

ANÁLISE DOS IMPACTOS DE VIBRAÇÕES E RUÍDOS EM ESTRUTURAS PRÓXIMAS DE ÁREAS DE LAVRA COM DESMONTE DE ROCHA COM EXPLOSIVO

André Luiz Cordeiro Ferreira

Orientador: Prof. Dr. Luis Eduardo de Souza

RESUMO

O desmonte de rocha realizado com o uso de explosivos é considerado uma etapa fundamental dentro do processo de extração mineral. Um bom planejamento seguido de uma correta execução do plano de fogo interfere de maneira positiva nas etapas subsequentes de carregamento, transporte e beneficiamento, além de minimizar os impactos a estruturas e ao meio ambiente. Seguindo esses procedimentos, as empresas mineradoras estarão se adequando à legislação e às normas de órgãos públicos fiscalizadores e, conseqüentemente, mantendo uma boa relação com a vizinhança do entorno da mina, que geralmente reclama e alega que fissuras e/ou rachaduras em suas casas são causadas pelas detonações dos explosivos. Neste trabalho foram realizados oito monitoramentos, divididos entre duas estruturas previamente definidas, com o objetivo de diagnosticar os níveis de vibração e ruído proveniente da área de lavra de calcário com desmonte de rocha em mineradoras do município de Caçapava do Sul, RS. Após a verificação dos níveis de ruído e vibração praticados foi possível analisar os resultados encontrados, avaliando se as detonações possuíam potencial para provocar danos a essas estruturas. Para a realização desses monitoramentos, foi utilizado um microsismógrafo de engenharia, aparelho que permite extrair parâmetros estipulados e determinados pela NBR 9653. De acordo com os limites definidos por essa norma, os resultados dos oito monitoramentos realizados mostraram que não há interferência ou possibilidade de danos causados nas estruturas, que sejam oriundos das detonações praticadas nas áreas de operação de lavra, já que tanto os níveis de vibração quanto de pressão acústica estavam dentro dos padrões exigidos pela norma.

Palavras-chave: desmonte de rocha, explosivos, monitoramento sísmico, estruturas.

1. Introdução

A indústria de mineração disponibiliza recursos minerais essenciais para o crescimento econômico de um país e o desenvolvimento da sociedade de maneira geral. É considerada a base de formação da cadeia produtiva, que vai da extração mineral até a fabricação dos produtos industriais. A demanda pela mão-de-obra somada à rigidez locacional, faz com que o setor mineral provoque a criação de novos núcleos habitacionais em torno das áreas onde ocorrem as atividades mineiras, trazendo conflitos cada vez mais frequentes entre as duas partes. Pois, apesar de sua importância, gera alguns impactos ambientais que são alvos constantes da fiscalização de órgãos públicos, visando estabelecer condições de conforto e segurança para habitantes e edificações existentes em seu próprio núcleo mineiro e suas vizinhanças (Dallora Neto, 2004).

A utilização de explosivos é uma das operações mais comuns na etapa do desmonte de rochas, possuindo um custo baixo em relação ao desmonte mecânico, além de garantir eficiência na fragmentação de quase todos os tipos de minérios. Porém o desmonte de rocha com uso de explosivo, quando executado sem a condução de um planejamento adequado da atividade, causa desconforto humano haja visto que coloca em risco não apenas a saúde dos trabalhadores expostos a esta atividade como também a saúde da população do entorno e suas estruturas, além de ter potencial para causar danos ao meio ambiente. Dentre os principais impactos relacionados com o desmonte de rochas realizado com explosivos, o ruído e a vibração são os que mais estão sujeitos à reclamações da vizinhança no entorno das áreas de mineração. O ultralancamento, a poeira, além de modificações das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio são outros impactos gerados por esta etapa de fragmentação das rochas com o uso de explosivos (de Pontes *et al.*, 2013).

Segundo de Pontes *et al.* (2013), esses problemas podem ser reduzidos a um nível aceitável, se a lavra for executada com a utilização de técnicas modernas tanto na extração quanto no beneficiamento de minérios, e com um monitoramento paralelo de maneira contínua dos parâmetros ambientais envolvidos, ou seja, mantendo os níveis monitorados abaixo dos limites máximos estabelecidos pelos organismos governamentais fiscalizadores.

Em muitos países existem normas limitando os níveis de vibração como forma de proteção às propriedades vizinhas de acordo com o tipo de construção edificada. Especificamente no Brasil, a norma que diz respeito aos limites de vibração e sobrepressão acústica aceitáveis é a NBR- 9653 (ABNT, 2005). Em se tratando de mineração, a averiguação desses limites estabelecidos pelas normas está diretamente relacionada com as detonações realizados nas áreas de lavra, e os procedimentos adequados para tal etapa estão dispostos na NRM-16 (DNPM, 2001).

Atento a essa busca incessante pela redução dos impactos ambientais oriundos do desmonte de rochas com explosivos e, por conseguinte a adequação às normas regulamentadoras dos órgãos ambientais, o presente trabalho tem como objetivo monitorar os níveis de vibração e ruído de duas estruturas próximas á áreas de detonações de rocha de duas empresas mineradoras de calcário, no município de Caçapava do Sul, levando em consideração levantamentos geológicos e os dados do plano de fogo utilizado para as detonações. Com a posse dessas informações e baseado nos parâmetros que regem as normas brasileiras sobre limites de vibração e ruído, foi possível analisar se as detonações executadas tem potencial para provocar danos às estruturas monitoradas.

1.1 Área de estudo

A área de estudo está localizada a 8 km do centro da cidade de Caçapava do Sul, distante 260 km de Porto Alegre, no distrito de Caieiras, local com grande concentração de empresas mineradoras de calcário no município. As cavas das empresas A e B, onde realizam-se as detonações estão separadas pela BR-392. A empresa A fica ao norte, com as cavas denominadas de Linhares e Pedreira. Já as duas cavas da empresa B, a Corticeira e o Mangueirão estão localizadas ao sul da mesma rodovia (Figura 1).

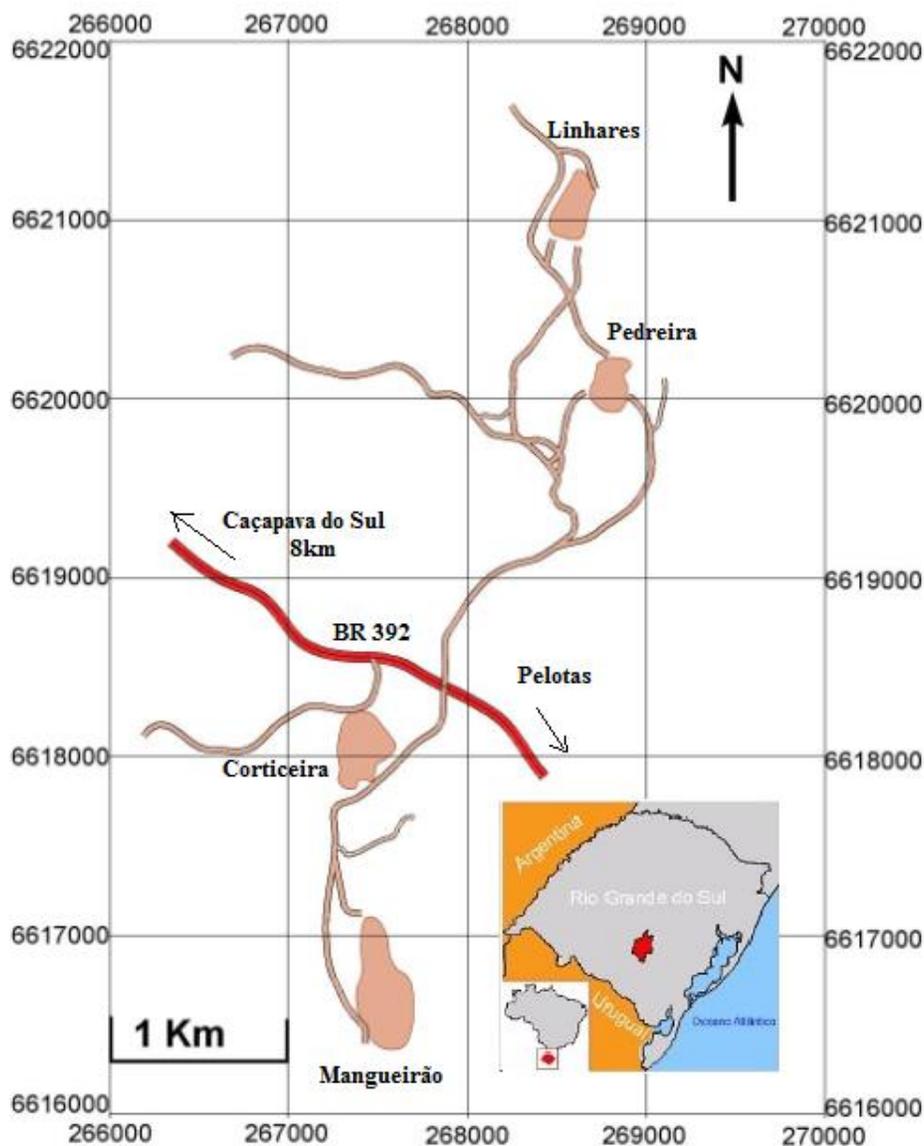


Figura 1: Mapa de localização da área de estudo.

1.1.1 Geologia Regional

Em termos regionais, na área de estudos ocorrem litotipos pertencentes ao Complexo Metamórfico Vacacaí (CMV), que ocorre a oeste do escudo Sul-Rio-Grandense. O CMV reúne as unidades vulcanossedimentar e metavulcânica. O metamorfismo regional que afetou as rochas desta associação é de baixo grau, com rochas de grau metamórfico mais elevado apenas nas proximidades das intrusões graníticas (Ribeiro *et al.*, 1970). A unidade metavulcanossedimentar é constituída predominantemente por rochas pelíticas com ocorrências subordinadas de estreitos níveis arenosos e esporadicamente de rochas ortoderivadas. A escassez de afloramentos e a superposição de uma foliação milonítica, que transpõe as feições primárias e as feições deformacionais, impedem a caracterização da relação entre litotipos metassedimentares e os ortoderivados. As metavulcânicas são rochas com representação subordinada em relação à unidade vulcanoclástica.

Constituem níveis métricos com rochas de aspecto maciço, com foliação metamórfica incipiente, sendo constituídas por lentes de mármore e xistos provenientes de metapelito, grafita xisto, quartzitos, anfibolitos e níveis de metavulcânicas intermediárias, com todo conjunto metamorfoisado nas fácies (Porcher *et al.*, 2000).

Outro importante evento geológico da região é a Suíte Granítica Caçapava do Sul (SGCS), com idade de 540 Ma aproximadamente, tendo uma extensão de 25 km com uma forma de corpo elíptico com o eixo maior orientado na direção N-S. O monzo e os sienogranitos, com participação subordinada de rochas de composição granodiorítica a tonalítica representadas principalmente na borda oeste do corpo principal constituem a SGCS. Além dos diversos tipos petrográficos em três fácies principais, que são classificadas como biotita granitoide, leucogranitóides e granitoides transicionais. A Figura 2 apresenta o mapa geológico regional simplificado, mostrando as principais litologias da geologia regional.

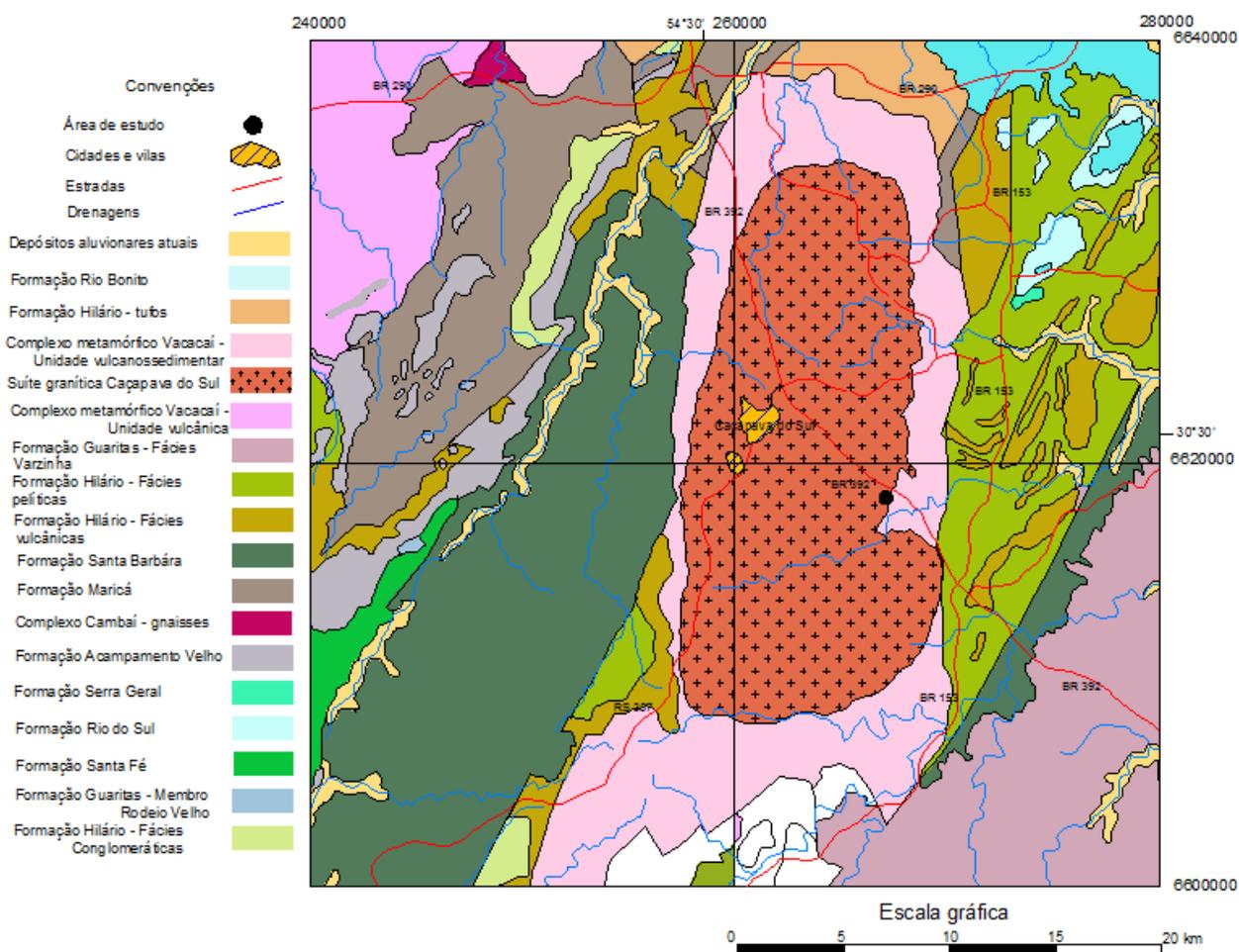


Figura 2: Mapa geológico da região com as unidades litoestratigráficas. Fonte: Dorneles, 2013.

1.1.2 Geologia Local

A área de estudo fica localizada no Complexo Metamórfico Vacacaí (CMV), da unidade metavulcanossedimentar, com a presença de minério rico em carbonatos. A leste da Suíte Granítica Caçapava do Sul (SGCS) ocorrem os mármores dolomíticos na forma de corpos lenticulares de dimensões variadas, apresentando uma coloração branco-amarelada. Além da presença de mármores pretos e róseos na porção sul da faixa que contorna a SGCS. As rochas calcissilicáticas estão representadas por biotitacarbonato xistos e quartzodiopsídio gnaisses, sendo estas, associadas aos corpos carbonáticos, com os quais mostram contatos gradativos. Também há a ocorrência de anfibólio xistos, anfibólio gnaisses, anfibolitos, gnaisses quartzo-feldspáticos, rochas magnesianas e rochas vulcânicas de composição riolítica a riodacítica metamorfisadas, além de rochas anquimetamórficas (Porcher *et al.*, 2000).

A estratificação tem de maneira geral composição silicática, sendo que os minerais considerados impureza formam bandas entre partes de composição carbonática uniforme, possuindo cores esverdeadas e amareladas. É possível notar a intrusão de apófises graníticas supergênicas entre as camadas (Figura 3), de maneira concordante ou discordante em relação ao calcário, além de intrusões de diábase (formado posteriormente ao granito), intrudidos em sentido discordante àquele do calcário (Porcher *et al.*, 2000).

Com grandes descontinuidades e fraturas locais, existe a dificuldade para prever a continuação das intrusões durante as perfurações para o carregamento dos explosivos, pois ocorrem contatos bruscos de diferentes litologias, causando grandes desvios e conseqüentemente interferindo diretamente no plano de fogo para desmontar a rocha. Segundo Dorneles (2013) e Fontanelli (2014), esta heterogeneidade do maciço rochoso e o alto grau de fraturamentos encontrados no distrito das Caieiras favorece para que as vibrações do desmonte de rochas com o uso dos explosivos sejam rapidamente atenuadas.

O depósito, de maneira geral, acompanha o eixo N-S, com composição calcítica (CaCO_3) e dolomítica ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$). O tamanho e a forma das partículas de calcário, decorrentes das condições de pressão, temperatura e ação de solvente, são fatores que influenciam as características físicas da rocha. Essa variação na composição química aumenta a variedade de uso do minério. O material calcítico apresenta maior valor econômico e após passar por processo de calcinação, é empregado na fabricação da cal e argamassa. Já o calcário dolomítico, por apresentar magnésio em sua composição, é empregado como corretivo de solo.



Figura 3: Depósito da cava Linhares (empresa A) e Mangueirão (empresa B), onde é possível observar a grande heterogeneidade do maciço, com a presença de diversas descontinuidades geológicas.

2. Estado da Arte

2.1 Desmontes de Rochas com explosivos

Na grande maioria dos projetos de mineração estão presentes as operações de perfuração e desmonte (P&D) de rochas com o uso de explosivos, apenas em alguns casos esta técnica é substituída pela aplicação de outro método, como água pressurizada ou desmonte mecânico. No ciclo de operações que envolvem a produção, a perfuração antecede o desmonte, servindo como estrutura para que o mesmo ocorra. Esses processos são os responsáveis pelo desenvolvimento e produção da mina, tendo repercussão nas operações subseqüentes de lavra e beneficiamento (Rosenhaim *et al.*, 2011).

Pontes (1998) cita que para o desmonte de rocha ser eficiente é necessário estar atento a alguns aspectos importantes para utilizar a energia do explosivo, como: a fragmentação desejada, preservação do talude remanescente, formação da pilha do material adequada com os equipamentos de carregamento e transporte e a preservação da praça de lavra. Além disso, existem alguns parâmetros que irão interferir nas diversas operações unitárias: finalidade do material a ser trabalhado, característica do maciço rochoso, situação topo-geográfica e mão-de-obra disponível. Com a realização de uma análise criteriosa desses parâmetros, deverão ser definidos os investimentos de forma a viabilizar a operação do desmonte de rocha.

Segundo Araújo (2002), as propriedades de um maciço rochoso variam espacialmente, com cada rocha reagindo de maneira diferente na interação explosivo/rocha, de acordo com a localização dos pontos de aplicação da energia transferida pelo explosivo no maciço rochoso. Por isso, passa a ser de fundamental importância um estudo do maciço rochoso para adotar um plano de desmonte que se ajuste às condições ideais, com o objetivo de obter uma melhor fragmentação e, conseqüentemente, evitar danos ao meio ambiente.

2.2 Vibrações e Ruídos

A busca por critérios regulatórios relativos a danos e ao desconforto causado às pessoas em virtude do desmonte de rochas com uso de explosivos já ocorre há décadas. E para isso foram realizados estudos levando em consideração os seguintes parâmetros:

- i) a relação empírica entre a carga detonada e a energia de vibração, em função da distância;
- ii) limites máximos admissíveis de vibração, e;
- iii) medidas economicamente viáveis a serem tomadas para evitar que as vibrações ultrapassem esses limites máximos, além;
- iv) de aparatos técnicos capazes de captar as vibrações de maneira precisa, confiável e reproduzível (Pontes *et al.*, 2013).

Para Azevedo & Patrício (2001), as vibrações de maneira geral, são atenuadas através dos mecanismos geométricos e também pela dissipação existente durante o seu percurso. França *et al.* (2011) afirma que, em termos práticos, as vibrações nem sempre diminuem com a distância, já que segundo o autor, em meios estratificados, dependendo da geometria, as ondas podem concentrar-se ou sobrepor-se a outras ondas refletidas, podendo ocorrer altos valores de vibração em locais mais afastados.

Uma análise factível sobre frequência de vibração de edificações foi apresentada por França *et al.* (2011). Segundo o autor, toda estrutura possui um intervalo de frequência de vibração natural e todo corpo em virtude de sua inércia reage a uma vibração. Assim ao existir uma fonte externa vibrando com frequência similar à frequência natural de um sistema, o mesmo passa a vibrar em grande intensidade, colocando-se em ressonância com a fonte. Portanto, a instabilidade de estruturas perante a propagação das ondas sísmicas, sejam elas naturais ou artificiais, possui pequena relação com a frequência de ressonância.

É possível prever com um bom grau de confiabilidade e precisão os níveis de pico de vibração de detonações futuras em determinado local, levando em consideração os fatores locais de atenuação de vibrações, que estão estritamente relacionadas com as propriedades geológicas, geotécnicas e físicas de um maciço rochoso (Dallora Neto & Ferreira, 2006).

Reil (1998) menciona que os três principais fatores relacionados à vibração no solo determinantes para as estruturas construídas vibrarem, são:

- i. velocidade de vibração máxima de partícula e vibração resultante (VR);
- ii. duração da vibração; e
- iii. frequência de vibração.

Existe a possibilidade da propagação de vibrações no terreno provocar trincas em construções, porém seu desconforto ambiental à população, geralmente, se reduz ao incômodo causado pela sensação de vibração ou tremor das edificações, provenientes da oscilação ou queda de objetos (Dallora Neto, 2004).

Outro parâmetro causador de grande reclamação por parte de moradores vizinhos aos locais de detonação em uma área de lavra é o ruído. Para Persson *et al.* (1994), o principal colaborador para a geração dos ruídos é a grande quantidade de massa de ar que é movimentada pela detonação, tornando determinante o grau de confinamento do explosivo em cada furo da

malha do plano de fogo, já que a falta de contato entre explosivo e rocha provocará a dissipação da sobrepressão acústica na atmosfera, portanto quanto maior o confinamento do explosivo melhor será a fragmentação do maciço rochoso e menor será o efeito do ruído.

Sánchez (1995) e Eston (1998) consideram que as principais fontes de sobrepressão acústica em desmonte de rochas com explosivos, está relacionada à liberação de gases através de fraturas das rochas e da parte superior da coluna de explosivos com a ejeção do tampão. Além da detonação de explosivos não confinados e a refração das ondas sísmicas através da atmosfera.

2.3 Principais Normas Aplicadas ao Desmonte de Rochas com Explosivos

As normas técnicas regidas pelos órgãos públicos fiscalizadores são de extrema importância para a realização dos monitoramentos dos níveis de vibrações e ruídos. Através dessas normas são definidos cada um desses impactos, estipulando seus respectivos limites máximos, além de determinar os parâmetros necessários para analisar os danos às estruturas e edificações próximas aos locais do desmonte de rocha com o uso dos explosivos (Santos 2009).

A diferença entre as normas técnicas de alguns países, no que diz respeito às ações causadas pelos impactos ambientais e/ou danos em estruturas, está no fato de que algumas se basearam em valores empíricos e outras em parâmetros como o tipo de construção e o material utilizado (Bacci, 2003). Talvez essa seja a grande diferença da norma brasileira para as normas de grande referência mundial, como a DIN-4150 da Alemanha e a USBM-8507 dos Estados Unidos.

Desde 1989, a Alemanha adota a Norma DIN-4150 (1986) como padrão. Nesta norma são fornecidos os limites de velocidade de vibração de partícula em mm/s, considerando o tipo de estrutura civil e o intervalo de frequência em Hz, como podemos verificar na Tabela 1:

Tabela 1: Valores admitidos pela Norma Alemã DIN-4150 para danos em edifícios. Fonte: Bacci, 2000.

| Tipos de Estrutura | Fundação | | | Andar mais alto dos edifícios |
|---|-----------------|-----------|-----------|-------------------------------|
| | Frequência (Hz) | | | Qualquer Frequência |
| | <10 | 10-50 | 50-100 | |
| Industrial | 20mm/s | 20-40mm/s | 40-50mm/s | 40mm/s |
| Habitações | 5mm/s | 5-15mm/s | 15-20mm/s | 15mm/s |
| Edifícios particularmente delicados | 3mm/s | 3-8mm/s | 8-10mm/s | 8mm/s |

Considerada pioneira sobre normas que estabelecem os níveis de vibração e ruído, a USBM (*United States Bureau of Mines*) realizou estudos em buscas de um limite de segurança que não causasse danos estruturas em construção civis. Sempre correlacionando parâmetros como deslocamento, frequência, velocidade máxima de partícula e distância considerada segura com a energia da detonação.

Atualmente a USBM baseia seu critério para avaliar os danos em estruturas, através de pesquisas que foram realizadas em minerações a céu aberto e publicadas em 1980 no *Report of Investigation* (RI 8507). Durante estes estudos verificou-se que existe um grave problema em

relação à ressonância estrutural, sendo esta originada em resposta à vibração de baixa frequência, resultando em aumentos dos deslocamentos e deformações nas estruturas, reforçando a ideia que esses danos podem ser causados pela frequência. Os níveis de vibração de partícula considerados seguros estão dispostos na Tabela 2. Tais valores sofreram duras críticas da indústria de mineração americana, que considerou os valores baixos, portanto, prejudiciais à sua produção.

*Tabela 2: Níveis seguros de velocidade de vibração de partícula para estruturas civis, segundo USBM (RI 8507).
Fonte: Bacci, 2000.*

| Tipo de Estrutura | Baixas frequências: f40< Hz | Altas frequências: f40>Hz |
|---|-----------------------------|---------------------------|
| | PPV (mm/s) | PPV (mm/s) |
| Casas modernas, paredes interiores pré-moldadas sem | 19 | 50 |
| Casas velhas, paredes interiores com gesso ou revestimento de madeira | 12,7 | 50 |

A norma brasileira NBR-9653 foi concebida pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) a partir de monitoramentos de vibrações produzidas pelo desmonte de rocha com uso de explosivos em pedreiras localizadas próximas a áreas periféricas das grandes concentrações urbanas. Esses dados foram coletados desde a década de 70 e a norma brasileira publicada em 1986. Os principais objetivos dos monitoramentos eram os seguintes:

- i. caracterizar as operações médias de operação das pedreiras que correspondessem à condições favoráveis economicamente e;
- ii. caracterizar os níveis de vibração correspondentes àquelas condições econômicas de operação.

De maneira geral, os estudos mostraram que para todos os tipos de rochas onde ocorreram os desmontes de rochas (gnaisse, granito, calcário e basalto), não foram observados valores de vibração de partícula acima de 15 mm/s a partir de 200 m do local onde ocorreram as detonações. Assim foram sugeridos valores máximos de carga máxima por espera (Q), para que os valores de vibração de partícula não excedessem os 15 mm/s, para faixas de valores de distância (D) inferiores a 200 m, ficando estipulado da seguinte maneira:

Para $140 < D < 200$, $(Q) < 100$ kg/espera e para $40 < D < 140$, $(Q) < 30$ kg/espera.

A partir de então a NBR-9653 definiu como 15 mm/s o limite máximo de vibração permissível nos arredores das áreas onde ocorriam as detonações em pedreiras. A velocidade resultante de partícula deve ser calculada de acordo com a equação 1:

$$VR = [(VL^2) + (VT^2) + (VV^2)]^{0,5} \quad (1)$$

Onde: VR = Velocidade resultante de vibração de partícula (mm/s), VL = Velocidade de vibração na direção longitudinal, em mm/s, VT = Velocidade de vibração na direção transversal (mm/s) e VV = Velocidade de vibração na direção vertical, em mm/s.

A norma brasileira também definiu que o nível de sobrepressão acústica medida além da área de operação não deve ultrapassar os 134 dB e que não devem ocorrer ultralaçamentos de fragmentos além da área de operação do empreendimento. A NBR-9653 foi publicada em 1986 e não fazia referencia a frequência dos fenômenos vibratórios, além de não mencionar em sua análise os tipos de edificações afetadas pelas vibrações. A norma foi revisada e atualizada em 2005 passando a avaliar os riscos de danos induzidos por vibrações do terreno, considerando a magnitude e a frequência de vibração da partícula, estabelecendo limites para esses parâmetros. Podemos observar esses valores numericamente na Tabela 3:

Tabela 3: Limites de velocidades de vibração de partícula de pico por faixas de frequência. Fonte: NBR-9653, 2005.

| Faixa de Frequência | Limite de PPV (mm/s) |
|----------------------------|---|
| 4 Hz a 15 Hz | Inicia em 15mm/s e aumenta linearmente até 20mm/s |
| 15 Hz a 40 Hz | Acima de 20mm/s e aumenta linearmente até 50mm/s |
| Acima de 40 Hz | 50mm/s |

3. Materiais e Metodologia

Em uma primeira etapa do projeto, buscou-se identificar a estrutura que estivesse mais próxima das áreas de detonações em cada uma das empresas responsáveis pelo direito de exploração mineral, sendo que cada empresa tem duas cavas em seus domínios. As duas estruturas selecionadas são residências particulares construídas por alvenaria, porém não foi realizada qualquer análise referente à qualidade do material utilizado para a construção.

A coleta de dados dos níveis de vibração e sobrepressão acústica, foi realizada por meio de microssismógrafos de engenharia, marca Geosonics® 3000 EZ Plus, instalados nas estruturas previamente definidas. Os aparelhos foram configurados em modo de disparo para captar sinais a partir de 0,127 mm/s de vibração de partícula, dentro de um intervalo de 5 segundos para o tempo de gravação. E são compostos pelos seguintes componentes:

- i) geofone: faz a captação dos valores de vibração de partícula em três direções;
- ii) microfone: faz a captação dos níveis de ruídos provocados pelas detonações, e;
- iii) uma unidade de armazenamento de dados.

Os geofones foram fixados utilizando-se gesso e orientando-o na direção do foco da explosão, assim como o microfone que foi instalado no solo exterior da estrutura (Figura 4).

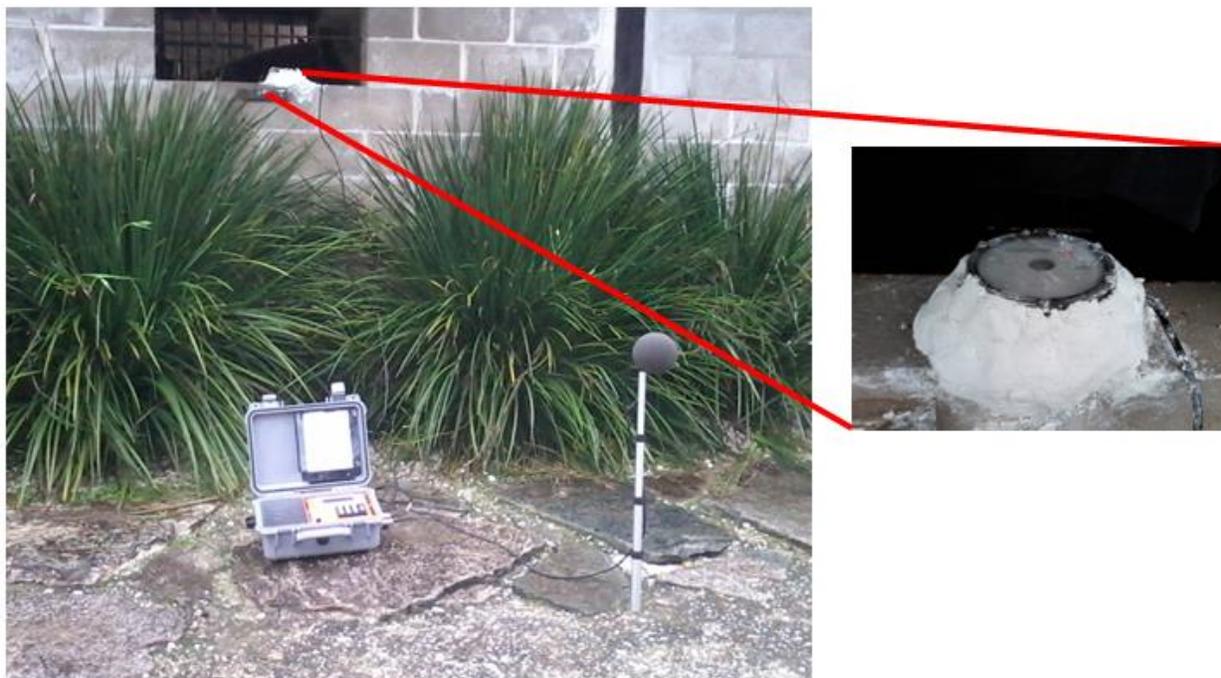


Figura 4: Sismógrafo instalado em uma das estruturas monitoradas, com o detalhe da fixação do geofone.

Os registros dos dados ficam armazenados no aparelho e são transportados para o programa GeosonicsInc, Analysis 8.2, assim foi possível obter gráficos (Figura 5) com os valores de vibração de partícula nas três componentes do sensor e a medição do nível de ruído que chega a estrutura.

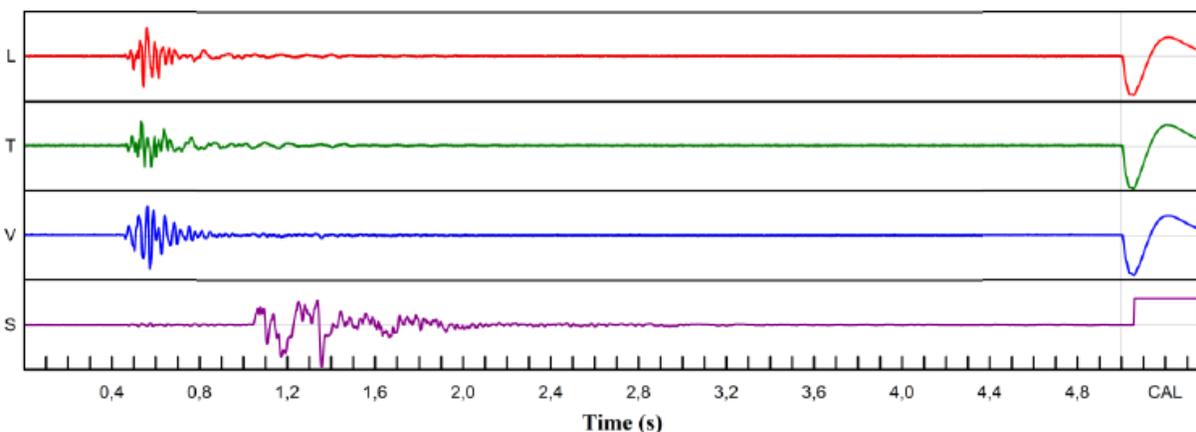


Figura 5: Interface gráfica gerada pelo GeosonicsInc.Analysis 8.2 de um dos monitoramentos, com o registro de velocidade de partícula para cada uma das componentes: longitudinal (L), transversal (T) e vertical (V), além do ruído: sinal sonoro (S).

Os locais dos desmontes eram determinados de acordo com a demanda por matéria-prima das empresas, sendo possível realizar uma campanha de quatro monitoramentos para cada

estrutura. Em todas as situações foram registradas as coordenadas de cada ponto de detonação e dados importantes do plano de fogo para efeito de análise dos resultados como: carga máxima por espera (QME) e distância escalonada (DE), sendo estes valores apresentados na Tabela 4:

Tabela 4: Especificações dos desmontes monitorados.

| Data | Sismógrafo | Ponto Detonação | | Ponto Monitoramento | | Distância (m) | Carga máxima por espera (kg) | Distância escalonada (m/kg ^{0,5}) |
|------------|------------|-----------------|---------|---------------------|---------|---------------|------------------------------|---|
| | | X | Y | X | Y | | | |
| 12/12/2014 | 2 | 268656 | 6621059 | 269117 | 6621107 | 419,00 | 132,70 | 36,37 |
| 12/19/2014 | 2 | 268885 | 6620103 | 269117 | 6621107 | 1000,00 | 168,36 | 77,07 |
| 04/24/2015 | 1 | 268645 | 6620940 | 269117 | 6621107 | 464,00 | 220,37 | 31,26 |
| 05/19/2015 | 1 | 268664 | 6621036 | 269117 | 6621107 | 430,00 | 136,34 | 36,83 |
| 05/26/2015 | 1 | 267464 | 6616569 | 267740 | 6617638 | 1173,00 | 61,57 | 149,49 |
| 06/01/2015 | 1 | 267580 | 6616587 | 267740 | 6617638 | 1000,00 | 222,72 | 67,01 |
| 06/02/2015 | 1 | 267469 | 6616728 | 267740 | 6617638 | 960,00 | 174,02 | 72,77 |
| 06/03/2015 | 1 | 267434 | 6618232 | 267740 | 6617638 | 695,00 | 108,00 | 66,88 |

Os valores da distância escalonada foram encontrados através da equação 2:

$$DE = \frac{D}{QME^{0,5}} \quad (2)$$

Onde D é a distância horizontal entre o ponto de medição e o ponto de detonação em metros e QME é a carga máxima de explosivos detonados no mesmo instante.

Outras características do plano de fogo como: tipo de explosivo, profundidade média dos furos, afastamento, espaçamento e acessórios utilizados foram considerados, pois podem ter relação direta nos resultados dos níveis de vibração e ruído encontrados. Além de poder analisar se as empresas fazem valer as recomendações gerais da NBR-9653 sobre conforto ambiental.

No que tange aos dados do plano de fogo, as duas empresas são parecidas, utilizando cartuchos de emulsão na carga de fundo dos furos e ANFO (*Ammonium Nitrate + Fuel Oil*) granulado como carga de coluna quando não há presença de água nos furos. Devido à falta de resistência desse tipo de explosivo nesta condição, esses casos são utilizados explosivos encartuchados também para carga de coluna. As amarrações da malha de fogo em ambas as empresas, são geralmente realizadas em cunha com cordéis detonantes de 4,8 mm de diâmetro (NP-10) e/ou 3,8 mm de diâmetro (NP-5), com tempos de retardos diferentes, retardos de 17 milissegundos na empresa “A” e 25 milissegundos para a empresa “B”. Em apenas um dos monitoramentos a empresa “B” substituiu o cordel detonante por tubo de choque que tem maior velocidade de detonação e ajudaria a minimizar os impactos ambientais propagados pela atmosfera na forma de ruído e poeiras. As Figuras 6 e 7 mostram os pontos de detonação e indicam as estruturas monitoradas nas empresas A e B, respectivamente.

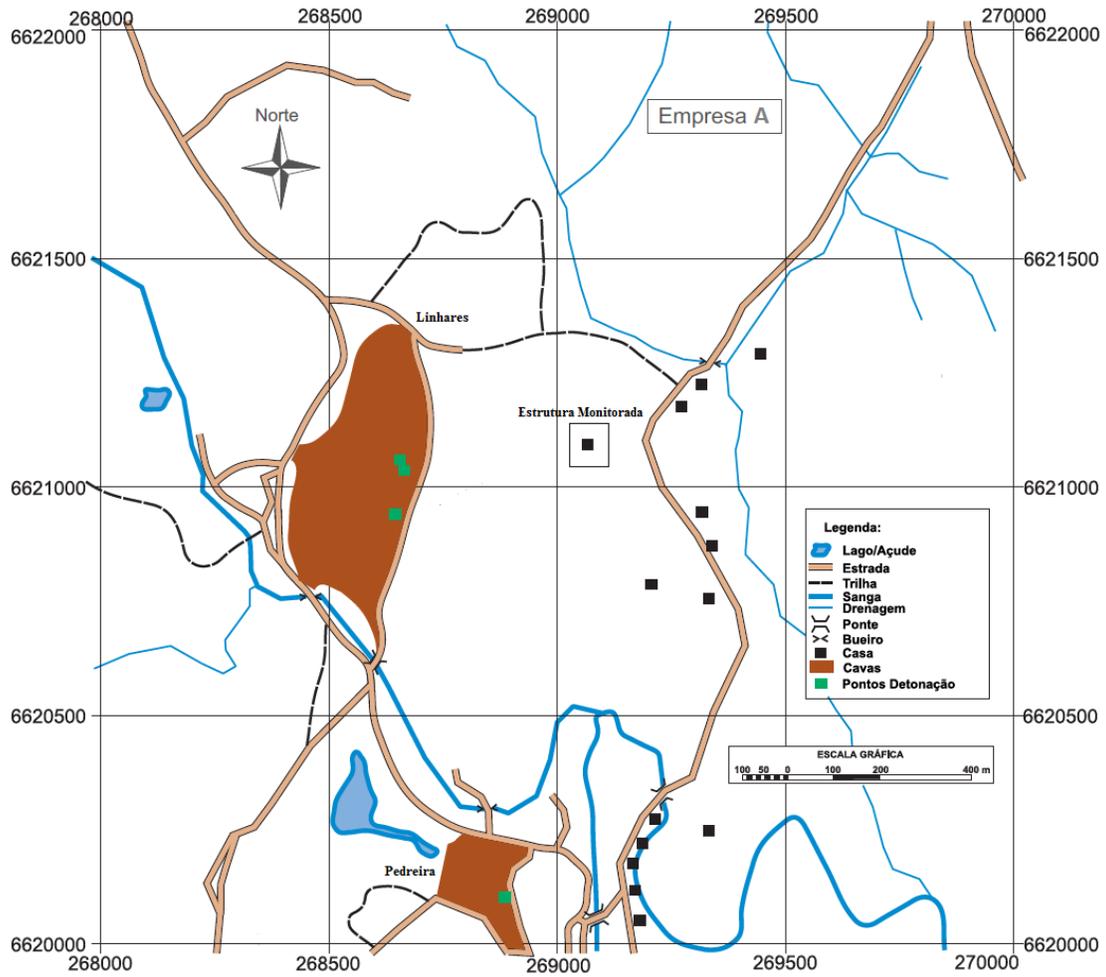


Figura 6: Localização das cavas da empresa A com os pontos de detonação e da estrutura monitorada.

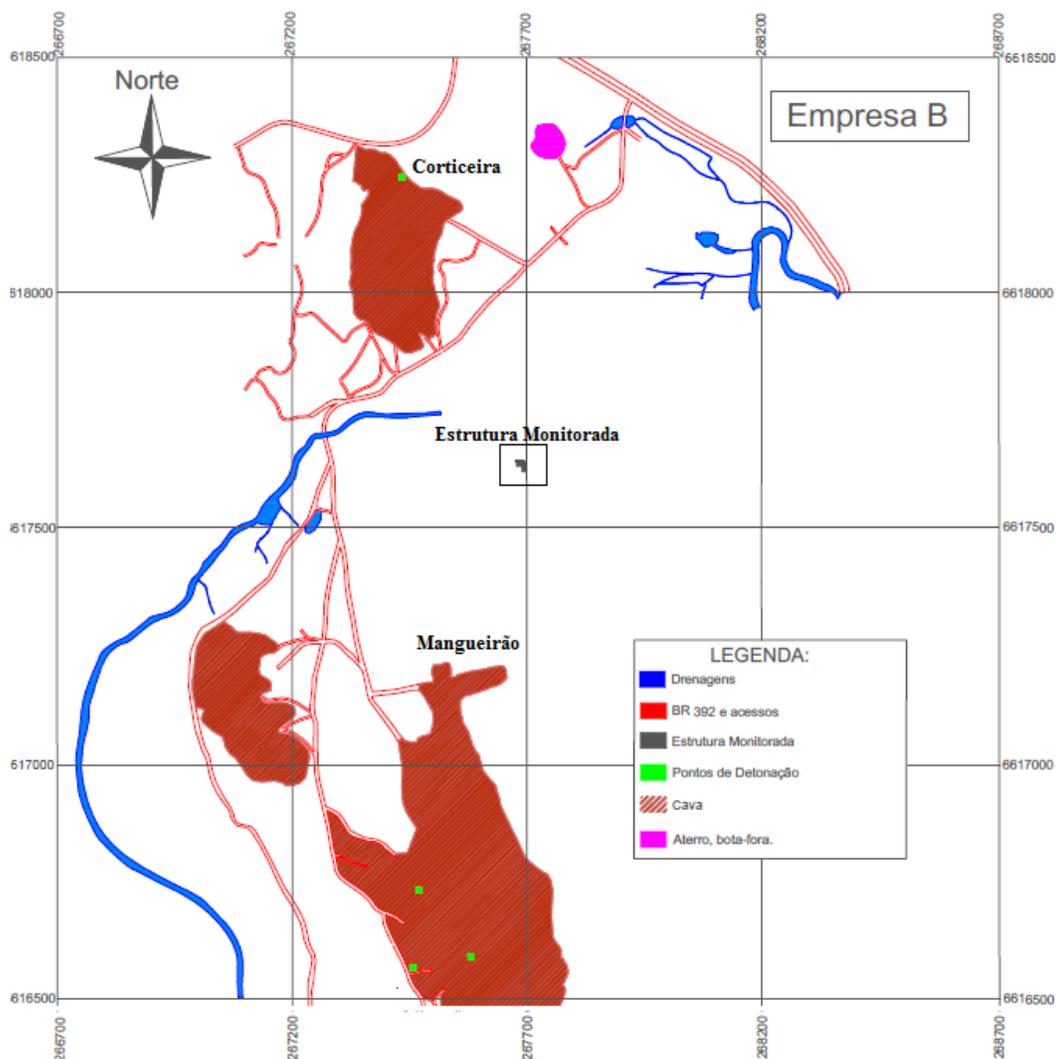


Figura 7: Localização das cavas da empresa A com os pontos de detonação e da estrutura monitorada.

4. Análises dos Resultados

Nas duas estruturas monitoradas os níveis de vibração e ruído não ultrapassaram os limites estabelecidos pela NBR-9653. O maior valor de velocidade de pico de partícula encontrado foi de 10,92 mm/s na estrutura localizada próxima a área de operação da empresa “A” na 1ª campanha. Valor insuficiente segundo a norma brasileira para que possa provocar algum tipo de dano induzido por vibrações a uma estrutura. Assim, as reclamações citadas pelo morador da residência localizada próxima a empresa B não são pertinentes. Esse fato pode ser explicado pelos fatores geológicos do local de estudo, tendo em vista que existe uma grande heterogeneidade e um alto grau de fraturamento do maciço rochoso, fazendo com que as ondas de vibração de partícula sejam atenuadas na medida em que encontram diferentes litologias ao longo do percurso até o ponto monitorado (estrutura). Em virtude desses fatores geológicos e/ou geotécnicos locais do

máciço rochoso estar relacionados com a possibilidade de atenuação das ondas de vibração ao longo do seu percurso, chegou-se a uma equação de atenuação, através dos dados da velocidade de vibração da partícula (PPV), distância ente o ponto de detonação e ponto da estrutura monitorada (DE) e a carga máxima a ser detonada no mesmo instante (Q). Para as ondas sonoras também é possível chegar a essa equação de atenuação, utilizando as mesmas variáveis citadas acima, substituindo apenas a PPV pelo ruído. As formas gerais que mencionam as três variáveis para PPV e ruído estão descritas nas equações 3 e 4 respectivamente:

$$PPV = k(DE)^{-p} \quad (3)$$

$$Ruído = k(DE)^{-p} \quad (4)$$

Onde K e p são os fatores geológicos e/ou geotécnicos que serão encontrados com o gráfico de ajuste linear (Figura 8).

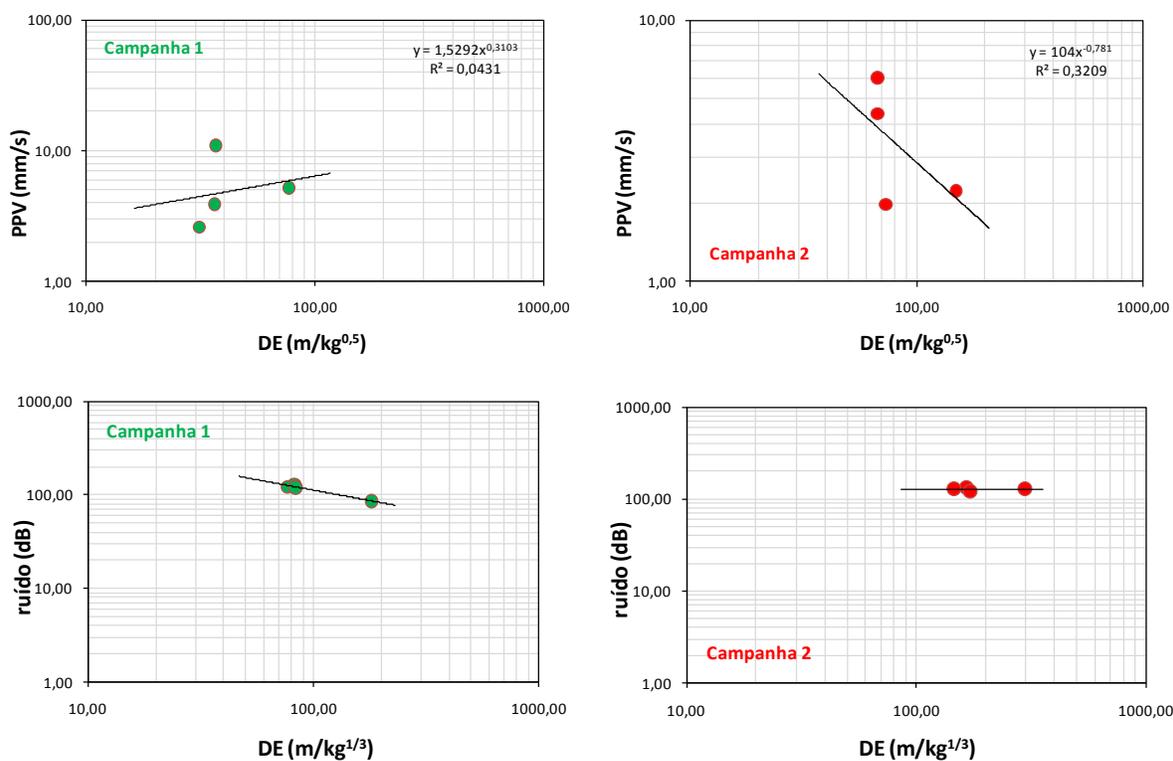


Figura 8: Ajuste linear relacionado com a equação de atenuação das ondas de vibração e ondas sonoras (ruído) extraídas de ambas campanhas de monitoramento.

Como cada campanha teve uma quantidade pequena de monitoramentos os resultados do fator de determinação (R²) ficaram próximos de zero, o que impede que essas equações de

atenuação sejam utilizadas como parâmetros para um modelo de regressão confiável, para os níveis de vibração.

É importante ressaltar que a norma nacional não faz referência ao tipo de estrutura monitorada, como a norma alemã e americana, que antes da definição dos valores máximos de vibração de partícula, dividem e classificam os tipos de estruturas como vimos anteriormente. Ainda assim, adequando as estruturas monitoradas nas campanhas a essas outras duas normas e classificando-as como habitação percebe-se que os valores limites estabelecidos pelas mesmas estão próximos da NBR-9653, portanto os níveis de vibração e ruído encontrados seriam permissíveis na Alemanha (DIN 4150) e Estados Unidos (USBM RI 8507), conforme Figura 9.

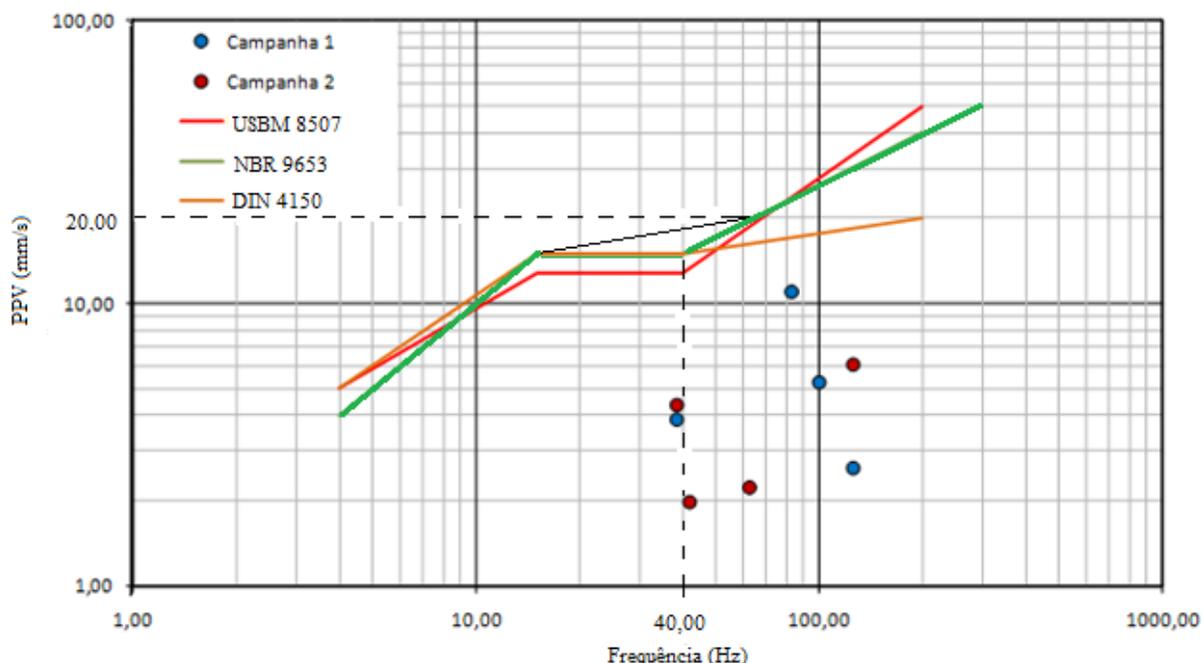


Figura 9: Representação gráfica dos valores de vibração de partícula em relação a frequência, encontrados na estrutura A (campanha 1) e estrutura B (campanha 2). Em verde a linha que estabelece os limites permitido pela NBR-9653, em vermelho os limites da USBM-(RI8507) e em laranja os limites da DIN-4150.

De maneira geral, os níveis de sobrepressão acústica (ruídos) também estão dentro do permitido pela norma (Figura 10). Os valores encontrados não ultrapassam os 134 dB, porém em quase todos os monitoramentos os níveis ficaram bem próximos deste valor, indicando que é preciso aperfeiçoar a metodologia do desmonte, evitando que haja transtorno com a comunidade, pois, os moradores do entorno da área de mineração podem associar apenas os níveis de ruído com os danos causados em suas residências, o que não é justificável.

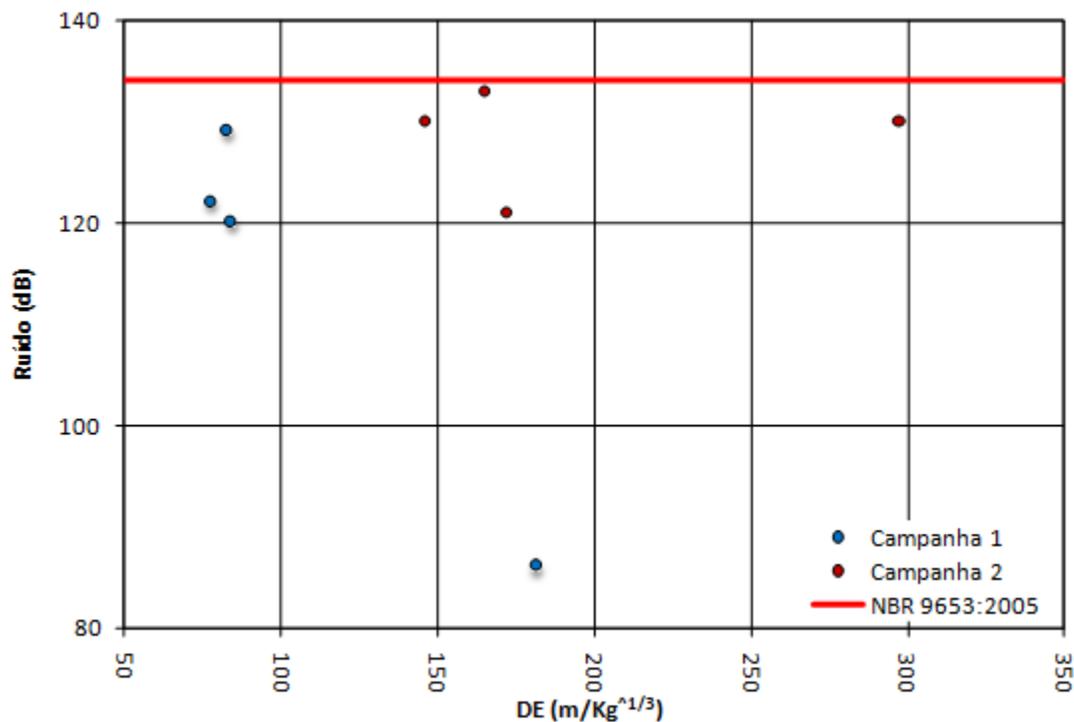


Figura 10: Representação gráfica dos valores de ruído em relação à distância escalonada. A linha em destaque refere-se ao valor limite de 134 dB para níveis de ruído, segundo NBR 9653:2005.

5. Conclusões

Nas duas campanhas realizadas, os valores de velocidade de pico de partícula estão dentro da faixa de frequência estabelecida pela NBR-9653, portanto, considerando esta norma, não existe a possibilidade de ocorrência de danos às estruturas que foram monitoradas nas áreas próximas de operação das duas empresas. Porém, a norma brasileira não faz referência ao tipo de estrutura que esta sendo monitorada, sendo necessário um estudo mais detalhado baseado nos materiais utilizados para a construção das duas residências, e assim, obter o máximo grau de vibração em cada uma delas.

Em relação aos níveis de ruídos encontrados nos monitoramentos, ainda que todos os valores estejam abaixo de 134 dB, valor máximo permitido pela NBR-9653, é necessário ficar atento aos aspectos técnicos que podem diminuir consideravelmente os níveis de ruído nas duas empresas. Fontanelli (2014) em uma campanha de monitoramentos realizados na área de operação da empresa “B”, já havia proposto como uma de suas metodologias, medidas que visassem reduzir os níveis de ruído, como: cobrir com uma camada de material areno-argiloso o cordel detonante exposto em superfície ou a troca do mesmo por tubos de choque. O cordel detonante destrói o tampão, que tem como principal finalidade abafar a sobrepressão acústica dos explosivos. Além disso, recomenda-se utilizar brita angular com diâmetro de 1/10 do diâmetro do furo para o tampão. Medidas simples como essas podem auxiliar de maneira eficaz na atenuação dos níveis de ruído.

É importante ainda mencionar que é necessário um maior rigor no que diz respeito à segurança, tanto dos funcionários quanto da comunidade residente nas proximidades da área de operação das minas, visando o melhor resultado do desmonte de rocha com uso de explosivo. Em especial na empresa “A”, pois se verificou nos dias de monitoramento, que a mesma não utilizou veículo apropriado para o transporte dos explosivos e o alerta de sinal sonoro avisando sobre a detonação, além do horário de detonação estabelecido não foram praticados. Todos esses fatores são mencionados nas recomendações da NBR-9653 sobre conforto ambiental, sendo assim a aplicação dessas medidas é fundamental na relação entre empresa e a comunidade do entorno da mina.

6. Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus por permitir que eu continuasse firme no objetivo de me formar, mostrando o caminho e me apresentando pessoas que foram fundamentais para alcançar esse êxito durante esses anos de faculdade;

A minha mãe Ieda, motivo de exemplo por toda sua história de vida, aos meus irmãos Bruna, João e Bruno, por sempre me apoiarem em todos os momentos. A minha namorada e companheira Lucélia que esteve ao meu lado nessa batalha diária sempre com afeto e carinho;

Aos meus tios Norma e Toniol pelo carinho e incentivo, assim como os primos Rodrigo e Fernanda que proporcionaram momentos de boas discussões e sorrisos;

Ao prof. Luis Eduardo de Souza, pela orientação, disposição e paciência durante todo o projeto;

Aos profs. Raul Neto, Régis Paranhos, Luciana Abichequer, Ítalo Gomes, Delia Del Pilar e Anelise Schimdt e a técnica do laboratório de mineração Ângela Bertoi pela contribuição no meu aprendizado durante o curso;

Aos colegas Caio Cesar, Rogério Rosa, Taís Regina pela ótima convivência e devidas colaborações, e em especial a Jhulien Loreto pela parceria nos estudos, estágio e os momentos de descontração;

Aos tecnólogos de minas Lucas Tolfo e Evandro Gomes, à direção e aos colaboradores das duas empresas, que tornaram possível a realização deste trabalho.

5. Referências Bibliográficas

- ARAÚJO, G.J.L., A Aplicação de Espoleta Eletrônica de Rochas com Explosivos. 13 f. Universidade Federal de Campina Grande, 2002.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR-9653 - **Guia para avaliação dos efeitos provocados pelo uso de explosivos nas minerações em áreas urbanas**. Rio de Janeiro, 2005.
- AZEVEDO, S.F., PATRICIO, J., Vibrações Ambientais. Critérios de Danos e de Incomodidade. Atualidade e Perspectivas Futuras. **Revista Técnica Acústica**. **9p.** (2011).
- BACCI, D.C., Vibrações Geradas Pelo Uso de Explosivos no Desmonte de Rochas: Avaliação dos Parâmetros Físicos do Terreno e dos Efeitos Ambientais. **Tese de Doutorado**. Universidade Estadual Paulista, 2003.
- DALLORA NETO, D., FERREIRA, G. D Controle de Vibrações Geradas por Desmonte de Rocha com Explosivos, Estudo de Caso: Calcário Cruzeiro Limeira (SP). **Departamento de Geologia Aplicada, Instituto de Geociências e Ciências Exatas**, Universidade Estadual Paulista, Campus de Rio Claro. Rio Claro, São Paulo, 2006.
- DALLORA NETO, C. Análise das vibrações resultantes do desmonte de rocha em mineração de calcário e argilite posicionada junto à área urbana de Limeira (SP) e sua aplicação para a minimização de impactos ambientais. 99 f. **Dissertação (Mestrado em Geociências) - Programa de Pós-Graduação em Geociências – Área de Concentração em Geociências e Meio Ambiente**. Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2004.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. NRM-16 – **Operações com explosivos e acessórios**. Rio de Janeiro, 2001.
- DINIS DA GAMA. Ruídos e Vibrações Ligados à Utilização dos Explosivos e Equipamentos. In: 1º Seminário de Auditorias Ambientais Internas. **Divisão de Minas e Pedreiras do Instituto Geológico e Mineiro, Portugal, 16p** (1998).
- DORNELES, F. T. Controle e Previsão de Vibrações e Ruídos Gerados Por Desmonte de Rochas com Explosivos. Universidade Federal do Pampa. **Trabalho de Conclusão de Curso**. Caçapava do Sul, 2013.
- ESTON, S.M., Uma análise de nível de vibração associados a detonações. São Paulo, **125p. Tese (livre docência)** - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 1998.
- FERREIRA, G.C., DAITX, E.C., DALLORA NETO, C. Impactos Ambientais Associados a Desmonte de Rochas com Uso de Explosivos. **UNESP, Geociências, V.25, n.4.p.467-473**, São Paulo (2006).
- FONTANELI, G. Diagnóstico e Modelos de Previsão de Níveis de Ruído e Vibração em Desmontes de Rochas com Explosivos. Universidade Federal do Pampa. **Trabalho de Conclusão de Curso**. Caçapava do Sul, 2014.
- FRANÇA, G.S., VASCONCELOS, M.A.R., CHMPLIGANOND, C.N., TOMÁS, S.S. Estudo das Vibrações Geradas por Detonações na Obra Civil da Eclusa 2 de Tucuruí - **PA RBGF: Revista Brasileira de Geofísica. Vol. 29 (1)**, 2011.

PERSSON, P. A; HOLMBERG, R.; LEE, J. *Rock Blasting and Explosives Engineering*. **Boca Raton, Florida: CCR Press, 531 p.**, 1994.

PONTES, J. C Estudo da Fragmentação em Desmorte com Explosivos na Pedreira Queimadas – **PEDRAQ, 128p.** (1998).

PONTES, J.C Impactos de Vizinhança Proporcionados Pelo Desmorte de Rochas com Uso de Explosivos: Estudo de Caso a Mineração Dantas Gurgel & CIA LTDA, Caicó-RN. 2013. 86 f. **Tese (Doutorado em Recursos Naturais) – Centro de Tecnologia e Recursos Naturais Pós-Graduação em Recursos Naturais**. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2013.

PONTES, J.C; FILHO, J.L.R; SILVA, J.A.L; LIMA, V.L.A. Desmorte de rocha com técnica de produção mais limpa: Uma construção para a saúde do trabalhador. **Estudos Geológicos 22(2), pp. 33-47** (2012).

PORCHER, C. A.; LOPES, R. C; J. A. FONSECA. Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil. Ministério de Minas e Energia, **Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais - CPRM. Cachoeira do Sul, Folha SH. 22-Y-A**. Brasília, Distrito Federal, 2000.

REIL, J.P., *Why people complain about blasting*. *Rock Products*. p.40–44 (1998).

RIBEIRO, M., BROCCHI, P.R., TESSARI, R.I., FIGUEIREDO, F. Geologia da Quadrícula de Caçapava do Sul, Brasil. **DNPM Boletim da Divisão de Fomento da Produção Mineral, 127, pp. 1-232** (1970).

ROSENHAIM, V. L.; MUNARETTI E.; FEIJÓ J. F. L.; KOPPE J. C. Otimização da fragmentação e minimização de vibrações por mudanças no grau de liberdade e sequenciamento do desmorte de carvão no RS. **III Congresso Brasileiro de Carvão Mineral**. Gramado, Rio Grande do Sul, Brasil. 12f (2011).

SÁNCHEZ, L.E. *Ruído y Sobrepression atmosférica*. In: REPETTO, F.L. & KAREZ, C.S (Eds), Aspectos Geológicos de proteccion ambiental. Montevideo: **PNUMA/UNESCO e Instituto de Geociência/UNICAMP, V.1, p.189-196** (1995).

SANTOS, D.G., Estudo das Vibrações Geradas pelo Desmorte de Rochas com Uso de Explosivos e a Sua Relação Com as Fraturas da Pedreira Bangu-RJ. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. **Trabalho de Conclusão de Curso**. Rio de Janeiro, 2009.