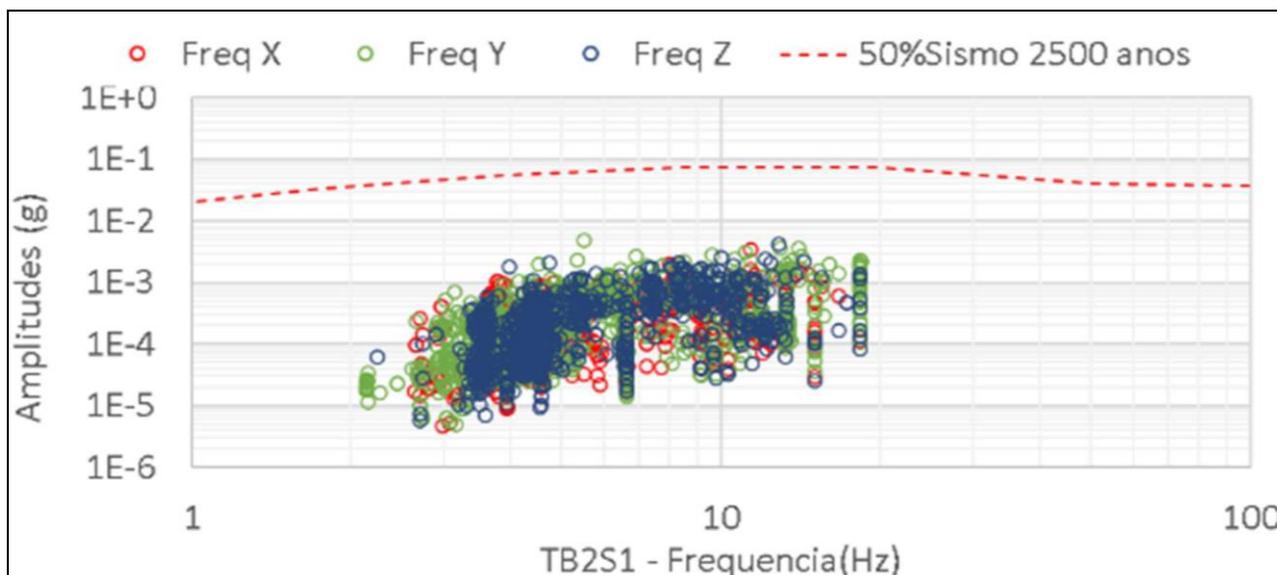


Figura 5. Limites de referência em função da frequência – TB2S1.

Segundo Simangunsong et al. (2024), a frequência dominante de vibrações induzidas por desmontes varia entre 5 e 30 Hz, em acordo com a maioria dos dados apresentados nos gráficos. Sendo assim, considerando uma frequência de 20 Hz, com uma velocidade limite de 2,5 mm/s, a aceleração será:

$$A = 2 \times \pi \times 20 \times 0,0025 \rightarrow A = 0,31m/s^2$$

Como a aceleração de  $0,31m/s^2$  resulta em um PGA (*peak ground acceleration*) de 0,031g, avaliando os gráficos das Figuras 6 e 7, onde são apresentadas as acelerações em função de g no mês de outubro/2024, é notório que as leituras dos instrumentos localizados no barramento são inferiores aos limites aplicados (0,031g ou  $0,31m/s^2$ ) e aos máximos toleráveis pela estrutura, obtidos pelas análises de sensibilidade e estabilidade (0,09g ou  $0,90m/s^2$ ).

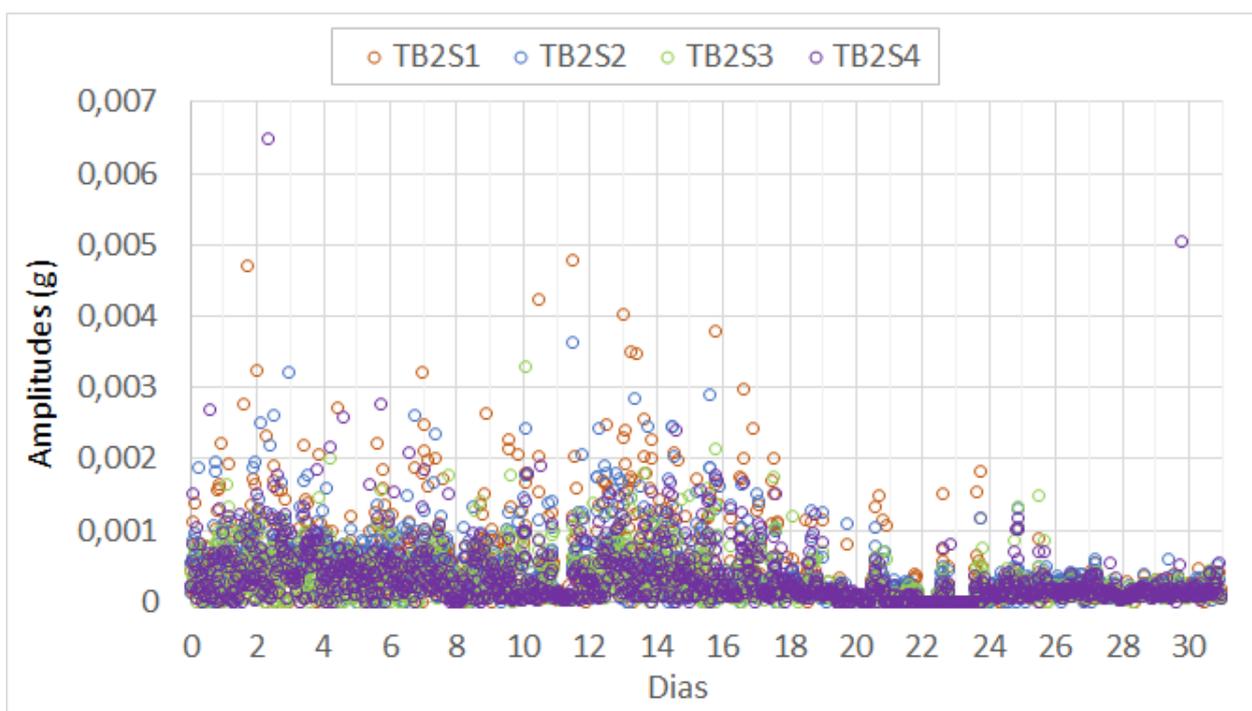


Figura 6. Soma vetorial das amplitudes (PGAs) máximas ao longo dos dias.

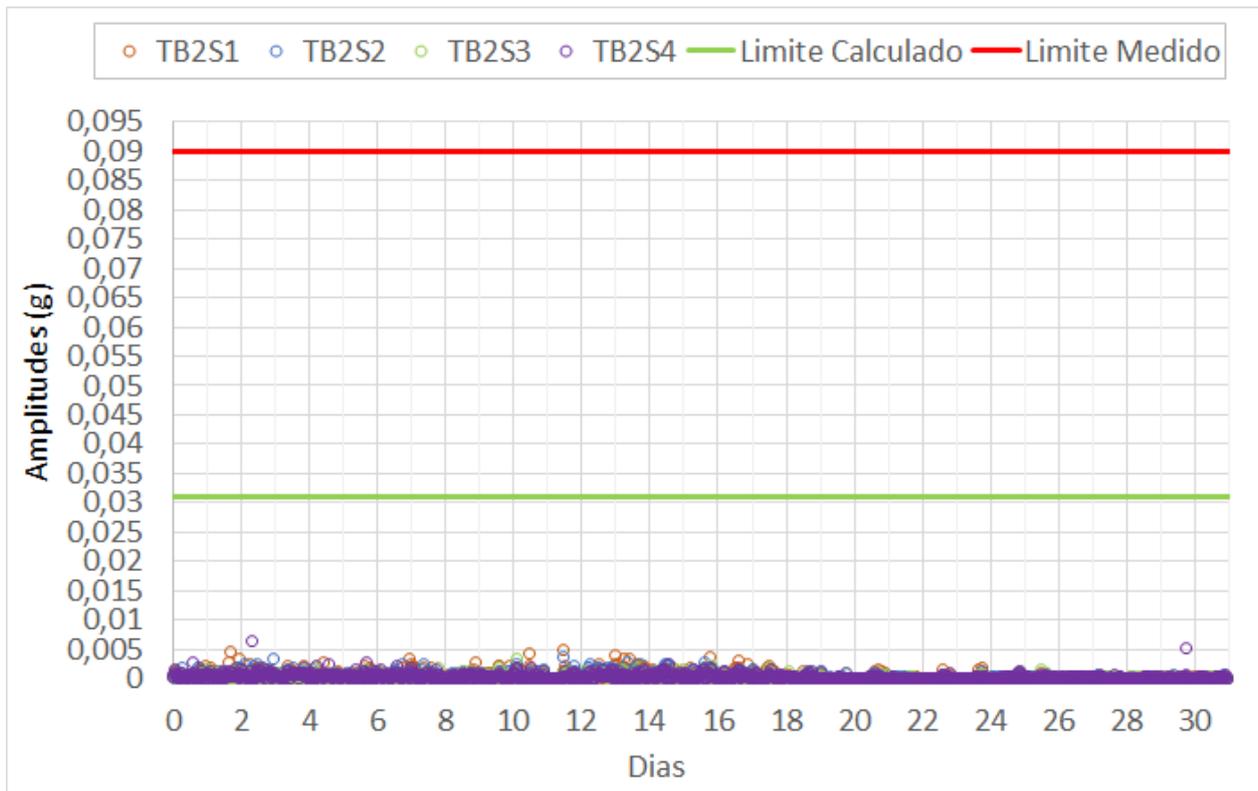


Figura 7. Comparação entre os PGAs lidos, calculados e o limite medido pelas análises de sensibilidade.

Ademais, é possível constatar que para gerar um PGA de 0,09g (0,9m/s<sup>2</sup>), adotando-se como frequência máxima 20 Hz, valor mais representativo dos observados nos registros, a velocidade máxima de partícula seria:

$$PPV = \frac{0,9}{2 \times \pi \times 20} \rightarrow PPV = 0,007 \text{ m/s}^2 \rightarrow (7,0 \text{ mm/s})$$

Conforme observado no resultado obtido, a velocidade de 2,5mm/s, adotada como limite no monitoramento das vibrações, é bem inferior ao máximo tolerável pela estrutura, 7,0 mm/s.

Por fim, analisando as Figuras 8 e 9, é nítido que as velocidades médias lidas são muito baixas e que mesmo as máximas históricas não superam o valor de 3,5 mm/s.

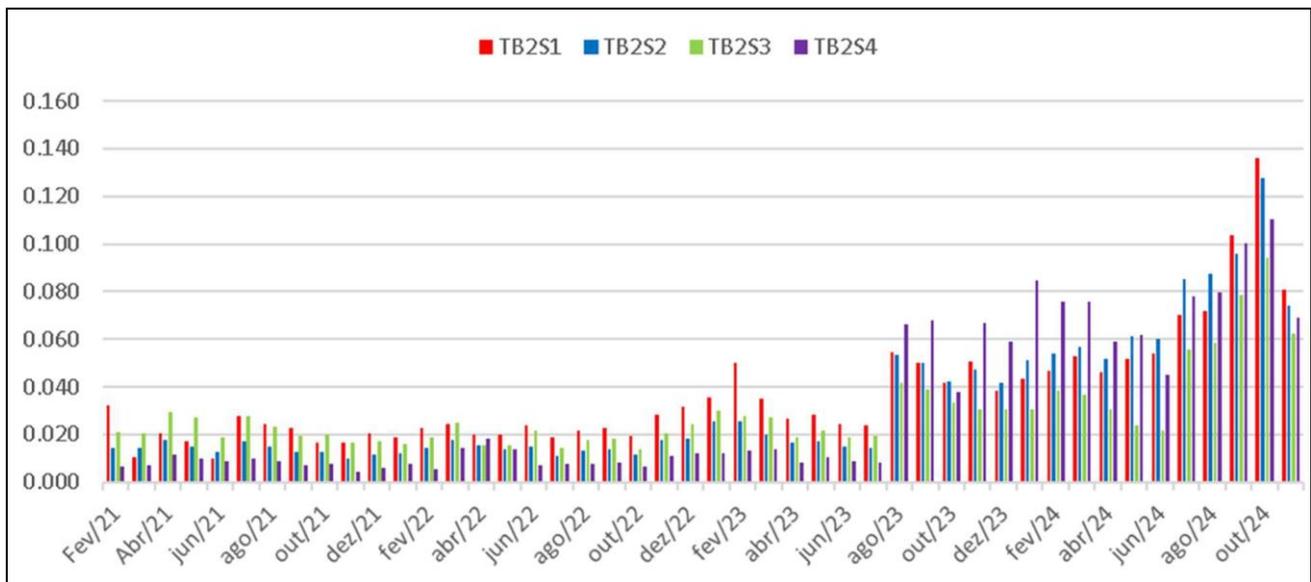


Figura 8. Evolução das velocidades médias (mm/s).

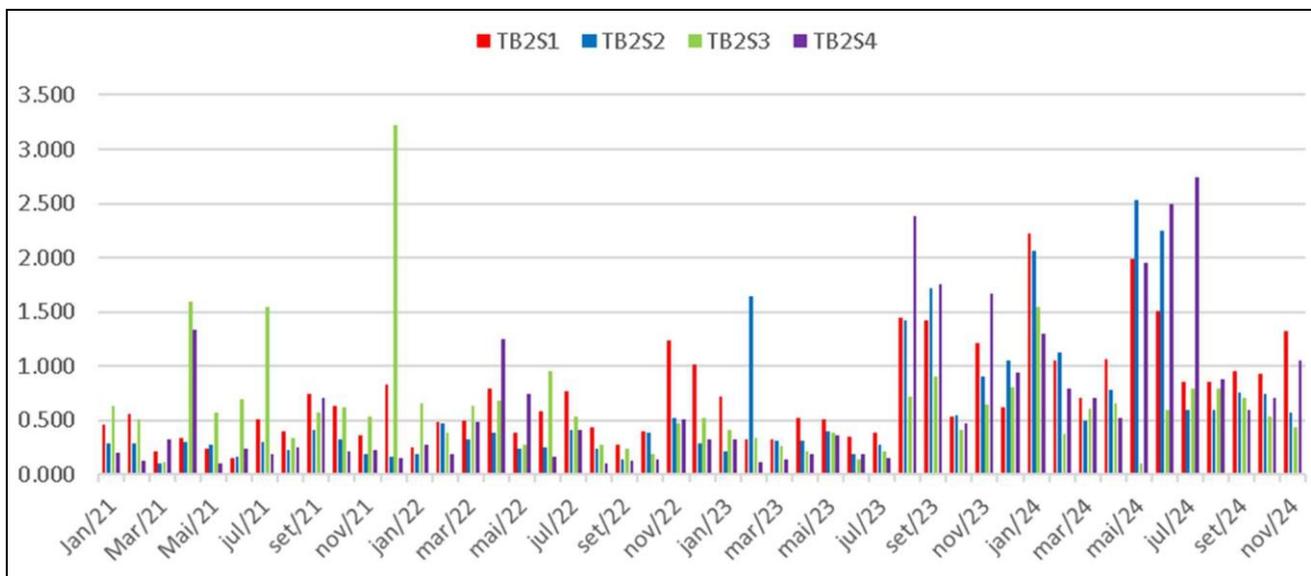


Figura 9. Evolução das velocidades máximas (mm/s).

## 5. CONCLUSÕES

O estudo concluiu que os sismos registrados na estrutura geram acelerações muito abaixo dos valores necessários para causar algum dano. Todavia, fica evidente a importância da instalação de sismógrafos para monitoramento das vibrações, tendo em vista que vários picos foram observados desde o início dos registros, que foram muito superiores aos números médios.

Portanto, é de extrema relevância a determinação das acelerações máxima toleradas pelo barramento, juntamente com o acompanhamento dos dados reportados, pois qualquer mudança no plano de fogo, ou local de sua execução, pode gerar valores extremos e acima do limite permitido.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Mineração Morro do Ipê pela disponibilidade dos dados e permissão para divulgação do estudo.

## REFERÊNCIAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2024). NBR 13028. *Mineração - Elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água – Requisitos*.

DE OLIVEIRA DIAS, Leonardo Santana et al. *Mining induced ground motions in a tailings dam*. Anuário do Instituto de Geociências, v. 45, p. 1-12, 2022.

DIN 4150-3, *Structural vibration part 3: effects of vibration on structures*, (Berlin, Deutches Institut fur Normung, 1999).

DUNCAN, J. Michael; WRIGHT, Stephen G.; BRANDON, Thomas L. *Soil strength and slope stability*. John Wiley & Sons, 2014.

International Society of Explosives Engineers (ISEE) (2011), "*ISEE Blasters' Handbook*," ISEE, 2nd ed., 2011, Cleveland, Ohio.

SIMANGUNSONG, Ganda Marihot; PRASSETYO, Simon Heru; PINEM, Riadi Simka. *Relationship between blasting operation and slope stability: a case study at Borneo Indo Bara open pit coal mine*. Scientific Reports, v. 14, n. 1, p. 1-21, 2024.