



Análise de Vibrações Provenientes de Desmontes Mecânicos, Operações das Usinas de Beneficiamento e Dutos de Transporte em uma Mina de Ferro

Felipe Jesus

Geofísico, Tetra Tech, Belo Horizonte - MG, Brasil, felipe.jesus@tetrattech.com

Victor Salles

Geofísico, Tetra Tech, Belo Horizonte - MG, Brasil, victor.salles@tetrattech.com

Milena Matos

Geofísica, Vale S.A., Nova Lima - MG, Brasil, milena.matos@vale.com

Daniel Coelho

Geofísico, Tetra Tech, Belo Horizonte - MG, Brasil, daniel.coelho@tetrattech.com

Luciano Assis

Engenheiro Geólogo, Vale S.A., Nova Lima - MG, Brasil, luciano.assis@vale.com

RESUMO: A caracterização das diversas fontes de vibrações presentes no ambiente minerário é uma crescente demanda, desde as recentes rupturas de barragens de mineração nos últimos anos. Essas vibrações induzidas estão associadas, principalmente, às operações rotineiras do processo de extração, beneficiamento e transporte de minérios. A metodologia usual visa gerar curvas de atenuações através da disposição de um arranjo linear de sismógrafos de engenharia partindo da fonte de vibrações, possibilitando analisar o comportamento da amplitude de vibração com o aumento da distância até a fonte. No entanto, essa metodologia é ineficiente quando consideramos os casos em que as fontes de vibração são dispersas, a exemplo de uma usina de beneficiamento de minério. Tendo em vista esse cenário, o presente estudo tem como objetivo analisar as vibrações geradas por diversas fontes associadas aos desmontes mecânicos, às operações das usinas de beneficiamento e aos dutos de transporte de água e rejeitos em uma Mina de Ferro. Adicionalmente, os resultados obtidos foram utilizados para avaliar se a retomada desse conjunto de operações tem potencial para ocasionar um aumento de vibrações nas estruturas geotécnicas da região.

PALAVRAS-CHAVE: Vibrações Induzidas, Mineração, Sismografia de Engenharia

ABSTRACT: After the recent dam failures in Brazil, there is a growing demand on studying the different vibration sources within a mining environment. The induced vibrations are mainly associated with the routine operations including ore extraction, its beneficiation and transport process. Well known methodologies to evaluate vibration are focused on engineering seismographs arrays to generate attenuation curves and analyze the vibration amplitudes as the distance to the source increases. However, this approach is inefficient when the vibration sources are dispersed such as in an ore beneficiation plant. The present study aims to evaluate the vibrations generated by different sources operating at the same time in a mining environment, such as rock breaking nonexplosive methods, the ore beneficiation, and water/tailings transport process. The results were also used to assess whether this set of operations increases the vibrations in nearby geotechnical structures.

KEYWORDS: Induced Vibrations, Mining, Seismography Engineering

1 Introdução

Em 2019, após o rompimento da barragem B1 na Mina de Córrego do Feijão, algumas minas tiveram suas operações de produção interditadas pela Agência Nacional de Mineração em função da condição de conservação e monitoramento das barragens de disposição de rejeito, uma vez que estruturas mais susceptíveis ao fenômeno de liquefação poderiam ser impactadas pela geração de vibração inerente aos processos de extração, beneficiamento e transporte dos minérios.



Desde então, as mineradoras vêm investindo no monitoramento, inspeção e caracterização das estruturas geotécnicas afim de melhorar a condição de estabilidade, bem como iniciar o processo de descaracterização de estruturas a montante com segurança, como preconiza a legislação vigente. Nesse contexto, em prol do retorno das atividades minerárias, com segurança, vários estudos vêm sendo desenvolvidos com o objetivo de caracterizar as diversas fontes de vibrações inerentes às operações, incluindo campanhas recentes de aquisição de dados utilizando sismógrafos de engenharia para o monitoramento de: desmontes, operações ferroviárias, tráfego de veículos e máquinas pesadas, atividades de sondagens, usinas de processamento, entre outros.

2 Objetivos

O estudo desenvolvido teve como objetivo caracterizar as fontes de vibração associadas ao funcionamento das usinas de beneficiamento, dutos de transporte de água e rejeitos, e o processo de desmonte mecânico em uma cava de minério de ferro. Em complemento, o objetivo secundário dessa caracterização, visa avaliar se o conjunto de operações acarreta incremento aos patamares de vibrações considerando as distâncias entre as fontes sísmicas e as estruturas geotécnicas.

3 Metodologia

3.1 Base de dados

Neste trabalho, devido à necessidade de se analisar as vibrações geradas a partir da retomada de operação de três macro atividades do contexto minerário: operação das usinas de beneficiamento, desmonte mecânico de frentes de lavra e transporte de água e rejeito em dutos, realizadas em regiões distintas, foram utilizados registros de sensores instalados em três arranjos, conforme apresenta a Figura 1.

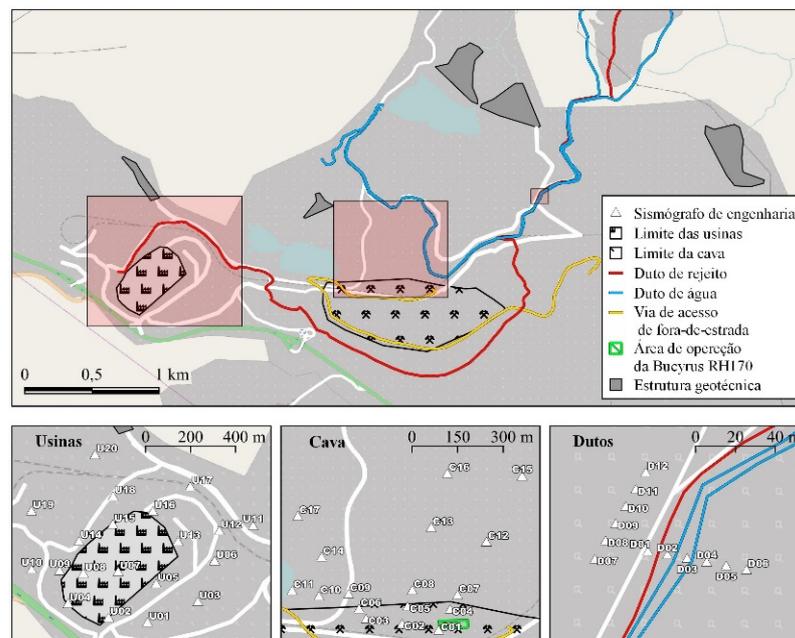


Figura 1. Arranjos de sismógrafos de engenharia instalados nas três regiões de interesse desse estudo.

Os sismógrafos de engenharia utilizados neste trabalho correspondem a equipamentos do modelo Vibracord FX, da fabricante Vibraquipo, calibrados a menos de 1 ano e instalados seguindo as diretrizes da norma brasileira NBR 9653 (ABNT, 2018).

A base de dados total disponibilizada para o estudo compreendeu registros de janelas de histogramas, com duração de 1 segundo cada, do monitoramento realizado durante os testes de retomada de operação das atividades minerárias, com duração total de 7 semanas e contemplando 49 pontos de instalação de sismógrafos



de engenharia. Entretanto, para fins de análise a apresentação dos principais resultados de estudo, foram selecionadas janelas menores, com duração variável de algumas horas, mas que contemplam e sintetizam as assinaturas de vibração dos cenários de interesse apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Cenários de interesse para análise de vibração desse estudo.

Cenário de interesse	Região de estudo
Nível de vibração de referência sem operação (<i>background</i>)	Todas
Operação do britador primário	Usinas
Operação das usinas de beneficiamento	Usinas
Desmonte mecânico realizado e carregamento de caminhões por escavadeira hidráulica	Cava
Bombeamento de rejeito/água via dutos	Dutos

Ressalta-se que as operações foram analisadas separadamente, com coleta de dados conforme os arranjos propostos, mas o sequenciamento das operações ocorreu de forma incremental, ou seja, as operações se iniciaram nas usinas seguindo uma sequência de fases até a disposição de rejeito na barragem, através dos dutos de transporte, e por fim o desmonte mecânico na cava.

Em função da natureza espacialmente dispersa e transiente das diversas fontes que são objeto de análise deste estudo, considera-se que não há uma direção preferencial para apontar o eixo longitudinal dos sismógrafos de engenharia para as fontes de vibrações. Neste caso, o principal dado utilizado ao longo das análises foram os registros de *Peak Vector Sum* (PVS), correspondente à soma vetorial dos valores de velocidade de partícula registrados pelos três eixos de medido do sensor, que independe da direção fonte-receptor.

3.2 Etapas de processamento dos dados

A Figura 2 apresenta um fluxograma que sintetiza as principais etapas de processamento dos dados para geração dos produtos discutidos neste estudo.

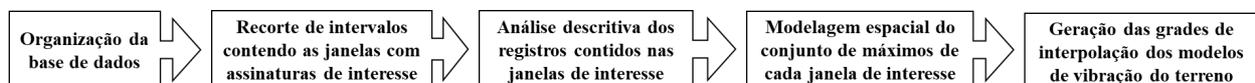


Figura 2. Fluxograma das principais etapas de processamento realizadas neste estudo.

A manipulação dos dados de vibração foi realizada por meio de um algoritmo desenvolvido com base nos trabalhos de Beyreuther et al. (2010), Megies et al. (2011) e Krischer et al. (2015). Já modelagem espacial e interpolação das observações dos fenômenos de interesse, relacionados à propagação de vibração em superfície, foram realizadas com base nos trabalhos de Esposito e Iervolino (2011) e Wang e Du (2013), optando-se pelo uso da técnica de Krigagem Ordinária que, segundo Kiš (2016), corresponde ao método mais eficiente para o caso de conjunto de dados com disponibilidade baixa de pontos (entre 15 e 20).

4 Resultados

4.1 Assinaturas de Vibração Características das Operações da Mina

Neste subitem são apresentados os registros de vibração, em termos de PVS, característicos de cada cenário analisado no contexto deste estudo (apresentados na Tabela 1). As diferentes assinaturas de vibração registradas são apresentadas a seguir e separadas de acordo com a região de interesse.

4.1.1 Região das Usinas

A Figura 3 apresenta os dados registrados pelos sismógrafos de engenharia durante a retomada de operação das usinas de beneficiamento, em termos de PVS, com destaque para os intervalos utilizados nas análises deste estudo: *background* da área (sem operação), retomada de operação do britador primário e usinas operando de forma simultânea.



Na Figura 3, observa-se o contraste entre os registros de vibração dos cenários com operação e sem operação (*background*). Na janela destacada em vermelho, notam-se picos da ordem de 5,00 mm/s nos registros do sensor U05, o mais próximo do britador primário. Já na janela azul, referente ao intervalo de operação das usinas, nota-se um aumento constante na amplitude das vibrações, mais evidente nos sensores U10 e U15, para um patamar de aproximadamente 0,50 mm/s. Adicionalmente, no intervalo azul, também se nota um pico de vibração no sensor U05 com amplitude da ordem de 2,00 mm/s.

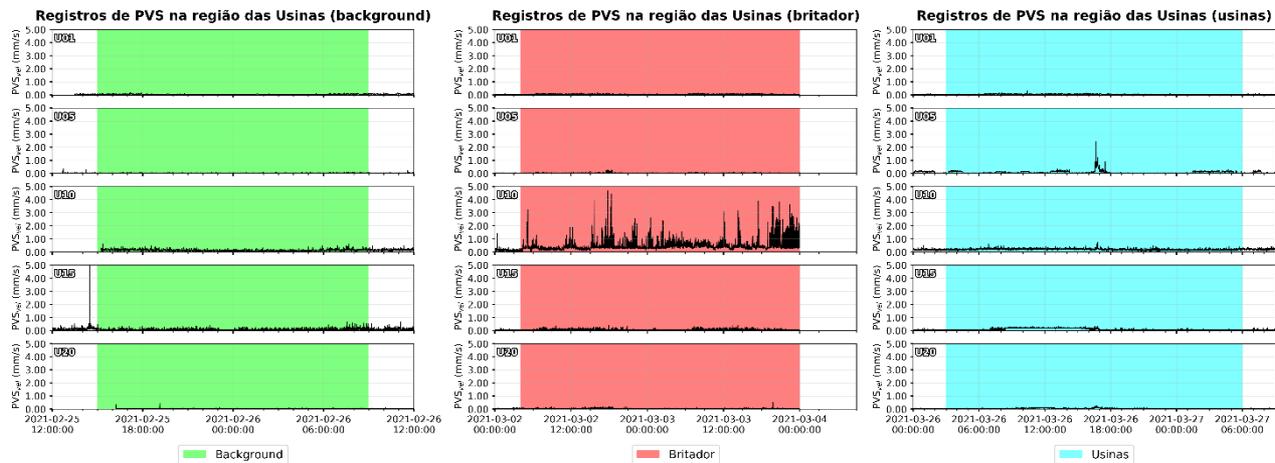


Figura 3. Registro de PVS de velocidade das janelas de interesse da região das Usinas.

4.1.2 Região da Cava

A Figura 4 apresenta os dados registrados pelos sismógrafos de engenharia durante a retomada de operação de desmonte mecânico da frente de lavra, em termos de PVS, realizado pela escavadeira hidráulica Bucyrus RH170, com apoio de caminhões fora-de-estrada CAT785 no transporte de materiais desmontados, destacando os intervalos utilizados nas análises deste estudo: *background* da área (sem operação) e escavadeira operando na área.

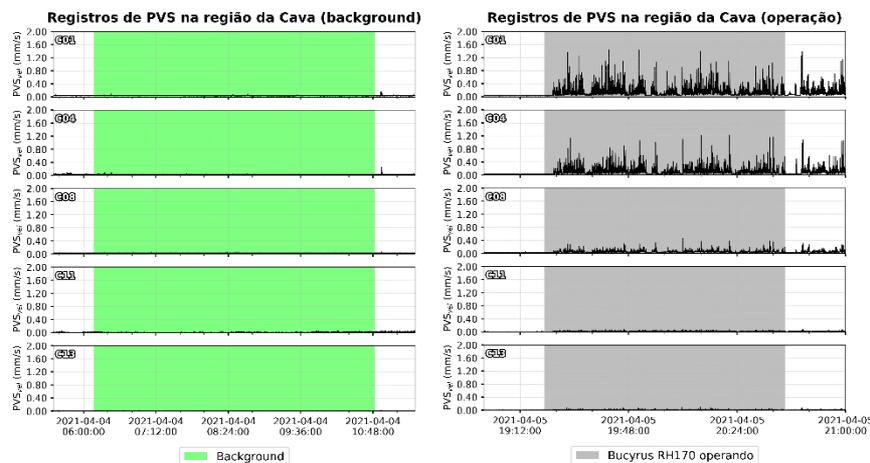


Figura 4. Registro de PVS de velocidade das janelas de interesse da região da Cava.

Na Figura 4, também se observa o contraste entre os registros de vibração dos cenários com operação e sem operação (*background*). Na janela destacada em cinza, notam-se picos da ordem de 1,60 mm/s nos registros dos sensores C01 e C04, mais próximos do local de atividade da escavadeira hidráulica. Adicionalmente, observa-se similaridade nas assinaturas sismográficas dos registros apresentados, com diferenças apenas de amplitude de PVS, em função do aumento da distância fonte-receptor.



4.1.3 Região dos Dutos

A Figura 5 apresenta os dados registrados pelos sismógrafos de engenharia durante a retomada de operação dos dutos de rejeito, em termos de PVS, com destaque para os intervalos utilizados nas análises deste estudo: dutos paralisados e dutos em operação.

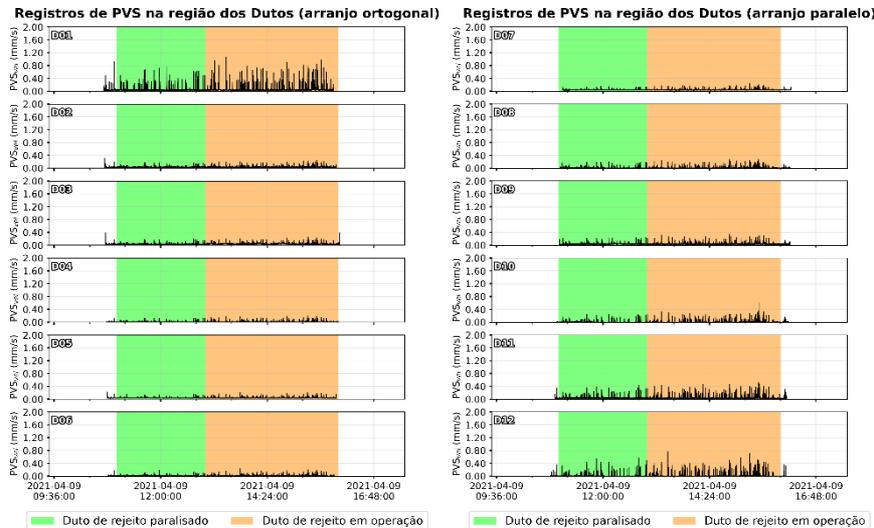


Figura 5. Registro de PVS de velocidade das janelas de interesse da região dos Dutos.

Na Figura 5, diferente do que se observou nos demais casos, não se observa o contraste entre os registros de vibração dos cenários com operação (intervalo destacado em amarelo) e sem operação (intervalo destacado em verde). Neste caso, os picos de vibração observados em ambos os perfis, são consequência do tráfego de veículos no acesso próximo ao arranjo. Ao verificar o mapa da Figura 1, nota-se a concordância entre a variação de amplitude dos registros dos sensores e a distância em relação à pista.

4.2 Análise da Vibração de *Background* das Regiões do Estudo

A Figura 6 apresenta os diagramas de caixa dos registros de vibração registradas de cada um dos sensores utilizados neste estudo, dentro das janelas de análise de registro de *background* apresentadas no subitem anterior.

Na Figura 6, nota-se que nas regiões da Cava e dos Dutos nenhum máximo dos diagramas de caixa ultrapassou 0,10 mm/s. Já na região das Usinas, observa-se que a maioria dos máximos dos diagramas permanece entre 0,10 e 0,20 mm/s, com exceção do diagrama do sensor U10 (mais próximo do britador primário) com máximo na ordem de 0,30 mm/s. Essa variação nos níveis de vibração de fundo das janelas analisadas nas diferentes regiões, possivelmente, é consequência das atividades que ocorrem regularmente dentro da área de mina. Por exemplo, o maior número de acessos na região das Usinas implica na maior quantidade de trânsito de veículos e pessoas, o que pode ser um fator de impacto no aumento do nível de vibração de fundo da região.

Adicionalmente, na Figura 6, notam-se dois agrupamentos dos diagramas que apresentam valores de medianas distintos. O primeiro grupo apresenta valores da ordem de 0,05 mm/s, enquanto o segundo grupo apresenta valores da ordem de 0,005 mm/s, o que corresponde a uma ordem de grandeza abaixo. Neste caso, em função das baixas amplitudes de vibrações, entende-se que as diferenças observadas estão associadas às diferentes sensibilidades dos sensores utilizados.

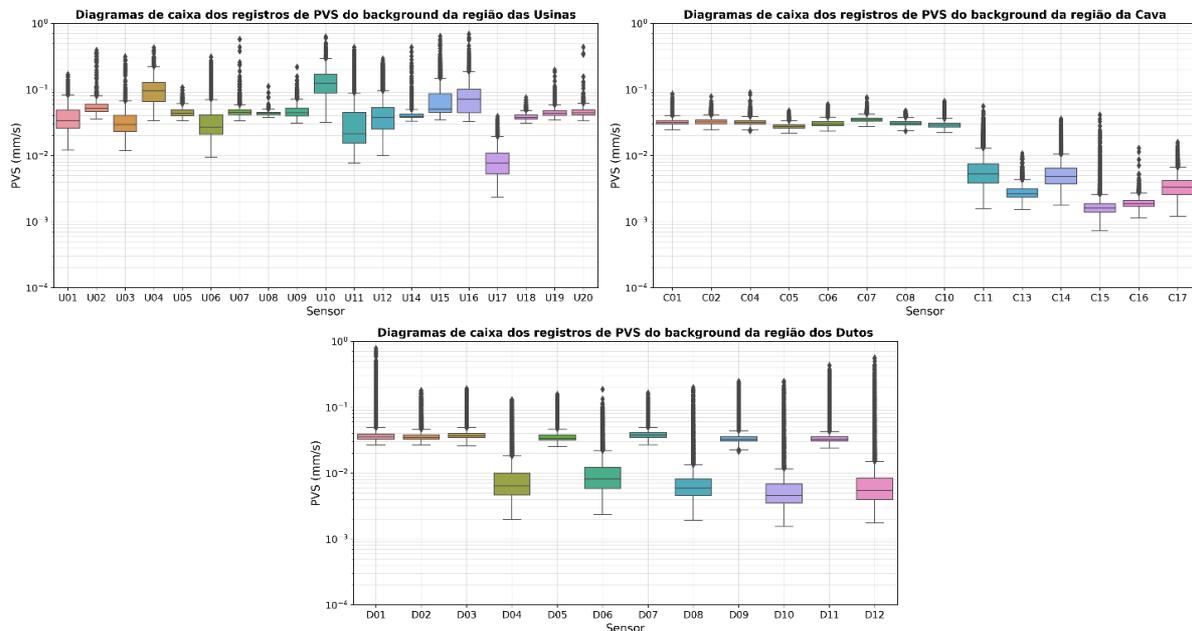


Figura 6. Diagramas de caixa dos registros adquiridos ao longo das janelas sem atividades (*background*) nas três regiões de interesse.

4.3 Modelos de Vibração do Terreno

Os modelos de vibração do terreno foram gerados a partir da interpolação das maiores amplitudes de vibração correlacionáveis registrados dentro das janelas de análise com assinaturas de vibração de interesse. Para o cálculo dos semi-variogramas experimentais, adotou-se o conjunto de medidas com distribuição mais simétrica, após a comparação com as respectivas transformações em logaritmo, e a distância média observada entre os pontos amostrais. Para a modelagem de semi-variograma optou-se pelo modelo de melhor ajuste, após a comparação entre o ajuste dos modelos: esférico, exponencial, gaussiano, cúbico, estável e matern. Para a região dos Dutos, em função da falta de contraste, não foram gerados modelos de vibração do terreno.

A Figura 7 apresenta os mapas com as interpolações dos valores de PVS registrados na região das Usinas, referentes às janelas de registros do *background* da área (modelo estável), funcionamento do britador primário (modelo exponencial) e funcionamento das usinas beneficiamento (modelo cúbico).

Na Figura 7, assim como discutido no subitem anterior, as vibrações de *background* na região das Usinas apresentam, em geral, amplitudes de PVS da ordem de 0,10 a 0,30 mm/s. Para o cenário com operação do britador primário, observa-se a presença de uma mancha avermelhada com amplitudes de PVS superiores a 1 mm/s, entretanto, verifica-se que o aumento de amplitude é concentrado apenas na região do sensor U10 e a partir de, aproximadamente, 160 m de distância do britador as vibrações estimadas são da ordem de 0,25 mm/s, ou seja, compatíveis com o nível de vibração do *background* da região. Já no cenário de operação das usinas de beneficiamento, nota-se uma anomalia em formato de pluma, que se estende em direção aos prédios dentro do perímetro da usina, com amplitude de PVS da ordem de 0,50 mm/s e, assim como observado para o britador, que decaem para valores da ordem de 0,25 mm/s em distâncias similares.

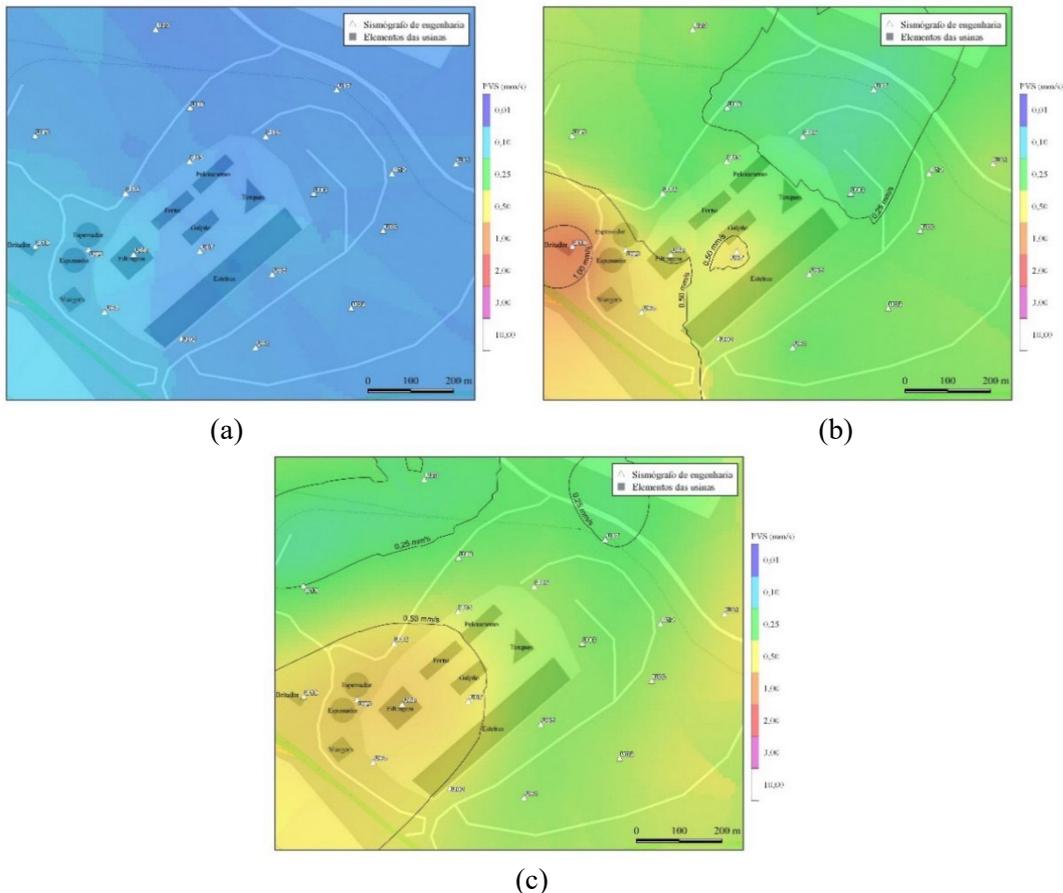


Figura 7. Modelo de interpolação dos registros de máximo PVS na região das Usinas contidos nas janelas de interesse do a) *background*, b) operação do britador primário e c) operação das usinas de beneficiamento.

A Figura 8 apresenta os mapas com as interpolações dos valores de PVS registrados na região da Cava, referentes às janelas de registros do *background* da área (modelo estável) e operação de desmonte mecânico realizada pela escavadeira Bucyrus RH170 (modelo cúbico).

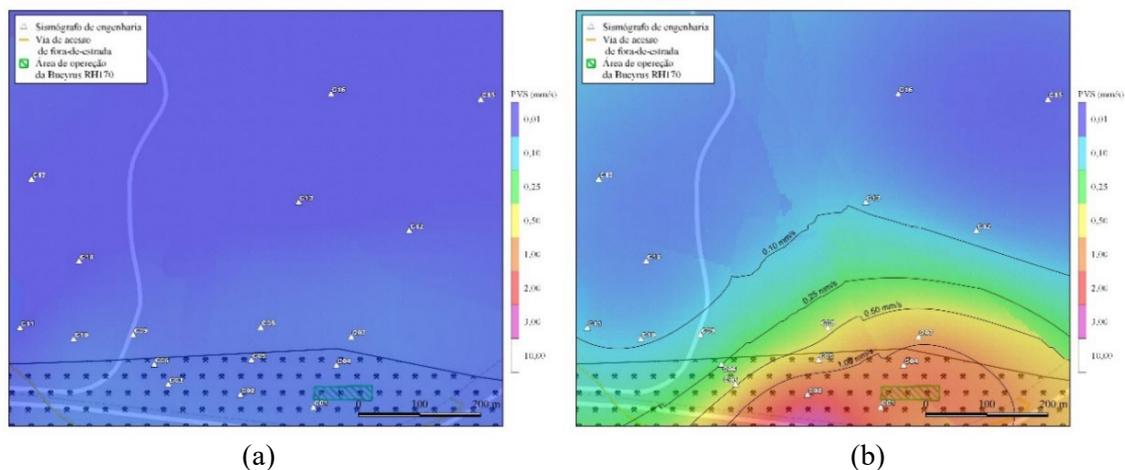


Figura 8. Modelo de interpolação dos registros de máximo PVS na região da Cava contidos nas janelas de interesse do a) *background* e b) operação de desmonte mecânico realizada pela Bucyrus RH170.

Na Figura 8, as vibrações de *background* na região da Cava apresentam, em geral, amplitudes de PVS da ordem de 0,10 mm/s ou inferiores. Para o cenário com desmonte mecânico e carregamento de caminhões a partir da operação da Bucyrus RH170, observa-se a presença de uma mancha avermelhada com amplitudes de



PVS superiores a 1 mm/s, coerentes com a área de operação da escavadeira e a partir de, aproximadamente, 250 m de distância da área de operação as vibrações estimadas são da ordem de 0,10 mm/s, ou seja, compatíveis com o nível de vibração do *background* da região.

5 Considerações finais

A vibração de fundo das três regiões contempladas pelo estudo, antes da retomada das respectivas atividades, foi da ordem de 0,10 mm/s em termos de PVS de velocidade.

Com relação ao funcionamento dos dutos de transporte de água e rejeitos, não se observou variações significativas na comparação entre as janelas de correlação temporal de intervalos com e sem operação. Os picos registrados dentro das janelas analisadas não apresentaram um padrão correlacionável com a operação ininterrupta da fonte de vibração alvo do estudo. Possivelmente, conforme destacou-se na análise dos resultados, os picos de vibração com amplitudes de PVS de velocidade acima de 0,20 mm/s ocorreram em função do tráfego de veículos nos acessos próximos aos pontos de medida.

Nos registros de vibração relacionados à operação das usinas, o britador primário em funcionamento gerou as maiores amplitudes de vibrações, com medidas de PVS de velocidade superiores a 1,00 mm/s nos sensores mais próximos. Entretanto, verificou-se no modelo de vibração do terreno, obtido através da interpolação das medidas de vibração, que a partir de distâncias da ordem de 160 m essas altas amplitude atenuaram-se para valores da ordem de 0,25 mm/s, medida compatível com a vibração de fundo registrada na região do estudo.

Já com relação aos registros de vibração associado à operação de desmonte mecânico, realizado na região da cava, os sensores mais próximos da escavadeira Bucyrus RH170 também apresentaram registros de PVS de velocidade com amplitudes superiores a 1,00 mm/s. Neste caso, observou-se no modelo de vibração do terreno, também gerado a partir da interpolação do conjunto de medidas de vibração, que a atenuação da amplitude de vibração para valores da ordem, ou abaixo, de 0,10 mm/s ocorreu a partir de distâncias superiores a 250 m. Adicionalmente, não foram identificados registros de vibração que pudessem ser diretamente relacionados ao tráfego de caminhões fora-de-estrada na região.

Portanto, a partir dos pontos citados, e considerando as relações de distância fontes-estruturas, entende-se que as operações analisadas não geram vibrações com amplitudes de PVS acima de 0,25 mm/s nas estruturas geotécnicas mais próximas, tendo em vista que as mesmas se encontram a distâncias superiores à 250 metros.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT (2018). NBR 9653:2018. *Guia para avaliação dos efeitos provocados pelo uso de explosivos nas minerações em áreas urbanas*. Rio de Janeiro.
- BEYREUTHER, M.; BARSCH, R.; KRISCHER, L.; MEGIES, T.; BEHR, Y.; WASSERMANN, J. Obspy: A python toolbox for seismology. *Seismological Research Letters*, Seismological Society of America, v. 81, n. 3, p. 530–533, 2010.
- ESPOSITO, S.; IERVOLINO, I. (2011) PGA and PGV spatial correlation models based on European multievent datasets. *Bulletin of the Seismological Society of America*, *Seismological Society of America*, v. 101, n. 5, p. 2532–2541.
- Kiš, I. M. (2016) Comparison of Ordinary and Universal Kriging interpolation techniques on a depth variable (a case of linear spatial trend), case study of the Šandrovac Field. *Rudarsko-geološko-naftni zbornik*, v. 31, n. 2, p. 41–58.
- Krischer, L.; Megies, T.; Barsch, R.; Beyreuther, M.; Lecocq, T.; Caudron, C.; Wassermann, J. (2015) Obspy: A bridge for seismology into the scientific Python ecosystem. *Computational Science & Discovery*, *IOP Publishing*, v. 8, n. 1, p. 014003.
- Megies, T.; Beyreuther, M.; Barsch, R.; Krischer, L.; Wassermann, J. (2011) Obspy—what can it do for data centers and observatories? *Annals of Geophysics*, v. 54, n. 1, p. 47–58.