

EVALUACIÓN DE LAS VIBRACIONES INDUCIDAS Y SUS EFECTOS EN LAS EDIFICACIONES DE UNA COMUNIDAD PRÓXIMA A UNA GRAN MINA DE HIERRO

Vidal Félix Navarro Torres ^a, Fabiano Veloso Ferreira ^b & Victor Albuquerque de Carvalho ^c

^a Vale Institute of Technology, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brazil, vidal.torres@itv.org

^b Vale Institute of Technology, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brazil, fabiano.veloso@itv.org

^c Vale Institute of Technology, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brazil, victor.carvalho@pq.itv.org

RESUMEN

La voladura de rocas es una de las actividades que se realizan habitualmente en la minería. A pesar de sus beneficios para el progreso de las actividades en la mina, las voladuras tienen algunos efectos negativos como las vibraciones inducidas y la presión acústica, lo que hace que este tema sea de gran relevancia para la comunidad en general. Entre las diversas metodologías para estimar la propagación de ondas a lo largo del terreno, se encuentra el desarrollo de leyes de atenuación. En este trabajo se abordarán los impactos de las vibraciones inducidas generadas por la voladura de rocas con explosivos y sus posibles efectos sobre los edificios próximos al tajo de una gran mina de hierro.

Palabras clave: Daños, edificios, comunidad, mina a cielo abierto; perforación y voladura; vibraciones.

EVALUATION OF INDUCED VIBRATION AND ITS EFFECTS ON BUILDINGS IN A COMMUNITY NEAR A LARGE IRON ORE MINE

ABSTRACT

Rock blasting is one of the activities commonly carried out in open-pit mining. Despite their benefits for the progress of activities in the mine, blasting has some deleterious effects such as induced vibrations and acoustic pressure, making this topic of great relevance to the general community. Among the various methodologies for estimating the propagation of waves along the underground, there is the development of attenuation laws. This work will address the impacts of induced vibrations generated by explosive rock blasting and their possible effects on buildings near the pit of a large iron ore mine.

Keywords: Damage, buildings, community, open pit mine; drill-and-blasting; vibrations.

1 Introduction

As vibrações induzidas por desmonte de rochas com explosivos são um tema de grande relevância e impacto. Essas vibrações podem afetar tanto a integridade das estruturas quanto o conforto dos ocupantes.

Comumente, o parâmetro utilizado para a quantificação e avaliação da potencialidade de danos das vibrações sísmicas é a velocidade de vibração de pico de partícula (PPV) em conjunto com frequência [1], [2]. A atenuação da energia vibratória é crucial para minimizar esses impactos. A distância entre a fonte de vibração e o receptor, bem como a carga máxima por espera (CME) desempenham um papel fundamental nesse processo, uma vez que são

variáveis fundamentais para definição das leis de atenuação das vibrações [3].

Neste estudo, foram avaliadas as vibrações induzidas por desmontes de rochas com explosivos em uma mina de ferro de grande porte, localizada no Quadrilátero Ferrífero e o possível impacto dessas vibrações em comunidades vizinhas.

2 Contexto Litológico e Topográfico da Mina e Área do Entorno

A geologia da área em estudo é composta majoritariamente por materiais friáveis (próximo a 60%), sendo itabiritos friáveis, filitos e cangas friáveis, e em menor proporção por itabiritos, hematitas e quartzitos compactos, conforme exposto na Tabela 1.

Na mina em estudo apresenta-se problemas com a geração de blocos denominados matacões, que são fragmentos com próximo a 1,0 ou 2,0 m. Estes fragmentos influenciam na baixa produtividade e altos custos na cadeia de produção de desmote a britador primário.

Tabela 1. Ocorrência de litologias friável, semicompacta e compacta na mina em estudo.

Litologia	Litologias	Percentual
Friável	IF, IGO, HF, Filito, Canga	58,21%
Semicompacto	ISC, HSC, Canga	5,23%
Compacto	IC, HC, Quartzito	8,32%

IF: Itabirito friável; IGO: Itabirito geotítico; HF: hematita friável; ISC: Itabirito semicompacta; HSC: hematita semicompacta; IC: Itabirito compacto; HC: hematita compacta

Entre a cava da mina e a comunidade vizinha, as litologias ocorrem longitudinalmente com predomínio de Itabirito Silicioso compacto (azul escuro) a friável (azul claro), Itabirito argiloso (marrom) e quartzito (amarelo), como visto na Figura 1.

Topograficamente, a cava da mina está nas cotas de 860 a 1020 m e a comunidade vizinha está a 760 m, existindo uma falésia com altura de 100 a 260 m, que

forma uma face livre e influência na importante atenuação das vibrações.

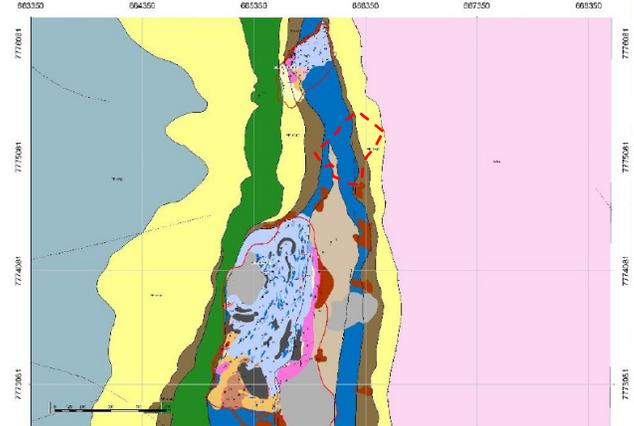


Figura 1. Litologias que ocorrem entre a mina e a comunidade vizinha.

3 Critérios de Segurança para Estruturas de Construção Civil

Na literatura é possível identificar diversas normas de referência para análise de critério de segurança de vibrações em relação a estruturas civis. Na Tabela 2 estão listadas algumas importantes normas sobre o tema.

Tabela 2. Normas de Segurança para Vibrações em relação a Estruturas Civis.

Norma	País	Frequência (Hz)	Velocidade Pico de Vibrações (mm/s)			Pressão acústica (dB)
			Estruturas sensíveis	Estruturas Correntes	Estruturas reforçadas	
USBM, RI 8507	EUA	< 40	12,7	-	19,0	136
AS 2187	Austrália	≤ 10	2,0	10,0	25,0	
DIN 4150	Alemanha	≤ 10	3,0	5,0	20,0	
NP 2074	Portugal	≤ 10	1,5	3,0	6,0	
ABNT 9653	Brasil	4 - 15	15 – 20 para qualquer tipo estrutura			134

Dentre as normas mais restritivas, temos a AS 2187, DIN 4150 e a NP 2074, que em geral recomendam limites de frequências iguais ou inferiores a 10 Hz, e padrões de PPV (mm/s) de 1,5 a 3,0 mm/s para tipos de estrutura sensíveis de 3,0 a 10,0 mm/s para estruturas correntes e de 6,0 a 25,0 mm/s para estruturas reforçadas.

Entre as normas mencionadas, a norma Portuguesa NP 2042:2015 é mais conservadora.

Desta forma, esta norma será considerada para avaliação dos efeitos das vibrações geradas pelos desmontes na comunidade vizinha a mina, particularmente nas edificações mais próximas.

Para a avaliação dos possíveis impactos na percepção de conforto humano foram consideradas Norma AS 2187 (Tabela 3) e a BS 64722-2 (Tabela 4).

Tabela 3. Norma AS 2187 na sua seção J4.2 sobre incomodidade humana.

Categoria	Operação de desmonte	PPV (mm/s)
Monumentos históricos*		2
Local sensível (residencial, escolas, etc.)	Ao longo de 12 meses ou > 20 desmontes	5
	Menor de 12 meses ou < 20 desmontes	10
Locais não sensíveis (fábricas, comercio, etc.)	Todo tipo de desmonte	25

Tabela 4. Norma Britânica BS 6 472-2 sobre incomodidade humana.

Local	Operação de desmonte	PPV (mm/s)
Residencial	Diurno (08h00 – 18h00)	6 - 10
	Noturno (23h00 – 07h00)	2
	Outro horário	4,5
Escritórios, locais de trabalho	Tempo todo	14,0

4 Parâmetros Medidos *in situ* e Modelos de Atenuação

O estudo baseia-se em 206 eventos medidos entre os anos de 2016 a 2024. Após a devida validação dos dados, foi determinado o modelo de atenuação integrando 95% dos dados (Equação 1), a partir do modelo de 50% com R² maior que 80% (Figura 2).

$$PVS = 124,99Q^{0,55}D^{-1,10} \quad (1)$$

Onde: PVS é a velocidade resultante das componentes pico de vibrações em três direções (mm/s); Q é a carga explosiva por espera (kg/espera); D a distância entre o local de detonação da carga explosiva e local de mediação (m).

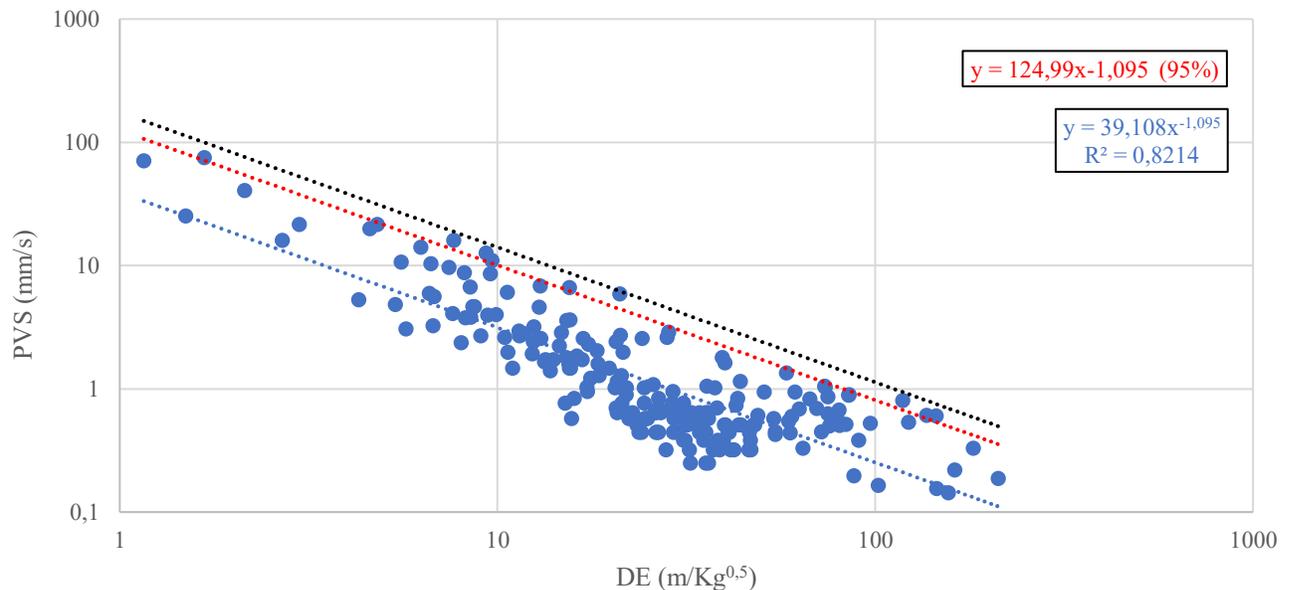


Figura 2. Caracterização do modelo de atenuação entre a cava de Fazendão e a comunidade de Morro de Água Quente

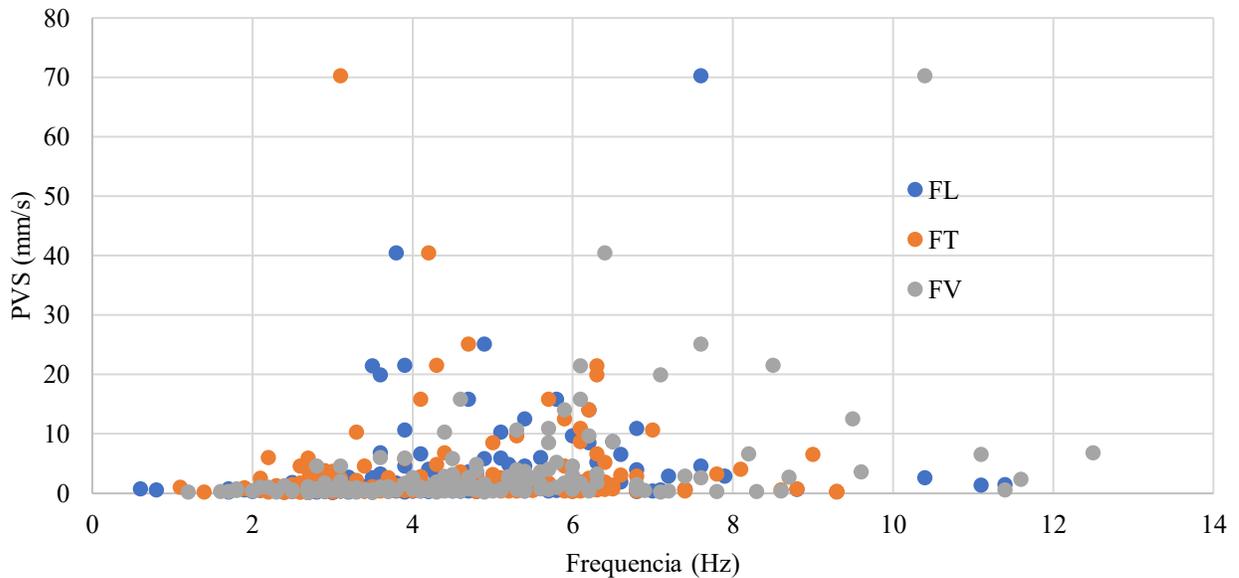


Figura 3. Freqüência das vibrações medidas por causa de vibrações induzidas nos desmontes na mina de Fazenda

As freqüências medidas durante as referidas campanhas de caracterização sísmica entre a cava da mina e a comunidade vizinha resultaram 0,8 a 12,5 Hz, com freqüência de dominante na faixa de 2 a 10 Hz (Figura 3).

Por outro lado, com base nos 206 eventos medidos e correlacionando o PVS com as três componentes das velocidades pico de partículas (PPV) foi possível caracterizar que a componente longitudinal (PPV_l) apresenta melhor correlação (Figura 3).

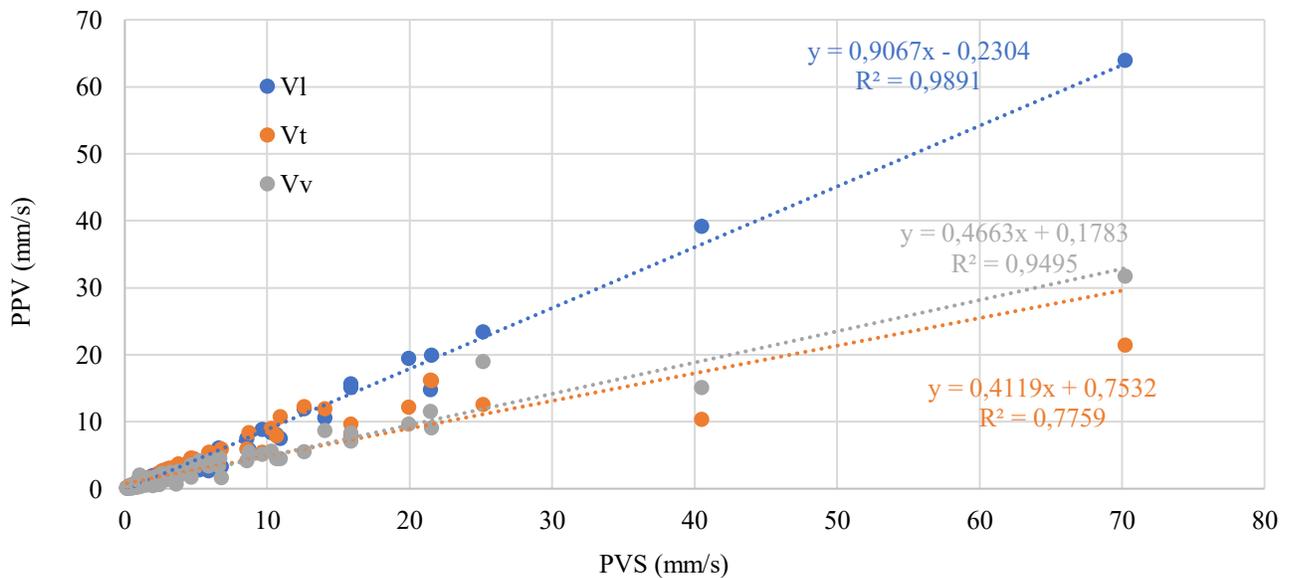


Figura 4. Correlação de PVS com PPV baseado em 206 eventos medidos.

Aplicando a equação resultante da correlação entre PVS e PPV_l (Figura 4) na Equação (1) se obtém o modelo de atenuação em função de PPV_l (Equação 2).

$$PPV_l = 113,32Q^{0,55}D^{-1,10} - 0,23 \quad (2)$$

Adicionalmente os dados da campanha de monitoramento sísmico realizado em 2016 foram usados para gerar mapas de isovalores para avaliação da

propagação das ondas vibratórias em mm/s (Figura 5) e da pressão acústica em dB (Figura 6).

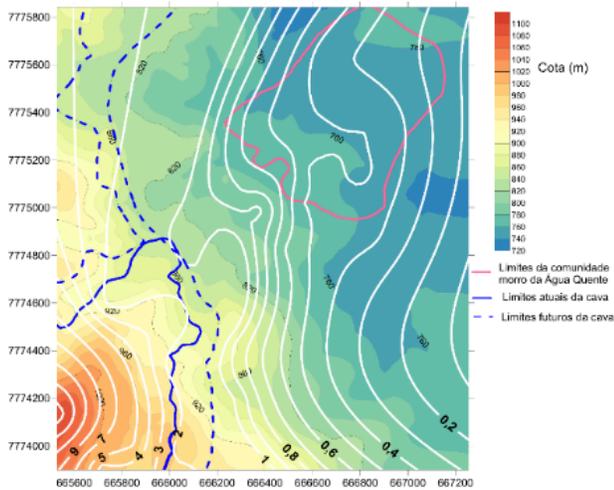


Figura 5. Mapa de isovalores de vibrações.

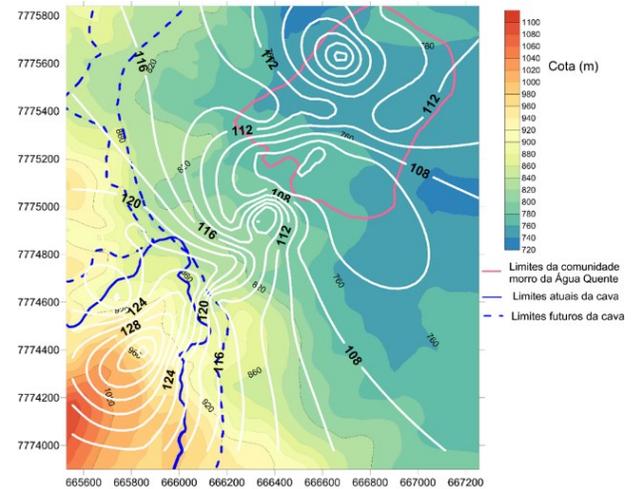


Figura 6. Mapa de isovalores de pressão acústica.

5 Avaliação dos Possíveis Impactos das Vibrações dos Desmontes na Mina

5.1 Avaliação histórica dos possíveis impactos no bangalô B11

Para avaliação dos possíveis impactos nas estruturas civis na comunidade na vizinhança da mina, será

avaliado a estrutura denominada bangalô 11 (B11), que está localizada a uma distância de 1000 m do extremo norte da cava atual da mina em estudo, e a uma distância de 502 m dos limites da cava final, conforme pode ser visto no ponto em vermelho identificado na Figura 7.



Figura 7. Localização do bangalô B11 em relação a cava da mina.

O bangalô B11, é uma estrutura montada sobre pilares de concreto armado em processo de deterioração, reforçados com madeira, (Figura 8, c e d), e com piso em azulejos com aspecto de deslocamento vertical e fissuração (Figura 8 a) assim como presença de fissuras no bangalô (Figura 8 b).

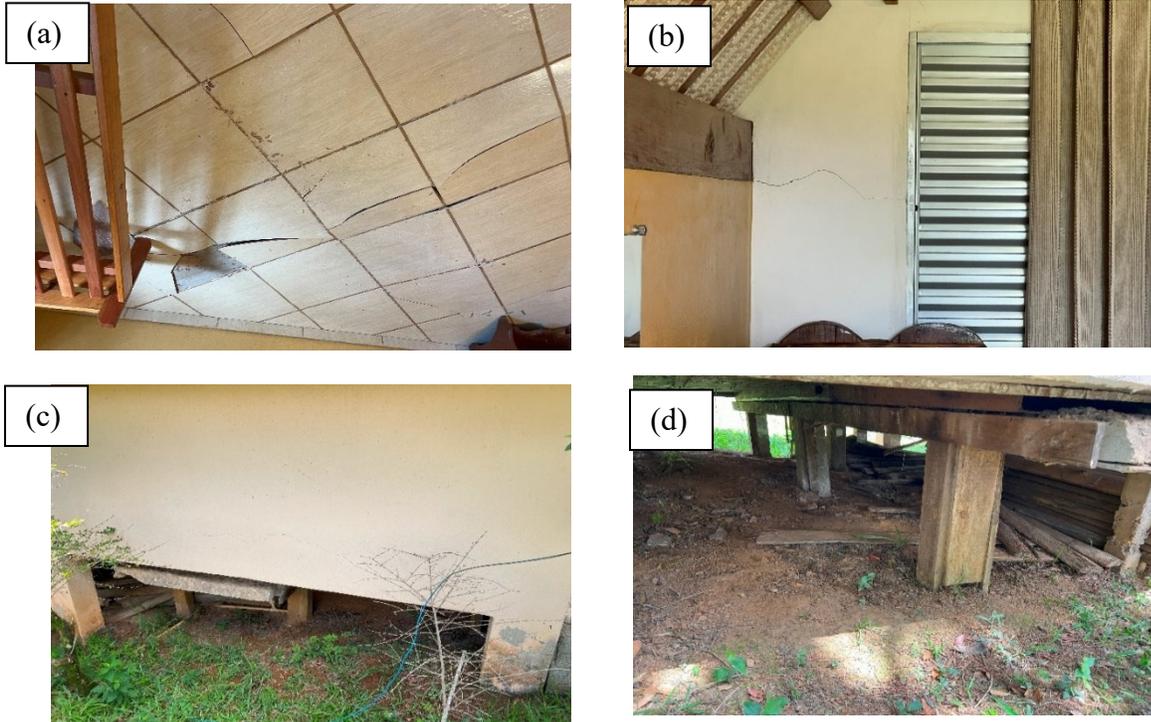


Figura 8. Caracterização do bangalô B11.

No contexto da norma NP 2042:2015 esta estrutura pode ser considerada como estrutura corrente, para o qual o valor de vibração de partículas pico admissível é de 3 mm/s.

Para avaliar o possível dano ou impacto no bangalô B11, considera-se a distância de 1000 m, que corresponde a distância entre este bangalô e a borda da zona norte da cava da mina.

Para a avaliação dos possíveis níveis de PPV_i (mm/s) que teriam atingido o bangalô B11, foi utilizada a

Equação (2), para, a parti de dados históricos dos desmontes realizados nos anos de 2020 a 2023, estimar os níveis de vibrações induzidas que teriam atingido o referido bangalô (Fig. 9).

Os valores de vibração pico de partículas (PPV_i) mais altos que teriam atingido o bangalô B11 variam de 2,1 mm/s a 3,1 mm/s, que correspondem à detonação de 828 kg a 1600 kg por espera, respectivamente, conforme visto na Tabela 5.

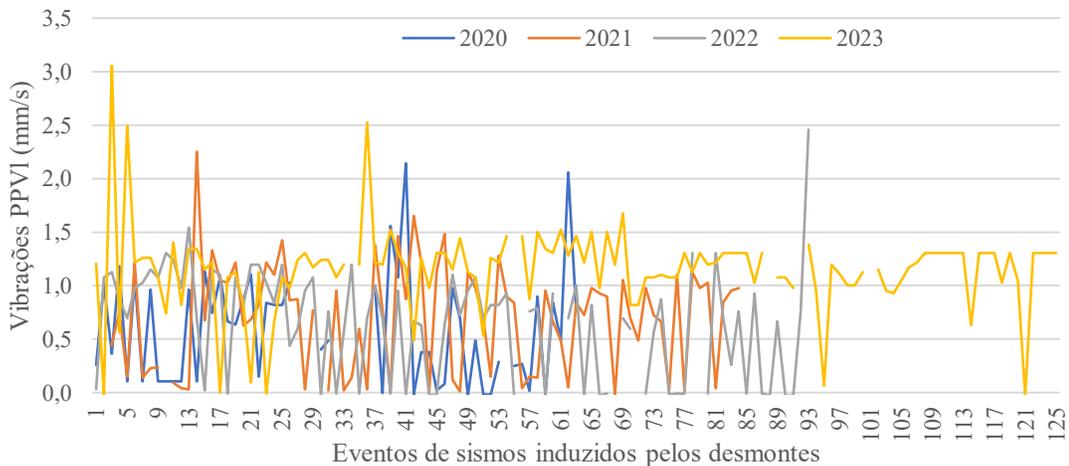


Figura 9. Possíveis PPV_i que teriam atingido o bangalô B11 entre os anos 2020 a 2023.

Comparando com o padrão adotado de 3 mm/s, pode-se concluir que um único evento que ultrapassou o padrão adotado é no desmonte realizado com carga explosiva de 1600 kg/retardo no ano 2023.

Tabela 5. Valores máximos de PPV₁ que teria atingido o B11 entre os anos 2020 a 2023.

Ano	Carga explosiva (kg/retardo)	PPV ₁ (mm/s)
2020	828	2,1
2020	886	2,1
2021	960	2,3
2022	1110	2,5
2023	1160	2,5
2023	1140	2,5
2023	1600	3,1

Com a finalidade de validar os valores simulados para o nível vibratório no bangalô B11, foi realizada uma medição em campo de um evento ocasionado por uma desmonte a 1100 m e com uma carga explosiva de 400 kg/retardo. Como resultado foi medida uma vibração de 0,32 mm/s no chão (Figura 10 a) e 0,36 e 0,38 mm/s no piso superior do bangalô (Figura 10 b).



Figura 10. Monitoramento do nível vibratório medido no bangalô B11

5.2 Avaliação de possíveis vibrações no futuro cenário da lavra até a cava final

Na zona Sudoeste e da comunidade vizinha a Mina tem-se uma Pousada, onde existem 12 bangalôs (Figura 11), dos quais, um é o B11.

A distância crítica entre o grupo dos bangalôs existentes na comunidade de Morro de Água Quente, acontecerá quando se realizem as detonações na zona da cava a final (Fig. 7), pelo que será o momento crítico para a aplicação de desmontes com controle de vibrações para evitar os eventuais impactos na segurança das estruturas e a incomodidade humana. Nesse sentido as distâncias entre a cava final e os bangalôs é importante para realizar as respectivas previsões (Tabela 6).



Figura 11. Localização da Pousada com os 12 bangalôs na comunidade vizinha a Mina

Tabela 6. Distâncias entre a zona Norte da cava final da Mina e os 12 bangalôs

ID	X	Y	Z	D cava final (m)
B12	666335	7775046	783.7	464
B1	666450	7775142	771.9	614
B10	666387	7775049	779.9	507
B11	666387	7775039	779	502
B2	666436	7775093	775.9	573
B3	666424	7775091	776.8	562
B4	666414	7775083	777	549
B5	666406	7775064	777.5	531
B6	666398	7775053	778.9	518
B7	666358	7775058	780.5	490
B8	666335	7775072	780.8	481
B9	666333	7775063	781.8	474

Para a vibração pico de partículas admissível de 3 mm/s e aplicando a Equação (2) é possível obter a Equação (3) que permite determinar a carga explosiva máxima a detonar na zona Norte da cava final em relação a cada um dos 12 bangalôs.

$$Q_{max} = 0,001552 \cdot D^2 \quad (3)$$

Aplicando a Equação (3) para diferentes distâncias, foi identificado que a 1000 m de distância dos bangalôs, é possível detonar cargas de até 1552 kg por retardo, valor que diminui gradualmente até 334 kg por retardo a uma distância de 464 m, que é equivalente a menor distância entre os bangalôs e o limite da cava final da mina (Fig. 12).

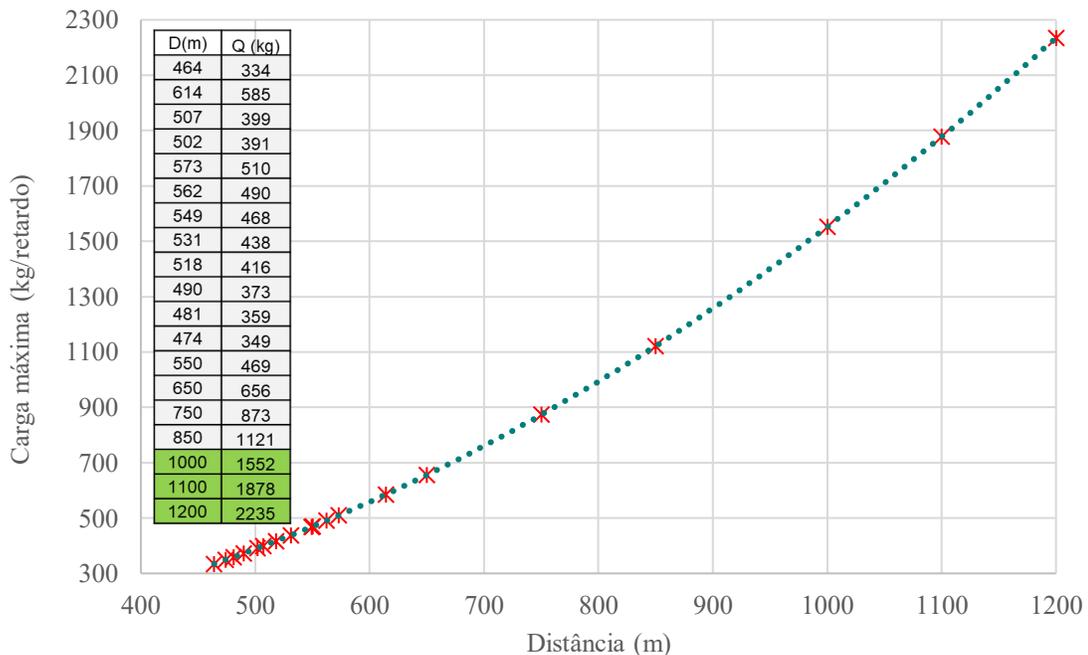


Figura 12. Carga máxima por espera admissível para desmonte realizado atualmente (> 1000 m) e os que serão realizados no futuro até a cava final.

Sabendo que as detonações nos desmontes com explosivos no processo de lavra na cava da Mina causam ondas vibratórias que se propagam no sentido dos bangalôs na comunidade vizinha, o primeiro bangalô influenciado será o de número 12 que está localizado a 464 m da cava final. Desta forma, os

desmontes que serão executados nesta zona não deverão ultrapassar a carga de 334 kg por espera. Estando os restantes 11 bangalôs a distancias maiores a 464 m, estes estarão protegidos quando utilizado uma explosiva por espera de 334 kg, como pode ser visto na Figura 13

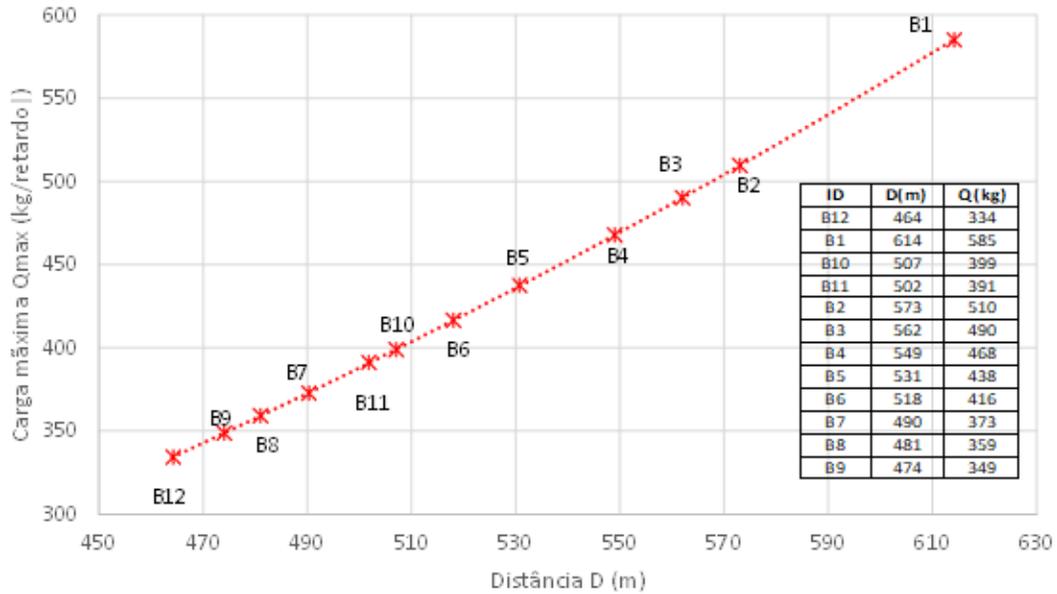


Figura 13. Carga máxima por espera admissível relacionado com cada um dos 12 bangalôs.

Para a avaliação dos possíveis impactos à incomodidade humana na comunidade vizinha, foram utilizadas as normas AS 2187 e BS 64722-2, e considerado um PPV limite de 2 mm/s. Aplicando a

Equação (3), e tomando como referência a distância entre a zona norte da cava final e o bangalô 12, será possível usar um máximo de 170 kg por retardo, como pode ser visto na

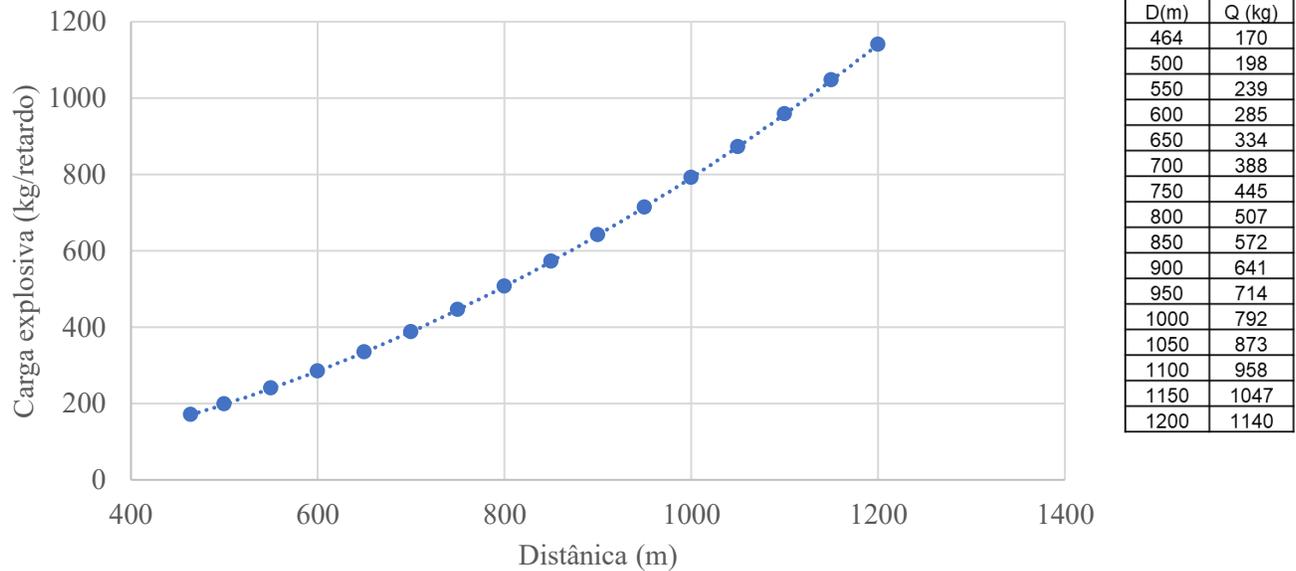


Figura 14. Carga máxima por espera admissível para evitar incomodidade humana na comunidade vizinha a Mina.

6 Conclusões

Com cargas explosivas detonadas, durante os anos 2020, 2021, 2022 e 2023, na cava da Mina e a uma distância maior da 1000 m dos bangalôs localizadas na comunidade vizinha, ter-se-ia gerado PPV_1 máximos de 2,1 mm/s a 3,1 mm/s, que correspondem à detonação de 828 kg a 1600 kg por espera, respectivamente, somente em 7 eventos, sendo ligeiramente maior a 3 mm/s só um único evento.

Para evitar a incomodidade humana, quando atingirem a cava final na futura lavra da Mina, é recomendável uma carga máxima de 170 kg por retardo.

A conclusão do parágrafo anterior, permite afirmar que os desmontes realizados de 2020 a 2023, não foram causantes dos danos existentes no bangalô B11 nem geraram incomodidade humana.

Para evitar os riscos de possíveis danos estruturais nos bangalôs e nas outras estruturas, quando atingirem a cava final na futura lavra da Mina, é recomendável o uso de uma carga máxima de 334 kg por retardo.

Foi constatado que não existe impacto à comunidade por causa da pressão acústica, devido a que o valor máximo atingiria 112 dB sendo o valor admissível de 134 dB.

7 Referências

- [1] Zorzal, C. B., F. L. dos Santos, J. M. da . Silva, and R. de F. . Souza. "Prediction of Blast-Induced Ground Vibration Using Artificial Neural Networks". Research, Society and Development, vol. 11. Sept. 2022.
- [2] Faramarzi, F., Farsangi, M. A. E., Mansouri, H. Simultaneous investigation of blast induced ground vibration and air blast effects on safety level of structures and human in surface blasting. International Journal of Mining Science and Technology, Volume 24, Issue 5. 2014.
- [3] Navarro Torres V.F., Silveira L.G.C., Lopes P.F.T., De Lima H.M. Assessing and controlling of bench blasting-induced vibrations to minimize impacts to a neighboring community. Elsevier - Journal of Cleaner Production. v.187 p.514-524, 2018.
- [4] Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR 9653: Guia para avaliação dos efeitos provocados pelo uso de explosivos nas minerações em áreas urbanas – Procedimento. 2018.
- [5] Siskind D.E., Stagg M.S., Kopp J.W. and Dowding C.H. Structure Response and Damage Produced by Ground Vibrations from Surface Blasting, RI 8507. U.S. Bureau of Mines, 1980. Washington, D.C.
- [6] DEUTSCHE NORM (DIN 4150). Structural vibration in buildings - effects on structures. 1986.
- [7] Australian Standard AS 2187.2:2006, Explosives – Storage and use, Part 2 – Use of explosives (AS 2187 Part 2).
- [8] ESTEVES, J.M. Project for updating the portuguese standard NP2074 (1983): Assessment of the influence of vibrations caused on buildings due to blasting or similar forces. 1994. EXPLOSIVES 94 - CONFERENCE PROCEEDINGS - University of Leeds, U.K. - The Institute of Explosives Engineers. The European Federation of Explosives Engineers & The University of Leeds Department of Mining & Mineral Engineering. p. 27-30.
- [9] BS-6472 - 1992. Guide to evaluation of human exposure to vibration in buildings (1Hz to 80Hz). British Standard

Artículo recibido en: 29.04.2024

Artículo aceptado: 20.05.2024