

# Caracterização de Vibrações Provenientes do Tráfego de Equipamentos sobre uma Barragem de Rejeito: Impactos na Retomada Operacional de uma Mina de Ferro

Virginie Queiroz

MSc Engenharia Geotécnica, Vale S.A., Nova Lima - MG, Brasil, virginie.queiroz@vale.com

Milena Matos

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

Felipe Jesus

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

Elias Sousa

Engenheiro Ambiental, Vale S.A., Nova Lima - MG, Brasil, elias.sousa@vale.com

Daniel Raposo

Geólogo, Vale S.A., Nova Lima - MG, Brasil, daniel.raposo@vale.com

**RESUMO:** Desde as recentes rupturas de barragens de rejeito nos últimos anos, vinculadas ao processo de liquefação, a caracterização de vibrações inerentes aos processos de logística e produção de minério se tornaram mandatórias, visto que vibrações induzidas e naturais são um possível gatilho para este modo de falha. A metodologia usual deriva de estudos difundidos na análise de vibrações induzidas por desmontes, no qual são geradas curvas de atenuações das vibrações através da disposição de um arranjo linear de sismógrafos de engenharia partindo da fonte de vibrações, viabilizando analisar o comportamento da amplitude de vibração com o aumento da distância até a fonte. Sendo assim, o presente estudo visa analisar as vibrações produzidas por diversos equipamentos e veículos utilizados no contexto operacional de uma Mina de Ferro e, frente aos resultados obtidos, analisar se a retomada operacional do tráfego desses equipamentos sobre uma barragem de rejeito pode gerar um incremento de vibrações prejudicial à condição geotécnica dessa estrutura.

**PALAVRAS-CHAVE:** vibrações, liquefação, sismógrafos de engenharia, barragens, caracterização geológico-geotécnica.

**ABSTRACT:** Considering recent tailings dam failures, which were associated with the liquefaction process, it has become imperative to characterize the vibrations inherent in logistics and ore production processes. This is because both induced and natural vibrations could potentially trigger these failure modes. The commonly used methodology stems from extensive studies on vibration analysis induced by blasting. In this method, vibration attenuation curves are generated through a linear arrangement of engineering seismographs, starting from the source of vibrations. This allows for the analysis of the behavior of the vibration amplitude as the distance from the source increases. In this context, the present study aims to analyze the vibrations produced by various equipment and vehicles used in the operational context of an Iron Mine. Based on the results obtained, the study will examine whether the resumption of these equipment's operation over a tailings dam could lead to an increase in vibrations that could be detrimental to the geotechnical condition of the structure.

**KEYWORDS:** vibrations, liquefaction, engineering seismographs, dams, geological-geotechnical characterization.

## 1 INTRODUÇÃO

O ano de 2019 foi marcado pelo rompimento da barragem B1, na Mina de Corrêgo do Feijão, que foi construída pelo método à montante, o que refletiu em uma mudança considerável na gestão e fiscalização das estruturas geotécnicas, especialmente barragens de rejeito. Em seguida ao rompimento, a Agência Nacional de Mineração (ANM) interditou a operação de algumas minas em função da similaridade do método construtivo (alteamento a montante), cuja susceptibilidade à ruptura pelo modo de falha liquefação poderia ser engatilhada pela geração de vibrações inerentes aos processos de operação do ambiente minerário.

Sendo assim, houve um grande investimento por parte das mineradoras em novas tecnologias de monitoramento, projetos, campanhas de investigação geológico-geotécnica e modelagens numéricas, com objetivo de melhorar o entendimento da performance das barragens, bem como acurar os parâmetros que condicionam as análises de estabilidade para determinação dos fatores de segurança que enquadram as estruturas em níveis de emergência, segundo os critérios definidos pelas legislações vigentes.

Nesse contexto, e impulso oriundo das requisições técnicas dos órgãos regulamentadores e fiscalizadores, foi iniciada uma extensa campanha de caracterização das vibrações induzidas no ambiente minerário, visando embasar tecnicamente a retomada progressiva das atividades operacionais de uma mina, a exemplo do tráfego de equipamentos de grande porte próximos à essas estruturas geotécnicas.

## 2 CONTEXTUALIZAÇÃO

A estrutura geotécnica, objeto desse trabalho, trata-se de uma barragem cujo maciço foi formado acima do limite da cava que faz parte de seu reservatório. Essa estrutura era uma Cava que, após exaurida, foi preenchida com rejeito para atender as necessidades de disposição da Mina. No entanto, ao longo do tempo, foram construídos aterros à jusante da parede leste da cava, o que posteriormente acabou sendo configurado como o maciço da barragem, uma vez que o aterro ultrapassou o bordo da cava. Além disso, durante a operação houve o avanço do acesso operacional da mina para dentro da cava, acima do rejeito. Esta plataforma de acesso foi posicionada em cota superior ao aterro da barragem, sendo, portanto, responsável pelo controle do trânsito de cheias do reservatório. Portanto, apesar de o aterro destinado ao acesso ser constituído de solo e não ser condicionante da estabilidade da estrutura, este trecho é utilizado para controle de cheias, configurando a barragem como uma estrutura alteada a montante, pelos critérios da legislação vigente.

Essas duas características, método construtivo e ser um acesso imprescindível na logística de operação da Mina, fizeram com que essa estrutura fosse objeto de diversos estudos de vibrações desde 2020, afim de subsidiar a retomada operacional do tráfego de veículos e equipamentos no acesso sobre a crista. Os estudos realizados visaram caracterizar uma gama de equipamentos utilizados rotineiramente na logística de produção, beneficiamento e escoamento de uma Mina de Ferro. A linha do tempo apresentada na Figura 1 evidencia os marcos temporais dos estudos de vibrações na barragem Área IX e seus reflexos em termos da retomada operacional do site.

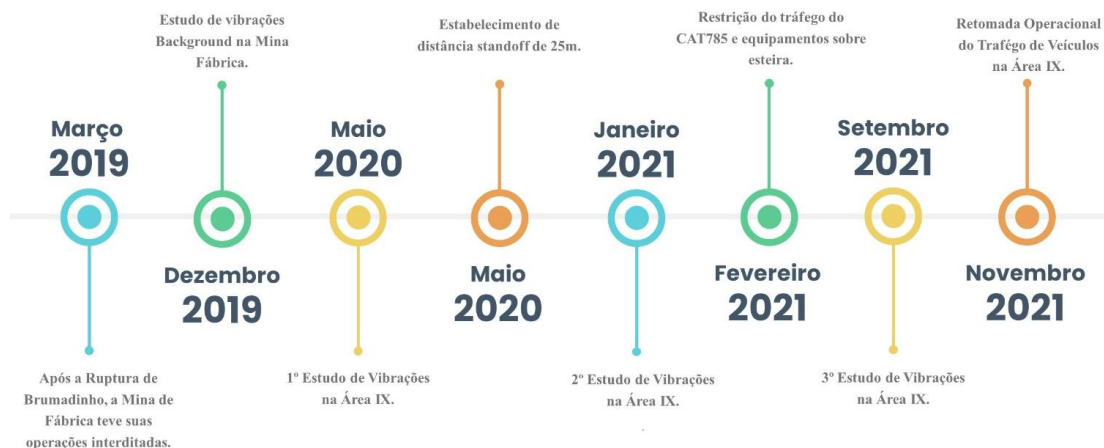


Figura 1. Linha do tempo dos estudos de vibrações realizados na Área IX e seus reflexos em prol da retomada operacional do site (Fonte: autor).

### 3 CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICA

A área de estudo localiza-se na porção sudoeste do Quadrilátero Ferrífero, região ao sul do Cráton São Francisco. O Quadrilátero Ferrífero possui o embasamento composto por rochas granito-gnáissicas do Arqueano. Sobre estas ocorre o *greenstone belt* Rio das Velhas (também Arqueano), seguido pela sequência metassedimentar do Supergrupo Minas (Sideriano) e Supergrupo Estrada Real (Riaciano). Regionalmente, na área do empreendimento afloram rochas dos Grupos Itabira e Piracicaba (Sg. Minas), do Grupo Sabará (Sg. Estrada Real), além de unidades Cenozóicas.

A Figura 2 apresenta o mapa geológico-geotécnico da barragem e uma imagem aérea da estrutura, possibilitando entender a conformação da barragem, com o aterro a jusante recoberto por grama e a montante da bacia a área de disposição de rejeito. As porções compostas por materiais *in situ*, dispostas nos entornos da estrutura, estão demarcadas pela presença de vegetação. Os materiais geológicos identificados na área foram separados em cinco unidades distintas, da base para o topo, a saber: itabirito compacto, semi-compacto e friável, da Formação Cauê, filito da Formação Saramenha e coberturas terciárias constituídas de representantes da Formação Cata Preta. Além desta, há coberturas recentes compostas por solos residuais e colúvios laterizados ou não laterizados, além de materiais antropomórficos de rejeito e aterros

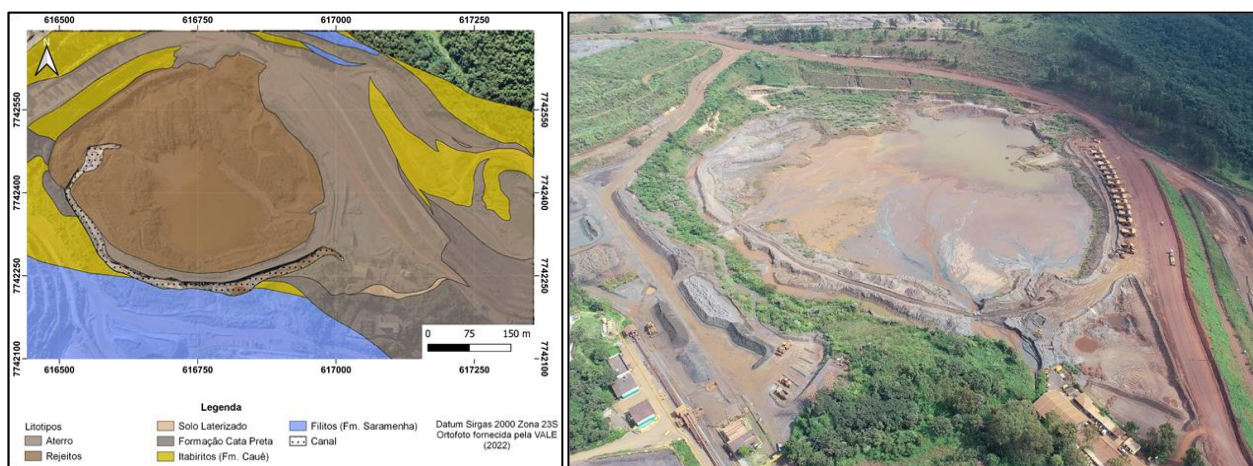


Figura 2. a) Mapa geológico-geotécnico local - agosto, 2022; b) vista geral da barragem – junho 2019 (Fonte: documento interno VALE).

Foram realizadas diversas campanhas de investigações geológico-geotécnicas de campo e laboratório, com foco na caracterização das unidades antropomórficas e de fundação da barragem e na definição dos parâmetros geotécnicos dos materiais que compõe a estrutura. Também foram feitas sobreposições de levantamentos topográficos e análise de imagens de satélite. Por fim, foram conduzidas campanhas de investigação geofísica na região pelos métodos de eletrorresistividade e de potencial espontâneo (SP).

Os ensaios de campo compreenderam sondagens rotativas, à percussão, poços de investigação com coleta de amostras indeformadas e ensaios CPTu no rejeito. Identificou-se que o principal componente da fundação é o itabirito friável da Formação Cauê, da base para o topo são seguidos por brechas e colúvios/diamictitos da Formação Cata Preta. Há porções com presença de filito da Formação Saramenha e o maciço da barragem é composto por aterros de fontes diversas.

A Figura 3, apresenta a interpretação da seção geológico-geotécnica central da estrutura, destacado em vermelho está a região principal de locação estudos sismográficos apresentados neste trabalho. Na sequência a Figura 4 apresenta a análise de estabilidade da seção central, bem como os parâmetros geotécnicos utilizados. Cabe ressaltar que os parâmetros de resistência adotados para o rejeito, foram baseados nos ensaios triaxiais CIU realizados, além da compilação dos ensaios de CPTu executados no reservatório.

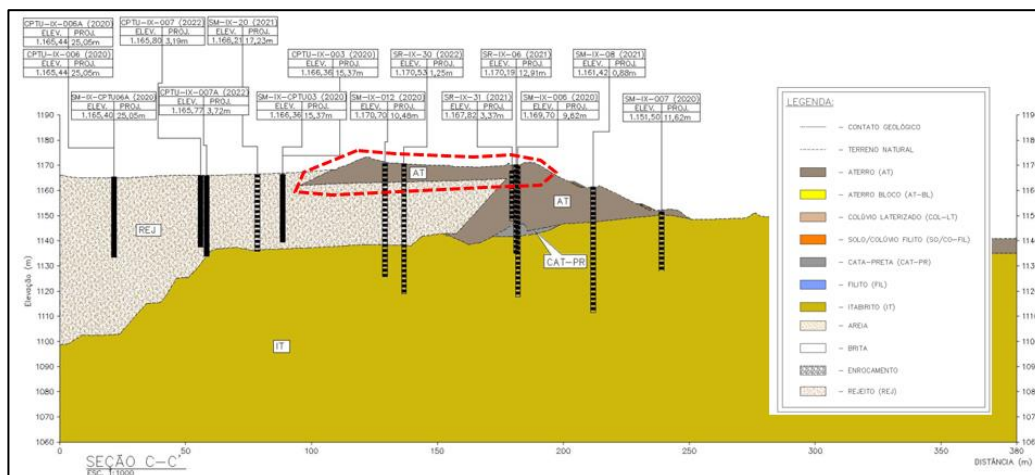


Figura 3. Seção geológico-geotécnica central. Na base há itabiritos, na porção central há sobreposição de aterro e rejeitos a montante. Na base do aterro ocorre delgada lente de formação Cata Preta (Fonte: documento interno VALE).

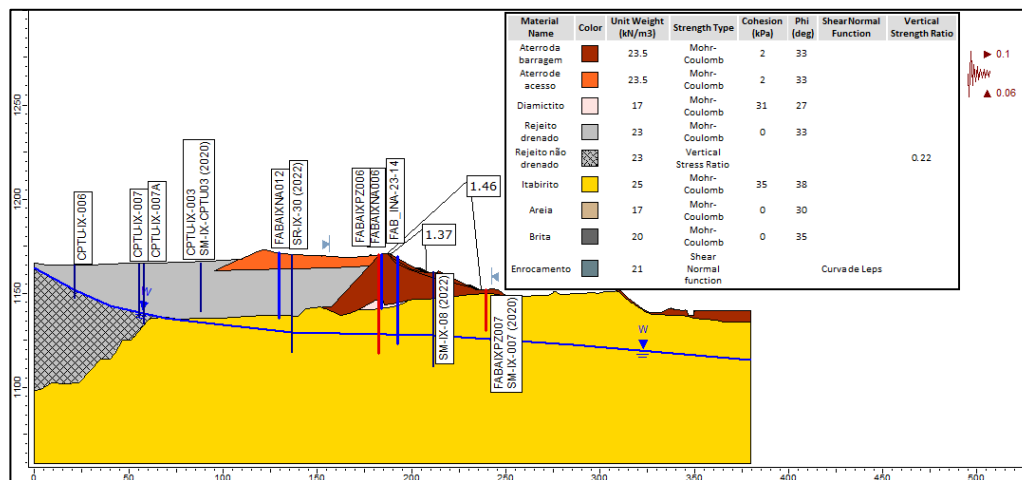


Figura 4. Resultado da análise de estabilidade não drenada – Jusante – Solicitação sísmica – Não circular – Seção Central (Fonte: documento interno VALE).

#### 4 METODOLOGIA

Estudos sismográficos são difundidos na caracterização de fontes de vibração relacionadas com desmontes utilizando explosivos e cravação de estacas em fundações de grandes obras (DOWDING, 1996). No contexto desse trabalho, a abordagem metodológica desses estudos permite a caracterização acerca do nível de vibração (velocidade de partícula em mm/s) gerado por operações de máquinas/veículos em ambiente mineral, e como essas vibrações se propagam no terreno da área de interesse.

De forma geral, são dispostos arranjos lineares de sismógrafos de engenharia (conjunto de alimentação, módulo de aquisição e geofone) no terreno de interesse e realiza-se o controle espacial e temporal das operações de interesse (potenciais fontes de vibração), que passam a ser tratadas como eventos (Figura 5a). Dessa forma, os valores de vibração registrados em cada sensor passam a ser correlacionáveis aos eventos dentro de um intervalo denominado “janela de correlação do evento”.

As janelas de correlação são usadas para se obter parâmetros estatísticos dos dados contidos nelas, dentre eles, os valores máximos de amplitude registrados que são associados os eventos de interesse. Os valores dos máximos, combinados às coordenadas dos sensores e dos locais de atividade das máquinas/veículos, permitem o ajuste de curvas de atenuação das vibrações (Figura 5b) as quais correspondem a modelos matemáticos que permitem estimar níveis de vibração a uma certa distância da fonte de interesse.



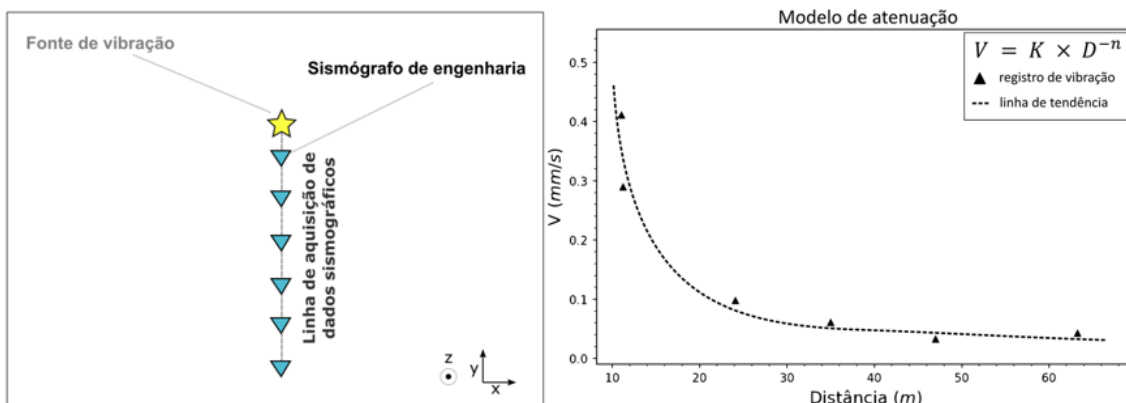


Figura 5. (a) Arranjo linear de sismógrafos de engenharia (esquerda) e (b) curva de atenuação ajustada a partir dos dados de nível de vibração e distância dos sensores em relação à fonte (Fonte: documento interno VALE).

## 5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

### 5.1 Estudo de Dezembro de 2019 - Background

Em 2019, antes do início dos testes com máquinas, desenvolveu-se um estudo com o objetivo de estimar o nível de vibração de fundo (*background*) na região do Complexo de Fábrica, enquanto a maioria das atividades operacionais estavam paralisadas. Dessa forma, os resultados proporcionariam uma referência para avaliar o impacto da retomada das atividades em termos de acréscimo do nível de vibração. Para tal, foram utilizados dezessete (17) sismógrafos de engenharia, espalhados em todo o complexo minerário, incluindo a região da Área IX (destacada na Figura 6), para registrar os níveis de vibração durante uma semana consecutiva.

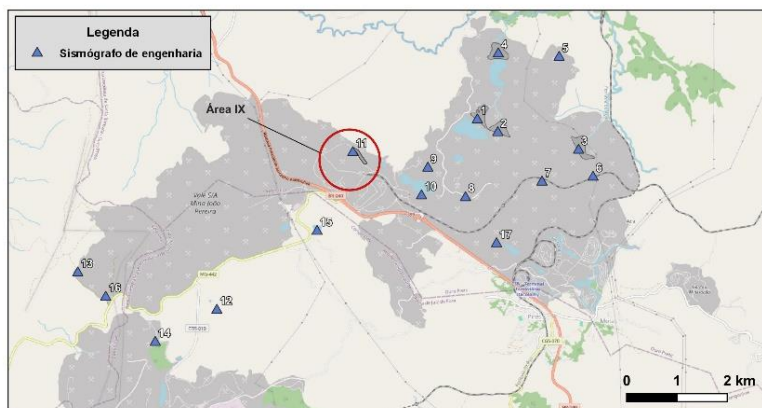


Figura 6. Sensores utilizados na estimativa de background da mina (Fonte: documento interno VALE).

Ao final, adotando a referência do percentil 99% da distribuição de registros (descartando a parcela de 1% de maiores registros como dados espúrios, e.g., intervenções nos sensores), na região da barragem, estimou-se um nível de vibração entre 0,20 e 0,30 mm/s, em termos de velocidade de partícula. A partir desse estudo, foi definido como referência o limite de 0,20 mm/s de PVS (*Peak Velocity Sum*) como limite de vibração admissível para estruturas de contenção de rejeito construídas pelo método a montante.

### 5.2 Estudo de Maio de 2020

O trabalho consistiu no primeiro estudo controlado na Área IX (Figura 7) com o objetivo de caracterizar, em função da distância, máquinas e veículos utilizados em operações minerárias específicas como potenciais fontes de vibração. Para tal, foram testados: caminhões fora-de-estrada dos modelos CAT785 e CAT775, caminhão Scania basculante 8x4, carregadeiras dos modelos LT2350, CAT990, CAT966, escavadeira

hidráulica CAT390, tratores de esteira dos modelos D6T e D10T e uma perfuratriz MD6250. Devido ao caráter pioneiro para o contexto de retomada, a área do teste foi numa porção mais afastada da barragem (conforme destacado na Figura), com parte dos sensores posicionados no reservatório, em direção à estrutura.

Nesse estudo, os principais resultados foram curvas de atenuação, ajustadas em função do tipo de máquina e da atividade executada. Após apreciação dos resultados desse teste, estabeleceu-se uma distância mínima do tráfego dos equipamentos de 25 m a partir do contato com o rejeito, condição está que gerou diversas restrições operacionais na região.

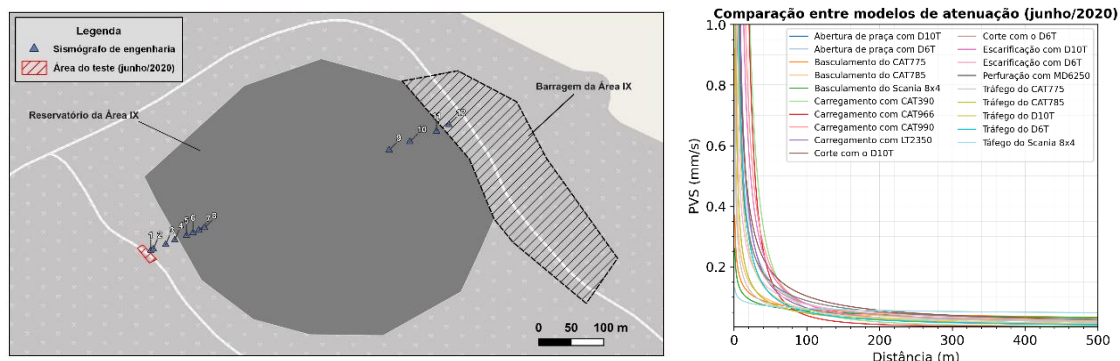


Figura 7. Arranjo utilizado no estudo feito em junho de 2020 (esquerda) e curvas de atenuação obtidas (direita) (Fonte: documento interno VALE).

### 5.3 Estudo de Janeiro de 2021

Esse trabalho correspondeu a uma nova campanha de testes com máquinas e foi o segundo estudo controlado feito na região da Área IX. Entretanto, diferente do primeiro estudo controlado, nesse trabalho houve uma maior aproximação da estrutura, com a área de testes localizada na região da ombreira esquerda da barragem da Área IX (Figura) e o foco nas operações de tráfego das máquinas. Nessa nova campanha, além das máquinas testadas no primeiro estudo, foram incluídas: carregadeira do modelo modelos CAT980, escavadeira hidráulica PC2000, motoniveladoras CAT16M e CAT140, trator de pneu CAT824, e uma perfuratriz BUCYRUS.

Além da caracterização das fontes, os testes também foram realizados com o objetivo de se observar a influência dos materiais superficiais na propagação das vibrações, com um arranjo bidirecional (destacado na Figura 8) com sensores em linha no sentido do reservatório e no sentido do terreno natural à jusante da estrutura. O arranjo mais refinado dos sismógrafos neste teste, permitiu um ajuste melhor das curvas de atenuação (Figura 9) e por consequência a retomada parcial do tráfego de alguns equipamentos dada a atenuação rápida dos equipamentos sobre rodas, no entanto, o tráfego do CAT785 e equipamentos sobre esteiras foram restringidos, visto que as vibrações foram mais acentuadas face ao valor de referência do *background noise* de 0,2 mm/s PVS.

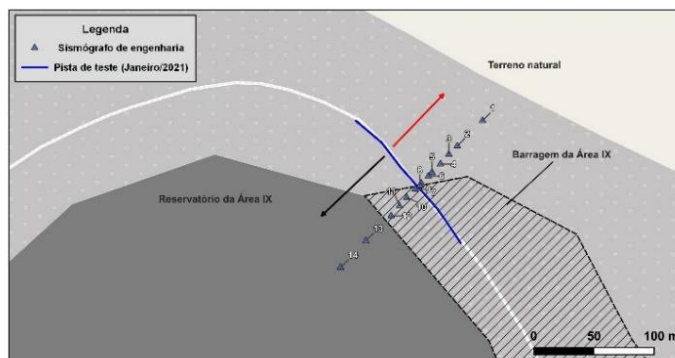


Figura 8. Arranjo utilizado no estudo feito em janeiro de 2021 (Fonte: documento interno VALE).

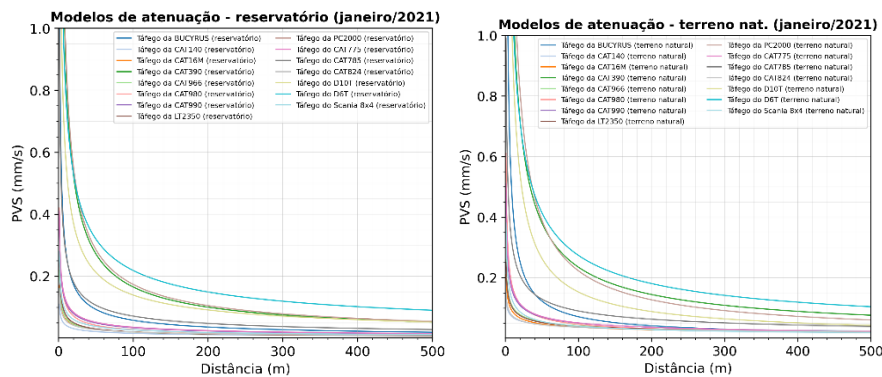


Figura 9. Curvas de atenuação obtidas no estudo de 2021 (Fonte: documento interno VALE).

#### 5.4 Estudo de Setembro de 2021

Esse trabalho correspondeu ao terceiro estudo controlado na região da Área IX, com testes realizados sobre centro do maciço da barragem (Figura 10). Novamente, o foco foi o tráfego das máquinas testadas. Além do arranjo de sensores em superfície para ambas as direções interesse, foram utilizados sismógrafos em profundidade para avaliar a atenuação das vibrações no aterro da estrutura. As máquinas testadas foram: caminhão fora-de-estrada CAT785 (tráfego lento – 20 km/h – e tráfego operacional – 40 km/h), caminhão CAT785 adaptado para prancha de transporte de outras máquinas, perfuratriz MD6290, trator de esteira D10T, escavadeiras hidráulicas dos modelos CAT390, CAT349 e PC2000.

O objetivo principal do teste foi refinar o arranjo sismográfico tanto em superfície quanto em profundidade, afim de dirimir as dúvidas levantadas no desdobramento do teste anterior, que acarretou a restrição do tráfego do CAT785, o que implicava numa condição operacional difícil para a mina visto que esse é principal equipamento utilizado.

Além das curvas de atenuação (Figura 11), também foram geradas extrapolações bidimensionais que simulam a máxima amplitude de vibração de determinada máquina a partir de qualquer ponto no eixo da pista de testes. Com relação aos sensores de profundidade, comparando os registros com o sensor 09 (projeção em superfície), notou-se que, na média, as amplitudes foram 9% menores a 2,75 m, 19% menores a 6,05 m, e 26% menores a 9,75 m.

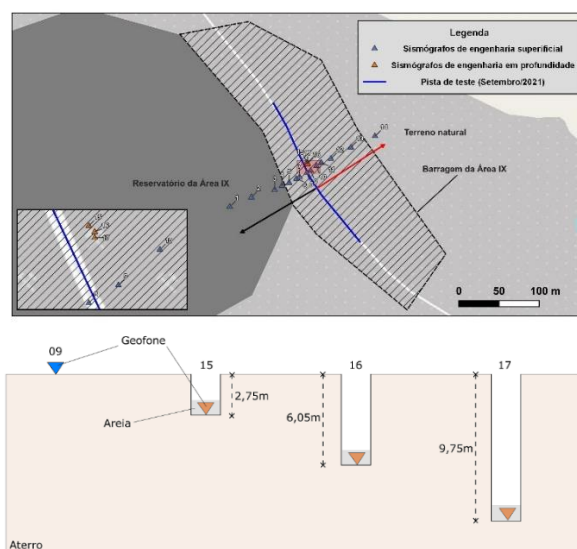


Figura 10. Arranjo utilizado no estudo feito em setembro de 2021 na Área IX (superior) e detalhe do posicionamento dos sensores em profundidade (inferior), (Fonte: documento interno VALE).

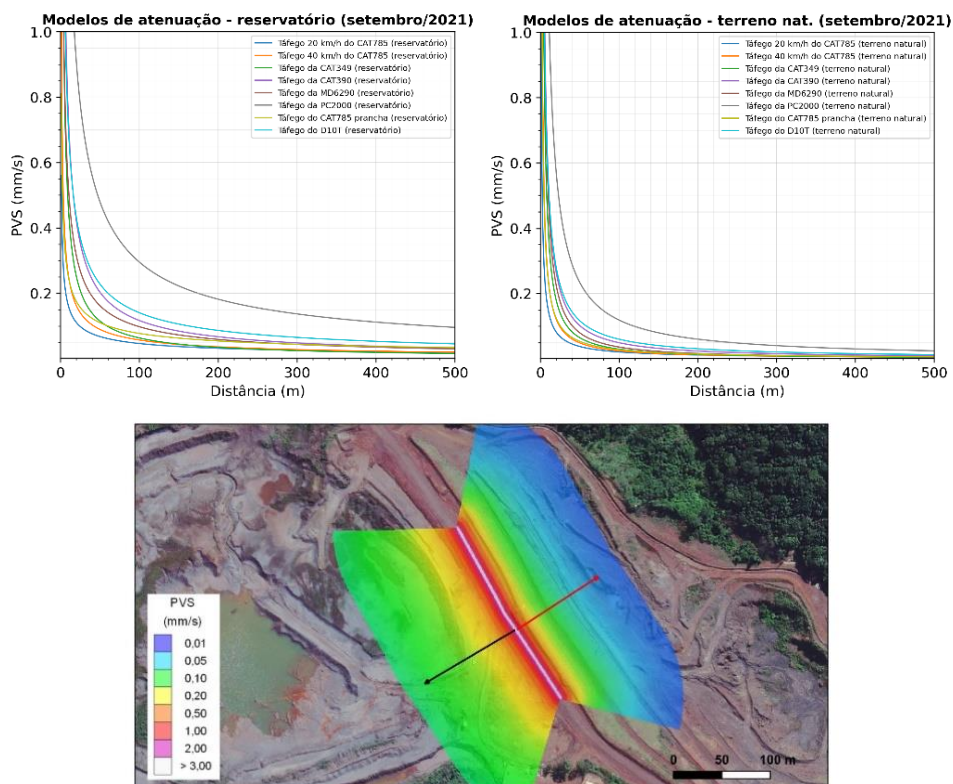


Figura 11. Curvas de atenuação obtidas no estudo feito em setembro de 2021 (superior) e exemplo extrapolação espacial dos modelos de atenuação (inferior), (Fonte: documento interno VALE).

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O contexto peculiar da Área IX - por se tratar originalmente de uma cava que após a produção ser exaurida se tornou um local de disposição de rejeitos, bem como sua localização estratégica em uma mina de Ferro, a tornou um dos acessos principais para logística de produção do site - colocou essa estrutura geotécnica como um dos principais focos de estudos relacionados a vibrações associadas ao tráfego e operação de equipamentos.

O avanço nos arranjos propostos para os testes executados, impulsionados pelas restrições de tráfego e recomendações impostas por auditores, proporcionaram um refinamento considerável nas curvas de atenuação geradas a partir do tráfego de diversos equipamentos utilizados na operação de uma mina. Tal refinamento nos estudos subsidiou tecnicamente a viabilidade da retomada operacional deste site, uma vez que foi evidenciado o não incremento de risco geotécnico, dada as baixas amplitudes e rápida atenuação, superficialmente e em profundidade, das vibrações geradas pelos equipamentos testados. Além disso, serviu de base para outros estudos em prol da descaracterização de barragens a montante deste complexo, cuja susceptibilidade ao modo de falha por liquefação as torna sensíveis a um possível gatilho relacionado a vibrações.

Por fim, ressalta-se a necessidade da continuação do trabalho com foco em correlacionar os resultados dos estudos de vibrações executados com as características geológico-geotécnicas das estruturas nas quais estes testes foram feitos. É essencial que sejam extraídas correlações empíricas de modo a viabilizar a transposição dos resultados entre diferentes estruturas com características geológico-geotécnicas similares.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Dowding, C. H. (1996). *Construction Vibrations*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ., 610.