

ANTÔNIO CLÁUDIO ANDRADE BRUM
EDUARDO ALMEIDA VENEROSO
EDUARDO TADEU POSSAS VAZ DE MELLO
ROSIANE LUCINDRO E WALLACE REZENDE COSTA

**PERÍCIA TÉCNICA PARA A VERIFICAÇÃO DA INFLUÊNCIA DE
VIBRAÇÕES PROVENIENTES DE DESMONTES COM EXPLOSIVOS
EM MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS EM EDIFICAÇÕES
PRÓXIMAS**

Trabalho de Perícia

Goiânia/GO
2021

**XXI COBREAP- CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE AVALIAÇÕES E
PERÍCIAS - IBAPE/GO**

**PERÍCIA TÉCNICA PARA A VERIFICAÇÃO DA INFLUÊNCIA DE VIBRAÇÕES
PROVENIENTES DE DESMONTES COM EXPLOSIVOS EM MANIFESTAÇÕES
PATOLÓGICAS EM EDIFICAÇÕES PRÓXIMAS**

RESUMO

As mineradoras localizadas próximos a centros urbanos constantemente sofrem com reclamações dos imóveis vizinhos, com fiscalizações de órgãos públicos e com judicializações devido a impactos gerados com a sua operação, principalmente devido a realização de desmontes com explosivos. Nas explosões para o desmonte de rochas, são geradas vibrações induzidas pelo solo, propagação de onda aérea e grandes formações de poeiras. Assim, existem condicionantes para resguardar a sociedade do risco de danos decorrentes da ação das vibrações provenientes do desmonte de rochas. Como não é tecnicamente possível a eliminação da propagação de vibrações, é necessário o controle e monitorização destes fenômenos, com o intuito de garantir os limites impostos pelas normas técnicas e órgãos ambientais. Diante desse cenário, apresentamos este trabalho, cujo objetivo é contribuir para a verificação da influência de vibrações provenientes de desmontes com explosivos em manifestações patológicas e/ou anomalias em edificações posicionadas próximas as mineradoras. Para a realização desse trabalho foi feito um estudo das vibrações provenientes do desmontes por explosivos, vistorias nos imóveis que alegaram problemas devido ao efeito das vibrações e diversos monitoramentos com sismógrafos de engenharia.

Palavras-chave: *Vibrações; Explosivos; Danos em Estruturas; Monitoramento.*

1 INTRODUÇÃO

Os valores limites do nível de vibração do terreno não dependem apenas dos danos que a velocidade de vibração de partícula pode causar nas construções civis, mas também do tipo de construção em si, tendo sido provado que, com frequência, a vibração gerada por explosivos é apenas o instante detonador de um processo de instabilidade atribuído a outras causas, como recalque, dilatação térmica, insuficiência de material, erro de cálculo de projeto, etc. (FORNARO, 1980).

Também é importante considerar as características próprias das vibrações, ou seja, a frequência, a repetitividade e a duração do fenômeno. Pode-se dizer que um edifício sofre danos, se os impulsos dinâmicos provocados pelas vibrações sobrepõem-se aos impulsos estáticos, levando a uma superação das condições de resistência da estrutura. Quando não é possível, partindo apenas das medidas de velocidade, atingir os valores de deslocamento e os impulsos, é necessário recorrer-se a tabelas empíricas de danos, correlacionando, de vários modos, as características mais evidentes do fenômeno. Esse é o caminho sugerido pela maior parte das normas (FORNARO, 1980).

1.1 Desmorte

O desmorte consiste na fragmentação e desagregação de um maciço rochoso previamente existente.

Este é conseguido introduzindo tensões no terreno que, quando são superiores às tensões de ruptura do material, originam a sua fracturação e consequente desagregação. Promove-se o desmorte quando se pretende a criação de um vazio num maciço rochoso, bem como quando é necessário a extração de uma substância útil existente na rocha tendo em vista o seu beneficiamento.

O desmorte de maciços rochosos é realizado essencialmente em duas situações:

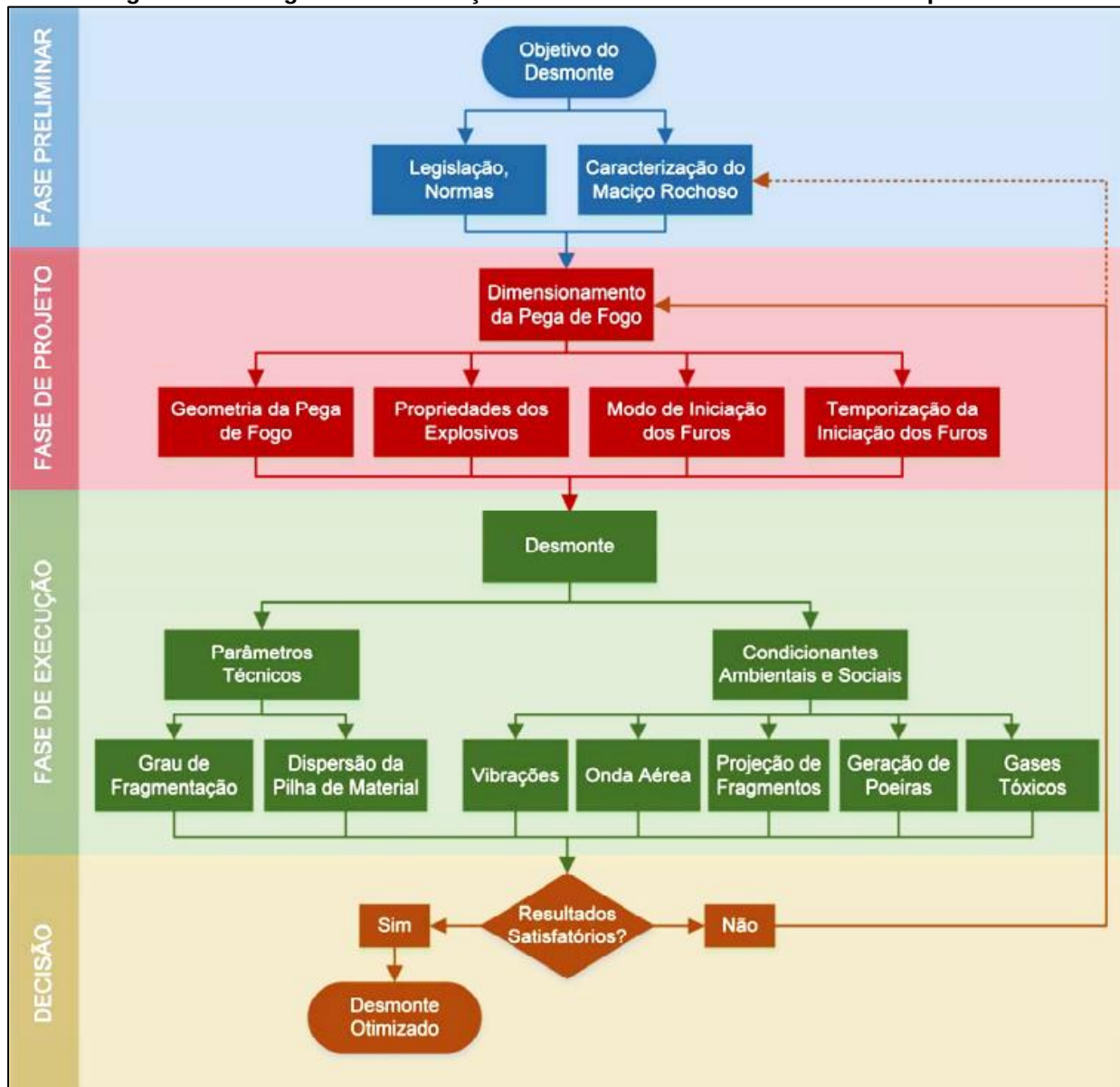
- ✓ Operações mineiras;
- ✓ Obras geotécnicas.

1.2 Desmorte com recurso de explosivos

Os critérios para a escolha do método de desmorte devem ter em conta o propósito para o qual vão ser executados, bem como a escavabilidade do maciço. A aplicação de explosivos em desmorte é o método mais eficiente quando o maciço é bastante competente, ou seja, quando o recurso a meios mecânicos não é exequível em tempo útil e a um custo aceitável. Como contrapartida, é o método que acarreta mais impactes durante e imediatamente após a sua execução.

Para a execução de um desmorte, é necessário estudar as condicionantes, com o intuito de calibrar as variáveis, como se pode analisar na Figura 1.

Figura 1 - Fluxograma da Execução de um Desmonte com Recurso a Explosivos.



Fonte: GOMES, JOSÉ PEDRO MOREIRA ANDRADE. Metodologia para análise de vibrações provocadas por desmontes com recurso a explosivos.

2 FENÔMENO VIBRATÓRIO

Do ponto de vista mecânico, uma vibração é o movimento oscilatório de uma partícula em torno da sua posição de equilíbrio, provocado por um impulso. Este impulso é gerado, geralmente, por forças exteriores, que são transmitidas pelas partículas envolventes. A vibração pode ser decomposta num somatório de ondas periódicas elementares, cuja natureza depende do meio físico em que se propagam.

As vibrações são uma resposta elástica do terreno, quando este é sujeito à passagem de uma onda de tensão, com origem direta ou indireta numa solicitação dinâmica de origem artificial ou natural (BERNARDO, 2004).

A detonação de uma carga explosiva confinada induz no terreno uma quantidade considerável de energia sob a forma de pressão. Esta, por sua vez, gera tensões concêntricas ao furo, que são responsáveis pela formação de vibrações.

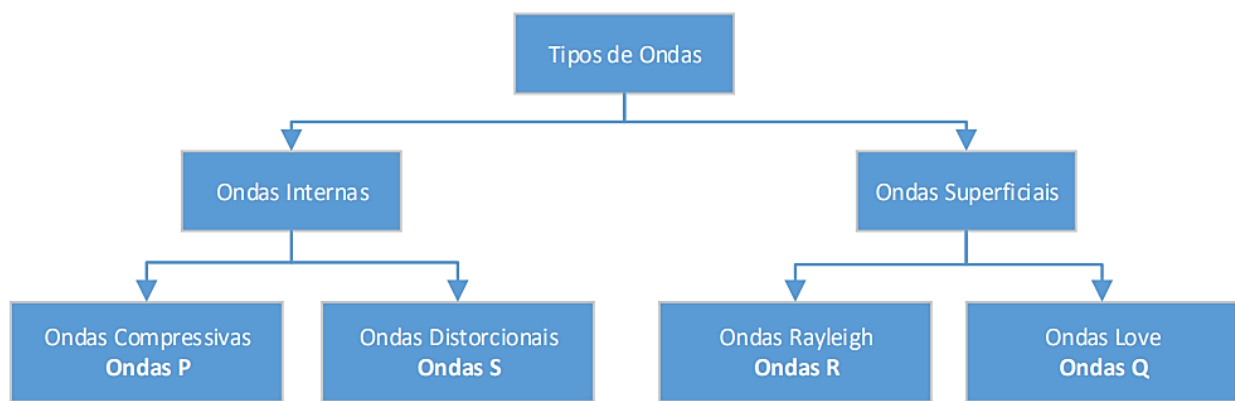
2.1 Caracterização de uma onda

As vibrações produzidas por desmontes podem ser, de uma ótica simplificada, analisadas como ondas sinusoidais, que se propagam radialmente em torno da pega de fogo. Quando estas se propagam em regime elástico, não existe movimento irreversível de material, verificando-se apenas a transferência de energia de um ponto para outro.

2.2 Tipos de onda

As vibrações elásticas que se propagam no terreno são compostas por ondas com diferentes características, as quais aliadas à heterogeneidade dos meios de propagação, conferem à vibração um padrão pseudoaleatório. Estas podem ser divididas em dois grupos, como se explicita na Figura 2. Esta divisão é realizada com base no tipo de propagação.

Figura 2 - Tipos de ondas.



Fonte: GOMES, JOSÉ PEDRO MOREIRA ANDRADE. Metodologia para análise de vibrações provocadas por desmontes com recurso a explosivos.

Importa sublinhar que as características da propagação das ondas sísmicas no terreno dependem das particularidades do meio onde se propagam. O tipo de material, bem como a existência de heterogeneidades no terreno são os fatores que representam maior importância na alteração no modo de propagação à medida que as ondas progridem no meio.

As velocidades de propagação das ondas são variáveis, assumindo valores consoante o tipo de onda bem como o tipo de meio onde se propagam.

A Tabela 1, compara as velocidades de propagação, com base nos parâmetros atrás enunciados:

Tabela 1 - Velocidades de propagação das Ondas P e S em diferentes meios; adaptado de (Stanford Rock Physics Laboratory).

Meios de Propagação	Ondas P	[m/s]	Ondas S	[m/s]
Solo vegetal	300	700	100	300
Seixos	300	700	100	300
Areias secas	400	1200	100	500
Areias saturadas	1500	2000	400	600
Argila saturada	100	2500	200	800
Xisto fino saturado	100	2500	200	800
Margas	200	3000	750	1500
Arenitos porosos saturados	2000	3500	800	1800
Calcário	3500	6000	2000	3300
Giz	2300	6000	1100	1300
Sal-gema	4500	5500	2500	3100
Anidrite	4000	5500	2200	3100
Dolomite	3500	6500	199	3600
Granito	4500	6000	2500	3300
Basalto	5000	6000	2800	3400
Gneisse	4400	5200	2700	3200
Carvão	2200	2700	1000	1400
Água	1450	1500		
Gelo	3400	3800	1700	1900
Óleo	1200	1250		

Fonte: GOMES, JOSÉ PEDRO MOREIRA ANDRADE. Metodologia para análise de vibrações provocadas por desmontes com recurso a explosivos.

- Ondas Internas

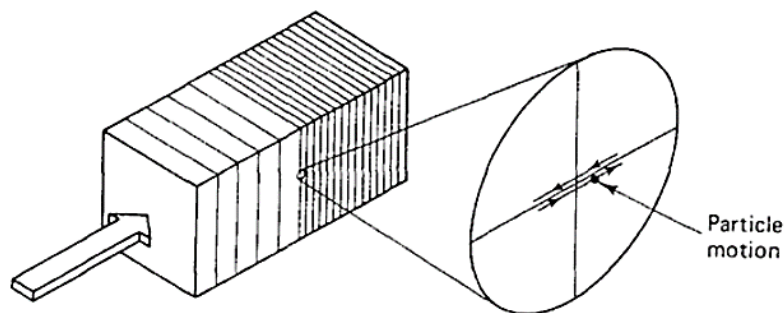
As ondas internas são caracterizadas por se propagarem esfericamente no interior da massa rochosa e induzirem nas partículas do solo movimentos unidirecionais. Estas assumem uma maior importância, ao nível da energia libertada, na proximidade da fonte que as gera. As ondas internas são compostas por ondas compressivas, denominadas doravante por ondas P, e por ondas transversais, ou ondas S.

- ✓ Ondas P

As ondas P propagam-se induzindo no terreno uma deformação longitudinal na direção da sua propagação, até intersectarem outro meio onde vão ocorrer alterações, nomeadamente, no surgimento de ondas de corte e de superfície. Para além de se tratarem das ondas com maior velocidade de propagação, estas são ainda caracterizadas pelas suas pequenas amplitudes e altas frequências.

A Figura 3 demonstra o movimento da onda P no terreno.

Figura 3 - Ondas P



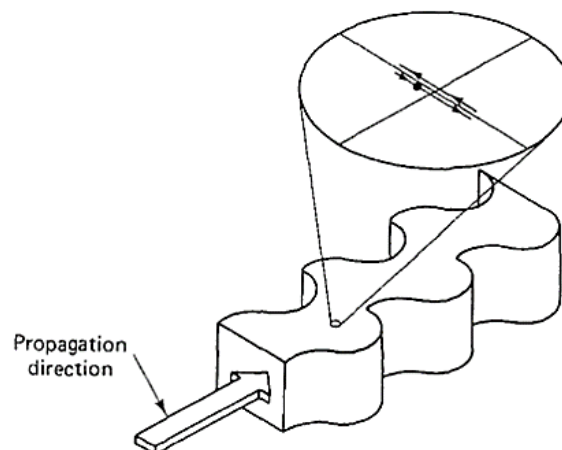
Fonte: DOWDING, 1985 apud GOMES, 2016.

- ✓ Ondas S

As ondas S geram no terreno uma deformação transversal à direção da sua propagação. A sua velocidade de difusão situa-se entre 60-70% da velocidade das ondas P. Estas apenas se propagam em corpos sólidos uma vez que os fluidos não suportam tensões de corte.

A Figura 4 demonstra o movimento da onda-S no terreno.

Figura 4 - Ondas S



Fonte: DOWDING, 1985 apud GOMES, 2016.

✓ Ondas Superficiais

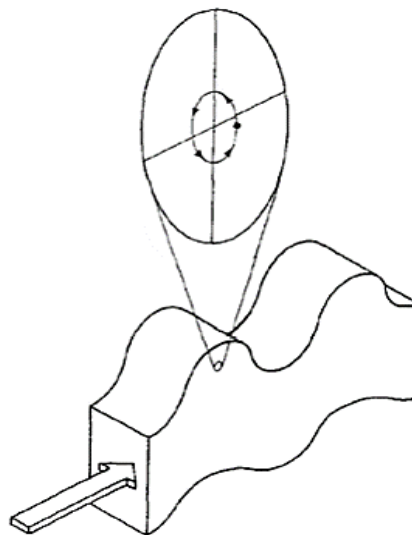
As ondas superficiais são caracterizadas por se propagarem nas interfaces do terreno, como por exemplo nas falhas, contactos geológicos e na superfície do terreno, induzindo vibrações bidimensionais. Na génese destas ondas está a transformação das ondas internas quando intersectam essas interfaces decorrentes da anisotropia nos materiais. São caracterizadas como tendo grande amplitude e duração, bem como baixa frequência. Assim sendo, tendencialmente estas gozam de um carácter mais destrutivo, e adquirem uma maior importância com distâncias de transmissão maiores. As ondas superficiais mais importantes são as ondas *Rayleigh*, denominadas doravante por ondas R, e as ondas Love, ou ondas Q.

✓ Ondas R

As ondas R propagam-se elipticamente em planos verticais, tendo o mesmo sentido que a direcção de propagação. A amplitude destas ondas é mais elevada do que as ondas internas, contudo, esta diminui rapidamente com o aumento da distância à interface. A velocidade de difusão destas ondas é aproximadamente 90% da velocidade das ondas S.

A Figura 5 demonstra o movimento da onda-R no terreno.

Figura 5 - Ondas R (Dowding, 1985).



Fonte: DOWDING, 1985 apud GOMES, 2016.

✓ Ondas Q

As ondas Q propagam-se em planos horizontais, sendo o tipo de oscilação elíptico. Tal como as ondas R, estas possuem amplitudes elevadas e frequências baixas, diferindo apenas na velocidade de propagação, que é ligeiramente superior.

• Reflexão e Refracção de Ondas

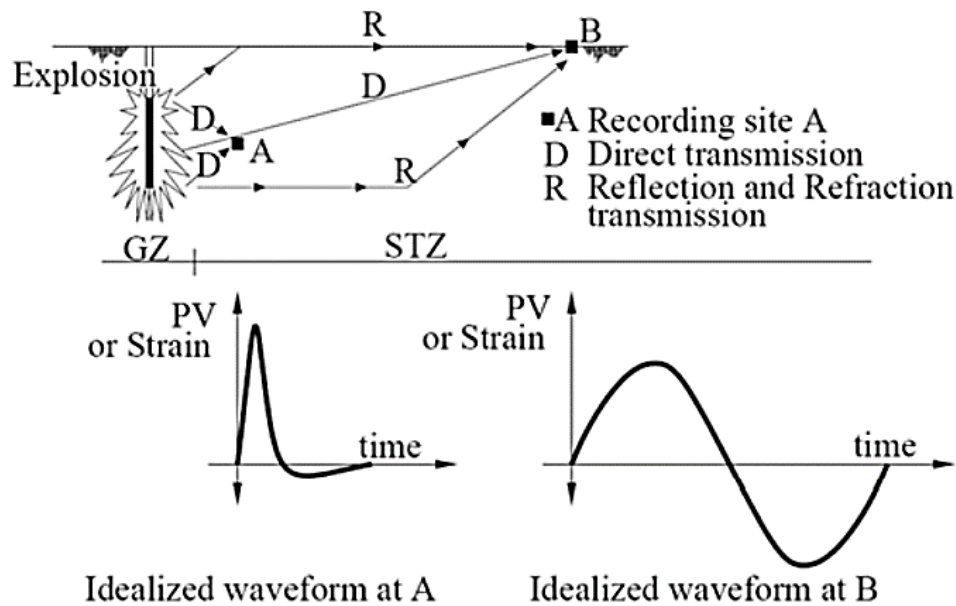
A heterogeneidade do meio de propagação de uma vibração conduz à alteração do fenómeno vibratório.

Quando é realizada a detonação da carga explosiva, ondas de tensão propagam-se em todas as direcções.

Na proximidade do furo, a vibração aproxima-se a um impulso de *Dirac*. Com o aumento da distância ao furo, a vibração adquire a forma sinusoidal, devido à combinação das propagações directa, refletida e refratada (DOWDING, 1985).

Na Figura 6 compara-se a forma das vibrações, de acordo com a localização do transdutor.

Figura 6 - Idealização da forma da onda num desmorte (Silva-Castro, 2012).



Fonte: DOWDING, 1985 apud GOMES, 2016.

3 PRINCIPAIS NORMAS E ESTUDOS EXISTENTES

No Brasil a ABNT NBR 9653 (ABNT,2018), estabelece os procedimentos para avaliação dos efeitos provocados pelo uso de explosivos nas minerações em áreas urbanas.

3.1 ABNT NBR 9653

O objetivo da ABNT NBR 9653 (ABNT,2018) é fixar a metodologia para reduzir os riscos inerentes ao demonte de rocha, com o uso de explosivos em indústria de minerações e construção em geral, estabelecendo parâmetros a um grau compatível com a tecnologia disponível. Assim, proporciona segurança das populações vizinhas, referindo-se a danos estruturais e procedimentos recomendados quantos à resposta humana.

No item 5 dessa norma são estabelecidos os requisitos de avaliação para operações de desmorte de rocha por explosivos.

Nesse item também é informado que “em operações de desmorte de rocha por explosivos, devem ser observadas as condições estabelecidas em 5.1 a 5.3:

- 5.1 Ultralançamento:

O ultralançamento não pode ocorrer além da área operacional do empreendimento, respeitadas as normas internas de segurança referentes à operação de desmorte;

- 5.2 Pressão acústica:

A pressão acústica, medida além da área de operação, não pode ultrapassar o valor de 100Pa, o que corresponde a um nível de pressão acústica de 134 dBL pico;

- 5.3 Velocidade de vibração de partícula de pico:

Os riscos de ocorrência de danos induzidos pelas vibrações transmitidas pelo meio físico devem ser avaliados levando-se em consideração a magnitude e a frequência de vibração de partícula.

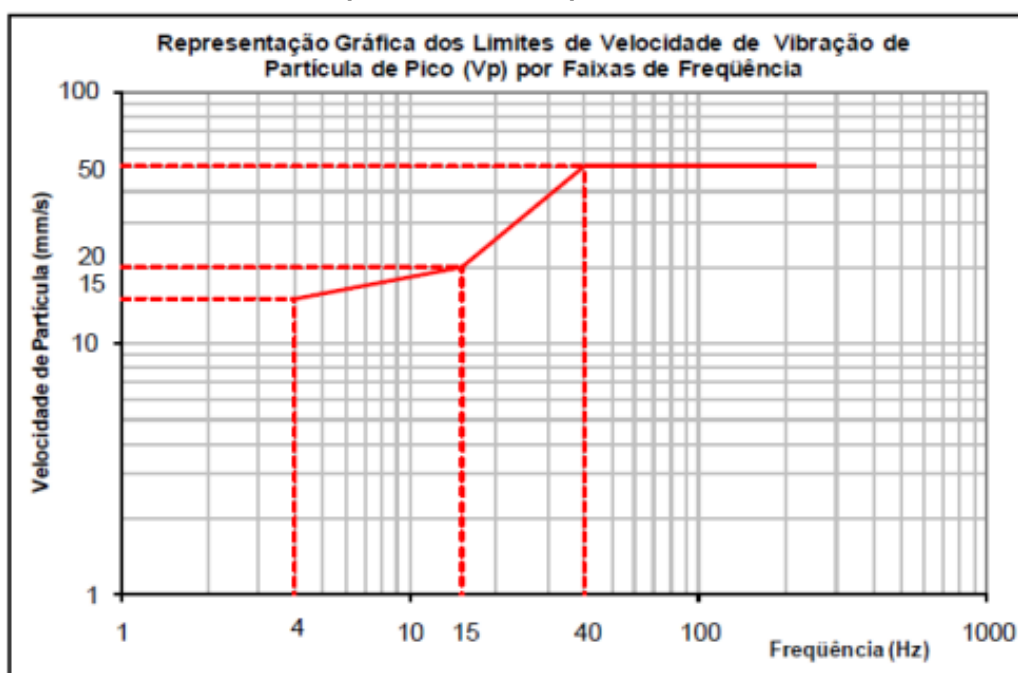
Os limites para velocidade de vibração de partícula de piso acima dos quais podem ocorrer danos induzidos pelas vibrações transmitidas pelo meio físico são apresentados numericamente na Tabela 2 e graficamente na Figura 7.

Tabela 2 - Limites de velocidade de vibração de partícula de pico por faixas de frequência.

Faixa de Frequência	Limite de Velocidade de vibração de partícula de pico
4 Hz a 15 Hz	Iniciando em 15 mm/s aumenta linearmente até 20 mm/s
15 Hz a 40 Hz	Acima de 20 mm/s aumenta linearmente até 50 mm/s
Acima de 40 Hz	50 mm/s
NOTA - Para valores de frequência abaixo de 4 Hz deve ser utilizado como limite o critério de deslocamento de partícula de pico de no máximo 0,6 mm (de zero a pico)	

Fonte: ABNT, 2018.

Figura 7 - Representação gráfica dos limites de velocidade de vibração de partícula de pico por faixas de frequência.



Fonte: ABNT, 2018.

3.2 CETESB / D7.013 (fev/2015)

A CETESB estabeleceu critérios de avaliação de problemas ambientais através da norma interna D7.013, de 1992, na qual se fixam as condições exigíveis para a atividade de mineração a céu aberto que utiliza explosivos no desmonte do minério, no que se refere ao controle de poluição e à conservação do meio ambiente. Esse critério avalia o incômodo gerado à população e não se refere aos danos em estruturas civis, como a NBR 9653.

A velocidade resultante de vibração de partícula é calculada do mesmo modo que na norma NBR 9653, a qual estabelece como valor máximo de V_p 3mm/s, medido na componente vertical.

Quando a medição for realizada com utilização de instrumentos cujos resultados sejam a integração das três componentes, o valor máximo permitido para a velocidade de partícula é de 4,2mm/s, para que não haja incômodo à população. Em ambos os casos, a medição deve ser feita fora dos limites da propriedade da mineração.

Quanto à instalação dos sensores, estes devem ser fixados rigidamente no solo, a uma distância inferior a 10m da edificação mais atingida.

3.3 Norma Norte- Americana – USBM (RI 8507) e OSMRE

O *Bureau of Mines* americano sempre se destacou como pioneiro nos estudos das vibrações, tendo como preocupação o estabelecimento de um limite de segurança que não causasse danos estruturais em construções civis.

A maioria dos seus trabalhos correlaciona os parâmetros deslocamento, frequência, velocidade máxima de partícula e distância segura com a energia liberada na detonação.

Duvall e Fogelson (1962) concluíram que danos em residências são proporcionais à velocidade de vibração de partícula e que danos maiores (queda de reboco ou rachaduras) podem ser esperados a partir de V_p de 190mm/s (7,6pol/s).

Já danos menores (trincas no reboco, abertura de rachaduras preexistentes) podem ser esperados a partir de V_p de 140mm/s (5,6pol/s) e que 50mm/s (2,0pol/s) representa um valor razoável de separação entre zona de segurança e uma zona de prováveis danos.

O Boletim 656, publicado pelo *Bureau of Mines* em 1971, intitulado "*Blasting Vibrations and Their Effects of Structures*", propôs uma velocidade máxima de partícula de 50mm/s (2,0pol/s) como o nível de segurança para as construções civis. A probabilidade de danos a uma estrutura residencial varia conforme aumenta ou diminui, em proporção, o nível de vibração acima ou abaixo de 50mm/s.

O critério atual de danos desenvolvido pelo *United States Bureau of Mines* (USBM) baseia-se nas pesquisas realizadas em minerações a céu aberto e publicadas em 1980 no *Report of Investigation RI 8507*, intitulado "*Structure Response & Damage Produced by Ground Vibration from Surface Mine Blasting*" (*Siskind et al.*, 1980). Nesse trabalho, foi constatado que existe um sério problema com a ressonância estrutural, originada em resposta à vibração de baixa frequência propagada no terreno, apresentando como resultado aumentos em deslocamentos e deformações, o que veio reforçar a idéia de que danos podem ser ocasionados pela frequência.

Os limites de danos adotados no RI 8507 foram definidos para "danos cosméticos do tipo mais superficial", ou seja, fissuras internas que se desenvolvem em todas as residências, independentemente das vibrações geradas pela detonação de explosivos.

Os níveis de vibração de partícula seguros foram definidos como "níveis com improbabilidade de produzir fissuras no interior de residências ou quaisquer outros danos". Esses níveis são apresentados na Tabela 1 e são definidos como limites conservativos. Os valores foram muito criticados pela indústria das pedreiras por serem considerados desfavoráveis à produção.

O *United States Bureau of Mines* (USBM) e o *Office for Surface Mining Reclamation* (OSRME) estabeleceram dois critérios para o controle dos danos provocados pelas vibrações no terreno.

Os dois critérios, mostrados na tabela 3, constituem uma referência de velocidade máxima de vibração de partícula (V_p) em função da frequência.

Tabela 3 - Níveis seguros de velocidades de vibração da partícula para estruturas civis.

Tipo de estrutura	Vp (mm/s)	
	A baixas frequências s f < 40 Hz	A altas frequências s f > 40 Hz
Casas modernas – paredes interiores pré-moldadas em gesso, sem revestimento	19	50
Casas velhas – paredes interiores com gesso ou revestimento de madeira	12,7	50

Fonte: Bacci, 2000, adaptado de Siskind et al., 1980.

3.4 Norma Australiana

Os critérios australianos para limitar os níveis de vibração a partir de desmontes com explosivos em rochas são baseados nas especificações dos seguintes órgãos:

- Comissão Estadual de Controle da Poluição (SPCC) do Manual de Controle de Perturbação Ambiental (*New South Wales*) – 1980;
- Conselho Ambiental Australiano (AEC) - Norma AS2187, Parte 2 de 1983 - uso de explosivos;
- U.S. *Bureau of Mines* (USBM) - Relatório RI 8485.

O critério adotado pela SPCC para velocidade de vibração da partícula era o de não exceder 7mm/s e as detonações deveriam ser realizadas no período das 9 às 15 horas, para se evitarem inversões térmicas, sendo requisitado o monitoramento de todos os desmontes de um empreendimento.

A norma AS2187 (1983) adotou critérios referentes ao pico de velocidade de vibração da partícula, medido no terreno próximo à fundação da estrutura, como mostra a Tabela 4.

Tabela 4 - Valores máximos de velocidade de vibração da partícula, adotados pela Norma AS2187, segundo os tipos de construções civis

Tipos de construções	Velocidade máxima de vibração de partícula (mm/s)
Construções históricas e monumentos de especial valor ou significado	2
Casas e prédios residenciais de baixa altura	10
Prédios comerciais ou industriais ou estruturas de concreto armado ou ferro	25

Fonte: Bacci, 2000, adaptado de Scott, 1996.

A norma foi reeditada em 1993, não considerando limites de V_p para as construções históricas e monumentos, mas ressaltando que esses requerem considerações especiais, muitas vezes resultado em medições adicionais na sua própria estrutura.

Em abril de 1986, o *Environmental Noise Control Committee of the Australian Environmental Council* (AEC) editou um documento intitulado "*Draft Technical Basis for the Control of Noise and Vibration from Blasting*", sugerindo as seguintes restrições:

- Nível máximo permitido de velocidade de vibração da partícula de 5mm/s;
- O nível máximo pode ser excedido em 5% dos desmontes em um período de 12 meses, não ultrapassando nunca o valor de 10mm/s;
- Recomenda o valor de 2mm/s para o controle das vibrações;
- Os desmontes são permitidos das 9 às 15h, de segunda à sábado, sendo proibidos nos domingos e feriados;
- Os desmontes não podem ocorrer mais de uma vez ao dia, excetuando-se desmontes secundários;
- As restrições quanto ao tempo e à frequência dos desmontes não se aplicam a locais onde os efeitos das vibrações não são perceptíveis e a minas subterrâneas metalíferas.

3.5 Norma Alemã (DIN 4150)

As três classes de edifício definidas pela Norma Alemã (DIN 4150) são:

- Edifícios estruturais;

- b) Habitações;
- c) Monumentos e construções delicadas.

As frequências são analisadas em três intervalos, ou seja, valores menores que 10Hz, valores entre 10-50Hz e valores entre 50-100Hz. A norma prevê que, para frequências acima de 100Hz, a estrutura suporta níveis altos de vibração.

Os valores de velocidade de vibração de partícula definidos variam de 3mm/s, no caso de monumentos e construções delicadas com frequência inferior à 10Hz, até 50mm/s, no caso de estruturas industriais com frequência entre 50 -100Hz.

Na avaliação dos danos estruturais causados pelas vibrações do terreno, os valores limites de V_p admitidos para diversos tipos de construções, em função da frequência, são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Valores admitidos pela norma alemã DIN 4150 para danos em edifícios

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

Fonte: Bacci, 2000, adaptado de Berta, 1985.

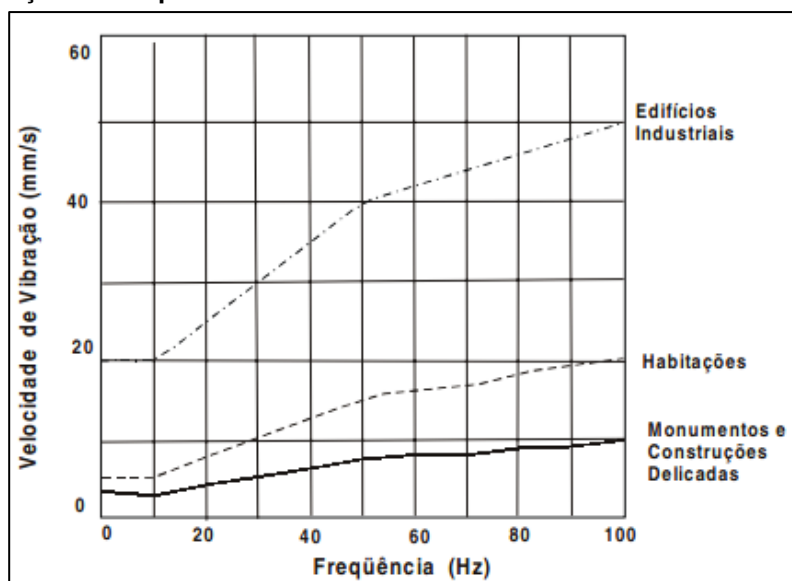
Valores de frequências acima de 100Hz podem ser aceitos nas partes mais altas dos edifícios. Outros valores, medidos abaixo dos limites especificados anteriormente, são considerados não danosos à estrutura civil.

Essa norma é aceita em toda comunidade européia como norma-padrão.

Muitos países europeus desenvolveram suas próprias normas, baseando-as na DIN 4150 ou relacionando-as a ela.

A Figura 8 representa graficamente os valores de V_p dados pela norma alemã DIN 4150.

Figura 8 - Norma alemã DIN 4150. Estão representados os valores de velocidade de vibração em mm/s em função da frequência em Hz e das características estruturais dos edifícios.



Fonte: Fonte: Bacci, 2000, modificado de Berta, 1985.

3.6 Norma Italiana (UNI 9916)

Trata-se de uma norma de 1991, referente à metodologia de indagação e, portanto, não estabelece valores limites.

A norma fornece um guia para a escolha do método apropriado de medida, de tratamento de dados e de avaliação dos fenômenos vibratórios produzidos nos edifícios, com os seguintes objetivos:

- a) Avaliar se o tipo de vibração pode afetar a estrutura do edifício;
- b) Verificar a presença ou não de danos estruturais atribuídos à superação dos limites de vibração;
- c) Avaliar o comportamento do edifício quando submetido a cargas dinâmicas acidentais, como, por exemplo, terremotos.

A norma tem um caráter geral e não se refere aos efeitos das vibrações. Considera os fenômenos vibratórios não necessariamente produzidos por desmontes, com cargas explosivas caracterizadas por gamas de frequência compreendidas entre 0,1 e 150Hz, levando em conta que fenômenos vibratórios, caracterizados por frequências superiores a 150Hz, não influenciam significativamente a resposta de um edifício qualquer à vibração.

Os parâmetros seguidos para a caracterização das vibrações são:

- a) Duração e amplitude da vibração;
- b) Campo de frequência de interesse;
- c) Características dimensionais do elemento estrutural do qual é avaliada a resposta, em função do tipo de edifício, da interação solo-rocha, das características do terreno e das frequências naturais.

Em relação ao posicionamento do aparelho de registro, a norma sugere a verificação do nível de vibração na base da estrutura, a qual é escolhida em função da fundação, ou, na ausência desta, na base do muro de sustentação. É aconselhável, além dos registros das três componentes ortogonais entre si, o registro do vetor resultante da velocidade de vibração.

Para edifícios com menos de quatro andares, sugere-se dispor os geofones próximo à fundação e no último andar, enquanto que, para edifícios com mais de quatro andares, é aconselhável colocar os geofones em andares intermediários. Os geofones devem estar fixados sobre a estrutura, evitando-se o uso de suportes, de modo que se permita a reprodução fiel do fenômeno vibratório, impedindo alterações atribuídas ao sistema geofone-superfície de medição.

A norma italiana não apresenta novidades e segue os conceitos básicos e limites da DIN 4150.

3.7 Norma Suíça (SN 640312 a)

Antes de 1992, a Suíça adotava uma norma referente aos valores para salvaguardar a integridade dos edifícios; referia-se ela à componente vertical da velocidade, medida na fundação dos edifícios.

Os limites de intensidade de velocidade de vibração de partícula variavam de 25mm/s para museus até 100mm/s para construções em concreto armado.

Estudos posteriores introduziram a frequência como parâmetro a ser avaliado, resultando na elaboração da Tabela 3, na qual o tipo de estrutura e o tipo de fonte de vibração são atualmente considerados.

A norma introduzida em abril de 1992 abrange os efeitos nos edifícios, acrescentando critérios de avaliação dos danos materiais, mantendo, no entanto, os valores de V_p mostrados na Tabela 6.

Tabela 6 - Valores sugeridos pela norma suíça. Os valores de Vp foram medidos para fontes de vibração de tipo ocasional.

Tipos de estrutura	Frequência (Hz)	Velocidade máxima de vibração da partícula (mm/s)
I. Edifícios de concreto armado	10-60	30
	60-90	40
II. Construções normais de edifícios	10-60	18
	60-90	18-25
III. Habitações	30-90	12-18
IV. Edifícios delicados	10-60	8
	60-90	8-12

Fonte: Bacci, 2000, adaptado de Borla, 1993.

Essa norma, utilizada mais para escavações em subterrâneo, no período diurno, diferencia as classes de edifícios, as classes de repetitividade do fenômeno (ocasional, freqüente e permanente) e os campos de freqüência de velocidade da partícula. Acrescenta a distinção dos efeitos das vibrações, nas pessoas, no terreno e nos aparelhos que se encontram nos edifícios e propõe, ainda, uma atualização da metodologia de coleta de dados e dos critérios de determinação e avaliação dos danos materiais.

3.8 Norma Portuguesa (NP-2074)

Datada de 1983, a norma portuguesa segue, em linhas gerais, a norma alemã DIN 4150, determinando, em particular, um critério de controle dos parâmetros característicos das vibrações produzidas em minerações e seus efeitos nos edifícios.

Os valores limites são estabelecidos de acordo com as características das condições da fundação, do tipo de construção e das forças dinâmicas.

Esteves (1994) propôs, além da consideração das características anteriormente mencionadas, a consideração da freqüência. O parâmetro usado para avaliar o nível de vibração é a soma vetorial das três componentes ortogonais da velocidade de partícula, ou simplesmente tomando-se o valor máximo de cada eixo.

O resultado desse estudo é mostrado na Tabela 7.

Tabela 7 - Limites dos valores de vibração de partícula em mm/s.

	Tipo de solo		
	Solos incoerentes (areias inconsolidadas)	Solos de consistência muito dura, dura e média; solos compactos incoerentes	Solos de alta coerência e rochas
Velocidade da onda	$C_p < 1000 \text{ m/s}$	$1000 < C_p < 2000 \text{ m/s}$	$C_p > 2000 \text{ m/s}$
Tipos de construção	< 10	Frequência 10 a 40	> 40
Construções que requerem cuidados especiais (monumentos históricos, museus, prédios muito altos)	3	5	10
Construções normais (habitações)	5	10	20
Construções reforçadas (prédios a prova de terremotos)	15	30	60

Fonte: Bacci (2000), adaptado de Esteves, 1994.

3.9 Norma Sueca (SS4604866)

A norma sueca foi aprovada em 1989 e revisada em 1991.

Essa norma prevê a medida da componente vertical do vetor de velocidade de vibração da partícula como parâmetro de controle das vibrações nos edifícios (Borla, 1993).

Os níveis estipulados não consideram, entretanto, a perturbação nos seres humanos ou possíveis danos em aparelhos sensíveis.

Em particular, o valor da velocidade de medido deve resultar menor que a velocidade V calculada como segue:

$V = V_0 F_k F_d F_t$ (2) onde:

V_0 = velocidade em mm/s, extraída de uma tabela, variando entre 18 e 70mm/s.

F_k = tipo de construção (por exemplo: edifício industrial, habitação, edifício histórico, etc.) e do material usado na construção.

F_d = distância entre o ponto de detonação e a captação.

F_t = ambiente de trabalho (galeria, cava, etc.)

Todos os coeficientes definidos anteriormente são extraídos de tabelas, as quais foram elaboradas a partir de trabalhos práticos.

Não estão previstos coeficientes específicos que levem em conta a frequência de vibração ou que considerem o tipo de fonte de vibração (irregular ou contínua). No entanto, os parâmetros F_d e F_t levam essas questões em consideração, uma vez que a frequência principal é função da distância e da natureza do terreno, e a duração e repetitividade dos eventos dependem do tipo de explosivo utilizado, ou seja, a fonte de energia.

A Tabela 8 mostra a compilação dos limites recomendados, usados na Suécia para desmontes em rochas em áreas residenciais normais, definidas como aquelas que são ocupadas por casas com fundação e vigas de concreto, paredes externas de tijolos com reboco ou concreto leve.

Tabela 8 - Valores-limites para V_p na componente vertical (mm/s), para danos em estruturas civis.

Areia Cascalho Silte	Ardósia Calcários	Granito Gnaiss Calcários duros Quartzitos arenosos Diabásios	Possíveis danos observados em residências
18	35	70	Nenhum tipo de rachadura
30	55	110	Rachaduras finas e queda de reboco
40	80	160	Rachaduras maiores
60	115	230	Sérias rachaduras

Fonte: Bacci, 2000, adaptado de *Langefors e Kihlstrom, 1963; in Persson et al., 1994.*

Para casas antigas, com fundações de baixa qualidade, o valor de V_p permitido é reduzido de 70mm/s para 50mm/s e, no caso de edifícios de concreto leve, o limite chega a 35mm/s. Muitos valores que ultrapassaram 110mm/s, nos estudos de definição dessa norma, foram registrados sem causar nenhum tipo de dano em construções com fundações sólidas. Construções de concreto armado, escavadas diretamente em rocha, puderam suportar valores de V_p acima de 150mm/s.

O valor-limite recomendado para áreas residenciais normais é de 50mm/s para frequências acima de 40 Hz.

3.10 Norma Indiana

O limite de vibração suportado pelas estruturas civis na Índia nos arredores das minas a céu aberto foi determinado pelo *Central Mining Research Institute* (CMRI), em 1991, através de um monitoramento da resposta estrutural de diversas construções.

A Tabela 9 apresenta os resultados de tal estudo.

Tabela 9 - Valores-limites estabelecidos pelo CMRI para vibrações na fundação a diferentes níveis de frequência.

Tipo	Especificações da estrutura	Valores de Vp (mm/s)	
		< 24 Hz	> 24 Hz
(a)	Construções domésticas, paredes interiores pré-moldadas em gesso; estruturas com reboco; pontes.	5	10
(b)	Prédios industriais, estruturas de concreto armado ou aço.	12,5	25
(c)	Estruturas de importância histórica; estruturas muito sensíveis; com mais de 50 anos de idade; estruturas em baixo estado de conservação e sem reparações.	2	5

Fonte: Adaptado de Pal Roy, 1998.

Os estudos apontam que um valor de Vp de 5mm/s, medido na fundação das estruturas, é seguro a baixas frequências para qualquer tipo de estrutura residencial, mesmo se este se amplifica no nível mais alto, devido à ressonância.

A Tabela 10 mostra os valores mínimos de vibração e os danos que podem ser gerados nas estruturas, segundo estudos do CMRI, em diversos tipos de residências.

Tabela 10 - Valores mínimos de vibrações produzidas por desmontes nos quais ocorreram danos, medidos nas estruturas, segundo CMRI (1991).

	Vp (mm/s)	Local de medição	Tipo de estrutura
Ocorrência das primeiras trincas	50	Solo	Estrutura de tijolo
Ocorrência das primeiras trincas	76	Primeiro andar	Estrutura de tijolo
Ocorrência das primeiras trincas	400	Paredes laterais	Estrutura de concreto
Alargamento de trincas existentes	90	Solo	Estrutura de tijolo
Rachaduras	240	-	Estrutura de tijolo
Queda de reboco	280	-	Estrutura de tijolo
Fissuras profundas	192	Paredes laterais e cantos	Construções de sapê (mud houses)

Fonte: Bacci (2000), adaptado de Esteves, 1994

Os valores propostos nesse estudo foram monitorados em residências, escolas, construções pobres e demais locais de interesse. Muitas dessas residências encontravam-se em mau estado de conservação e foram construídas sem nenhuma supervisão e com material de baixa qualidade.

3.11 Recomendações Francesas

Atualmente, estão em vigor na França duas recomendações diferentes. A

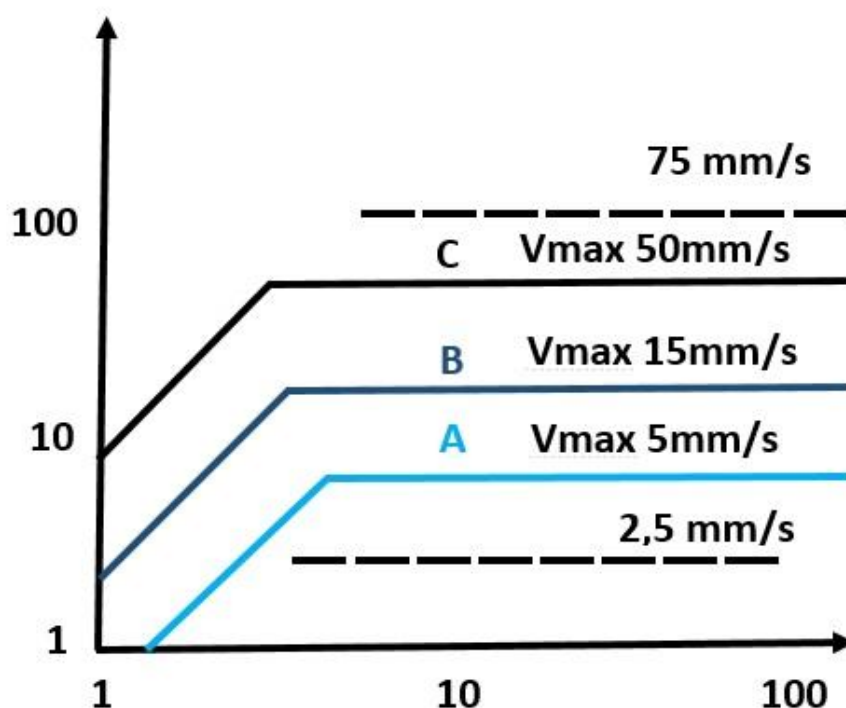
recomendação sugerida pela AFTES (*Association Française des Travaux en Souterrain*), de 1974, e a Circular, proposta pelo Ministério do Ambiente, em julho de 1986, ampliada em setembro de 1993.

A recomendação AFTES subdivide os edifícios em três classes:

- a) Tipo A - edifício de baixa qualidade mecânica (muros deformados);
- b) Tipo B - construções de média qualidade mecânica (sem deformações aparentes);
- c) Tipo C - construções de boa qualidade mecânica (fundações profundas).

Os limites sugeridos de velocidade são mostrados na Figura 9.

Figura 9 - Diagrama proposto pela AFTES das vibrações admitidas para as três classes de estrutura (Fonte: Bacci, 2000, adaptado de Anon,1974; in Borla, 1993).



Fonte: Bacci, 2000, adaptado de Anon,1974; in Borla, 1993.

3.12 Estudo sobre incomodidade e danos em conjunto

Dos estudos existentes sobre os impactos das vibrações induzidas pela atividade humana ao meio ambiente, destaca-se o realizado por WHIFFIN A C e DR LEONARD, *A survey of traffic-induced vibrations, Report LR 418, Design Division, Transport and Road Research Laboratory, UK*, 1971, que é amplamente utilizado no Brasil, principalmente para a Elaboração de EIA-RIMA.

Na conclusão desse estudo americano é apresentada uma tabela com os limites de velocidade de partícula, em (mm/s), dividido em seis intervalos; e a Reação Humana e os Efeitos sobre as construções/edificações, nesses intervalos. A seguir são apresentadas as tabelas original (tabela 11) e a adaptada (tabela 12) desse estudo, que também é utilizada neste trabalho.

Tabela 11 - Effects of Vibration on People and Buildings according to TRRL.

PPV^a (mm/s)	Human Reaction	Effect on Buildings^c
0 – 0.15	Imperceptible	Unlikely to cause damage of any type
0.15 – 0.3 ^b	Threshold of perception	Unlikely to cause damage of any type
2.0	Vibrations perceptible	Recommended upper level to which ruins and ancient monuments should be subjected
2.5	Continuous exposure to vibrations begins to annoy ^d	Virtually no risk of “architectural” damage to normal buildings
5	Vibrations annoying to people in buildings	Threshold for risk of “architectural” damage in houses with plastered walls and ceilings
10 - 15	Continuous vibrations unpleasant and unacceptable	Would cause “architectural” and possibly minor structural damage.

^a Peak Particle Velocity in the vertical direction. For human reaction, the value applies at the point at which the person is situated. For buildings, the value refers to the ground motion (but without an allowance for the amplifying effect of structural components). It is assumed that the frequency of vibration is in the range of 5 to 20 Hz.

^b This level applies to a continuous sinusoidal vibration. However, truck induced vibration is of shorter duration (about 2 to 3 seconds) and thus higher levels appear to be applicable.

^c The criteria for buildings recognize that the building damage will result from a fatigue failure over a long period of time (not from a one-time event).

^d Vibration levels causing annoyance may be lower for occurrences during night time and for occurrences that are very frequent.

Fonte: WHIFFIN A C e DR LEONARD, 1971.

Tabela 12 - Níveis Recomendáveis de Vibrações.

Velocidade de Partícula – Pico (mm/s)	Reação Humana	Efeitos sobre as Construções/ Edificações
0 - 0,15	Imperceptível pela população. Não incomoda	Não causam danos de nenhum tipo
0,15 a 0,30	Limiar de percepção. Possibilidade de incômodo	Não causam danos de nenhum tipo
2	Vibração perceptível	Vibrações máximas recomendadas para ruínas e monumentos antigos
2,5	Vibrações contínuas. Produzem incômodos na população	Virtualmente, não há risco de dano arquitetural às construções normais
5	Vibrações incomodativas.	Limiar, no qual existe risco de danos às construções
10 – 15	Vibrações desagradáveis.	Causam danos arquiteturais às residências

Observações: - Os valores de velocidade referem-se ao componente vertical da vibração.

- A medição para avaliação da resposta humana é feita no ponto onde está se localiza.

- Para edificações, o valor refere-se à medição realizada no solo.

- Consideram-se, na aplicação destes parâmetros, os movimentos vibratórios com frequência acima de 3 Hz.

- As recomendações de níveis de vibração realçadas em amarelo são adotadas por agências de controle ambiental para avaliações de vibração induzidas à vizinhança.

Fonte: WHIFFIN A C e DR LEONARD, 1971 (adaptada).

3.13 Incomodidade das vibrações aos seres humanos

Destacamos que as avaliações da resposta humana, diante dos efeitos da vibração, são todas muito subjetivas. Elas são a mistura de fatores fisiológicos e psicológicos, que mudam de pessoa para pessoa.

Convém notar que as faixas de sensibilidade humana são muito inferiores dos níveis de vibração suportados pelas estruturas, isto é, as pessoas sentem desconfortavelmente, vibrações que não causam danos às estruturas.

Para Nojiri (2001), não existe um consenso sobre valores admissíveis de vibrações em função da resposta humana. E, em geral, as normas internacionais, assim como as brasileiras, não tratam com base clara as relações de causa e efeito: não existe uma definição clara do que realmente é desconforto ambiente e dano estrutural em diferentes níveis e nem quais as normas que se aplicam para cada caso em si.

Noriji (2001) cita que nos Estados Unidos, no Relatório Interno da USBM RI-9455 de 1993, a velocidade da partícula é de 12,7 mm/s, com duração igual ou menor do que é tolerada por 95% das pessoas. Esse valor tem como respaldo as consultas que foram realizadas com a população antiga, que relatou apenas uma discreta percepção.

Raina (2004) defende que o corpo humano difere das estruturas, bem como na frequência natural, e de maneira peculiar, cada pessoa pode responder à vibração e à sobrepressão diferentemente, por meio de diferentes posturas, ao sofrer influência, como elemento de um ambiente psicossocial.

Uma observação importante sobre as vibrações é que normalmente elas se dissipam com o aumento da distância à origem, ou seja, quanto mais distante uma estrutura ou pessoa se encontra do ponto de origem da vibração, menor o efeito da vibração sobre a pessoa.

4 METODOLOGIA

Com a finalidade de quantificar os níveis das intensidades de vibrações, para análise dos riscos estruturais, conforto das comunidades vizinhas e impactos ambientais foram realizados monitoramentos sismográficos das detonações da mineradora ocorridas no período do dia 01/01/2021 a 31/01/2021, para verificação dos níveis de intensidades de vibrações que estariam atingindo as áreas internas e externas da mineração, bem como dos possíveis danos causados às estruturas nas imediações da mineração.

Os resultados foram compilados e analisados, tendo como objetivo verificar a situação atual dos impactos provocados pelo desmontes praticado pela Mineradora.

4.1. Descrição do local

O local de estudo é uma mineradora, localizada em um município do estado de Minas Gerais. A Figura 10 mostra a localização da mineradora, e o bairro próximo, vizinho a mina e motivo dos estudos.

Figura 10 – Localizações da Mineradora e do bairro onde se encontram as edificações vistoriadas.



Fonte: Relatório Técnico fornecido pela mineradora.

A geologia local e a topografia são fatores com grande influência nas vibrações, juntamente com os parâmetros do plano de fogo. Devido a proximidade de áreas de desmonte de rochas por explosivos, é necessário determinar a influência da execução desses desmontes nas casas e habitantes do bairro em destaque.

4.2. Equipamentos

A Tabela 13 expõe os dados dos equipamentos utilizados durante o estudo:

Tabela 13 – Dados dos equipamentos.

Código do sismógrafo	Descrição	Número certificado	Próxima calibração
UM16914	Micromate	UM169142020626	26/06/2021
UM16728	Micromate	UM167282020430	30/04/2021
UM16734	Micromate	UM167342020430	30/04/2021

UM16735	Micromate	UM167352020430	30/04/2021
UM17024	Micromate	UM170342020723	23/07/2021
UM6187	Micromate	UM6187VMA22/12/2020 e UL1372VMA22/12/2020	22/12/2021

Fonte: Relatório Técnico fornecido pela mineradora.

Figura 11 apresenta um sismógrafo de engenharia, esses equipamentos possuem um canal tri-ortogonal para registro de vibrações pelo terreno e um canal para medida de pressões acústicas provenientes de detonações. Podem ser acionados por um evento de magnitude selecionável pelo operador, ficando instalado aguardando sua inicialização por longos períodos de tempo.

Figura 11 – Sismógrafo de engenharia.



Fonte: Relatório Técnico fornecido pela mineradora.

O sismógrafo apresenta, inicialmente, os resultados em um *display* que mostra a máxima velocidade de partícula registrada em um canal, através de comunicação com microcomputadores tipo PC e software específico obtém-se automaticamente os valores máximos de deslocamento, velocidade e aceleração de partícula em cada canal. Para o item de velocidade de partícula, calcula-se ainda para cada máximo a frequência (em *hertz*) medida de zero a pico e o instante de ocorrência (em milissegundos) a partir do início de seu acionamento. Obtém-se ainda a resultante vetorial da velocidade de partícula, analisada em incrementos de tempo de um milissegundo e apresentando-se o valor máximo em todo o evento, bem como seu instante de ocorrência, a forma da onda é também impressa sob o comando do usuário.

Com o uso de programas adicionais, interpreta-se o espectro de frequência através de análise de *Fast Fourier Transform*, bem como se executam estudos sobre a precisão de acessórios utilizados, e ainda se realizam comparações e interpretações com normas e regulamentações de diferentes procedências. Esse equipamento contém memória interna para registrar, analisar e arquivar o resultado de até 400 eventos de 1 segundo de duração.

4.3. Metodologia de análise dos dados registrados

O Relatório Técnico de monitoramento contratado pela Mineradora seguiu a norma da ABNT NBR 9653:2018 “Guia para avaliação dos efeitos provocados pelo uso de explosivos nas minerações em áreas urbanas”.

Os valores estabelecidos pela ABNT NBR 9653:2018 para vibração de partícula estão descritos na Tabela 14, faixa de frequência x velocidade de partícula individual por canal.

Tabela 14 – Limites de velocidade de vibração de partícula de pico por faixa de frequência.

Faixa de Frequência	Limites de velocidade de vibração de partícula de pico
4 a 15 (Hz)	Iniciando em 15 mm/s, aumenta linearmente até 20 (mm/s)
15 a 40 (Hz)	Acima de 20 mm/s, aumenta linearmente até 50 (mm/s)
Acima de 40 (Hz)	50 (mm/s)

Para valores de frequência abaixo de 4 Hz, deve ser utilizado como limite o critério de deslocamento de partícula de pico de no máximo 0,6 mm (de zero a pico).

NOTA: 1Hz corresponde a uma oscilação por segundo

Fonte: Norma ABNT NBR 9653, 2018.

Segundo a norma acima citada, cada valor de frequência corresponde a um limite máximo de vibração para as faixas de 4 a 40 Hz.

4.4. Parâmetros dos desmontes

A tabela 15 destaca o período e local dos desmontes realizados na área interna da mineradora:

Tabela 15 – Local de realização dos desmontes.

Período	Local	Número do desmonte
05/01/2021	BANCO 820	21-01-01
05/01/2021	BANCO 810	21-01-03
07/01/2021	BANCO 795	21-01-03
07/01/2021	BANCO 810	21-01-04
12/01/2021	BANCO 795	21-01-06
12/01/2021	BANCO 810	21-01-05
14/01/2021	BANCO 795	21-01-07
19/01/2021	BANCO 810	21-01-08
21/01/2021	BANCO 795	21-01-09
21/01/2021	BANCO 840	21-01-10
26/01/2021	BANCO 795	21-01-11
28/01/2021	BANCO 810	21-01-12
28/01/2021	BANCO 795	21-01-13
05/01/2021	BANCO 820	21-01-01

Fonte: Relatório Técnico fornecido pela mineradora.

4.5. Relatórios Técnicos

Os estudos apresentados neste trabalho foram realizados devido às reclamações dos moradores em relação as detonações realizadas nas operações da mineradora localizado em um município do interior de Minas Gerais.

Até a época das vistorias a empresa responsável pelo monitoramento já havia disponibilizado um total de 4 (quatro) relatórios técnicos.

1 – O Relatório Técnico Número 157/20 disponibilizado pela empresa responsável pelo monitoramento foi realizado durante as detonações ocorridas no período do dia 01/10/2020 a 30/10/2020, em 01(um) ponto localizado na rua mais próxima da área da mineradora. Nesse período foram realizados 12 desmontes, sendo que o Vpl máx. = 2,29 mm/s, com frequência de pico de 27 Hz, registrada no canal transversal; PA = 120,5 dB (L) ou 21,27 Pa.

2 – O Relatório Técnico Número 188/20 disponibilizado pela empresa responsável pelo monitoramento foi realizado durante as detonações ocorridas no período do dia 01/11/2020 a 30/11/2020, em 01(um) ponto localizado na rua mais próxima da área da mineradora. Nesse período foram realizados 13 desmontes, sendo que o Vpl máx. = 2,14 mm/s, com frequência de pico de 16 Hz, registrada no canal transversal; PA = 110,3 dB (L) ou 6,5 Pa.

3 – O Relatório Técnico Número 218/20 disponibilizado pela empresa responsável pelo monitoramento foi realizado durante as detonações ocorridas no período do dia 01/12/2020 a 31/12/2020, em 01(um) ponto localizado na rua mais próxima da área da mineradora. Nesse período foram realizados 13 desmontes, sendo que o Vpl máx. = 3,23 mm/s, com frequência de pico de 21 Hz, registrada no canal transversal; PA = 126,1 dB (L) ou 40,5 Pa

O Relatório Técnico Número 218/21 disponibilizado pela empresa responsável pelo monitoramento foi realizado durante as detonações ocorridas no período do dia 01/01/2021 a 31/12/2021, em 01(um) ponto localizado na rua mais próxima da área da mineradora. Nesse período foram realizados 14 desmontes, sendo que o Vpl máx. = 1,93 mm/s, com frequência de pico de 12 Hz, registrada no canal transversal; PA = 111,5 dB (L) ou 7,5 Pa.

As conclusões apresentadas nos resumos desses relatórios elaborados pela empresa responsável pelo monitoramento foram as seguintes:

“Com base nos planos de desmonte fornecidos pela contratante e nos sismogramas dos ensaios realizados pôde-se observar que os níveis de vibrações pelo terreno e os níveis de pressões acústicas mantiveram-se dentro os limites estabelecidos pela legislação aplicável, norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) Normas Brasileiras Regulamentadoras (NBR) 9653:2018 “Guia para avaliação dos efeitos provocados pelo uso de explosivos nas minerações em áreas urbanas”, não gerando portanto, riscos estruturais e impactos ambientais nos locais que foram alvo deste monitoramento.”

Tabela 16 - Resumo dos principais valores encontrados de velocidade de vibração de partícula de pico nos Monitoramentos da VMA em comparação com os limites de danos estabelecidos pela ABNT NBR 9653:2018

RELATÓRIOS MONITORAMENTO VMA	VALORES MEDIDOS		LIMITES DA NORMA ABNT NBR 9653 VPL- (DANOS)	
	VPL MÁXIMA (MM/S)	FREQUÊNCIA (HZ)	ABNT NBR 9653 (MM/S)	PERCENTUAL ATINGIDO DA ABNT NBR 9653 (%)
RT Número 157/20	2,29	27	34,4	6,66
RT Número 188/20	2,14	16	21,2	10,09
RT Número 218/20	3,23	21	27,2	11,88
RT Número 012/21	1,93	12	18,6	10,37

Fonte: Laudo de Vistoria Pericial realizado pelos autores.

Tabela 17 - Resumo dos principais valores encontrados de velocidade de vibração de partícula de pico nos Monitoramentos da VMA em comparação com os limites de incômodos estabelecidos pela CETESB, na D7.013 de fevereiro de 2015.

RELATÓRIOS MONITORAMENTO VMA	VALORES MEDIDOS		LIMITES DA CETESB, D07.013- FEVEREIRO DE 2015(INCÔMODOS)	
	VPL MÁXIMA (MM/S)	FREQUÊNCIA (HZ)	CETESB (MM/S)	PERCENTUAL ATINGIDO DA D7.013 CETESB
RT Número 157/20	2,29	27	4,2	54,52
RT Número 188/20	2,14	16	4,2	50,95
RT Número 218/20	3,23	21	4,2	76,90
RT Número 012/21	1,93	12	4,2	45,95

Fonte: Laudo de Vistoria Pericial realizado pelos autores.

Tabela 18 - Resumo dos principais valores encontrados de PRESSÃO ACÚSTICA nos Monitoramentos da VMA em comparação com os limites de danos estabelecidos pela ABNT NBR 9653:2018

RELATÓRIOS MONITORAMENTO VMA	VALORES MEDIDOS PRESSÃO ACÚSTICA		LIMITES DA ABNT NBR 9653 PRESSÃO ACÚSTICA		PERCENTUAL ATINGIDO DA ABNT NBR 9653 (%)
	dB(L)	Pa	dB(L)	Pa	
RT Número 157/20	120,5	21,27	134	100	21,27
RT Número 188/20	110,3	6,5	134	100	6,5
RT Número 218/20	126,1	40,5	134	100	40,5
RT Número 012/21	111,5	7,5	134	100	7,5

Fonte: Laudo de Vistoria Pericial realizado pelos autores.

Tabela 19 - Resumo dos principais valores encontrados de PRESSÃO ACÚSTICA nos Monitoramentos da VMA em comparação com os limites de incômodos estabelecidos pela CETESB, na D7.013 de fevereiro de 2015.

RELATÓRIOS MONITORAMENTO VMA	VALORES MEDIDOS PRESSÃO ACÚSTICA		LIMITES DA CETESB, D07.013- FEVEREIRO DE 2015 (INCÔMODOS)		PERCENTUAL ATINGIDO DA D7.013 CETESB (%)
	dB(L)	Pa	dB(L)	Pa	
RT Número 157/20	120,5	21,27	128	50,24	42,34
RT Número 188/20	110,3	6,5	128	50,24	12,94
RT Número 218/20	126,1	40,5	128	50,24	80,61
RT Número 012/21	111,5	7,5	128	50,24	14,93

Fonte: Laudo de Vistoria Pericial realizado pelos autores.

Os monitoramentos realizados pela empresa responsável confirmam que os níveis de vibrações que atingiram os imóveis vistoriados, em consequência das detonações que ocorreram na mineradora, ficaram bem abaixo do limiar de risco estabelecido pela Norma Técnica ABNT NBR 9653 -2018. Portanto, essas vibrações não tiveram nenhuma influência nos danos e anomalias constatados.

4.6. Ensaios realizados

A amostragem dos ensaios realizados foi obtida através da seleção de 01 (um) ponto de monitoramento solicitado pela contratante (ponto externo). Este ponto foi tomado como referência para identificação dos possíveis efeitos secundários provocados, e cuja finalidade foi a de identificar e quantificar a intensidade dos dois fenômenos gerados: Vibrações pelo terreno e Níveis de pressões acústicas. As coordenadas utilizadas nestes ensaios tiveram como referência geodésica o DATUM WGS84.

Para a realização do ensaio, a VMA utilizou 06 (seis) sismógrafos instalados em 01 (um) ponto de monitoramento solicitado pela contratante, totalizando uma série de 14 (quatorze) registros individuais, distribuídos conforme a tabela 20.

Tabela 20 – Local de realização dos ensaios.

Período	Local	Coordenadas		Nº de Registros
		N	E	
01/01/2021 à 31/01/2021	Rua X	7839229	594577	13

Fonte: Relatório Técnico fornecido pela mineradora.

Figura 13 – Área da lavra e local dos imóveis vistoriados.



Fonte: Próprio autor.

Figura 14 – Local dos imóveis vistoriados e o ponto de instalação do sismógrafo.



Fonte: Próprio autor.

4.9. Ensaio Fotográfico dos locais de detonação e monitoramento com sismógrafo

Figura 15 – Vista da extensão da bancada do desmorte realizado no dia 07/01/2021



Fonte: Relatório Técnico fornecido pela mineradora.

Figura 16 – Vista da lateral esquerda da bancada do desmorte realizado no dia 19/01/2021



Fonte: Relatório Técnico fornecido pela mineradora.

Figura 17 – Sismógrafo instalado no ponto 01 da Rua X.



Fonte: Relatório Técnico fornecido pela mineradora.

Figura 18 – Sismógrafo instalado no ponto 01 da Rua X (outro ângulo).



Fonte: Relatório Técnico fornecido pela mineradora.

4.10. Resultados dos ensaios

As distâncias (D) dos ensaios monitorados estiveram na faixa de D = 486 a 1183 m com média de 711 m. A carga média por espera variou de 60,2 a 100 kg com média de 77,5 kg. A carga total variou de 775 a 4.725 kg com média de 2.405 kg.

A tabela 21 apresenta os valores registrados nos pontos, quanto às vibrações pelo terreno.

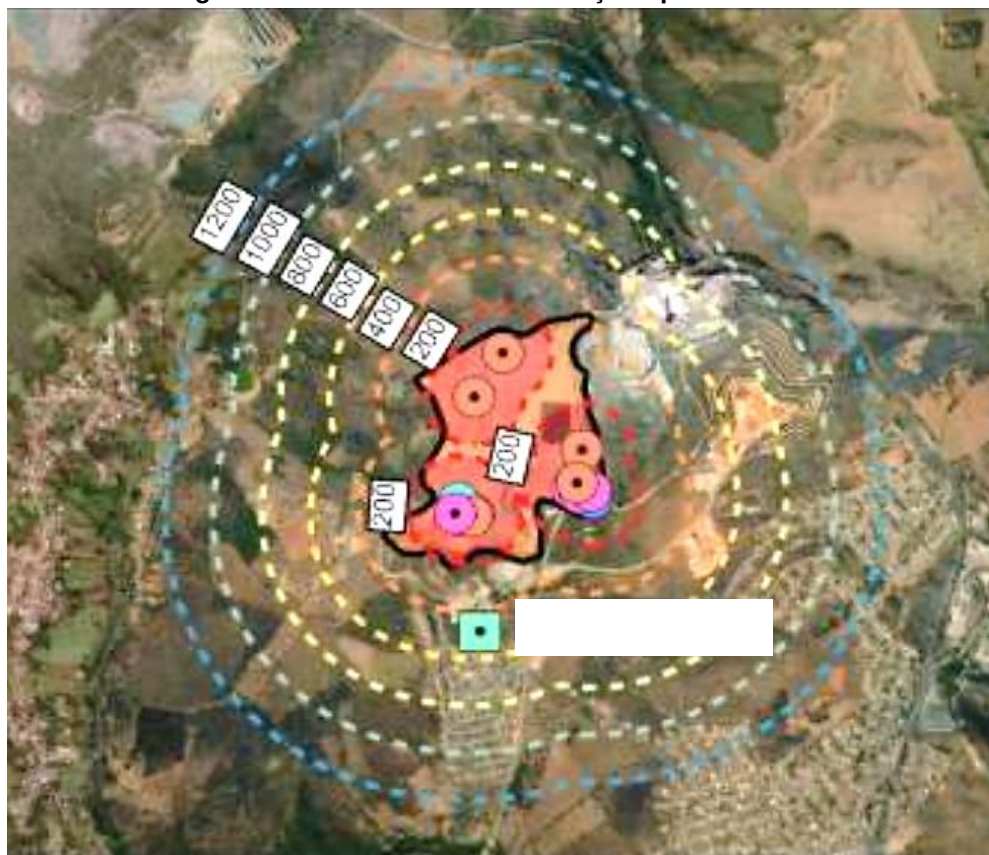
Tabela 21 – Faixa de valores de medição de vibrações pelo terreno.

Item	Máxima	Média	Mínima
Vp Resultante (mm/s)	2,60	1,24	0,26
Vp Individual (mm/s)	1,93	0,95	0,20
Frequência de Pico ZC (Hz)	Faixa de 9,50 à 47,0 (Hz) com média de 19,2 (Hz)		
Frequência Dominante FFT (Hz)	Faixa de 5,13 à 78,38 (Hz) com média de 12,4 (Hz)		

Fonte: Relatório Técnico fornecido pela mineradora.

Para esta simulação foi utilizado a maior carga média por espera apresentada no plano de desmonte que foi de 100 kg. Os valores registrados nos pontos de ensaio podem ser comparados aos da simulação.

Figura 19 – Intensidades de vibrações pelo terreno.



Fonte: Relatório Técnico fornecido pela mineradora.

Ponto 01 – Valor simulado = 1,53 a 2,93 mm/s; Maior valor registrado Vpl = 1,93 mm/s;

A tabela 22 apresenta os valores registrados nos pontos dos ensaios, quanto aos níveis das pressões acústicas.

Tabela 22 – Faixa de valores de medição dos níveis das pressões acústicas.

Item	Máxima	Média	Mínima
Pressão Acústica (dB (L))	111,5	103,0	96,3
Pressão Acústica (Pa)	7,5	3,2	1,3
Frequência de Pico ZC (Hz)	Faixa de 3,30 à 16,0 (Hz) com média de 7,81 (Hz)		
Frequência Dominante FFT (Hz)	Faixa de 2,75 à 9,13 (Hz) com média de 5,55 (Hz)		

Fonte: Relatório Técnico fornecido pela mineradora.

4.11. Interpretação e análise das vibrações registradas

As vibrações, registradas nas detonações realizadas pela mineradora tiveram características normais quando comparadas com eventos de outras regiões em área semelhantes.

Na interpretação dos sismogramas registrados, não foram verificadas associação da intensidade dos eventos com carga superposta, fazendo com que as detonações se processassem com a eficiência desejada, não comprometendo os desmontes, que são essenciais na vida da mineração.

Existe um amortecimento rápido das intensidades de vibração pelo terreno à medida que aumenta a distância, o que tornam as situações dos desmontes da mineradora considerados como normais.

a) Quanto às frequências das velocidades individuais podemos dizer:

As frequências de pico (ZC) das vibrações pelo terreno para as distâncias do ponto em relação aos desmontes, estiveram divididas entre baixa e alta frequência, sendo que a maior parte ficou na faixa de baixa frequência, o que representou 97,36 % dos valores inferiores a 40 Hz.

Já as frequências dominantes (FFT) das vibrações pelo terreno para as distâncias do ponto em relação aos desmontes, também estiveram divididas entre baixa e alta frequência, sendo que a maior parte ficou na faixa de baixa frequência, o que representou 97,43 % dos valores inferiores a 40 Hz.

b) Quanto às frequências da pressão acústica podemos dizer:

As frequências de pico (ZC) das pressões acústicas, para as distâncias do ponto em relação aos desmontes, estiveram classificadas na sua totalidade na a faixa de não audíveis, o que representou 100 % dos valores inferiores a 20 Hz.

Já as frequências dominantes (FFT) das pressões acústicas para as distâncias do ponto em relação aos desmontes também estiveram classificadas na sua totalidade na a faixa de inaudíveis, o que representou 100 % dos valores inferiores a 20 Hz.

4.12. Ensaio Fotográfico das vistorias realizadas nas edificações localizadas próximo à mineradora

Figura 20 – Imóvel 01.



Fonte: Laudo de Vistoria Pericial realizado pelos autores.

Figura 21 – Imóvel 02.



Fonte: Laudo de Vistoria Pericial realizado pelos autores.

Figura 22 – Imóvel 03.



Fonte: Laudo de Vistoria Pericial realizado pelos autores.

Figura 23 – Imóvel 04.



Fonte: Laudo de Vistoria Pericial realizado pelos autores.

5 RESULTADOS

Apesar dos problemas observados nos imóveis vistoriados serem decorrentes das falhas construtivas e da inadequada e deficiente manutenção preventiva e/ou corretiva, ao longo de sua vida útil, temos que considerar e analisar se as detonações que estão ocorrendo na mineração posicionada na mesma região do imóvel originaram ou agravaram manifestações patológicas identificadas no imóvel, conforme reclamações do proprietário/ocupante.

Os estudos técnicos referentes aos impactos das vibrações em edificações esclarecem que as vibrações normalmente se dissipam com o aumento da distância à origem, ou seja, quanto mais distante uma estrutura se encontra do ponto de origem da vibração, menor o efeito da vibração sobre ela.

Outra informação importante observada nestes estudos é que as avaliações da resposta humana, diante dos efeitos de vibração, são subjetivas e dependem de fatores fisiológicos e psicológicos, que mudam de pessoa para pessoa. Assim as faixas de sensibilidade humana são muito inferiores aos níveis de vibração suportados pelas estruturas, isto é, as pessoas se sentem desconfortáveis com vibrações que não causam nenhum dano às estruturas.

Ressaltamos que as investigações empreendidas em diversos países são concordantes em admitir que os danos em estruturas se correlacionam melhor com a velocidade de vibração das partículas, que é o parâmetro atualmente adotado para definir limites de danos provocados em estruturas em todo o mundo.

Ao analisar os vários estudos técnicos sobre os efeitos das vibrações provocadas por detonações para os desmontes de rochas, tem-se que são diversas as variáveis que influenciam na intensidade dessas vibrações, sendo que as mais destacadas nesses estudos são: as características do solo; o tipo e a carga de explosivos utilizados e a distância entre a fonte e o receptor.

A NBR-9653:2018 estabelece os procedimentos para avaliação dos efeitos provocados pelo uso de explosivos nas minerações em áreas urbanas. O objetivo dessa norma é fixar a metodologia para reduzir os riscos inerentes ao desmonte de rocha com uso de explosivos em indústria de mineração e construção em geral. Estabelece parâmetros a um grau compatível com a tecnologia disponível, para a segurança das populações vizinhas, referindo-se a danos estruturais e procedimentos recomendados quanto à resposta humana.

Essa norma estabelece que os riscos de ocorrência de danos induzidos pelas vibrações transmitidas pelo meio físico devem ser avaliados levando-se em consideração a magnitude e a frequência de vibração de partícula.

Os limites para velocidade de vibração de partícula de pico acima dos quais podem ocorrer danos induzidos pelas vibrações transmitidas pelo meio físico são apresentados numericamente na Tabela 23.

Tabela 23 - Limites de velocidade de vibração de partícula de pico por faixas de frequência"

Faixa de Frequência ^a	Limite de Velocidade de vibração de partícula de pico
4 Hz a 15 Hz	Iniciando em 15 mm/s aumenta linearmente até 20 mm/s
15 Hz a 40 Hz	Acima de 20 mm/s aumenta linearmente até 50 mm/s
Acima de 40 Hz	50 mm/s
Para valores de frequência abaixo de 4 Hz deve ser utilizado como limite o critério de deslocamento de partícula de pico de no máximo 0,6 mm (de zero a pico) NOTA 1 Hz corresponde a uma oscilação por segundo	

Fonte: Norma ABNT NBR 9653, 2018.

Já a CETESB, em fevereiro de 2015, publicou a D7.013 que é uma norma que fixa as condições mínimas exigíveis para o controle da operação de desmonte de rochas com uso de explosivos e seus acessórios, no que se refere à prevenção e mitigação de impactos ao meio ambiente e estabelece limites para avaliação do incômodo de pressão acústica e velocidade de vibração de partículas gerados pelas operações de desmonte de rochas com uso de explosivos e seus acessórios.

No item 9 (Critérios de Avaliação) dessa norma, que será reproduzido abaixo, são apresentados os limites para o Nível de Pressão Acústica – Lpl e da Velocidade Resultante de Vibração de Partícula – VR. Lembrando que esses são os limites para avaliação do incômodo gerado pelas operações de desmonte de rochas com uso de explosivos e seus acessórios relacionados à pressão acústica e vibração.

- 9.1 Nível de Pressão Acústica – Lpl:

O nível de pressão acústica (Lpl) proveniente das operações de desmonte de rocha com o uso de explosivos não poderá ser superior a 128 dB Linear - pico, no local de medição estabelecido no item 8.1;

- 9.2 Velocidade Resultante de Vibração de Partícula – VR:

A velocidade resultante de vibração de partícula (VR) proveniente das operações de desmonte de rocha com o uso de explosivos não poderá ser superior a 4,2 mm/s - pico, no local de medição estabelecido no item 8.1

Para realização deste estudo foram realizadas medições das vibrações geradas pela mineradora localizada no interior de Minas Gerais.

Os estudos de monitoramento das vibrações foram contratados devido às reclamações dos moradores em relação as detonações realizadas pela mineradora em suas operações.

A empresa responsável pelos monitoramentos disponibilizou um total de 4 (quatro) relatórios técnicos.

Os monitoramentos realizados pela empresa responsável confirmam que os níveis de vibrações que atingiram os imóveis localizados próximo ao bairro vizinho à mineradora, em consequência das detonações que ocorreram, ficaram bem abaixo do limiar de risco estabelecido pela Norma Técnica ABNT NBR 9653 -2018. Portanto, essas vibrações não tiveram nenhuma influência nos danos e anomalias constatados.

Os resultados dessas medições foram analisados levando-se em consideração os valores máximos de velocidade de vibração de partícula registrados em cada ponto.

Valores máximos registrados:

Ponto 1 – Rua X:

- Vpl máx. = 1,93 mm/s, com frequência de pico de 12 Hz, registrada no canal vertical;
- PA = 111,5 dB (L) ou 7,5 Pa;

Os valores com registros citados acima podem ser classificados da seguinte maneira quanto à norma ABNT NBR 9653:2018:

Ponto 1 – Rua auX

- Vpl – representou de 10,37 % do limite máximo estipulado, que é de 18,6 mm/s para a frequência de 12 Hz citada no item “a” acima. Portanto, pode-se concluir que os desmontes efetuados pela mineração estão dentro dos limites permitidos para velocidade de vibração de partícula de pico.
- PA – representou 7,5 % do limite máximo em Pa, sendo que o limite estabelecido pela norma é de 134 dB (L) ou 100 Pa. Portanto, pode-se concluir que os desmontes efetuados pela mineração estão dentro destes limites permitidos.

Sendo assim, as detonações que foram realizadas atendem, aos critérios estabelecidos na ABNT NBR 9653:2018 “Guia para avaliação dos efeitos provocados

pelo uso de explosivos nas minerações em áreas urbanas”, no que tange as vibrações pelo terreno e atmosfera.

No que diz respeito ao incômodo da população nas comunidades vizinhas as detonações na sua maioria produziram vibrações pelo terreno que foram perceptíveis no ponto de monitoramento. As vibrações pela atmosfera também foram perceptíveis ou audíveis em algumas detonações, mas sem nenhum valor que possa causar um incômodo maior.

Podemos concluir que as manifestações patológicas e/ou anomalias existentes nos imóveis vistoriados são em decorrência exclusiva de falhas ou vícios construtivos, somado a uma manutenção deficiente e precária e, por isso, não possuem nenhuma relação com as vibrações provocadas pelas detonações que ocorreram na mineradora.

6 CONCLUSÕES

Os monitoramentos realizados confirmam que os níveis de vibrações que atingiram os imóveis localizados próximo ao bairro vizinho à mineradora, em consequência das detonações que ocorreram, ficaram bem abaixo do limiar de risco estabelecido pela Norma Técnica ABNT NBR 9653 -2018. Portanto, essas vibrações não tiveram nenhuma influência nos danos e anomalias constatados.

Sendo assim, as detonações que foram realizadas atendem, aos critérios estabelecidos na ABNT NBR 9653:2018 “Guia para avaliação dos efeitos provocados pelo uso de explosivos nas minerações em áreas urbanas”, no que tange as vibrações pelo terreno e atmosfera.

No que diz respeito ao incômodo da população nas comunidades vizinhas as detonações na sua maioria produziram vibrações pelo terreno que foram perceptíveis no ponto de monitoramento. As vibrações pela atmosfera também foram perceptíveis ou audíveis em algumas detonações, mas sem nenhum valor que possa causar um incômodo maior.

Podemos concluir que as manifestações patológicas e/ou anomalias existentes nos imóveis vistoriados são em decorrência exclusiva de falhas ou vícios construtivos, somado a uma manutenção deficiente e precária e, por isso, não possuem nenhuma relação com as vibrações provocadas pelas detonações que ocorreram na mineradora.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6023 - Informação e documentação - Referências – Elaboração**. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 9653 – Guia para Avaliação dos Efeitos Provocados pelo Uso de Explosivos nas Minerações em Áreas Urbanas**. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

BACCI, D. C., ESTON, S. M., IRAMINA, W. S., SOARES, L. E. C. – 2003 – **Considerações Sobre o Monitoramento Sismográfico de Vibrações Provocadas por Detonações**. Revista Areia & Brita, nº 21. São Paulo.

BACCI, D. L. C. et al. **Principais Normas e Recomendações Existentes Para Controle de Vibrações Provocadas Pelo Uso de Explosivos em Áreas Urbanas: parte I**. Revista Escola de Minas, v. 56, n. 1, p. 51-57, 2003

BACCI, D. L. C. et al. **Principais Normas e Recomendações Existentes Para Controle de Vibrações Provocadas Pelo Uso de Explosivos em Áreas Urbanas: parte II**. Revista Escola de Minas, v. 56, n. 1, p. 51-57, 2003

BACCI, D.C. **Vibrações geradas pelo uso de explosivos no desmonte de rochas: avaliação dos parâmetros físicos do terreno e dos efeitos ambientais**. Rio Claro: Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista. 2000. v.1 (texto) e v.2 (anexos). (Tese de Doutorado).

BERTA, G. **L'esplosivo strumento di lavoro**. 1985. ITALESPLSIVI - Milano. 1ª ed. 488p. Surface mineral extractions (except coal) sites. British Standard.

BOLRA, G. **Esame delle principali normative e raccomandazioni esistenti per il controllo delle vibrazioni provocate dal brillamento di esplosivi ed indotte da queste negli edifici**. GEAM - Geoingegneria Ambientale e Mineraria. Associazione Mineraria Subalpina. Anno XXX, nº4, p.243-248, 1993.

CETESB - COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL - **Norma D7.013 - Mineração por explosivo**. São Paulo: 1992.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). **Norma técnica D7.013 de 24 de fevereiro de 2015**. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/2013/11/D7-013.pdf>. Acesso em: 10 set. 2021.

DOWDING, C. 1985. **Blast Vibration Monitoring and Control**. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, Inc., 1985. ISBN 0-13-078197-5.

DUVALL, W.I., FOGELSON, D.E. **Review of criteria for estimating damage to residences from blasting vibration**. BuMines RI 5968, 1962. 19 p.

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.

FORNARO, M. **Vibrazioni dannose per le costruzioni in conseguenza dello sparo di mine: esame di quanto amesso dalle norme e suggerito dall'esperienza.** Notiziario dell'Associazione Mineraria Subalpina Anno VI, n. 3-4. p. 18-28, 1980.

GOMES, JOSÉ PEDRO MOREIRA ANDRADE. **Metodologia para análise de vibrações provocadas por desmontes com recurso a explosivos.** Orientador: Prof. Dr Alexandre Júlio Machado Leite. Coorientador: Me. Vinícius Gouveia de Miranda. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas e Geo-Ambiente) – Faculdade de Engenharia , Universidade do Porto, Porto, 2016.

LANGFORS, U., KIHLSSTROM. **The modern technique of rock blasting.** New York, and Almqvist & Wiksell, Stockholm: John Wiley & Sons, Inc. 1963.

PAL ROY, P. **Characteristics of ground vibrations and structural response to surface and underground blasting.** Geotechnical and Geological Engineering, v. 16, p.151- 166, 1988.

PERSSON, P.A., HOLMBERG, R., LEE, J. **Rock blasting and explosives engineering.** International Society of Explosives Engineers. CRC Press, Inc. USA. 1994. 540 p.

SCOTT, A. **Open pit blast design.** In: JKMRC. T.J. Napier Munn Editor. Austrália: The University of Queensland. 1996. 339 p.

SISKIND, D.E., STAGG, M.S., KOPP, J.W., DOWDING, C.H. **Structure response and damage produced by ground vibration from surface mine blasting.** Report of Investigation 8507 USBM - United States Bureau of Mines, 1980. 74 p

UNI 9916. Norma italiana - **Criteri di misura e valutazione degli effetti delle vibrazioni sugli edifici.** 1991.

WHIFFEN, A. C. 1971. **A survey of traffic-induced vibrations.** (Report LR419.) Crowthorne, Berkshire, England: United Kingdom Department of Environment, Road Research Laboratory.