



## RELATÓRIO TÉCNICO

Eng. Bruno Duarte Martins  
Responsável Técnico: Eng. Alexandre Antonini

Belo Horizonte  
Maio de 2018

Eng. Bruno Duarte Martins  
Responsável Técnico: Eng. Alexandre Antonini

## RELATÓRIO TÉCNICO

Relatório referente a estudos para controle de vibrações pelo terreno, geradas tanto por detonações com uso de explosivos quanto por maquinários e atividades operacionais, e de seus efeitos junto a diques de contenção de rejeitos e a cavidades naturais subterrâneas, associado à construção de curvas de atenuação da vibração e adoção limites desses efeitos na área de implantação do **Projeto Bloco 8**, da **Sul Americana de Metais - SAM** em Grão Mogol / Padre Carvalho - MG.

Belo Horizonte  
Maio de 2018

## RESUMO

O presente trabalho é representado por um estudo visando à execução de serviços de Avaliação Sismográfica e Simulações Projeccionais referentes ao **Projeto Bloco 8**, da **Sul Americana de Metais - SAM** para a verificação futuros impactos que poderiam ser causados tanto pelos desmontes de rocha praticados na unidade de mineração quanto por atividades/fontes diversas emissoras de vibração, pela operação de maquinários na planta e unidade de beneficiamento ou ainda na área de operação da mina, conforme projeto a ser implantado nos municípios de Grão Mogol e Padre Carvalho - MG. Para tanto, utilizam-se resultados de monitoramentos sismográficos realizados em cenários similares aos do empreendimento e que foram realizados pela **VMA - Engenharia de Explosivos e Vibrações**, Laboratório acreditado pela Rede Metrológica de Minas Gerais (RMMG) Processo de Reconhecimento de Competência (PRC) nº 384.01 conforme a deliberação normativa do Conselho Estadual de Política Ambiental (COPAM) nº 216, de 27 de Outubro de 2018 da Superintendência Regional de Regularização Ambiental (SUPRAM). Foi realizada visita a campo em abril de 2018, e apresenta-se aqui as conclusões com vistas aos efeitos causados tanto aos diques de contenção de rejeitos quanto às cavidades naturais subterrâneas existentes, caso não haja controle desses aspectos.

Com base nos planos de desmonte fornecidos pela SAM, estimam-se os níveis de vibração a serem produzidos nos desmontes, comparando-os com as recomendações da norma da **Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) Normas Brasileiras Regulamentadoras (NBR) 9653: 2018** e com as recomendações apresentadas nos trabalhos de Orientações Básicas e Contribuição Técnica à Análise e Realização de Estudos Ambientais do **CECAV - Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas e do ICMBIO - Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade, do MMA - Ministério do Meio Ambiente**.

Propõe-se ainda os limites de vibração adequados para a futura operação, estimando-se as relações de vibrações com as cargas e distâncias necessárias para a preservação dos diques e das cavidades naturais subterrâneas.

**Palavras-chave:** Monitoramento. Vibração pelo Terreno.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Projeto Bloco 8 - Sul Americana de Metais - SAM.....	11
Figura 2 - Área do Projeto.....	11
Figura 3 - Localização do Projeto.....	12
Figura 4 - Sismógrafo de engenharia.....	15
Figura 5 - Instrumentações e envio de dados “on line”.....	16
Figura 6 - Mapa e corte geológicos.....	20
Figura 7 - Testemunho de sondagem do metadiamectito semi compacto e compacto.....	21
Figura 8 - Afloramento de metadiamectito.....	21
Figura 9 - Curvas versus carga e distância.....	25
Figura 10 - Cargas estipuladas em função das distâncias dos grupos de cavidades e dique conceitual - $V_{pi} = 15$ mm/s.....	27
Figura 11 - Cargas estipuladas em função das distâncias dos grupos de cavidades e dique conceitual - $V_{pi} = 50$ mm/s.....	27

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Documentação do Serviço.....	13
Tabela 2 - Procedimentos para Realização de Ensaios.....	16
Tabela 3 - Limites de vibração pelo terreno $V_{pi}$ em função da frequência da onda.....	17
Tabela 4 - Parâmetro de Perfuração.....	22
Tabela 5 - Parâmetros de Detonação.....	23
Tabela 6 - Distâncias para máximas intensidades.....	26
Tabela 7 - Cargas máximas por espera previstas em função da distância para diferentes níveis de vibração pelo terreno.....	26

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	-	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ART	-	Anotação de Responsabilidade Técnica
Av.	-	Avenida
CREA	-	Conselho Regional de Engenharia Arquitetura e Agronomia
Eng.	-	Engenheiro
Dr.	-	Doutor
GO	-	Goiás
GPS	-	Sistema de Posicionamento Global
IEC	-	Comissão Internacional de Eletrotécnica
Inc.	-	Incorporação
ISO	-	Organização Internacional de Normalização
Ltda	-	Limitada
máx.	-	Máxima
MG	-	Minas Gerais
NBR	-	Normas Brasileiras Regulamentadoras
NPA	-	Nível de Pressão Acústica
Nº	-	Número
PA	-	Pressão Acústica
PO	-	Procedimento Operacional
Rev.	-	Revisão
RMMG	-	Rede Metrológica de Minas Gerais

## LISTA DE SIMBOLOS

Vp	-	Velocidade de partícula
t	-	Tempo
Ap	-	Deslocamento de partícula (mm)
f	-	Frequência
$\lambda$	-	Comprimento de Onda
A	-	Amplitude
Vl	-	Velocidade longitudinal
Vv	-	Velocidade vertical
Vt	-	Velocidade transversal
cm/s	-	Centímetros por segundo
mm/s	-	Milímetros por segundo
Hz	-	Hertz
Pa	-	Pascal
dB	-	Decibel
dB (L)	-	Decibel linear
m	-	Metros
U	-	Incerteza
Vpi	-	Velocidade de partícula individual
Vpr	-	Velocidade de partícula resultante
Vti	-	Velocidade individual da partícula no transdutor transversal
Vvi	-	Velocidade individual da partícula no transdutor vertical
Vli	-	Velocidade individual da partícula no transdutor longitudinal
N	-	Referência de norte e sul
E	-	Referência de leste e oeste
cm	-	Centímetros
Kg	-	Quilogramas
D	-	Distância
ZC	-	Frequência de pico Zero to Crest
FFT	-	Frequência dominante Fast Fourier Transform
%	-	Porcentagem

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>9</b>
1.1 Objetivo do presente estudo .....	9
1.2 Localização da área de estudo .....	11
1.3 Apresentação da Contratada .....	14
1.4 Serviços Reconhecidos .....	14
1.5 Documentação .....	14
<b>2 DESENVOLVIMENTO.....</b>	<b>15</b>
2.1 Pessoal da VMA envolvido no estudo.....	15
2.2 Equipamentos .....	15
2.3 Metodologia de execução e análise .....	17
2.3.1 Metodologia de análise dos dados registrados, limites e norma referenciadas.....	18
2.4 Informações da geologia local.....	19
2.5 Etapas de desenvolvimento .....	22
2.5.1 1ª Etapa - Visita de campo .....	23
2.5.2 2ª Etapa - Identificação das características dos futuros desmontes de S11D.....	23
2.5.3 Análise de vibrações de detonações em áreas similares e proposição para o Projeto Bloco 8.....	24
<b>3 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>29</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>32</b>
<b>APÊNDICES.....</b>	<b>33</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>83</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Em atendimento a solicitações da **WALM Engenharia e Tecnologia Ambiental** e da **SAM S/A**, através do Diretor de Projetos, Eng. Eder de Silvio, a **VMA - Engenharia de Explosivos e Vibrações** elaborou o presente estudo visando à execução de serviços de Avaliação Sismográfica e Simulações Projeccionais referentes ao **Projeto Bloco 8**, da **Sul Americana de Metais - SAM**. Este projeto prevê a lavra e beneficiamento de minério de ferro, em jazidas de metadiamictitos situadas em Grão Mogol / Padre Carvalho - MG com previsão de lavra de cerca de 1.978,4 milhões de toneladas em 18 anos de operação. Para essa lavra, será necessária a execução de desmontes de rocha por explosivos, operação que traz como efeito secundário principal a geração de vibrações pelo terreno. O estudo aborda também sobre as vibrações produzidas por maquinários e atividades operacionais no geral.

### 1.1 Objetivo do presente estudo

O presente estudo refere-se aos potenciais impactos dessas vibrações em duas situações existentes ou a serem implantadas na área do projeto, quais sejam:

- Diques de contenção de rejeitos, sendo alguns externos à cava, na fase inicial de 3 a 5 anos, e outros internos à cava no restante do projeto, em regiões onde já se tenha atingido o “pit” final;
- Cavidades naturais subterrâneas, existentes na área de lavra do projeto.

Com relação aos diques de contenção de rejeito, o objetivo dos serviços técnicos propostos é o atendimento a requisitos relevantes e complementares para a obtenção de licenças solicitados para o **Projeto Bloco 8**, com implantação de uma cava e diques de contenção ao longo da vida útil do projeto, bem como elaborar procedimentos preliminares para a fase de operação dos desmontes nas imediações desses futuros diques.

Já com relação às cavidades naturais subterrâneas existentes na área de lavra da jazida, o objetivo maior é adequar as operações tanto de maquinários e instalações diversas quanto de desmontes de rocha por explosivos com o disposto nos trabalhos de Orientações Básicas e Contribuição Técnica à Análise e Realização de Estudos Ambientais do **CECAV - Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas e do ICMBIO - Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade**, do **MMA - Ministério do Meio Ambiente**, e trabalhos diversos referentes à sismografia aplicada à proteção do patrimônio espeleológico.

Os estudos do presente relatório têm como finalidade prever e quantificar os níveis de intensidades das vibrações geradas, para avaliação e análises dos riscos estruturais à estabilidade e impactos ambientais sobre os diques e as cavidades

naturais subterrâneas existentes no cenário de atividades minerárias futuras, com base em situações similares, e de prever ainda a forma de propagação e atenuação dessas vibrações geradas com a distância, estabelecendo limites em sua intensidade, e definindo assim relações preliminares entre a intensidade das vibrações, as cargas máximas de explosivos detonadas e as distâncias entre os locais de desmonte e interferências representadas por esses diques e cavidades naturais subterrâneas. O estudo servirá portanto para disponibilizar à SAM as informações técnicas necessárias para as premissas básicas visando o controle de vibrações para esse projeto e para compor os documentos a serem protocolados para o licenciamento em elaboração junto ao órgãos reguladores do Estado ou União.

Nos estudos, são realizadas inicialmente simulações de cenários de referência similares aos existentes em áreas equivalentes e uma análise conceitual da situação, prevendo-se o comportamento de vibrações a serem produzidas nos futuros desmontes. Para tanto, serão utilizados resultados e informações existentes de monitoramentos sismográficos já realizados em outras minerações de características semelhantes, englobando o estudo de vibrações pelo terreno geradas por detonações com uso de explosivos em áreas e processos envolvendo maciços rochosos, métodos de desmonte e geometrias locais equivalentes aos do projeto em análise, e considerando-se dados secundários de literatura técnica referente à questão em estudo.

Adicionalmente, serão também apresentados estudos relativos a vibrações pelo terreno geradas por equipamentos diversos a serem utilizados tanto nas obras de implantação das instalações fixas do projeto quanto na própria operação da lavra, tendo em vista a existência das cavidades naturais subterrâneas fora da área de lavra: a atenuação de vibrações pelo terreno provocadas nesse tipo de estudos de vibrações provocadas por máquinas e equipamentos se dá através de modelos de regressão potenciais diferentes das vibrações de detonações. Essas vibrações de equipamentos são aqui tratadas em razão de futuras adequações e definição de limites estabelecidos pelas legislações e recomendações vigentes, ainda em conformidade com as recomendações do CECAV / ICMBio para as cavidades naturais subterrâneas na área do projeto estudado.

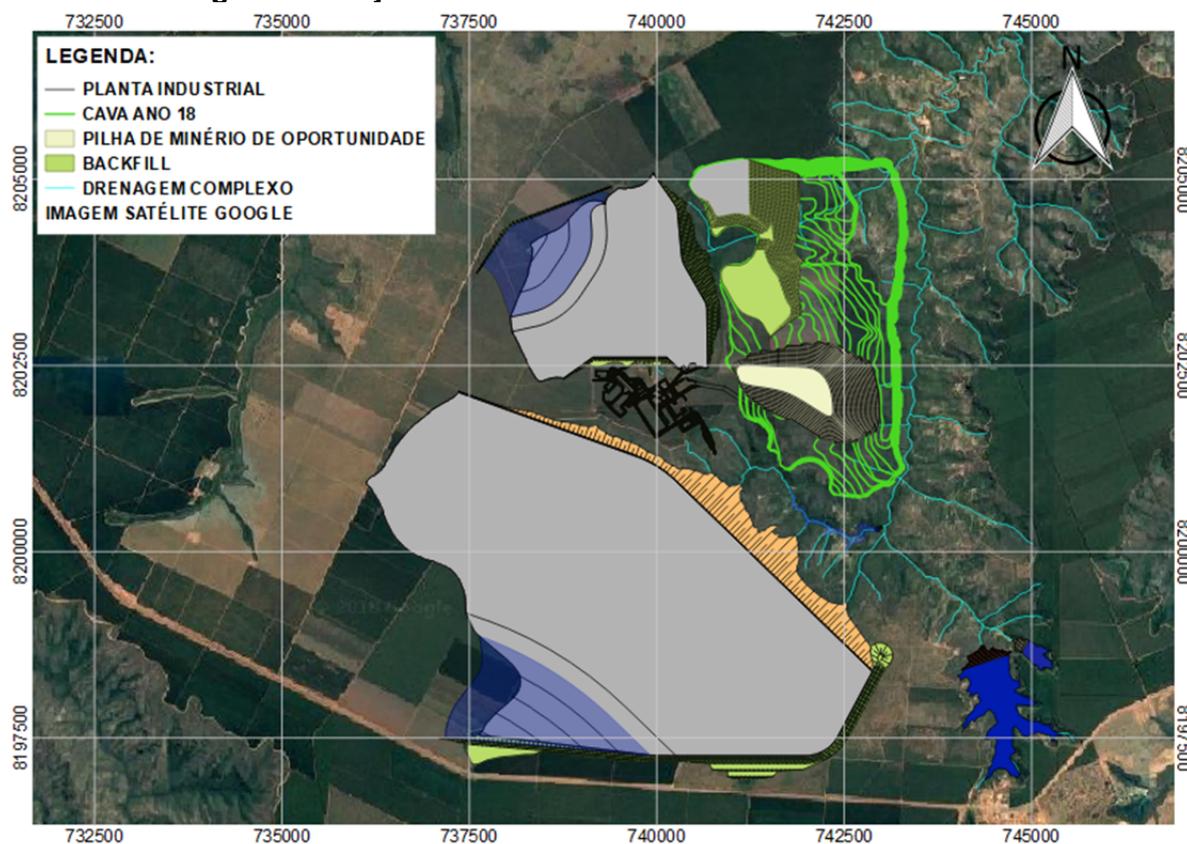
Não faz parte do escopo deste trabalho a realização de estudos da estabilidade dinâmica dos diques, nem de seu comportamento quando submetido às vibrações dinâmicas dos desmontes, trabalhos que deverão ser desenvolvidos pelas projetistas dos diques: a proposta refere-se apenas à simulação projetional da atenuação das vibrações pelo terreno com a distância, vibrações estas produzidas por diferentes “cargas por espera” utilizadas nos desmonte de rocha por explosivos a serem aplicadas na fase de operação do Projeto Bloco 8 e aos limites de vibração propostos sob a forma de velocidade de partícula de pico. Eventuais limites futuros propostos pelos projetistas poderão ser reinterpretados em estudos complementares.

O presente estudo não inclui “a priori” nenhum monitoramento de vibrações em campo no atual cenário existente pela inexistência de obras no local, propondo-se entretanto um plano de monitoramento e acompanhamento futuro para este fenômeno a ser controlado.

## 1.2 Localização da área de estudo

A Figura 1 apresenta uma visualização do Projeto Bloco 8 - Bloco 8 em desenvolvimento.

**Figura 1 - Projeto Bloco 8 - Sul Americana de Metais - SAM.**



Fonte: Sul Americana de Metais - SAM - 2018

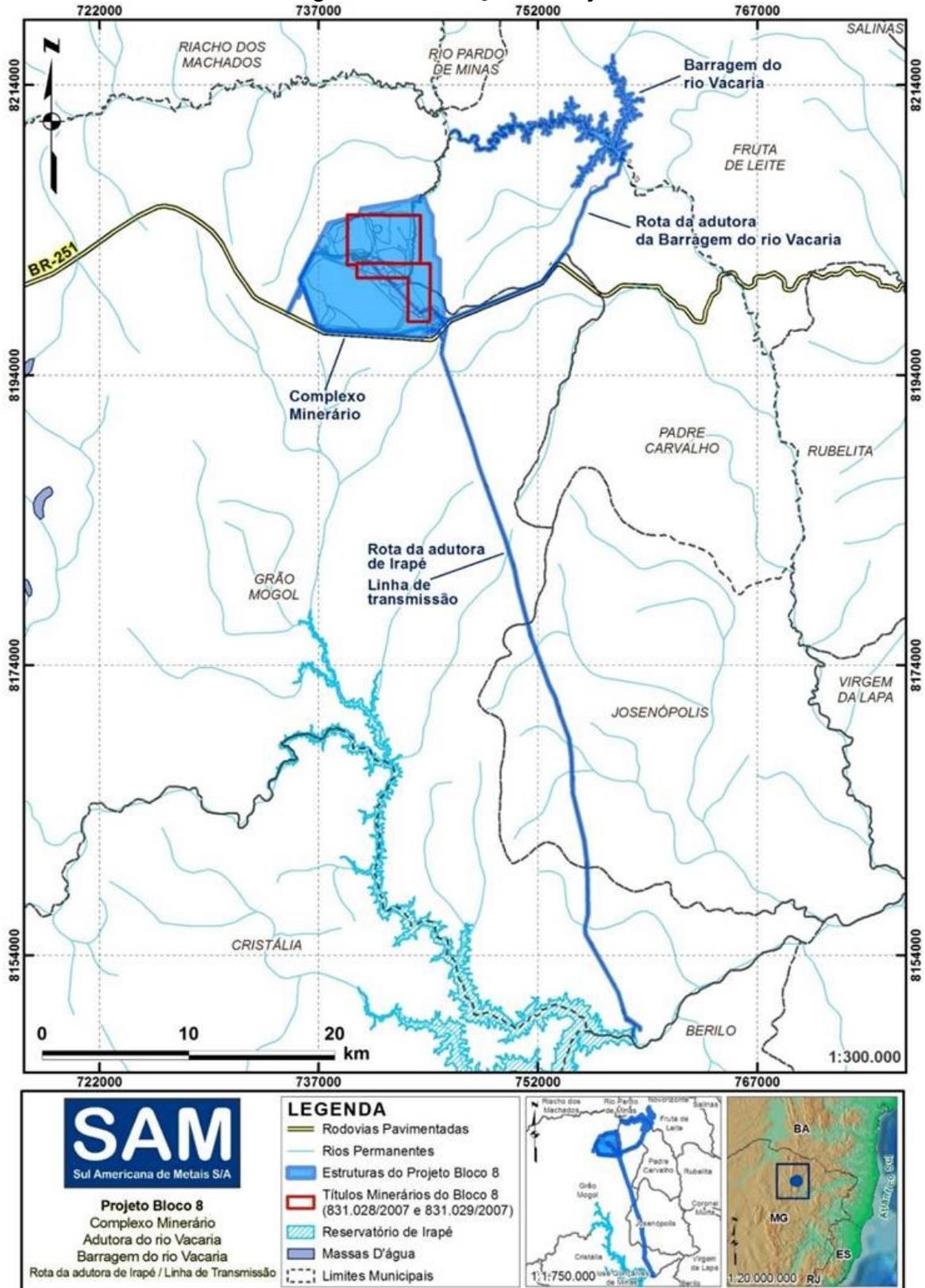
As figuras 2 e 3 apresentam a localização do projeto.

**Figura 2 - Área do Projeto.**



**Fonte: Google, 2018**

**Figura 3 - Localização do Projeto.**



Fonte: Sul Americana de Metais - SAM - 2018

### 1.3 Apresentação da Contratada

A **VMA - Engenharia de Explosivos e Vibrações**, com sede na Av. Getúlio Vargas, Nº 874, 13º andar - Belo Horizonte - MG é uma empresa independente de consultoria e serviços, atuando na área de mineração, engenharia, geologia e meio ambiente. É uma empresa de especialistas aptos a fornecer consultoria e soluções em desmonte de rochas, em todos os seus aspectos, para minas, para obras de construção civil e desmontes especiais.

### 1.4 Serviços Reconhecidos

Fazem parte do escopo de reconhecimento deste laboratório de ensaios na Norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) Normas Brasileiras Regulamentadoras (NBR) Organização Internacional de Normalização (ISO) / Comissão Internacional de Eletrotécnica (IEC) 17025:2005 “*Requisitos gerais para a*

*competência de laboratórios de ensaio e calibração*”, somente os ensaios que podem ser visualizados na página de Rede Metrológica de Minas Gerais (RMMG), através do link <http://www.rmmg.org.br> na página de laboratórios reconhecidos, Ensaio. As demais informações apresentadas neste relatório se fazem por competência e experiência técnica deste laboratório e seu corpo técnico.

### 1.5 Documentação

Os dados da documentação pertinente ao serviço executado encontram-se descritos na Tabela 1: a Anotação de Responsabilidade Técnica (ART) referente ao contrato encontra-se no ANEXO A.

**Tabela 1 - Documentação do Serviço**

Descrição	Número	Validade
Certidão de registro e quitação de pessoa jurídica junto ao Conselho Regional de Engenharia, Arquitetura e Agronomia de Minas Gerais (CREA-MG).	003075/18	31/03/19
Registro do responsável técnico junto ao CREA-MG	007494/18	31/03/19
Certificado de reconhecimento de competência junto a RMMG	384.01	15/03/19

Fonte: VMA Engenharia de Explosivos e Vibrações, 2018.

O ANEXO B apresenta uma imagem georreferenciada da mineração.

## 2 DESENVOLVIMENTO

Com o objetivo de identificar parte dos efeitos causados tanto pelo uso de explosivos nos desmontes de rocha quanto na operação de máquinas e equipamentos serem desenvolvidos na fase de operação do Projeto, a **VMA - Engenharia de Explosivos e Vibrações** efetuou o presente estudo, atendendo à solicitação da **Sul Americana de Metais - SAM** conforme contrato estabelecido entre ambas empresas.

O foco principal deste estudo são os efeitos dos impactos gerados pelas vibrações em relação à segurança operacional e riscos de danos com relação à:

- futuros diques de contenção de rejeitos a serem construídos durante a lavra da mina;
- cavidades naturais subterrâneas existentes no entorno da mineração e unidade fabril.

O Projeto Bloco 8 está inserido em áreas rurais dos municípios de Grão Mogol e Padre Carvalho - MG. No estudo, serão abordadas as vibrações geradas tanto por desmontes de rocha por explosivos quanto pela operação de equipamentos diversos, propondo-se limites para essas atividades.

### 2.1 Pessoal da VMA envolvido no estudo

Supervisão dos trabalhos de campo, relatório, análise, interpretação e tratamento:

- Eng. Alexandre Antonini - CREA n°: 39.702/D
- Eng. Bruno Duarte Martins - CREA n°: 76.392/D
- Geol. Luiz Cerello - CREA n°: 200589147-9

### 2.2 Equipamentos

O monitoramento de vibrações é normalmente realizado por sismógrafos de engenharia. Para as futuras obras e desenvolvimento das atividades de lavra, será necessário a instrumentação de vibrações por esses equipamentos em pontos críticos da operação, e que deverão ser definidos em função da evolução da mineração no que se refere ao sequenciamento das escavações. Adicionalmente, numa fase inicial, é recomendado um monitoramento dessas vibrações, tanto da operação de equipamentos quanto das primeiras fases de desmonte por explosivos, para a definição de equações prognósticas de atenuação em cenários reais do local, compreendendo suas condições de geologia, metodologias e tipos de equipamentos utilizados que serão os geradores de vibrações.

A Figura 4 apresenta os sismógrafos de engenharia da linha Instantel Inc. do Canadá utilizados. Esses equipamentos possuem 01 (um) canal triortogonal para registro de vibrações pelo terreno e 01 (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 4 - Sismógrafo de engenharia**

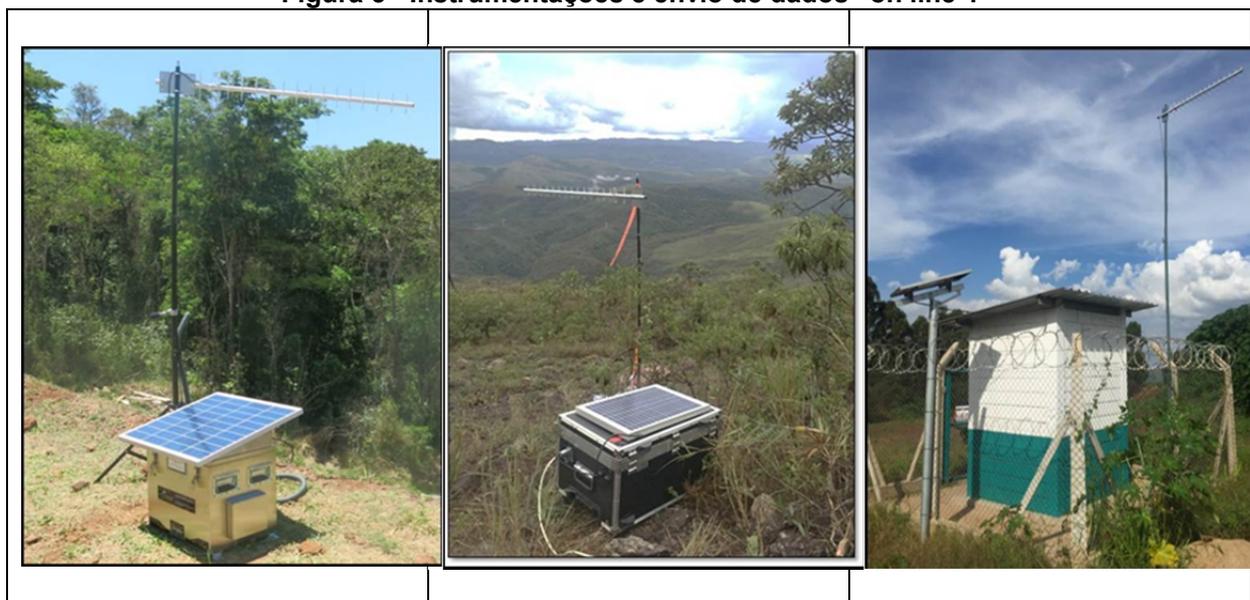


Fonte: VMA - Engenharia de Explosivos e Vibrações, 2018.

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 realizam-se 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 (quatrocentos) eventos de 1 (um) segundo de duração.

Os sismógrafos pode assim ser assim instalado numa determinada situação a cada desmonte ou instrumentação específica, ou ficar por exemplo 01 (uma) semana em instrumentação entre cada manutenção, ou ainda ser instalado com comunicação "on line" com as áreas de análise, ficando assim transmitido todas as informações de interesse em tempo real. A figura 5 mostra esses equipamentos fixos em diferentes situações de monitoramento em locais diversos com envio de informações em tempo real.

**Figura 5 - Instrumentações e envio de dados “on line”.**



Fonte: VMA - Engenharia de Explosivos e Vibrações, 2018.

### 2.3 Metodologia de execução e análise

Sempre que necessário a realização de ensaios pela VMA, os mesmos são desenvolvidos tendo como referência a norma ABNT NBR 9653:2018 “*Guia para avaliação dos efeitos provocados pelo uso de explosivos nas minerações em áreas urbanas*” e os procedimentos relacionados na Tabela 2:

**Tabela 2 - Procedimentos para Realização de Ensaios**

<b>Código</b>	<b>Título</b>	<b>Revisão</b>
PO-VMA-ENS-01	Monitoramento Sismográfico	30
IT-VMA-ENS-01	Uso do sismógrafo Minimate Plus	04
IT-VMA-ENS-03	Uso do sismógrafo Micromate	03
IT-VMA-ENS- 06	Utilização do GPS Etrex30	03
IT-VMA-ENS-07	Uso do Software Blastware	03

Fonte: VMA - Engenharia de Explosivos e Vibrações, 2018.

O **APÊNDICE A - CONCEITOS GERAIS** apresenta as principais características da propagação de vibrações pelo terreno e atmosfera, seus efeitos, limites pertinentes e as formas de abordagem do assunto, com enfoque principal nas vibrações produzidas pelo desmonte de rochas por explosivos.

O **APÊNDICE B - SIMULAÇÃO DO COMPORTAMENTO DO MACIÇO ROCHOSO QUANTO À ATENUAÇÃO DE VIBRAÇÕES SOB A FORMA DE VELOCIDADE DE PARTÍCULA** apresenta um estudo referente a equações prognósticas de atenuação

de vibrações pelo terreno produzidas especificamente por detonações para a área do Projeto Bloco 8.

O **APÊNDICE C - CARACTERIZAÇÃO DE FONTES DE VIBRAÇÃO NA OPERAÇÃO DE EQUIPAMENTOS** aborda sobre atenuações de vibrações de equipamentos e sua atuação sobre cavidades naturais subterrâneas.

Já **APÊNDICE D - FOTOGRAFIAS** apresenta imagens da área do projeto.

### 2.3.1 Metodologia de análise dos dados registrados, limites e norma referendada

Com relação aos limites de vibração para os diques de contenção, os valores máximos deverão obedecer às normas ABNT 9653:2018 supracitada. Esses limites são variáveis conforme a frequência da onda, e são assim relacionados e apresentados em tabela específica do Anexo D, além de discutidos no Apêndice A. No presente estudo, como não se dispõe ainda de informações de um cenário real, nem tampouco uma situação com semelhança integral em relação ao maciço local e forma de desmonte a ser realizado, faz-se considerações de limites preliminares de segurança com os seguintes níveis para diferentes valores de frequência de onda, conforme tabela 3 abaixo:

**Tabela 3 - Limites de vibração pelo terreno  $V_{pi}$  em função da frequência da onda.**

<b><math>V_{pi}</math> Limite (mm/s)</b>	<b>Frequência (Hz)</b>
<b>15</b>	<b>4</b>
<b>20</b>	<b>15</b>
<b>26</b>	<b>20</b>
<b>32</b>	<b>25</b>
<b>40</b>	<b>31,8</b>
<b>50</b>	<b>40</b>

Fonte: VMA - Engenharia de Explosivos e Vibrações, 2018.

Nos depósitos de minérios de ferro no Brasil, a frequência das ondas é normalmente baixa e inferior a 10 (dez) Hz: o metadiamectito do Projeto Bloco 8, por sua aparência mais compacta, possivelmente apresentará frequências um pouco superiores, fato que só poderá ser identificado na lavra real ou em eventuais testes preliminares de desmonte. Durante os desmontes a serem adotados na futura mineração, os limites máximos permitidos nos diques de contenção serão portanto função da frequência da onda, conforme ABNT 9653:2018: deve-se entretanto considerar como medida de precaução um nível de alerta em todos os desmontes que atingirem um nível equivalente a 2/3 (dois terços) do nível máximo definido,

quando as características do desmonte aplicado que gerou a vibração acima do alerta deverão ser revistas para evitar a repetitividade e sistematização do fato.

Já com relação aos limites de vibração para as cavidades naturais subterrâneas existentes no projeto da SAM, os estudos levaram em consideração 4 (quadro) cavidades de máxima relevância. De forma geral, os limites de segurança propostos em trabalhos CECAV são preliminares, e adequados para áreas com existência de cavidades naturais subterrâneas de máxima relevância, acrescidas de áreas de grande fragilidade geotécnica, e assim com risco iminente de colapsos e desabamentos.

É também considerado na análise do cenário local um trabalho recente publicado no 33º Congresso de Espeleologia em 2015, onde são apresentados estudos de instrumentação de detonações a até 75 (setenta e cinco) metros de cavidades naturais subterrâneas existentes em minério de ferro e junto a operações de lavra da Vale em desenvolvimento nas minas do sistema Norte no projeto Carajás no Pará. Considera-se ainda a revisão da ABNT 9653:2018 publicada em 08 de maio de 2018, que estabelece que os limites da nova edição da ABNT podem ser utilizados como referência na avaliação de cavidades naturais subterrâneas. Essa norma especifica limites de vibração para cavidades naturais subterrâneas iguais aos de estruturas, variando portanto de  $V_{pi} = 15$  mm/s a  $V_{pi} = 50$  mm/s em função da frequência da onda, conforme ANEXO D - Valores máximo de vibrações pelo terreno em função da frequência de pico. Para as cavidades naturais subterrâneas dentro do Projeto Bloco 8 confirmadas como máxima relevância, pode-se estipular para essa situação de vibrações de detonações um valor preliminar máximo de  $V_{pi} = 15$  mm/s, independente da frequência. Já para vibrações provenientes de operação de equipamentos com emissão de vibrações contínuas ou semi contínuas, recomenda-se um valor máximo de  $V_{pi} = 10$  mm/s, limites independentes da frequência da onda, sendo a cavidade natural subterrânea de máxima relevância. Propõe-se aqui também níveis de alerta equivalentes a 2/3 (dois terços) desses valores máximos, ou seja respectivamente de  $V_{pi} = 10$  mm/s para detonações e  $V_{pi} = 6,7$  mm/s para equipamentos, quando as operações se iniciarem este valores deverão ser revistos. Notar que os níveis de vibrações de equipamentos provocados pelas fontes estudadas no Apêndice C são de intensidade relativamente pequena, e atenuam-se rapidamente com a distância, não implicando portanto em riscos para as cavidades naturais do projeto.

As orientações do CECAV não consideram pressões acústicas como fator de controle em relação a cavidades naturais subterrâneas, e portanto não propõe estudos nem limites para este fenômeno. Analogamente, limites de pressão acústica não são pertinentes também nos diques de contenção.

## 2.4 Informações da geologia local

A área objeto deste estudo está inserida Grupo Macaúbas, Formação Nova Aurora, Membro Riacho Poções. A lito-estratigrafia do Grupo Macaúbas tem caráter sedimentar de origem glacial. Apresenta uma sequência de rochas quartzíticas, com intercalações de quartzo mica xisto, filito e variações faciológicas intermediárias, representada por níveis de metadiamicctitos.

O hematita-magnetita metadiamicctito, minério de ferro da região ( $Fe > 9\%$ ), aflora nos platôs e encosta dos vales locais. Formam depósitos elúvio-coluvionares, nas encostas e carapaça de canga (estrutural e química) aflorante ao longo da chapada de bordas abruptas preservando o relevo local. Em subsuperfície as camadas de metadiamicctitos quartzíticos e os metadiamicctitos hematíticos apresentam continuidade, e, localmente, nas zonas de cisalhamento, ocorrem lentes/faixas centimétricas e estreitas de formação ferrífera, com aparência de itabirito (faixas de hematita especular alternadas por leitos de quartzo) e lentes de hematita. Estudos sobre a gênese dos metadiamicctitos ferruginosos são escassos, apesar da origem relacionada a um evento glacial ser amplamente aceita para as formações compostas por diamictitos do Grupo Macaúbas. A Idade Neoproterozóica para esse grupo é aceita por muitos autores, e sugere a correlação de seus depósitos glaciogênicos com a glaciação Sturtiana. De fato, uma importante característica dos depósitos de ferro do Neoproterozóico é sua associação a eventos de glaciação. O depósito de ferro do Membro Riacho Poções é constituído por metadiamicctitos com hematita e/ou magnetita como componentes da matriz. Essas rochas foram depositadas em bacia de rifte continental durante um evento glacial. O depósito, assim como todo o Grupo Macaúbas, foram deformados e metamorfisados na Orogenia Araçuaí, no Brasileiro. Os metadiamicctitos ferruginosos registram três fases de deformação: D1, D2 e D3.

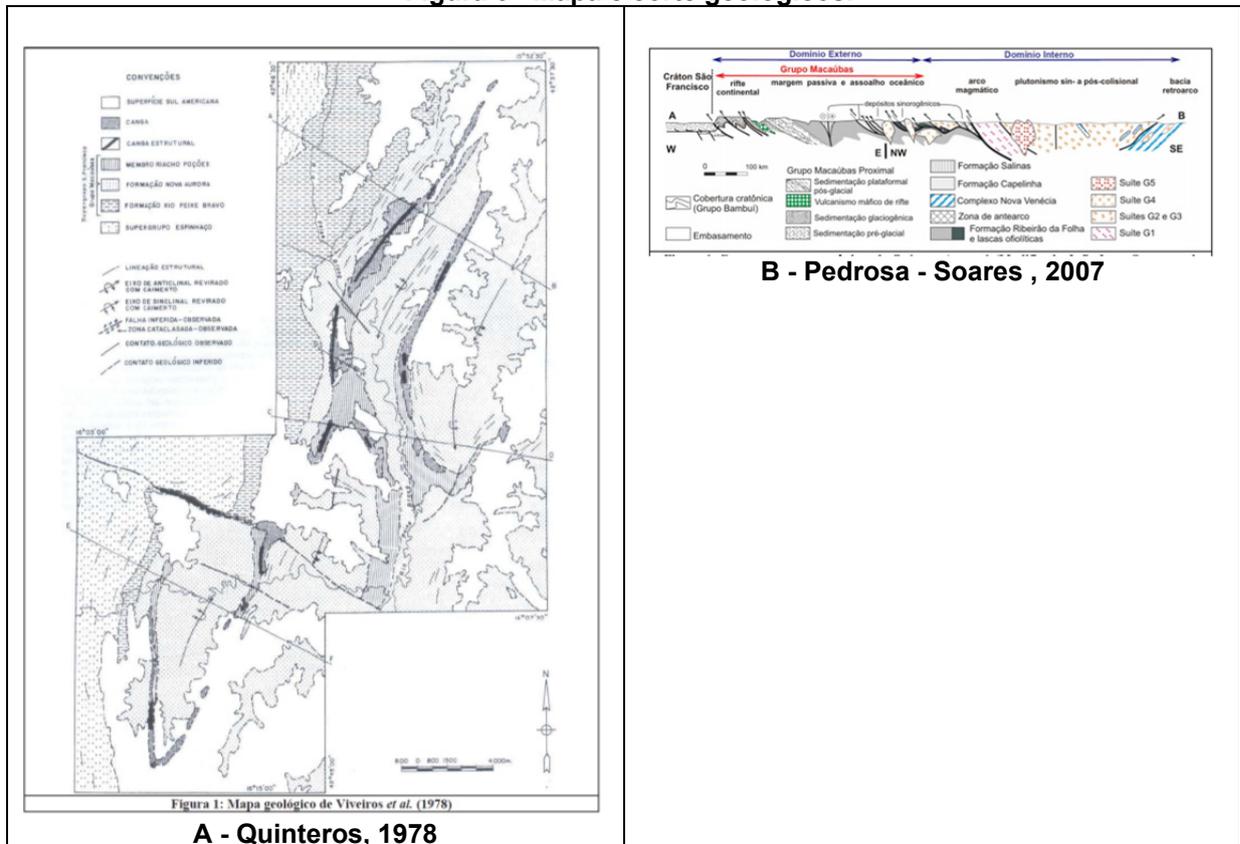
As formações ferríferas do Norte de Minas se assemelham àquelas do Grupo Jacadigo no Mato Grosso do Sul, podendo ser comparado, ainda, com o minério do Grupo Rapitan, localizado no noroeste do Canadá, também do Supergrupo Damara, no sudoeste da África e do Subgrupo Yudnamutana, no Sul da Austrália, todos de idade Neoproterozóica.

Na região do projeto, os metadiamicctitos contêm na matriz, teor variável de ferro marcado pela presença de óxidos (hematita, magnetita e magnetita). A caracterização inicial das unidades foi feita de acordo com seu grau de compactação (friável, semicompacto e compacto) e obviamente com a presença ou ausência de minério de ferro.

O pacote mineralizado em ferro apresenta espessura variável, sendo mais fina na parte oeste da área, na região do platô, onde a parte superior da mineralização já foi erodida, e mais espessa na porção leste do corpo, na qual a sequência estratigráfica encontra-se completamente preservada. Na parte oeste a profundidade média dos furos é de 70 metros, enquanto na porção leste os furos alcançaram até 445,50 metros de profundidade.

A figura 6 apresenta um mapa geológico e corte da área em questão.

**Figura 6 - Mapa e corte geológicos.**



Fonte: A - Quinteros (1978) e B - Pedrosa - Soares, apud Francisco Teixeira Vilela, dissertação de mestrado.

Já a figura 7 apresenta uma visão dos testemunhos de sondagem do minério / metadiamectito do projeto, e a figura 8 um afloramento do minério no local.

**Figura 7 Testemunho de sondagem do metadiamectito semi compacto e compacto.**



Fonte: VMA - Engenharia de Explosivos e Vibrações, 2018.

**Figura 8 - Afloramento de metadiamectito.**



**Afloramento de metadiamectito na área do projeto. Notar pequeno capeamento.**



**Afloramento - detalhe.**

Fonte: VMA - Engenharia de Explosivos e Vibrações, 2018.

Os ensaios realizados pelo Departamento de Engenharia de Minas - EEUFMG referentes à Resistência à Compressão Uniaxial apresentaram uma gama de valores bem amplos, variando de 4,49 MPa a 138,57 MPa, com Módulo de Elasticidade de 1,43 GPa a 62,92 GPa e Razão de Poisson de 0,050 a 0,253, sugerindo inclusive tratar-se de corpos de prova de amostras de diferentes domínios geomecânicos.

## **2.5 Etapas de desenvolvimento**

O programa de estudos abordado no presente Relatório foi desenvolvido em uma série consecutiva de etapas.

### 2.5.1 1ª Etapa - Visita de campo

Nesta fase, foram verificadas as condições atuais do Projeto Bloco 8, o posicionamento previsto dos diques iniciais de contenção de rejeito, das cavidades naturais subterrâneas, os litotipos presentes nos afloramentos disponíveis e nos testemunhos de sondagem, e uma visão geral da futura área de implantação da lavra e planta.

O Apêndice D apresenta um ensaio fotográfico das observações efetuadas.

### 2.5.2 2ª Etapa - Identificação das características dos futuros desmontes de S11D.

As características básicas dos futuros desmontes a serem realizados no projeto da SAM foram disponibilizadas em informações fornecidas pela mesma e constantes no relatório Venturini "MINA\_VRP005-1010-D-RE-01\_R02".

Segundo as informações, os parâmetros utilizados na perfuração de rocha são resumidos na tabela 4 abaixo.

**Tabela 4: Parâmetro de Perfuração**

Parâmetros de Perfuração					
Material		FRIÁVEL	SEMI-COMPACTO	COMPACTO	ESTÉRIL
Diâmetro da Perfuratriz	mm	200	165	165	165
Altura do Banco	m	15	15	15	15
Subfuração	m	1.05	1.2	1.65	1.65
Stemming	m	10	6.85	4.75	6.5
Burden	m	5	4	3.5	5
Spacing	m	12	8	7.5	10
Perfuração Específica	m <sup>3</sup> /m	56.1	29.6	23.7	45.1
Redril	%	3%	3%	3%	3%
Taxa de Penetração	m/h	50	45	35	40
BCM por furo	m <sup>3</sup> /hole	900	480	394	750
Vida útil do Bit	m	5,800	5,800	5,800	5,800

Fonte: Venturini "MINA\_VRP005-1010-D-RE-01\_R02".

Os parâmetros a serem utilizados no desmonte de rocha são apresentadas na tabela 5 abaixo.

**Tabela 5: Parâmetros de Detonação.**

Parâmetros de Detonação					
Material		FRIÁVEL	SEMI-COMPACTO	COMPACTO	ESTÉRIL
Diâmetro da Perfuratriz	inch	7 7/8	6 1/2	6 1/2	6 1/2
Densidade média da rocha	g/cm <sup>3</sup>	1.99	2.62	2.97	1.8
Densidade do Explosivo	g/cm <sup>3</sup>	0.85	0.85	0.85	0.85
Altura do Banco	m	15	15	15	15
Burden	m	5	4	3.5	3.5
Spacing	m	12	8	7.5	7.5
Subdrill	m	1.4	1.4	1.4	1.4
Comprimento Total do Furo	m	16.4	16.4	16.4	16.4
Stemming Length	m	10	6.85	4.75	6.5
Altura da coluna de explosivo	m	6.05	9.35	11.9	10.15
Quantidade de Explosivo / m	kg/m	26.7	18.2	18.2	18.2
Consumo de explosivo / furo	kg	161.6	169.9	216.3	184.5
Fator de Carga	kg/t	0.090	0.135	0.185	0.137

Fonte: Venturini "MINA\_VRP005-1010-D-RE-01\_R02".

Portanto, nos diferentes diâmetros propostos e considerando-se os tipos de materiais existentes, a carga por furo prevista deverá variar de 160 kg (cento e sessenta) quilogramas a 216 kg (duzentos e dezesseis) quilogramas. Com isso, pode-se assumir que para os cálculos de cargas máximas por espera serão a princípio iguais a esses valores. Evidentemente, cargas por espera superiores a esses valores poderão ser utilizadas em distâncias maiores das interferências representadas pelos diques e / ou pelas cavidades naturais subterrâneas existentes na área de lavra: por outro lado, cargas por espera menores também poderão ser consideradas, pela adoção de diâmetros menores, retardo dentro de furos, bancos de menor altura, e outras técnicas pertinentes para controle de vibrações.

### 2.5.3 Análise de vibrações de detonações em áreas similares e proposição para o Projeto Bloco 8.

O Apêndice C apresenta um estudo da atenuação prognóstica de vibrações provocadas por desmontes de rocha por explosivos para áreas similares à SAM. Nesse estudo, determina-se um modelo de projeção sismográfica para um cenário similar ao do Projeto Bloco 8, representado pela equação (1) abaixo

$$V_{pmax} = 600 \times (D/Q^{1/2})^{-1,113} \text{ (equação 1)}$$

Considera-se aqui alguns limites da norma ABNT 9653:2018, a qual é função da frequência, e que varia bastante, em função principalmente da rocha, e subsidiariamente de características do desmonte - principalmente da iniciação, e ainda da faixa de distâncias. O minério de ferro normalmente apresenta frequências baixas, mas a previsão para projeto da SAM é de valores mais altos, conforme discutido no item 2.3.1. A partir desses limites, chega-se a relações entre as cargas máximas por espera Q e as distâncias entre desmonte e ponto de interesse apresentados nas equações 2 a 5 abaixo:

$$Q = 0,001322 \times D^2 \text{ (equação 2) para Frequência} = 4 \text{ Hz e } V_{pi} = 15 \text{ mm/s;}$$

$$Q = 0,002217 \times D^2 \text{ (equação 3) para Frequência} = 15 \text{ Hz e } V_{pi} = 20 \text{ mm/s;}$$

$$Q = 0,003552 \times D^2 \text{ (equação 4) para Frequência} = 20 \text{ Hz e } V_{pi} = 26 \text{ mm/s;}$$

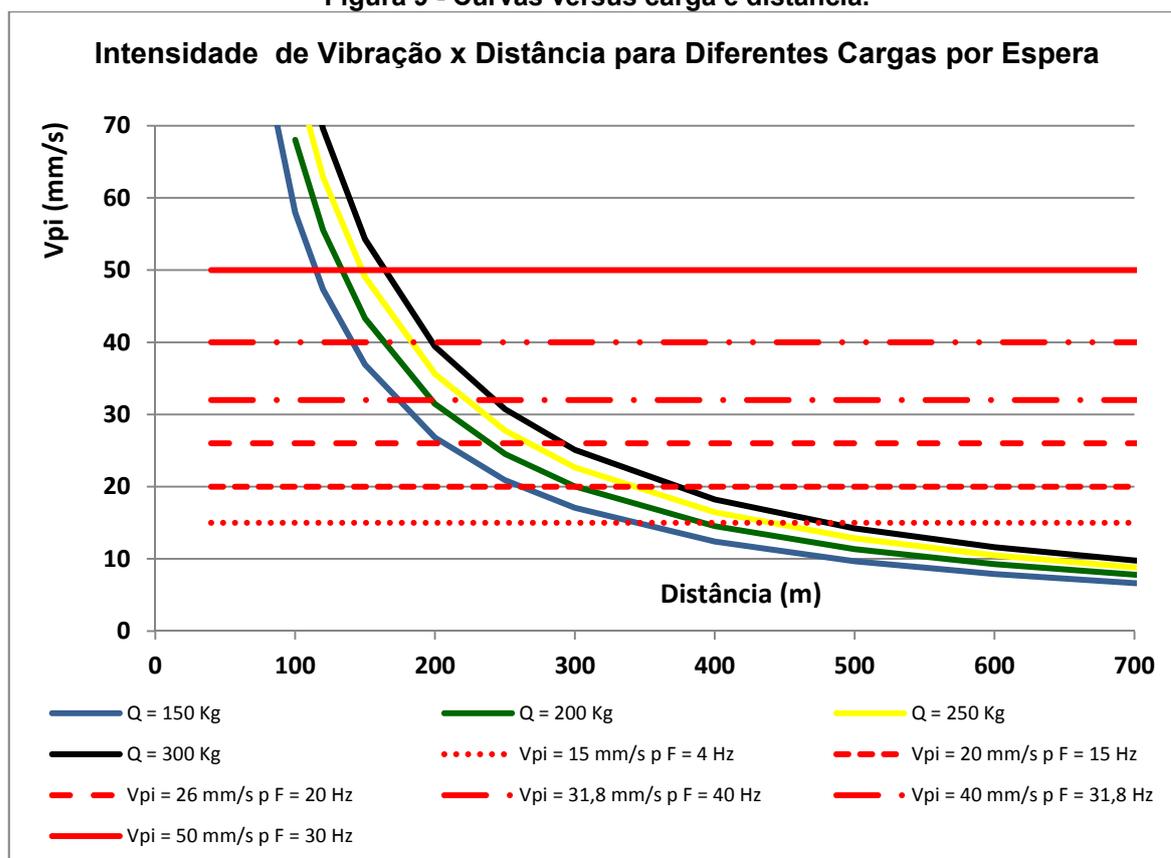
$$Q = 0,005158 \times D^2 \text{ (equação 5) para Frequência} = 25 \text{ Hz e } V_{pi} = 32 \text{ mm/s;}$$

$$Q = 0,007702 \times D^2 \text{ (equação 6) para Frequência} = 31,8 \text{ Hz e } V_{pi} = 40 \text{ mm/s;}$$

$$Q = 0,01150 \times D^2 \text{ (equação 7) para Frequência} = 4 \text{ Hz e } V_{pi} = 50 \text{ mm/s.}$$

A figura 9 apresenta em gráfico o amortecimento das vibrações, medidas em velocidade de partícula individual  $V_{pi}$ , em função da Distância, para diferentes cargas por espera, e indicando limites de  $V_{pi}$ , em função da frequência, conforme discutido acima.

**Figura 9 - Curvas versus carga e distância.**



Fonte: VMA - Engenharia de Explosivos e Vibrações, 2018.

A tabela 6 lista a distância para as quais as máximas cargas por furo do projeto respectivamente 161 kg (cento e sessenta e um) quilogramas para o minério friável e 216 kg (duzentos e dezesseis) quilogramas para o minério compacto para as diversas velocidades de partícula previstas no presente estudo.

Assim, caso um dique esteja a uma distância inferior à prevista por este estudo para uma determinada intensidade de vibração possível, as características da detonação deverão ser revistas: caso contrário, as detonações poderão ser executadas, mantendo-se sempre a necessidade de instrumentação local tanto do desmorte quanto do dique.

**Tabela 6: Distâncias para máximas intensidades.**

<b>DISTÂNCIAS (m) EM FUNÇÃO DA INTENSIDADE PARA Q DE PROJETO PARA AS CARGAS DE EXPLOSIVO DO PROJETO</b>			
<b>Vpi (mm/s)</b> (mm/s)	<b>Frequência (Hz)</b> (Hz)	<b>Cargas / Furo do Projeto</b>	
		<b>Q esp = 161 kg</b>	<b>Q esp = 216 kg</b>
<b>15</b>	4	<b>349</b>	<b>404</b>
<b>20</b>	15	<b>270</b>	<b>312</b>
<b>26</b>	20	<b>213</b>	<b>247</b>
<b>32</b>	25	<b>177</b>	<b>205</b>
<b>40</b>	31,8	<b>145</b>	<b>167</b>
<b>50</b>	40	<b>118</b>	<b>137</b>

Fonte: VMA - Engenharia de Explosivos e Vibrações, 2018.

Já a tabela 7 lista cargas máximas por espera previstas pelos estudos para diferentes níveis de vibração pelo terreno.

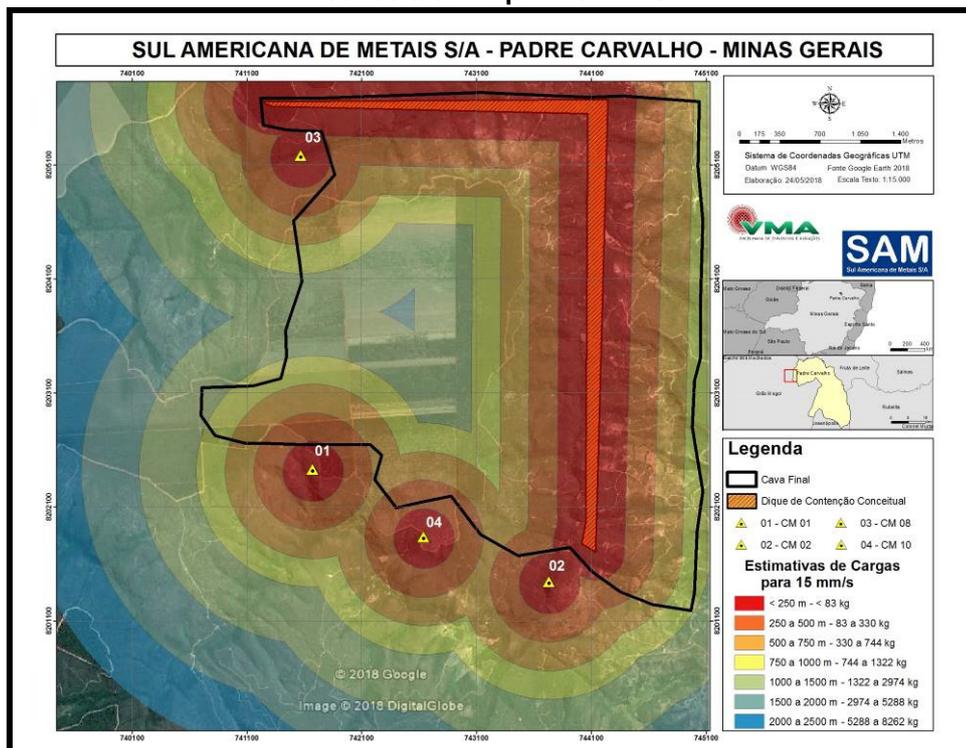
**Tabela7 - Cargas máximas por espera previstas em função da distância para diferentes níveis de vibração pelo terreno.**

<b>CARGA MÁXIMA POR ESPERA (kg)</b>						
<b>D (m)</b>	<b>15 mm/s</b>	<b>20 mm/s</b>	<b>26 mm/s</b>	<b>32 mm/s</b>	<b>40 mm/s</b>	<b>50 mm/s</b>
<b>50</b>	3,31	5,54	8,88	12,9	19,3	28,8
<b>75</b>	7,44	12,5	20,0	29,0	43,3	64,7
<b>100</b>	13,2	22,2	35,5	51,6	77,0	115
<b>125</b>	20,7	34,6	55,5	80,6	120	180
<b>150</b>	29,7	49,9	79,9	116	173	259
<b>175</b>	40,5	67,9	109	158	236	352
<b>200</b>	52,9	88,7	142	206	308	460
<b>225</b>	66,9	112	180	261	390	582
<b>250</b>	82,6	139	222	322	481	719
<b>275</b>	100	168	269	390	582	870
<b>300</b>	119	200	320	464	693	1035
<b>325</b>	140	234	375	545	814	1215
<b>350</b>	162	272	435	632	943	1409
<b>375</b>	186	312	500	725	1083	1617
<b>400</b>	212	355	568	825	1232	1840
<b>425</b>	239	400	642	932	1391	2077
<b>450</b>	268	449	719	1044	1560	2329
<b>475</b>	298	500	801	1164	1738	2595
<b>500</b>	331	554	888	1290	1926	2875

Fonte: VMA - Engenharia de Explosivos e Vibrações, 2018.

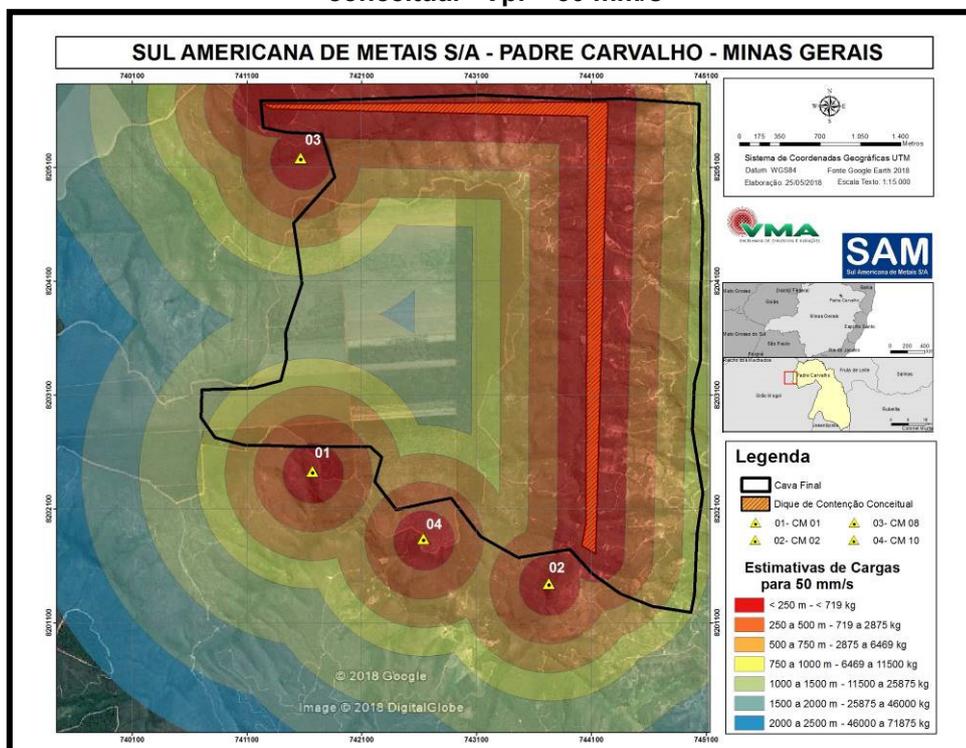
As figuras 10 e 11 abaixo apresentam as cargas por espera estipuladas em função da equação prognóstica de atenuação (equação 1), página 23. Essas figuras apresentam a ação conjunta das 4 (quatro) cavidades de máxima e de 1 (um) dique conceitual de contenção de rejeitos dentro da cava, respectivamente para as intensidades de vibração de Vpi = 15 mm/s e de Vpi 50 mm/s.

**Figura 10 - Cargas estipuladas em função das distâncias dos grupos de cavidades e dique conceitual -  $V_{pi} = 15$  mm/s**



Fonte: VMA - Engenharia de Explosivos e Vibrações, 2018.

**Figura 11 - Cargas estipuladas em função das distâncias dos grupos de cavidades e dique conceitual -  $V_{pi} = 50$  mm/s**



Fonte: VMA - Engenharia de Explosivos e Vibrações, 2018

### 3 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A partir presente estudo, verifica-se a viabilidade dos desmontes por explosivos e de suas futuras atividades de lavra de minério ferro no Projeto Bloco 8 da SAM, dentro dos padrões estudados. As equações verificadas em cenários equivalentes ou de referência indicam que as cargas de explosivo necessárias para os futuros desmontes podem ser compatíveis tanto com os diques de contenção de rejeito como com as cavidades naturais subterrâneas existentes na área do Projeto. Eles foram baseados em resultados de monitoramentos de vibrações em campo transmitidas pelo terreno em áreas similares em 04 (quatro) diferentes minerações de ferro no Brasil, bem como de trabalhos internacionais existentes que envolveram a análise de desmontes de rocha por explosivos em minerações com alto grau de confinamento, em maciços rochosos diversos.

As conclusões obtidas servirão para um melhor dimensionamento nas escavações e desmontes do Projeto, em função das características dos futuros desmontes e das restrições ambientais do Projeto. Um acompanhamento posterior é também proposto, em função das peculiaridades normais de minerações de ferro de grandes dimensões.

De forma geral, foi definida uma equação para o planejamento dos desmontes Projeto Bloco 8, relacionando as máximas vibrações previstas sob a forma de Velocidade de Partícula ( $V_p$  máx., em mm/s), as cargas detonadas por espera ( $Q$ , em kg) e a distância entre a detonação e o ponto de estudo alvo de alguma proteção. Essa equação é rerepresentada abaixo:

$$V_{p\text{máx}} 600 \times (D/Q^{1/2})^{-1,113} \rightarrow \text{Equação SAM}$$

A partir dessa equação, foram geradas outras (equações 2 a 5 - Subitem 2.5.3) relacionando a carga por espera com a distância entre detonação e ponto de interesse.

Os limites propostos de vibração pelo terreno para os diques de contenção são baseados na norma ABNT 9653:2018, e são variáveis conforme a frequência de pico da onda gerada em cada detonação. Para as cavidades naturais subterrâneas, é proposto o limite máximo de  $V_{pi} = 15 \text{ mm/s}$ , independente da frequência. Em ambos os casos quando da execução de obras ou do processo de lavra, os níveis de vibração pelo terreno deverão ser devidamente monitorados em todas detonações, propondo-se ainda níveis de alerta para essas vibrações a serem geradas.

A equação proposta deverá englobar as principais situações a serem encontradas na lavra de Projeto Bloco 8. Os estudos aqui propostos são preliminares, e necessitam, portanto de um acompanhamento e detalhamento posterior, durante as

fases iniciais de implantação e início de operação do projeto, por meio de sismógrafos de engenharia tradicionais, ou eventualmente com instrumentações adicionais conforme exposto no decorrer dos estudos. A lavra do Projeto Bloco 8 deverá ser constantemente monitorada, tanto nas cavidades naturais subterrâneas de relevância máxima, mas principalmente junto aos diques de contenção de rejeitos que se encontrarem mais próximos às frentes de detonações, para que se identifiquem os níveis de vibração de forma rápida logo após cada desmonte, e se tomem as medidas que forem pertinentes para evitar qualquer tipo de dano.

Os estudos indicaram portanto que existem condições de operação nas escavações a céu aberto, com a utilização de métodos de desmonte com uso de explosivos. Eles indicam ainda que, embora as escavações gerem efeitos secundários a forma de vibrações em suas imediações, estas possuem um rápido amortecimento com a distância, e portanto as vibrações pelo terreno, associados às atividades propostas estarão sob controle, e as estruturas existentes na área do projeto estarão garantidas, desde que se tomem os cuidados necessários e se obedeam às premissas indicadas nos quadros que fornecem as características dos desmontes de rocha por explosivos, considerando as distâncias recomendadas, as cargas de explosivo indicadas e os métodos de desmonte previstos para o projeto. Os limites de vibração deverão obedecer às recomendações do presente estudo, sendo variável em função características de frequência das ondas de vibração pelo terreno que serão encontradas no cenário real quando da execução dos desmontes. Notar que também foram definidos níveis de alarme equivalentes à 2/3 (dois terços) dos limites máximos propostos, para que se executem eventuais modificações nos padrões de desmonte que foram estabelecidos previamente.

Deve-se salientar que estes estudos devem ser verificados quando do início da lavra, ou eventualmente em ensaios preliminares, através de instrumentação apropriada de campo, tanto junto aos diques de contenção quanto às cavidades naturais subterrâneas existentes, para que se possam ajustar os parâmetros das equações sugeridas e verificação dos amortecimentos de vibrações na situação real da mineração, promovendo-se então eventuais adequações nos projetos de desmonte e atividades futuras.

Foram também estudadas as vibrações pelo terreno provocadas na operação de equipamentos diversos e seus efeitos sobre as cavidades naturais subterrâneas. Essas vibrações mostraram-se de intensidade bem inferior às das detonações, porém mesmo assim são propostos limites de operação e também de alerta para as mesmas.

Outras instrumentações poderão também ser recomendadas para observações de eventuais movimentações na região, e devem ser objeto de programações específicas.

As interpretações e resultados do estudo são válidos apenas para os cenários avaliados, necessitando assim uma confirmação e verificação na situação real de operação.

## REFERÊNCIAS

Normas Técnicas, Associação Brasileira de. **ABNT NBR ISO/IEC 17025:2017 Requisitos gerais para a competência de laboratórios de ensaio e calibração.** Brasil: ABNT, 2017.

Normas Técnicas, Associação Brasileira de. **ABNT NBR ISO/IEC 10719:2015 Informações e documentação - Relatório técnico e/ou científico - Apresentação.** Brasil: ABNT, 2015.

Normas Técnicas, Associação Brasileira de. **ABNT NBR 9653:2018 “Guia para avaliação dos efeitos provocados pelo uso de explosivos nas minerações em áreas urbanas”.** Brasil: ABNT, 2018.

LANGFORS, U & KIHLMSTROM, B - **Técnica moderna de voladura de rocas.** Espanha, Edições URMO, 1968.

SISKIND, D. E. - **Vibrations from Blasting**, USA, International Society of Explosives Engineers, 2000.

ORIARD, L. - **Explosives Engineering Construction Vibrations and Geotechnology**, USA, International Society of Explosives Engineers, 2002.

VMA - Sociedade Técnica de Vendas Ltda. **PO-7.5-01 Monitoramento Sismográfico Rev.31.** Brasil, 2018.

## APÊNDICES

APÊNDICE A - CONCEITOS GERAIS.....	33
APÊNDICE B - SIMULAÇÃO DO COMPORTAMENTO DO MACIÇO ROCHOSO QUANTO À ATENUAÇÃO DE VIBRAÇÕES SOB A FORMA DE VELOCIDADE DE PARTÍCULA.....	53
APÊNDICE C - CARACTERIZAÇÃO DE FONTES DE VIBRAÇÃO NA OPERAÇÃO DE EQUIPAMENTOS .....	59
APÊNDICE D - CONCEITOS GERAIS.....	71

## **APÊNDICE A - CONCEITOS GERAIS**

### **A.1 Considerações iniciais**

As vibrações que se transmitem pelo terreno ou pela atmosfera, estas sob a forma de pressões acústicas ou ruídos, podem ser produzidas por fontes diversas, sejam naturais ou geradas em diferentes atividades executadas pelo homem. Na mineração, essas vibrações podem ser originadas pela operação de equipamentos diversos, sejam estacionários ou móveis, ou principalmente pelas operações de desmonte de rocha por explosivos, alcançando níveis significativos, principalmente a pequenas distâncias. As ondas de vibrações que percorrem um determinado meio podem ser contínuas (estacionárias), semi-contínuas ou transientes (impulsivas), estas de efeito muito rápido. A transmissão dessas ondas e seu amortecimento com a distância, bem como os efeitos sobre estruturas, são abordados no presente item. De forma geral, atenção maior tem sido dada às vibrações e pressões acústicas geradas no desmonte por explosivos, mas os mecanismos de outras fontes são similares e importantes.

O “Monitoramento dos Níveis de Vibração e Ruído” é um processo que tem como objetivo a avaliação dos valores de vibração e eventualmente de pressão acústica decorrentes de obras diversas e a comparação dos níveis registrados com os limites estabelecidos em Normas e Recomendações diversas, como por exemplo as Normas Brasileira da ABNT e outros critérios pertinentes. O objetivo é portanto (i) identificar as fontes de vibração e suas características, (ii) mensurar, através da utilização de sismógrafos de engenharia, a intensidade da velocidade de vibração de partícula que estaria chegando às estruturas localizadas no entorno da área onde se realizam as obras, (iii) verificar se tais valores estão dentro dos limites preconizados pela NBR 9653:2018 e demais critérios ou normas utilizadas para tal comparação.

A função principal do presente estudo é portanto a medição, registro, análise, interpretação e comparação rigorosa das características e parâmetros de cada elemento presente no entorno da mineração, e cujos efeitos poderiam provocar o aparecimento de patologias nas cavidades naturais subterrâneas vizinhas, no sentido de estabelecer ou afastar a relação de casualidade, e dirimir possíveis dúvidas que venham a se insurgir posteriormente. Os resultados do monitoramento são assim utilizados no presente estudo para verificar a relação existente entre os níveis de vibração obtidos e aqueles tecnicamente aceitáveis, para que se preserve a integridade física das cavidades naturais subterrâneas vizinhas à mina. As vibrações sísmicas possuem características que variam com relação à tipologia da operação. A depender da intensidade da vibração gerada, da periodicidade de ocorrência e, notadamente, da distância com relação ao alvo receptor (como por exemplo cavernas), uma dada atividade pode ser considerada crítica no tocante à emissão de vibração e, se não adequadamente monitorada e controlada, pode vir a exercer interferência na estrutura de uma cavidade natural subterrânea ou uma edificação existente no entorno.

Por preservação das cavidades naturais subterrâneas, deve-se entender a manutenção de valores de velocidade de vibração de partícula de pico abaixo das intensidades que possam causar danos às mesmas, ainda que cosméticos ou superficiais, seja a paredes, tetos, lages, espeleotemas, enfim, danos de qualquer espécie / natureza.

## A.2 Maciços rochosos

Maciços rochosos formam um conjunto de dois elementos principais:

- A matriz rochosa (ou rocha);
- Suas descontinuidades.

Com relação à matriz rochosa, ela é classificada principalmente:

- Por sua gênese;
- Pelos seus minerais constituintes.

Nas classificações e determinações da rocha, podem ainda ser importantes outros fatores, como por exemplo a granulometria e arranjo estrutural / textura. A tabela A-1 apresenta uma classificação inicial de tipos de rochas.

**Tabela A-1 - Classificação de tipos de rocha**

Rochas ígneas	Família dos Granitos	Granito, sienito, riolito, traquito, ...
	Família dos Dioritos	Diorito, andesito, ...
	Famílias dos Basaltos e Gabros	Gabro, dolerito, diabase, basalto, ...
Rochas metamórficas	R. metamórficas massivas	Gneisse, corneanas, quartzitos, mármore, ...
	R. metamórficas xistosas	Xistos, micaxistos, ardósias, xistos mosqueados, ...
Rochas sedimentares	R. sedimentares carbonatadas	Calcários, cré, dolomias, travertinos, ...
	R. sedimentares siliciosas	Grés, arenitos, conglomerados, ...
	R. sedimentares carbonatadas-siliciosas	Margas, grauvaques, ...

Nota<sup>1</sup>: o gneisse tem foliação mas não tem xistosidade.

**Fonte: VMA Engenharia de Explosivos e Vibrações, 2018.**

Algumas propriedades da rocha matriz são sua tenacidade, suas resistências à compressão simples, triaxial e à tração, o módulo de Young, sua densidade, as velocidades de propagação de ondas s e p, e outras.

No estudo da matriz rochosa, é também importante o seu estado de alteração e de ou de outras condições locais. Assim, uma mesma rocha pode ser classificada por exemplo em cinco grupos como são, pouco alterado, medianamente alterado, muito alterado ou decomposto. A figura A-1 abaixo apresenta uma mesma rocha com diferentes características de alteração, e evidentemente com diferentes comportamentos geotécnicos.

**Figura A-1 - Maciço rochoso com diferentes graus de alteração**



Sondagem e uma mesma rocha - quartzito, com trechos classificados como medianamente alterada (parte superior) e totalmente alterada (parte inferior).

Fonte: VMA Engenharia de Explosivos e Vibrações, 2018.

Já as discontinuidades geralmente são constituídas pelas chamadas “famílias” de discontinuidades. Elas podem estar relacionadas diretamente à gênese do maciço rochoso ou por esforços tectônicos posteriores. Podem ser representadas por planos de acamamento, xistosidade, gnaissificações, lineamentos, falhas ou fissuras diversas e outras. Esses planos normalmente possuem uma orientação espacial, sendo definidos por sua direção em relação ao norte - sul, e pelo seu mergulho, que pode variar de horizontal a vertical. O espaçamento entre os planos de uma mesma família é variável, às vezes de menos de 1 mm (um) milímetro até a mais de 10 m (dez) metros: a extensão e persistência dos planos também tem dimensões muito variadas. As discontinuidades podem ser abertas ou fechadas (e com diferentes espessuras), com ou sem preenchimento, de aspecto liso, rugoso, estriado e outros. Notar que cada família precisa ser estudada individualmente, e normalmente cada maciço possui de duas a quatro famílias de discontinuidades. Para maciços dobrados, a identificação das direções e mergulhos de cada família é ainda mais complexa, envolvendo estudos específicos e detalhados.

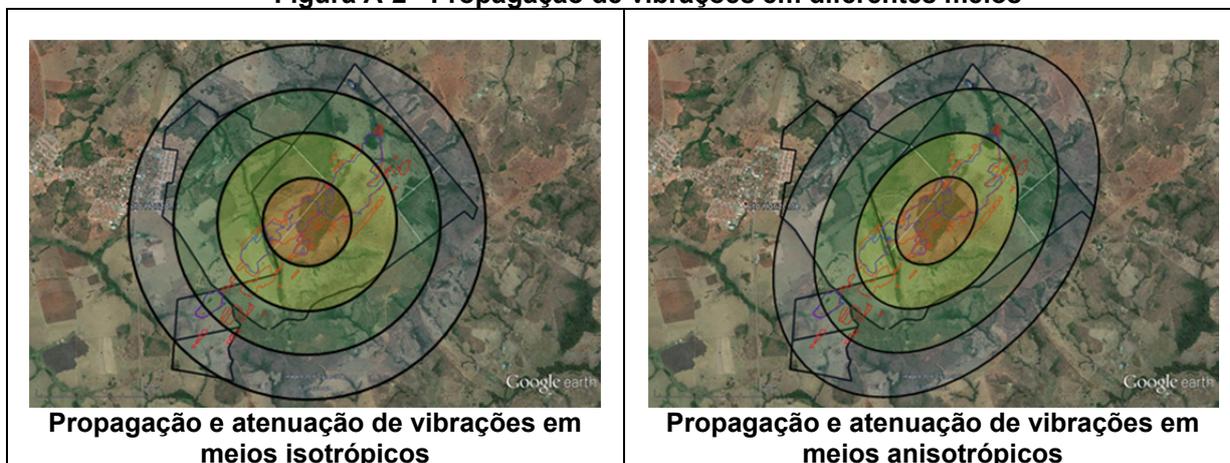
As diferentes classificações de maciços rochosos envolvem assim a verificação de diversos parâmetros, com a execução de ensaios de laboratório e mapeamento sistemáticos de campo. Esses estudos envolvem a litologia, as discontinuidades e mais a alteração da rocha e sua coerência. Não é portanto correto afirmar-se que um maciço é frágil apenas porque tem fraturas. Esses estudos envolvendo a classificação do maciço rochoso, principalmente para escavações subterrâneas, são desenvolvidos para determinação duas situações básicas:

- Definir qual o tipo de suporte que a escavação necessita (chumbadores, tirantes, telas, concreto projetado, cambotas metálicas, concreto estrutural e outros);
- Definir por quanto tempo a escavação pode ficar sem a intervenção de nenhum tipo de suporte antes de colapsar.

Para cavidades naturais subterrâneas, evidentemente não se está estudando o tipo de suporte necessário. Por outro lado, têm-se que a maioria das cavidades naturais subterrâneas normalmente existem a tempos bastante longos; muitas delas estão associadas a períodos de glaciação e degelo, sendo que o último deles ocorreu a cerca de 10.000 (dez mil) anos. Muitas cavidades naturais subterrâneas têm sua gênese e evolução associada ao deslocamento de parte de seu teto. Eventualmente, vibrações pelo terreno acima de determinado nível podem acelerar esse fenômeno, que iria ocorrer dali a 10 (dez) ou a 100 (cem) anos, mas pode ser antecipado pelas vibrações dinâmicas.

As condições geológicas e a presença de descontinuidades podem influenciar a atenuação da vibração pelo terreno, conforme figura A-2, e as ondas podem sofrer fenômenos de reflexão, refração, difrações, além de ampliações e mudanças de características - principalmente frequências - na passagem de um meio para o outro com características diferentes. Normalmente, os estudos de atenuação de vibração trabalham com os valores máximos e casos mais crítico, e portanto a favor da segurança.

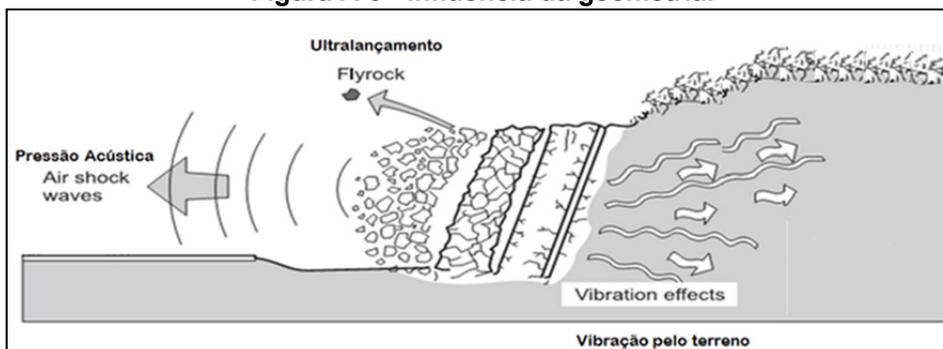
**Figura A-2 - Propagação de vibrações em diferentes meios**



Fonte: VMA Engenharia de Explosivos e Vibrações, 2018.

Outro fato a considerar é que a geometria do local também exerce grande influência na propagação de vibrações. Assim, vibrações pelo terreno são mais intensas na parte posterior das bancadas, ao contrário das vibrações pela atmosfera, que tem a tendência de se propagarem com maior intensidade à frente das mesmas, conforme esquematizado na figura A-3.

**Figura A-3 - Influência da geometria.**



Fonte: VMA Engenharia de Explosivos e Vibrações, 2018.

### A.3 Efeitos secundários do desmonte de rocha

Explosivos são substâncias químicas que devidamente iniciadas reagem liberando uma grande quantidade de energia num curto espaço de tempo. Parte dessa energia é utilizada para desagregar a rocha, fragmentando-a e lançando-a a uma certa distância de sua posição original, formando pilhas que podem ser trabalhadas por equipamentos de carregamento. Entretanto, outra parte é perdida para o ambiente, sob a forma de luz, calor e vibrações pelo terreno e atmosfera. As atividades de desmonte de rocha precisam portanto ser convenientemente conduzidas, quer pelo risco inerente à atividade como pela sua importância na economicidade da Empresa; sua inadequação poderia causar diversos inconvenientes, alguns relativos à própria operação, tais como fragmentação inadequada (excessiva ou insuficiente), superfícies remanescentes abaladas e oferecendo riscos a equipamentos e pessoal, pilhas de desmonte de difícil operação pelos equipamentos de carga e outros. Já com relação a perturbações ao meio ambiente, pode-se citar a geração de ruídos e pressões acústicas, bem como de abalos sísmicos e vibrações pelo terreno, ou ainda o ultralançamento de rocha; esses fatos estão geralmente associados à perda de energia liberada na detonação dos explosivos, constituindo-se consequentemente num fator de elevação de custos de produção.

O desmonte de rochas tem como efeitos secundários dois principais agentes:

- Vibrações pelo terreno;
- Pressões acústicas.

As vibrações ou ondas de choque percorrem o maciço rochoso sob a forma de ondas de tração e compressão e de cisalhamento, provocando tensões que vão decrescendo à medida que aumenta a distância da fonte. A seguir, os gases produzidos na detonação penetram nas fissuras, aumentando a fragmentação e provocando o lançamento do material desmontado em direção às faces livres. Analogamente, as pressões atmosféricas propagam-se pelo ar a grandes distâncias das detonações.

Nos desmontes a céu aberto executados em bancadas convenientemente planejadas, dirige-se a maior parte da energia disponível para uma parcela de rocha pré-estabelecida. No entanto, não se consegue evitar que parte dessa energia seja transmitida ao maciço rochoso remanescente e ao ambiente, manifestando-se sob a forma de vibrações pelo terreno e pressões acústicas, podendo ocasionar danos e impactos às áreas que deveriam ser preservadas. Essa energia do explosivo não utilizada na fragmentação da rocha é perdida, causando os efeitos acima citados. O presente Apêndice apresenta um detalhamento conceitual sobre os processos e efeitos da detonação de explosivos, suas características e interferências no ambiente, bem como limites recomendados.

### **A.3.1 Vibrações pelo terreno**

O desmonte de rocha por explosivos é uma atividade que depende de uma série de características e regras que precisam ser analisadas e obedecidas. De forma geral, trabalhos diversos indicam que apenas cerca de 30% da energia do explosivo é utilizada na fragmentação do maciço rochoso e na movimentação dos fragmentos obtidos e formação da pilha. Portanto, a não só a qualidade do desmonte é afetada por suas características, mas também a grande perda de energia, que se manifesta principalmente sob a forma de vibrações pelo terreno e pressões acústicas.

Conforme comentado, as vibrações que se propagam pelo terreno em níveis insuficientes para promover o fraturamento da rocha podem ocasionar danos às edificações e incômodos às pessoas. A grandeza normalmente utilizada para medir a intensidade da vibração é a velocidade de partícula ( $V_p$ ), definida como a derivada no tempo  $t$  do deslocamento  $A_p$  que uma dada partícula sofre quando submetida às ondas que percorrem o maciço. Já para vibrações pela atmosfera geradas por detonações, as grandezas normalmente utilizadas são pressões acústicas de pico, medidas em Pa (pascal) ou unidades equivalentes, ou então em níveis de pressão acústica, medidas em decibéis lineares de pico (dBL).

A influência da detonação nas vibrações se dá pelas características do plano de fogo conforme discutido abaixo, e pelas condicionantes do meio de propagação, que são as características geomecânicas da rocha, presença de descontinuidades e anisotropias, solo, presença de água, geometria, e outros.

Considera-se assim que o desmonte por explosivos, além das características do maciço rochoso local, é influenciado e determinado entre outros pelos seguintes fatores:

- Elementos da Furação:
  - Diâmetro do Furo - função equipamento / produção
  - Altura da Bancada - função diâmetro / característica da lavra
  - Ângulo da Face (furo)
  - Profundidade do Furo -  $P = H/\cos i + s$
  - Subfuração
  - Afastamento A - distância do furo à face ou entre linhas
  - Espaçamento E - distância de furos mesma carreira

- Razão de Furação (m/m<sup>3</sup>)
- Malha - A x E
  
- Elementos do carregamento:
  - Tipo de Explosivo; (associado à velocidade de detonação / densidade e energia por Kg, etc.)
  - Sistemas de Iniciação / Acessórios
  - Razão de Carregamento (Kg/m<sup>3</sup> ou g/t)
  - Carga de Fundo
  - Carga de Coluna
  - Carga por Furo
  - Tempo dos Retardos
  - Tempo Total
  - Tampão (material, granulometria e comprimento).

A carga por espera, que representa a quantidade de explosivo entre dois retardos sucessivos, e não a carga individual de cada furo, nem tampouco a carga total de explosivo da detonação, constitui-se no fator de maior relevância no estudo dos efeitos secundários de detonações e das consequências ao ambiente em seu entorno. Quando essa carga por espera é variável numa detonação, quer por envolver furos com cargas diferentes, quer por contemplar diferentes quantidades de furos entre esperas sucessivas, considera-se a carga por espera da detonação como sendo a máxima quantidade de explosivos detonados num mesmo tempo na sequência do desmonte.

As vibrações são portanto diretamente proporcionais à carga de explosivo detonado e inversamente proporcional à distância da frente ao local de observação. Modernamente, o uso de micro retardos de tempo nas detonações faz com que a intensidade desses efeitos secundários seja proporcional à chamada carga por espera, isto é, à quantidade de explosivo detonado em cada intervalo de tempo separado pelos elementos de retardos, que promovem as detonações com pequenas defasagens de tempo (da ordem de poucos milissegundos), e não à carga total do desmonte, que seria a soma das cargas por espera individuais; com isso, os picos máximos dessas vibrações nocivas são reduzidos e os efeitos diluídos no tempo total da detonação, e assim as análises dos desmontes devem considerar estes conceitos. Já os limites de vibração suportados por uma dada estrutura são função de fatores diversos que são avaliados no estudo de sua resistência.

Sempre que se detona uma carga de explosivos num maciço rochoso, além dos efeitos de destruição parcial, fraturamento e fragmentação, provocados na rocha, cria-se uma zona sísmica na qual se propagam ondas com amplitudes inferiores aos limites elásticos da rocha. Essas vibrações diminuem com a distância, atenuando-se por dissipação de energia no maciço rochoso. Elas são dadas pela amplitude (A), a frequência (f) e o comprimento de onda ( $\lambda$ ), e dependendo das características locais a transmissão dar-se-á com maior ou menor eficácia.

Estudos realizados tem mostrado que essas vibrações, ao atingirem uma dada estrutura, podem causar danos de diversas intensidades e magnitudes. Diversos autores (Crandell, 1960; Devine, 1962; Langefors 1968; Bollinger, 1971; Jimeno,

1995 e outros) afirmam que a grandeza que melhor se relaciona com a intensidade de danos em estruturas diversas é a velocidade de partícula ( $V_p$ ), que representa a taxa de variação da amplitude do movimento vibratório em função do tempo.

A velocidade de partícula resultante  $V_r$  é uma grandeza vetorial cujo módulo é obtido pela expressão abaixo, sendo “ $V_v$ ”, “ $V_l$ ” e “ $V_t$ ” as componentes dispostas triortogonalmente nas direções vertical, longitudinal e transversal em relação à reta que une os pontos de detonação e de captação:

$$V_r = (V_v^2 + V_l^2 + V_t^2)^{0,5}$$

Durante muitos anos na literatura considerou-se sempre para o cálculo da velocidade de partícula resultante os valores máximos das velocidades de cada canal individual. Posteriormente, com o advento de recursos mais sofisticados de informática, passou-se a considerar a velocidade real calculada a cada instante em incrementos de tempo infinitesimais, com os valores de Velocidade longitudinal ( $V_l$ ), Velocidade vertical ( $V_v$ ) e Velocidade transversal ( $V_t$ ) adotados praticamente para o mesmo instante (normalmente dentro de 1 milissegundo) no registro, e o máximo valor assim obtido é atualmente adotado como sendo a velocidade de partícula real máxima resultante ( $V_{pr}$ ).

A atenuação das vibrações mecânicas que afetam um meio físico é dada principalmente por três fatores complexos e independentes:

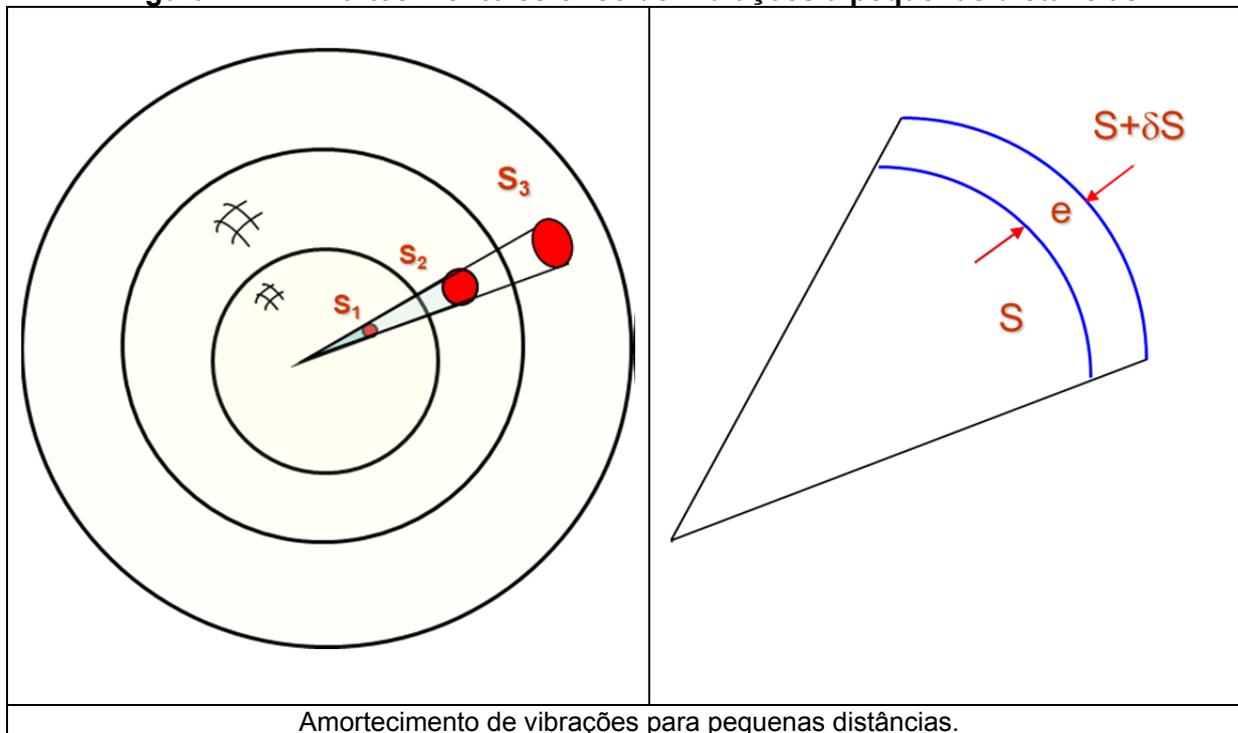
- As características da fonte de vibrações:
- A distância entre a fonte de vibrações e o local de observação:
- As características do material no qual se propagam as vibrações e relacionadas principalmente ao atrito interno do meio.

As vibrações mecânicas normalmente atenuam-se com a distância. Para distâncias pequenas e meios contínuos, ocorre um amortecimento esférico. Se considerarmos um fluxo de energia representado por um cone de ângulo interno fixo, propagando-se a partir de um ponto, a mesma quantidade de energia contida atravessa áreas de calotas esféricas  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$  progressivamente maiores, conforme mostrado na figura A-4 abaixo.

Essas calotas possuem área proporcional ao quadrado da distância ao ponto de origem, e com isso a vibração em um ponto - ou partícula - diminui com o quadrado da distância ( $D^{-2}$ ). Para distâncias intermediárias, o espalhamento das ondas se dá de uma forma mais cilíndrica, e com isso as vibrações diminuem inversamente à

distância ( $D^{-1}$ ). Para distâncias maiores, praticamente existe uma frente de onda plana, e portanto quase não ocorre o amortecimento com a distância.

**Figura A-4 - Amortecimento esférico de vibrações a pequenas distâncias**



Amortecimento de vibrações para pequenas distâncias.

Fonte: VMA Engenharia de Explosivos e Vibrações, 2018.

Já quando considerarmos um meio contínuo de mesma seção, como por exemplo um duto metálico (oleoduto, aqueduto, gasoduto) ou um trilho de metrô ou trem de alta velocidade, a atenuação da vibração se dá apenas pelo amortecimento interno do material específico: evidentemente, a vibração provocada por um impacto medida a 2 m (dois) metros é diferente do mesmo impacto medido a 200 m (duzentos) metros ou a 2 km (dois) quilômetros.

Através de instrumentações convenientemente planejadas e executadas, é possível quantificar-se o comportamento dessas vibrações, possibilitando não só a sua previsibilidade, mas também permitindo que se atue nos desmontes para minimizar seus efeitos e incômodos; nessa previsibilidade, são realizados estudos estatísticos com métodos e *softwares* específicos.

Em estudos envolvendo vibrações provocadas por fontes diversas, sejam elas contínuas (como por exemplo a operação de uma fábrica, um gerador ou uma correia transportadora), semi - contínuas (ex.: tráfego de veículos, máquinas de atuação intermitente e outras) ou impulsivas (provocadas por golpes súbitos, de duração inferior a poucos segundos e espaçados por longos períodos de tempo), o amortecimento com a distância é exponencial e inversamente proporcional à mesma, conforme a equação:

$$V_{pi} = C1 / D^{C2}$$

A deformação que afeta um meio físico pela ação de vibrações normalmente sofre uma atenuação com a distância, sendo função da transmissividade do material; essa atenuação é motivada principalmente pelo atrito interno do meio.

Através de instrumentações convenientemente planejadas e executadas, é possível quantificar-se o comportamento dessas vibrações, possibilitando não só a sua previsibilidade, mas também permitindo que se atue nos desmontes para minimizar seus efeitos e incômodos; nessa previsibilidade, são realizados estudos estatísticos com métodos e *softwares* específicos. Para tanto, registra-se as detonações por meio de sismógrafos de engenharia especialmente desenvolvidos para tal fim, obtendo-se uma correlação entre a carga de explosivos “Q” (em quilogramas) detonada por espera, distância “D” (em metros) entre o ponto de captação e o ponto de detonação e a velocidade de partícula “Vp” (em mm/s) conforme fórmula empírica:

$$V_p = C_1 D^{C_2} Q^{C_3}$$

Onde C1, C2 e C3 são parâmetros dependentes de três grandes grupos de fatores:

- Condicionantes Geológicos;
- Condicionantes Geométricos;
- Características da Detonação.

Em muitos estudos, introduz-se os conceitos das chamadas “Distâncias Escalonadas - SD”, utilizando-se relações pré-definidas entre Q e D. São apresentadas abaixo as relações mais adequadas para o estudo em questão:

$D/Q^{1/2}$  (Distância Escalonada Quadrática)

$D/Q^{1/3}$  (Distância Escalonada Cúbica)

Com isso, chega-se a equações do tipo:

$$V_p = A (SD)^{-B}$$

Onde:

Vp = Velocidade de partícula de pico (individual ou resultante)

SD = Distância Escalonada / “Scaled Distance” ( $D/Q^{1/2}$  ou  $D/Q^{1/3}$ ).

A e B = constantes que podem ser definidas por ensaios para situações específicas

### A.3.2 Normas, critérios e limites existentes.

Os limites de vibração aceitáveis para uma determinada condição variam em função de diferentes situações. Até o presente, não existe um consenso universal sobre o assunto, nem tampouco uma norma internacional ISO, e com isso existe uma grande quantidade de trabalhos com diferentes orientações locais. Assim por exemplo, a norma brasileira da **Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) Normas Brasileiras Regulamentadoras (NBR) 9653:2005** “*Guia para avaliação dos efeitos provocados pelo uso de explosivos nas minerações em áreas urbanas*”, com validade a partir de 31/10/2005, recomenda limites máximos de velocidade de vibração de partícula de pico por faixas de frequência a ser atingido nos limites da área de uma Mineração conforme Tabela A-2 abaixo. Embora específica para Minerações em áreas urbanas, essa norma, em seu item 1.3, cita que ela deve ser utilizada em situações que envolvam riscos semelhantes.

**Tabela A-2 - Limites de vibração pelo terreno conforme Norma ABNT/NBR-9653:2005**

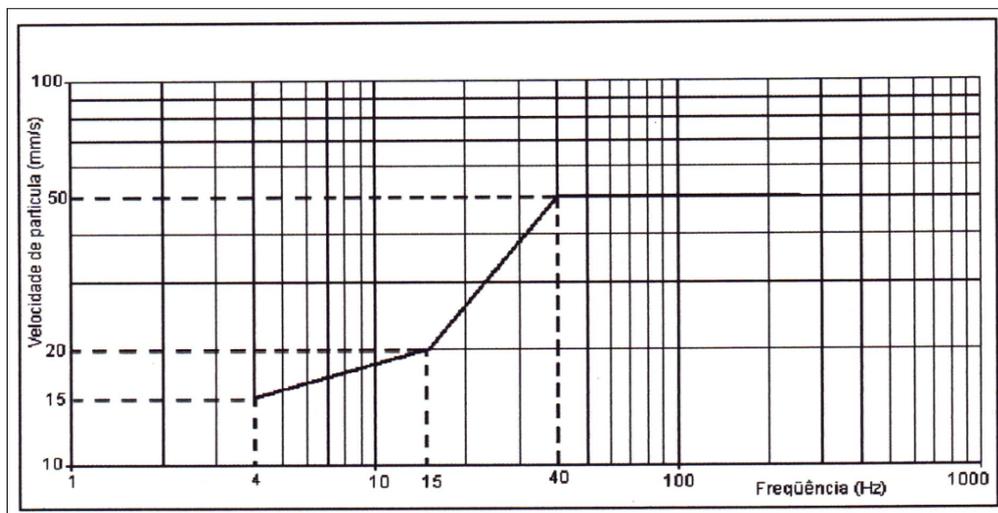
<b>Faixa de Frequência</b>	<b>Limites de velocidade de vibração de partícula de pico</b>
4 a 15 (Hz)	Iniciando em 15 mm/s, aumenta linearmente até 20 (mm/s)
15 a 40 (Hz)	Acima de 20 mm/s, aumenta linearmente até 50 (mm/s)
Acima de 40 (Hz)	50 (mm/s)

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: Norma ABNT NBR 9653, 2005.**

A figura A-5 abaixo mostra os limites dessa Norma Brasileira por faixa de frequência.

**Figura A-5 - Gráfico da Norma Brasileira ABNT/NBR-9653:2005**



Fonte: Norma ABNT NBR 9653, 2005.

A tabela A-3 apresenta um detalhamento dos valores máximos de vibração pelo terreno x faixa de frequências.

**Tabela A-3 - Valores máximos de vibração pelo terreno x faixas de frequência**

 <b>Valores máximos permitidos para velocidade de partícula de pico em relação a faixa de frequência - ABNT - 9653/2005</b>					
Frequência (Hz)	Velocidade de partícula (mm/s)	Frequência (Hz)	Velocidade de partícula (mm/s)	Frequência (Hz)	Velocidade de partícula (mm/s)
4	15,0	18	23,6	32	40,4
5	15,5	19	24,8	33	41,6
6	15,9	20	26,0	34	42,8
7	16,4	21	27,2	35	44,0
8	16,8	22	28,4	36	45,2
9	17,3	23	29,6	37	46,4
10	17,7	24	30,8	38	47,6
11	18,2	25	32,0	39	48,8
12	18,6	26	33,2	40	50,0
13	19,1	27	34,4	50	50,0
14	19,5	28	35,6	100	50,0
15	20,0	29	36,8	200	50,0
16	21,2	30	38,0	300	50,0
17	22,4	31	39,2	400	50,0

Fonte: VMA - Engenharia de Explosivos e Vibrações, 2018.

A norma brasileira é similar às recomendações RI-8507 do *US Bureau of Mines*, e que também adotam o máximo valor individual dos 03 (três) canais instrumentados, bem como estipulam valores limites de intensidade de vibração de partícula como função da frequência da onda.

Analogamente, as normas inglesas BS - 7385-2: 1983 "*Evaluation and Measurements for vibration in buildings - Part 2 : Guide to damage levels from ground borne vibration*" referentes ao assunto, também adotam a velocidade máxima do maior canal, sendo também função da frequência; adicionalmente, estipulam valores limites variáveis em função de horários, de tipo de ocupação / atividade do local, frequência semanal de detonações e outros para definição de valores para limiar de danos cosméticos em vibrações transientes.

Com relação às **Normas Reguladoras de Mineração - NRM Operações com Explosivos e Acessórios NRM - 16 do DNPM - Departamento Nacional de Produção Mineral**, temos nos itens abaixo os limites e recomendações preconizados:

"16.4.14 O monitoramento de vibrações no solo e o ruído no ar decorrentes detonações deve ser realizado nas obras civis próximas ao local de detonação, e manter-se dentro dos seguintes limites máximos:

a) velocidade de vibração da partícula: **15 mm/s** (quinze) milímetros por segundo - componente vertical e:

b) sobrepressão sonora: **134 dB (A)** (cento e trinta e quatro) decibéis.

16.4.15 Deve ser realizado estudo para o ajuste do plano de fogo de modo a atender aos limites do item anterior (16.4.14) observando os seguintes critérios técnicos:

a) determinação da relação empírica entre a velocidade de partícula e a distância escalonada;

b) as distâncias graduadas são definidas pela função  $(D/Q)^{1/2}$ ; onde D é a distância radial ao ponto de detonação e Q é o peso da carga por espera e

c) a velocidade de partícula máxima  $V_p$  é relacionada com a distância escalonada pela seguinte relação:

$$V_p = k (D/Q)^{1/2}^{-b}$$

Onde:

$V_p$  = velocidade de partícula de pico

D = distância da detonação ao ponto de medição

Q = carga por espera (peso)

k e b = fator do local. São constantes que devem ser determinadas por medições em cada local de desmonte em particular."

As tabelas A-4, A-5 e A-6 a seguir apresentam alguns trabalhos adicionais e limites de vibrações para maciços rochosos conforme diferentes autores. Notar que danos severos a maciços rochosos só são esperados em intensidades muito altas (Peter Stacey)

**Tabela A-4 - Danos por vibração em rocha segundo Bauer e Calder (1971).**

<b>Vp (mm/s)</b>	<b>DANOS A ROCHA (segundo Bauer e Calder)</b>
< 250	Nenhum Fraturamento
250 a 640	Deslocamento por Tração
640 a 2.500	Forte Fraturamento por Tração - Poucas Fraturas Radiais
> 2.500	Fragmentação Total do Maciço

Fonte: segundo Bauer e Calder (1971)

**Tabela A-5 - Danos ao maciço rochoso**

<b>Vp Limite (mm/s)</b>	<b>CONDIÇÃO DO MACIÇO</b>
400	Rocha Macia - Juntas Fracas
700 a 800	Rocha Média a Dura - Juntas Fracas
1.000	Rocha dura - Juntas fechadas

Fonte: VMA Engenharia de Explosivos e Vibrações, 2017/ 2018.

**Tabela A-6 - Danos ao maciço rochoso em taludes**

<b>Velocidade de Partícula (mm/s)</b>	<b>DANO À ROCHA EM TALUDES</b>
50 a 100	Queda de estruturas soltas
125 a 500	Dano à rocha frágil
375 a 1.000	Dano à rocha fresca sã.

Guidelines for Open Pit Slope Design, John Read & Peter Stacey, 2009

Alguns autores relacionam ainda o valor da tensão  $\sigma$  na rocha com a velocidade de partícula, visto termos as relações:

$$\varepsilon = k_1 \times \sigma/E = k_2 \times Vp/Vs \quad (\text{equação 5})$$

onde

$\varepsilon$  = deformação;

$k_1$  e  $k_2$  = constantes de conversão de unidades;

$\sigma$  = tensão;

E = módulo de elasticidade;

Vp = velocidade de partícula;

Vs = velocidade de propagação de ondas s.

A rocha será rompida quando a tensão  $\sigma$  for maior que sua resistência à tração. O Tabela A-7 relaciona a tensão na rocha a diferentes níveis de velocidade de partícula.

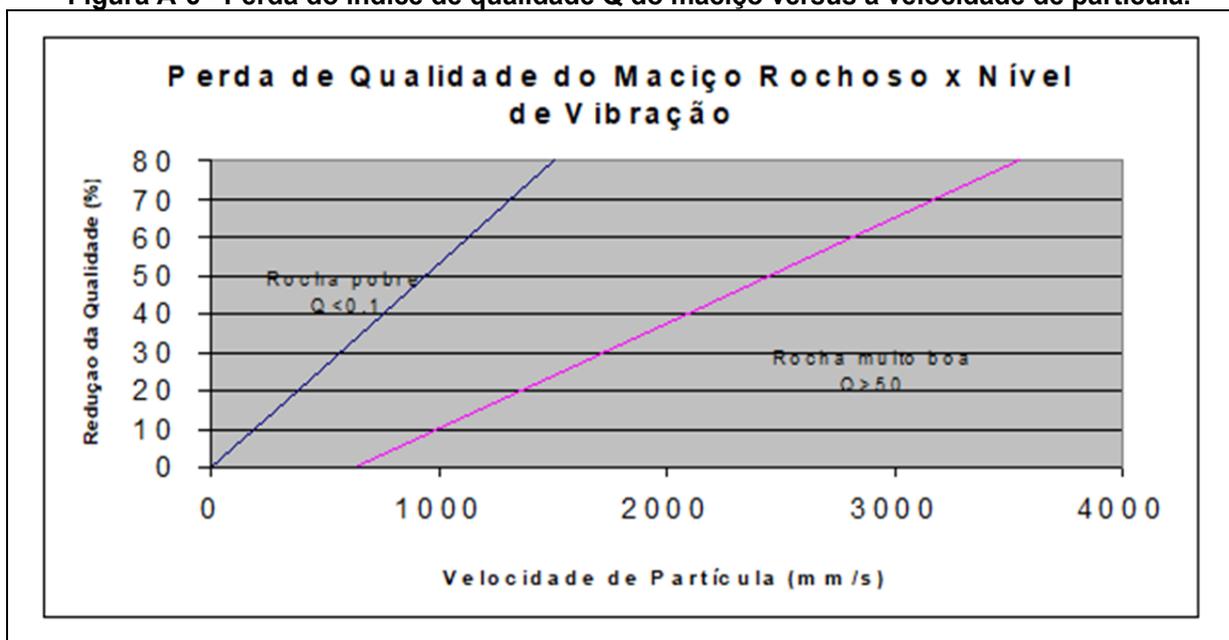
**Tabela A-7 - Tensão na rocha versus níveis de velocidade de partícula.**

$\sigma$ - TENSÃO NA ROCHA (Kg / cm <sup>2</sup> )	Vp - VELOCIDADE DE PARTÍCULA (mm/s)
30	110
90	326
700	2.500

Fonte: VMA Engenharia de Explosivos e Vibrações 2018.

A perda percentual do índice de qualidade Q do maciço rochoso pelo efeito de vibrações pode afetar a estabilidade de taludes: isto pode ser avaliada pelo gráfico da figura A-6 abaixo:

**Figura A-6 - Perda do índice de qualidade Q do maciço versus a velocidade de partícula.**



Fonte: VMA Engenharia de Explosivos e Vibrações, 2018.

A norma ABNT 9653 anteriormente citada está em processo final de revisão, tendo já sido submetida à consulta pública, e deverá ser publicada ainda no primeiro semestre de 2.018. Nesta revisão, o assunto limite de vibrações para cavidades foi exaustivamente discutido, tendo sido criado um Grupo de Trabalho específico para o assunto. Na nova versão, por consenso entre os participantes foi incluído no escopo da norma o parágrafo ***“Para situações onde haja proximidade com cavidades naturais subterrâneas e na ausência de estudos específicos para***

*estas, esta Norma pode ser aplicada como referência para avaliações dos efeitos físicos provocados pelos desmontes de rocha com uso de explosivos.”*

A publicação “Desmontes Cuidadosos com Explosivos”, de Carlos Manoel Nieble, da Ofitexto / EAD cita uma norma sueca, estipulando limites de vibração de **V<sub>pi</sub> de 70 a 100 mm/s** para cavidades subterrâneas em rocha dura com vão de **15 m** (quinze) metros a **20 m** (vinte) metros.

Já quando se considera materiais específicos, diferentes autores sugerem valores variáveis em função de suas características próprias; alguns limites são obtidos empiricamente através da prática e observação de casos similares, outros por meio de estudos teóricos de natureza diversa. Segundo eles, os níveis dinâmicos de tensão ( $\sigma$ ) interrelacionam-se com e massa específica ( $\rho$ ), com a velocidade de propagação de ondas sônicas no material em observação ( $c$ ) e com a velocidade de partícula ( $V_p$ ) conforme a relação abaixo:

$$\sigma = \rho c V_p$$

Diversos estudos mostram ainda que a influência dos efeitos climáticos (variações diárias / sazonais de temperatura e humidade, por exemplo) provocam tensões em edificações muitas vezes superiores às provocadas pelas detonações.

Na Tabela A-8 estão expostos os possíveis danos a estruturas em relação às vibrações pelo terreno em função da velocidade de partícula resultante, em mm/s.

**Tabela A-8 - Relação entre velocidade de vibração da partícula e possíveis danos em estruturas**

<b>Danos previstos</b>	<b>V<sub>p</sub> resultante (mm/s)</b>
Oscilações só notadas com uso de instrumento	2
Oscilações quase imperceptíveis	2 a 4
Oscilações sentidas por algumas pessoas ou por pessoas que saibam da detonação	4 a 8
Oscilações notadas por muitas pessoas- barulho nas vidraças	8 a 15
Queda de reboco, pequenos danos	15 a 30
Fendas em reboco, danos a edifícios já deformados	30 a 60
Danos a edifícios em estado satisfatório, fendas e queda de reboco, fendas nas paredes	60 a 120
Consideráveis danos em edifícios, fendas em pilares e paredes	120 a 240
Destruição de edifícios, grandes fendas nas paredes, danificação da alvenaria, queda de paredes	240 a 480
Grande destruição e colapso de edifícios	480

**Fonte: Medvedv, 1965; in IPT, 1988**

Existem diferentes publicações que relacionam intensidade de vibrações com fontes diversas e diferentes distâncias.

Assim, para ter-se uma noção das intensidades de vibrações geradas por atividades diversas, pode-se comparar as vibrações de equipamentos ou mesmo de detonações com outras, naturais ou induzidas pelo homem, conforme publicado na revista “*The Journal of Explosives Engineering*” em seu número de setembro e outubro de 1997, e resumidas na tabela A-9 a seguir:

**Tabela A-9 - Vibrações equivalentes em residências devido a fontes diversas, segundo “*The Journal of Explosives Engineering*” - set-out 97**

<b>FONTE</b>	<b>VELOCIDADE DE PARTÍCULA EQUIVALENTE</b>
Tráfego de Veículos	1 a 5 mm/s
Pulos no Piso	2,5 a 12,7 mm/s
Batida / Fechamento de Portas	3,8 a 48 mm/s
Variações Temperatura / Umidade	25 a 81 mm/s
Ventos a 80 km/h	28 a 170 mm/s

**Fonte: “*The Journal of Explosives Engineering*” - set-out 97.**

Uma norma bastante citada é norma alemã DIN 4150-3 (1999), que apresenta as diretrizes para a avaliação dos efeitos de vibração em edificações e demais estruturas. Os limites de vibração estabelecidos por esta norma apresentam critérios diferenciados para vibrações distintas, bem como considera variações quanto à condição de edificações. A Tabela A-10 apresenta os limites estabelecidos pela norma alemã para o caso de vibrações de para o caso de vibrações de longa duração, medidas no plano horizontal e no piso mais alto da edificação.

**Tabela A-10 - Limites de vibração contínua (longa duração) em edificações - DIN 4150-3.**

<b>Tipo da Estrutura</b>	<b>Velocidade de partícula - Vpi</b>
1. Edificações comerciais ou industriais	10,0 mm/s
2. Edificações residenciais	5,0 mm/s
3. Edificações que não se classificam nos itens anteriores e com alto valor intrínseco e sob preservação.	2,5 mm/s

**Fonte: Norma DIN 4150-3 Parte 3**

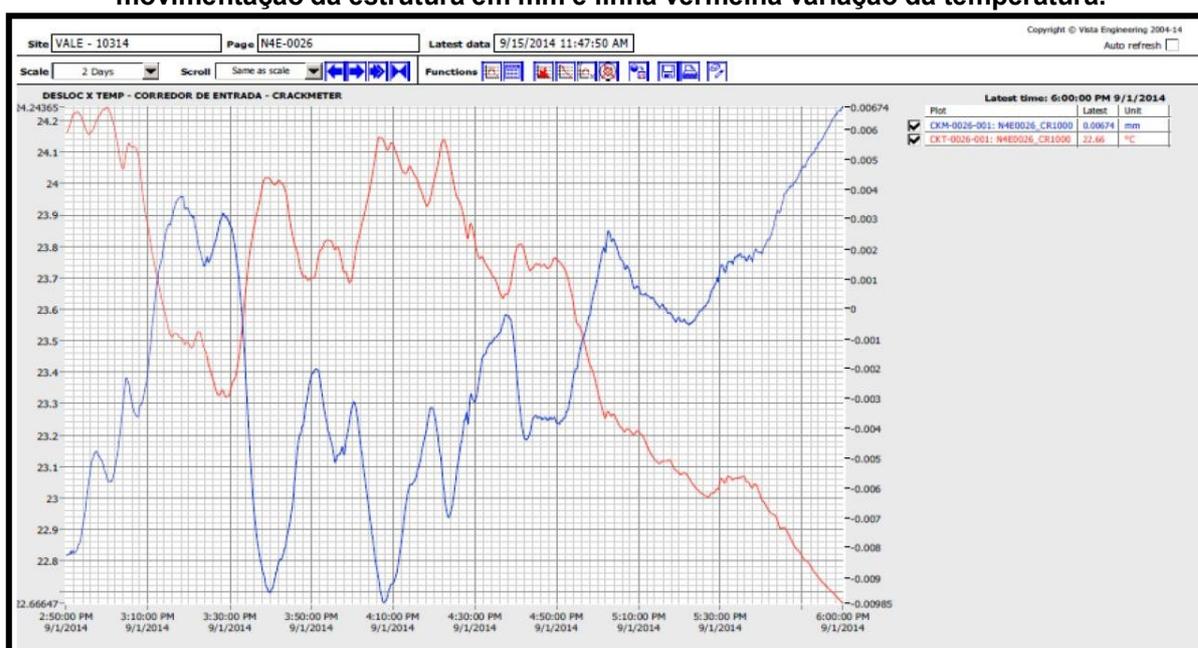
Deve-se aqui salientar que as normas alemãs quando se referem a ruínas e monumentos históricos possivelmente consideram as torres de igrejas, normalmente muito altas em estilo gótico, e portanto sujeitas a ressonâncias para vibrações de baixa frequência, e muitas vezes abaladas pelos efeitos de guerras e conseqüente bombardeios.

Um trabalho recente publicado no 33º Congresso de Espeleologia em 2015 apresenta o caso de cavidades de alta relevância que estão sendo submetidas em seu entorno a desmontes de rocha de grande porte a distâncias de até **75 m**

(setenta e cinco) metro, junto a áreas de lavra da Vale no complexo de Carajás, Mina N4E Norte.

Nesse estudo, devidamente autorizado pelo IBAMA, estava sendo realizado na ocasião o acompanhamento das sucessivas detonações e avanço da lavra acompanhada por instrumentação geotécnica, sismográfica e ambiental, com desmontes utilizando diâmetros de perfuração entre 10" e 3 1/2", e cargas por espera entre **30 Kg** (trinta) quilogramas e **250 Kg** (duzentos e cinquenta) quilogramas, e estipulando-se o limite de velocidade de pico de partículas **V<sub>pi</sub> = 20,7mm/s**. O avanço da lavra foi acompanhado através de um mapeamento e instrumentação sistemática, realizadas por sismógrafos de engenharia, craquímetros, medidores de convergência, medidores de temperatura e umidade, e complementados por filmagens específicas. Uma das constatações foi o registro da abertura e fechamento de fratura instrumentada pela variação da temperatura e umidade diárias da cavidade.

Figura A-7. Gráfico de deformação por *crackmeter* de uma fratura monitorada. Linha em azul: movimentação da estrutura em mm e linha vermelha variação da temperatura.



Fonte: 33º Congresso Brasileiro de Espeleologia

Esses estudos mostraram uma variação máxima de deslocamento de **0,003 mm**, quando a cavidade foi submetida a vibrações sísmicas, provocadas por desmonte de rochas com explosivos realizado a **75 m** (setenta e cinco) metros de distância, valores bem inferiores à variação diária registrada por efeitos da temperatura.

### A.3.3 Formas de redução de vibrações pelo terreno.

Um dos recursos para redução de vibrações pelo terreno é sem dúvida a redução das cargas máximas por espera. Nesse aspecto, as equações elaboradas neste estudo desenvolvido relacionando a distância escalonada com a intensidade da vibração constituem-se em ferramentas adequadas para a elaboração de um

planejamento de desmorte nas situações locais. Em casos críticos, recursos adicionais para a redução de vibrações poderiam ser recomendados. Todos os elementos do desmorte listados no subitem A.3 são contribuintes na geração e redução de vibrações, sendo os principais, além da carga por espera, o tipo de explosivo e a temporização do desmorte (envolvendo tipos e tempos de retardo). As tabelas A-11 e A-12 abaixo também apresentam uma indicação dos fatores que influenciam nas vibrações pelo terreno, tanto controláveis quanto não controláveis e que portanto precisam ser acompanhadas para a redução destes efeitos.

**Tabela A-11 - Fatores que influenciam nas vibrações pelo terreno - variáveis controláveis.**

		Fatores que influenciam a magnitude das vibrações (Rosenthal, et al., 1987)		
		Influência nas Vibrações		
		Importante	Moderadamente Importante	Insignificante
<b>Variáveis Controláveis</b>	Peso da carga explosiva por retardo	X		
	Intervalo dos retardos	X		
	Parâmetros geométricos do desmorte:			
	• Afastamento e espaçamento			
	• Confinamento da carga			
	• Comprimento e diâmetro da carga	X		
	• Ângulo e inclinação da carga			
	• Profundidade da carga			
• Quantidade e tipo do atacamto				
	Peso da carga por detonação	X		
	Direção da iniciação	X		
	Cordão detonante descoberto ou não			X

Fonte: Rosenthal,1987

**Tabela A-12 - Fatores que influenciam nas vibrações pelo terreno - variáveis não controláveis**

		Fatores que influenciam a magnitude das vibrações (Rosenthal, et al., 1987)		
<b>Variáveis Não Controláveis</b>	Geologia local	X		
	Tipo de material de cobertura	X		
	Espessura do material de cobertura	X		
	Distância entre desmorte e ponto de interesse	X		
	Propriedades do maciço rochoso	X		
	Erro no tempo de iniciação		X	
	Superfície do terreno			X

Fonte: Rosenthal,1987

### **Fatores que influenciam nas vibrações pelo terreno - diferentes autores**

1. Minimização da carga de explosivos por unidade de tempo de retardo, que pode ser alcançada através da redução do diâmetro e altura dos furos, além da divisão de cargas dentro dos furos, detonando-se em tempos distintos;
2. Desacoplamento da carga com uso de cartuchos;
3. Redução do número de furos detonados por tempo de retardo;
4. Determinar o tempo de retardo efetivo entre furos e linhas, que evite uma forte sobreposição de ondas, assim como a geração de ondas de baixa frequência;
5. Utilizar a quantidade de explosivo adequado de forma a se evitar o confinamento da carga;
6. Desenvolver o plano de fogo com uma relação entre a altura da bancada ( $H_B$ ) e afastamento ( $A$ ) maior que dois  $H_B/A > 2$ ;
7. Controlar a perfuração para que as malhas coincidam com as do plano de fogo e para eu se minimizem os desvios dos furos;
8. Possibilitar a maior frente livre possível;
9. Redução do tampão e da subperfuração;
10. Evitar com que o tempo da detonação ultrapasse um segundo;
11. Utilização de detonadores eletrônicos;
12. Eliminação de repés, ou outros obstáculos que impeçam o deslocamento do material desmontado e;
13. Proporcionar a progressão da detonação do ponto mais próximo para o mais afastado do local onde se pretende obter os menores níveis de vibração.

Os limites de vibração aceitáveis para uma determinada condição variam em função de diferentes situações. Normalmente, os danos mais superficiais ou cosméticos em edificações começam a se manifestar em níveis de 10 a 100 vezes os limites da percepção da vibração. Até o presente, não existe um consenso universal sobre o assunto, nem tampouco uma norma internacional ISO, e com isso existe uma grande quantidade de trabalhos com diferentes orientações locais.

## **APÊNDICE B - SIMULAÇÃO DO COMPORTAMENTO DO MACIÇO ROCHOSO QUANTO À ATENUAÇÃO DE VIBRAÇÕES SOB A FORMA DE VELOCIDADE DE PARTÍCULA**

Para a avaliação das vibrações pelo terreno que se propagam em áreas de cenários similares às do projeto SAM, a VMA selecionou diferentes estudos realizados em minerações de ferro no Brasil. Evidentemente, o minério da área da SAM, composto basicamente por metadiamectitidos, têm características até certo ponto diferentes das demais minerações avaliadas: entretanto, parte destas análises foi realizada em minas com presença de rochas itabíricas, compostas de minerais semelhantes aos do metadiamectito, e de diferentes graus de compacidade. Considera-se aqui, conforme informado no Apêndice A, que os resultados de estudos de atenuação de vibrações são sempre conduzidos pela análise dos casos mais críticos e desfavoráveis observados em um cenário real. Adicionalmente, os estudos e análises conduzidas nessas minerações e suas equações sismográficas projetacionais serão complementadas por relações baseadas em uma análise global de casos pertinentes estudados por diferentes autores.

Assim na análise de minerações de ferro no Brasil, foram verificadas instrumentações e elaboração de curvas projetacionais de vibração pelo terreno em 4 (quatro) diferentes minerações:

- Instrumentações na Mineração A;
- Instrumentações na Mineração B;
- Instrumentações na Mineração C;
- Instrumentações na Mineração D;

A utilização de letras (A, B, C, D) em substituição do nome das Mineradoras, foram empregadas para preservar a integridade dos dados e dos nomes dos empreendedores.

Os dados referentes a essas instrumentações foram inicialmente tratados por métodos estatísticos conforme descrito no Apêndice A, sendo comparados entre si. Conforme comentado, foram efetuadas regressões probabilistas utilizando-se dados e instrumentações de diferentes minerações, que foram tratados por métodos estatísticos discutidos nos Apêndices A e B. De forma geral, esses tratamentos estatísticos envolvem três diferentes variáveis, quais sejam:

- Q - carga máxima detonada por espera, em quilogramas (kg);
- D - distância entre o local de detonação e o ponto de interesse ou instrumentação em metros (m);
- V<sub>pi</sub> - Velocidade de partícula individual, em milímetros por segundo (mm/s).

Embora as análises efetuadas tenham sido feitas para diferentes critérios e autores com diversas distâncias escalonadas (Devine,  $D/Q^{1/2}$ , Hendrom  $D/Q^{1/3}$ , Langefors  $Q/D^{3/2}$ ), são aqui apenas apresentados os dados da distância escalonada quadrática  $D/Q^{1/2}$  ou critério de Devine para não sobrecarregar o Relatório, e também tendo-se em vista que os critérios de comparação internacionais são realizados nessa unidade.

As equações resultantes dos estudos tem portanto a fórmula geral:

$$V_p = A \times (D/Q^{1/2})^B$$

Onde A e B são constantes obtidas nas regressões realizadas.

De forma geral, nos estudos estatísticos para cada grupo de dados obtêm-se três equações, definindo-se um intervalo de confiança de 95%. Essas equações representam assim:

- $V_p$  máx → equação de máximos valores probabilistas;
- $V_p$  méd → equação média dos dados estudados;
- $V_p$  mín → equação de valores mínimos previstos.

Assim, todas essas equações foram definidas nas quatro minerações estudadas, porém elas não serão identificadas para não prejudicar o entendimento global do relatório. Em todos os trabalhos, será apresentada pelo menos a equação de máxima energia, tendo-se em vista que ela sempre representa o caso mais desfavorável (crítico) e sobre a qual são sempre efetuados estudos de prognósticos futuros.

Para a Mineração A, situada no quadrilátero ferrífero, apresenta-se o resultado da equação de máxima intensidade, conforme trabalhos desenvolvidos pela VMA.

$$V_p \text{ máx} = 265 \times (D/Q^{1/2})^{-1,29}$$

Analogamente para a Mineração B, também situada no quadrilátero ferrífero, apresenta-se o resultado das equações de máxima e média intensidade, conforme trabalhos desenvolvidos pela VMA e outras.

$$V_p \text{ máx} = 570 \times (D/Q^{1/2})^{-1,265}$$

$$V_p \text{ méd} = 216 \times (D/Q^{1/2})^{-1,265}$$

Já para a Mineração C, ainda situada no quadrilátero ferrífero, apresenta-se o resultado das equações de máxima intensidade, conforme trabalhos anteriores.

$$V_p \text{ máx} = 286 \times (D/Q^{1/2})^{-1,618}$$

Quanto à Mineração D, apresentam-se os resultados de instrumentações de desmontes de rocha em complexo minerário da região Norte, feitos com o objetivo de proteção das cavidades naturais existentes no entorno dessas minas. Esses registros tinham sido analisados em três diferentes grupos de instrumentações, dos quais o principal envolveu a instrumentação de desmontes normais de produção (535 instrumentações), e que são apresentados nas regressões projetoriais para essa mineração, quais sejam:

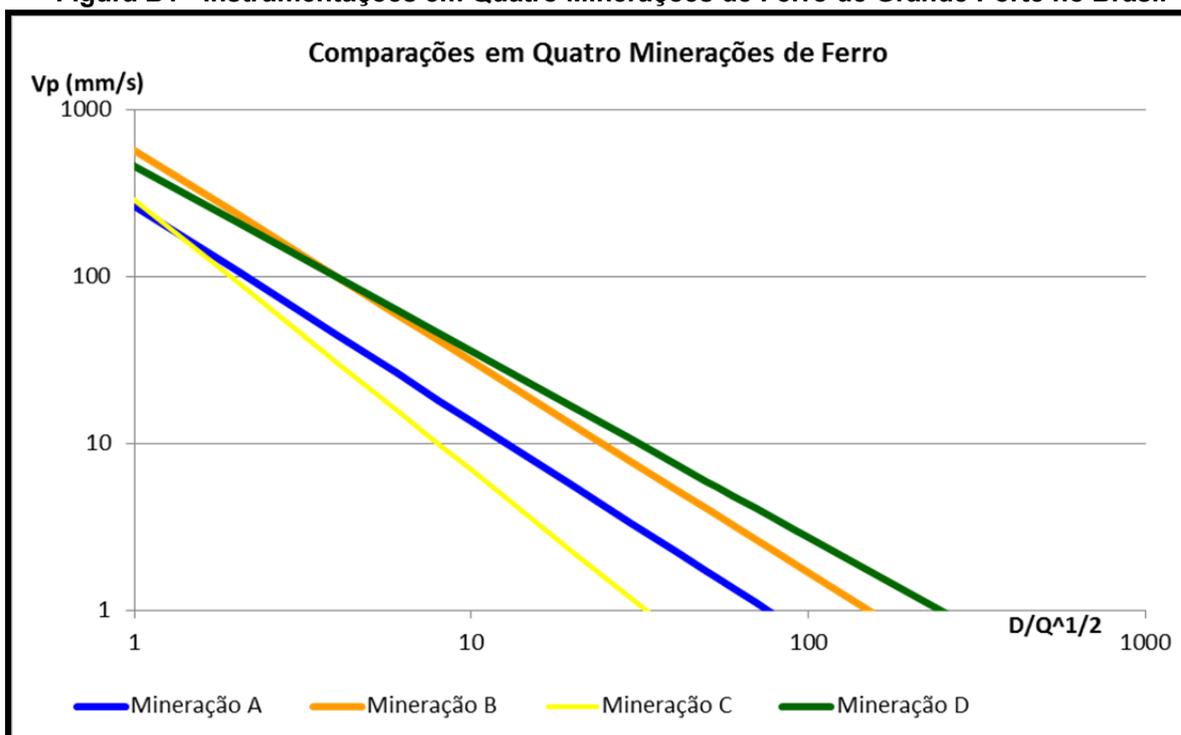
$$Vp \text{ máx} = 461 \times (D/Q^{1/2})^{-1,113}$$

$$Vp \text{ méd} = 107,7 \times (D/Q^{1/2})^{-1,113}$$

$$Vp \text{ mín} = 25,2 \times (D/Q^{1/2})^{-1,113}$$

O Gráfico da Figura B-1 apresenta assim as principais equações de  $Vp_{\text{máx}}$  resultantes nas quatro diferentes minerações de ferro de grande porte aqui estudadas. Notar que as curvas da Mineração B e da Mineração D são bem próximas, e acima das Minerações A e C. Adicionalmente, a Mineração C apresenta um comportamento de amortecimento um pouco diferente das demais.

**Figura B1 - Instrumentações em Quatro Minerações de Ferro de Grande Porte no Brasil**



Fonte: VMA - Engenharia de Explosivos e Vibrações, 2018.

Por outro lado, trabalhos internacionais foram desenvolvidos com instrumentações em diferentes minerações de portes diversos. Nos estudos aqui considerados, os autores procuram também avaliar o comportamento das vibrações pelo terreno em diferentes situações, analisando as equações de maior energia resultantes. Nesse aspecto, dois trabalhos são de grande importância para o presente estudo. Assim, os resultados obtidos para as quatro diferentes minerações estudadas foram comparados com estudos internacionais desenvolvidos por Siskind e por Oriard para

situações de desmontes de rocha com alto confinamento em diversas situações.

Segundo os estudos de Oriard (2002), o autor apresenta diferentes equações, das quais duas foram recalculadas para o sistema métrico MKS, sendo representadas pelas equações:

$$V_p \text{ máx} = \rightarrow 1728 \times (D/Q^{1/2})^{-1,6} \rightarrow \text{para curva superior de dados típicos}$$

$$V_p \text{ máx} = \rightarrow 4320 \times (D/Q^{1/2})^{-1,6} \rightarrow \text{para curva superior de alto confinamento}$$

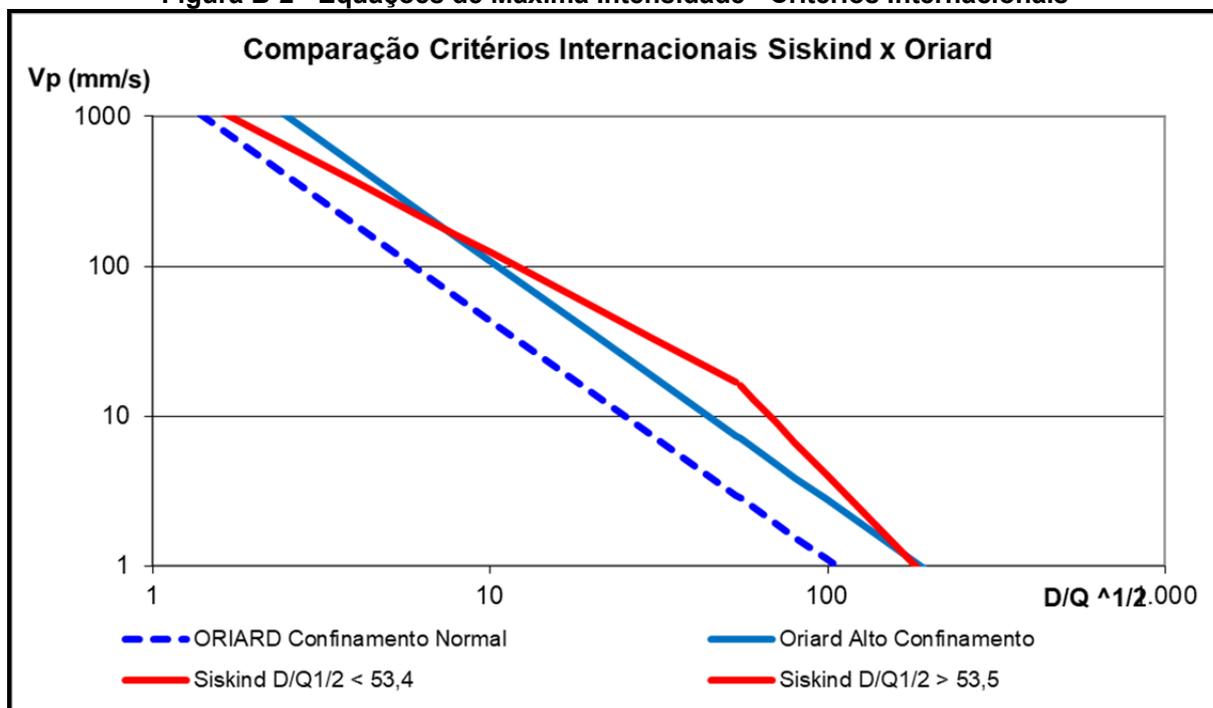
Já Siskind (2000), que trabalhou durante muitos anos como pesquisador do USBM - US Bureau of Mines, apresenta entre outras um envelope com equações de máxima energia obtidas principalmente com instrumentações em minerações de carvão dos Estados Unidos da América, que geravam ondas de baixa frequência muito similares às de grandes minerações de ferro, e onde os desmontes são realizados em grandes extensões, muito confinados e com furos de grande diâmetro e altas cargas de explosivos. As equações propostas por Siskind são:

$$V_p \text{ máx} = 1683 \times (D/Q^{1/2})^{-1,18} \rightarrow \text{para distâncias escalonadas } D/Q^{1/2} < 53,4$$

$$V_p \text{ máx} = 166508 \times (D/Q^{1/2})^{-2,31} \rightarrow \text{para distâncias escalonadas } D/Q^{1/2} > 53,4$$

Essas equações são apresentadas conjuntamente no gráfico da Figura B-2.

**Figura B-2 - Equações de Máxima Intensidade - Critérios Internacionais**

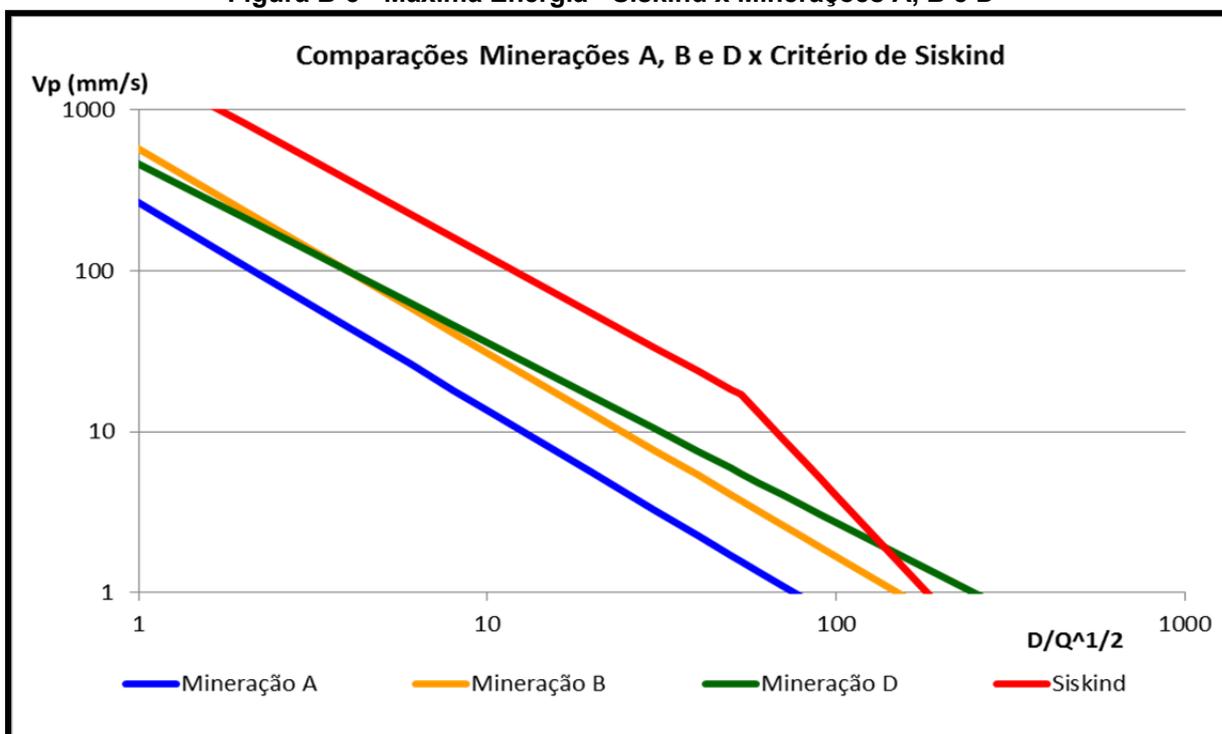


Fonte: Siskind (2000) e Oriard (2002), modificada por VMA

Na comparação entre os 02 (dois) pesquisadores e os resultados obtidos nos estudos da VMA, verifica-se inicialmente que os trabalhos de Siskind e Oriard obtiveram resultados diferentes com relação ao expoente “B” das equações apresentadas, com o segundo apresentando um coeficiente maior que o primeiro, o que indica um maior amortecimento das ondas com a distância escalonada. O comportamento das equações de Oriard é similar apenas ao observado na “Mineração C” de nossos estudos, talvez por esta envolver rochas mais compactas (quartzitos, itabiritos muito densos e compactos), ou ainda pela pequena quantidade de ensaios (31 instrumentações), e realizados a distâncias relativamente altas.

As demais Minerações, de estudos mais recentes, apresentaram um coeficiente de amortecimento “B” bastante próximo aos propostos Siskind (2000) para Distâncias Escalonadas  $D/Q^{1/2}$  inferiores a  $DE = 53,4$ . Portanto, a figura B-3 apresenta esse critério associado às equações de máxima das Minerações A, B e D.

**Figura B-3 - Máxima Energia - Siskind x Minerações A, B e D**



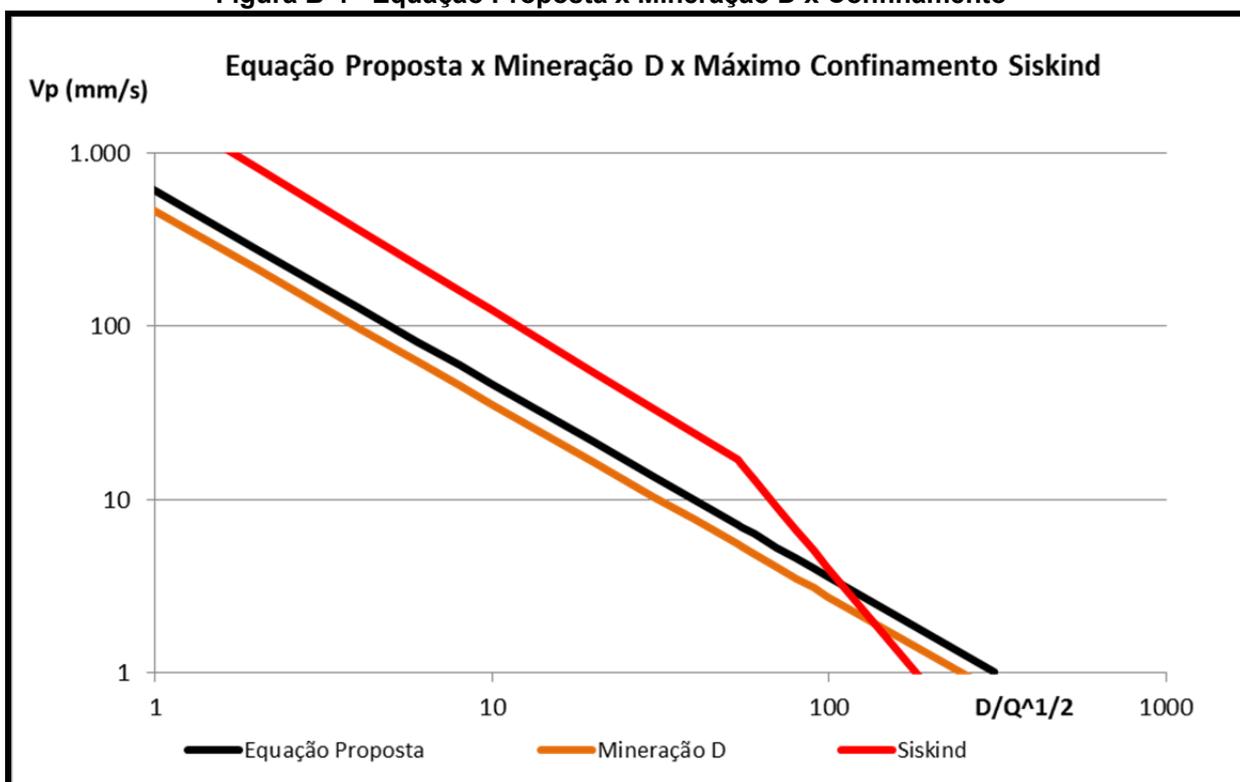
Fonte: Siskind (2000) e VMA

Nessa comparação, verifica-se que a equação da mineração D, dentro das minas brasileiras, foi a que proporciona as maiores vibrações para o intervalo de intensidades inferiores a **100 mm/s**, ou seja, para a faixa de trabalhos e limites a serem propostos. Verifica-se ainda que as vibrações dessa mineração D são inferiores às de diversos casos analisados no mundo todo por Siskind. Com isso, propõe-se para o caso do projeto da SAM uma equação projecional com um coeficiente de segurança de 30 % (trinta por cento) em relação a essa equação de maior intensidade da mineração D, chegando-se portanto à equação:

$$V_{pmax} = 600 \times (D/Q^{1/2})^{-1,113}$$

Essa curva é apresentada juntamente com a da mineração D e a de Siskind na figura B-4.

**Figura B-4 - Equação Proposta x Mineração D x Confinamento**



Fonte: VMA - Engenharia de Explosivos e Vibrações, 2018.

## APÊNDICE C - CARACTERIZAÇÃO DE FONTES DE VIBRAÇÃO NA OPERAÇÃO DE EQUIPAMENTOS

O presente apêndice irá decorrer sobre os principais tipos e fontes de vibrações que poderão ser produzidas durante as obras de implantação **Projeto Bloco 8**, da **Sul Americana de Metais - SAM** e em sua fase de operação e lavra. Não estão aqui estudados os impactos da Planta de Beneficiamento, tendo em vista a sua maior distância tanto aos diques de contenção de rejeitos e quanto às cavidades naturais subterrâneas considerando-se os parâmetros vigentes na ocasião dos estudos, e recomendando então a realização de uma campanha de medições de níveis de vibração quando projeto estiver em implantação e / ou a lavra entrar em operação, para validar os níveis simulados e garantir que não haverá impacto vibratório significativo.

A atenuação de vibrações pelo terreno provocadas nesse tipo de estudos de vibrações provocadas por máquinas e equipamentos se dá através de modelos de regressão potenciais com a seguinte formulação:

$$V_{pi} = K \times D^{-\alpha}$$

Onde:

$V_{pi}$  = velocidade de partícula = medida da intensidade da vibração em um ponto;

$D$  = Distância entre a fonte e o ponto de medição;

$K$  e  $\alpha$  = Constantes definidas em função da fonte de vibração e características do terreno nas quais as mesmas se propagam.

A partir de monitoramentos efetuados em diferentes obras civis e atividades de mineração, é possível efetuar-se simulações baseadas em medições reais vibrações de operações similares às que serão desenvolvidas nas obras de implantação do Projeto SAM e em sua operação. Em obras e atividades de lavra de qualquer jazida, são utilizados equipamentos gerais de diferentes portes e capacidades. Alguns se locomovem sobre esteiras, outros sobre pneus, outros ainda que produzem movimentos vibratórios mais intensos em sua operação. Para as obras e operação da SAM, serão utilizados:

Equipamentos sobre pneus:

- Caminhões de diferentes capacidades;
- Carregadeiras;
- Motoniveladoras.

Equipamentos sobre esteiras:

- Escavadeiras;
- Tratores, com ou sem “ripper”.

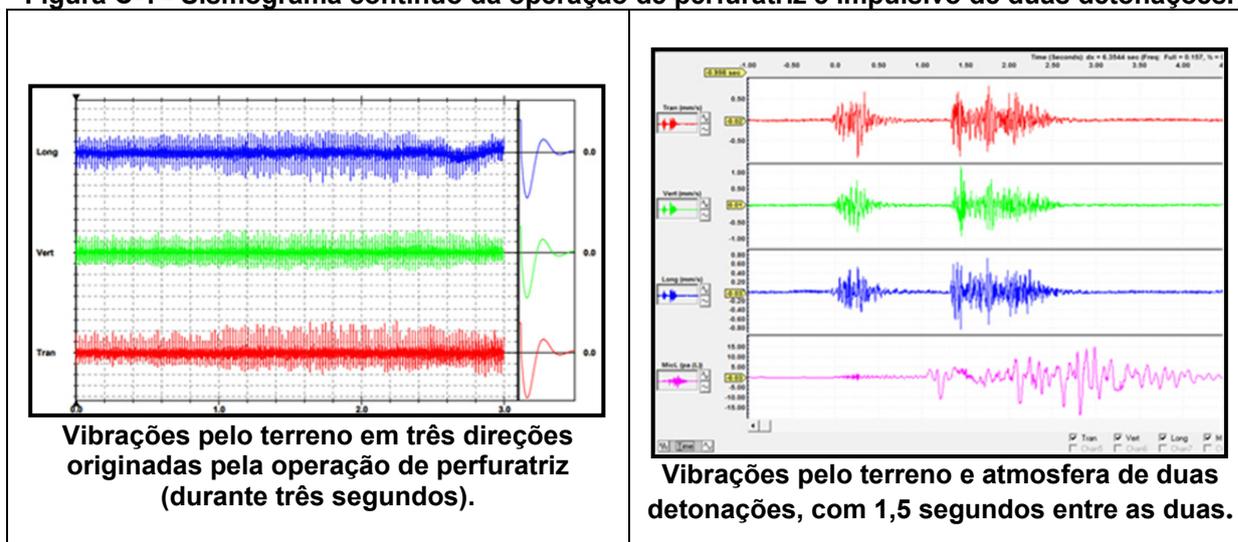
Equipamentos vibratórios:

- Perfuratrizes;
- Martelos hidráulicos;
- Rolo compactador vibratório;

Cada um desses equipamentos será abordado nos subitens abaixo, sendo que todos eles têm sido objeto de monitoramentos diversos em diferentes obras e minerações, a distâncias variáveis e em condições normais de trabalho em seis diferentes situações, envolvendo a maioria minerações e uma delas uma obra civil junto a áreas tombadas pelo IPHAN. Em algumas dessas situações e relatórios pertinentes, estão apenas referidos os valores máximos, distâncias e quantidade de ensaios. Já em outros é apresentada a atenuação das vibrações nos locais dos ensaios, e assim o presente estudo pode apresentar os resultados das duas maneiras.

Normalmente esses equipamentos geram vibrações de características até certo ponto diferente das vibrações de detonações. Os sinais das vibrações de equipamentos são mais contínuos e homogêneos, e os de detonação de curta duração e mais impulsivos, com pulsos e instantes mais marcados, conforme figura C-1.

**Figura C-1 - Sismograma contínuo da operação de perfuratriz e impulsivo de duas detonações.**



Fonte: VMA - Engenharia de Explosivos e Vibrações, 2018.

Considerando-se as vibrações pelo terreno devido à operação de máquinas e equipamentos que possuem essa característica de emissões semi-contínuas, e que poderão perdurar por um tempo total superior às de detonações, estipula-se como

limite de vibração de partícula para essas operações de equipamentos durante a execução das obras o valor de  $V_{pi} = 10,0 \text{ mm/s}$ .

## C1 - VIBRAÇÕES DE CAMINHÕES

Embora haja citações em diversas publicações sobre vibrações produzidas por caminhões, na prática, quando se instrumenta esse tipo de veículo em estradas não pavimentadas junto a obras e minerações, onde as velocidades de tráfego são bem reduzidas, os registros de vibração são muito raros, e mostram um amortecimento bastante rápido. Caminhões de diferentes tamanhos, inclusive de modelos de fora de estrada com até 150 t (cento e cinquenta) toneladas de capacidade, têm sido instrumentados internamente em minerações em vias não pavimentadas, e os resultados surpreendentemente têm se mostrado sempre inferiores a  $V_{pi} < 0,51 \text{ mm/s}$ , mesmo a distâncias bastante baixas, a partir de  $1,0 \text{ m}$  (um) metro. Esse valor de vibração de 0,51 mm/s é normalmente adotado como limite mínimo de acionamento dos sismógrafos de engenharia para esse tipo de instrumentação, e é um valor muito inferior a qualquer limite de dano. Para uma melhor identificação das vibrações dessa fonte, em algumas situações foi instrumentado o tráfego de caminhões em minerações com níveis de acionamento ainda inferiores, e com isso verificadas vibrações com valores máximos de  $V_{pi} = 0,26 \text{ mm/s}$ . Em duas obras, com instrumentações entre  $1 \text{ m}$  (um) a  $8 \text{ m}$  (oito) metros, também não ocorreu registro de vibrações. É interessante aqui registrar que, para vias urbanas com calçamento irregular, chegou-se a registrar intensidades de até  $V_{pi} = 1,93 \text{ mm/s}$  numa distância de 4,0 m (quatro) metros, dentro de cidades, junto a edificações históricas. Esses valores registrados aquela ocasião são compatíveis com valores de bibliografia internacional apresentada no presente relatório. Outro dado interessante é que geralmente o caminhão descarregado provoca maiores vibrações do que os carregados, possivelmente por “pularem” mais. A figura C-2 mostra exemplos dessas instrumentações.

Figura C-2 - Instrumentação de fluxo de passagem de caminhões.



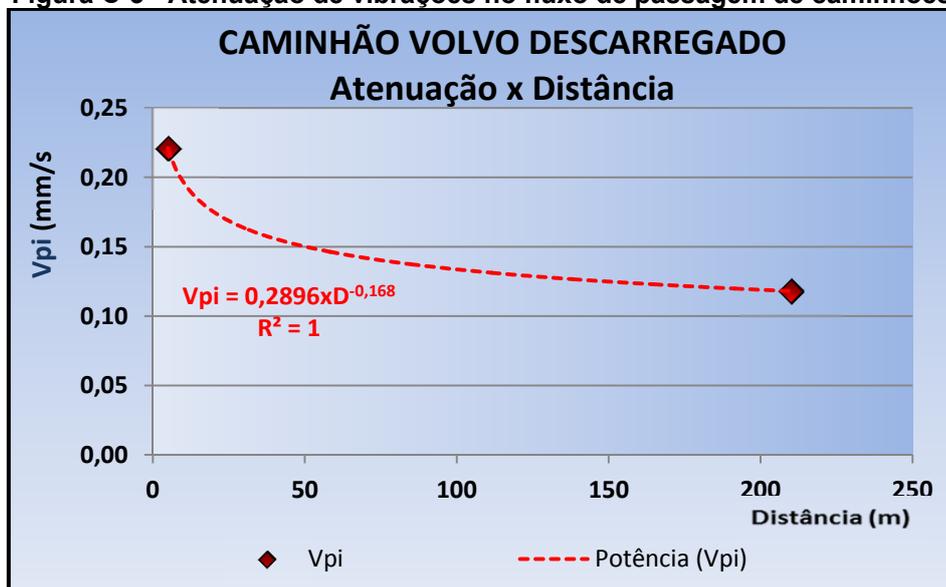
Caminhão de 40 t (quarenta toneladas) carregado trafegando em área de mineração, e instrumentação a 5 m de distância com sismógrafo de engenharia.

Caminhão de 150 t trafegando a 1 m do sismógrafo sem acionamento do mesmo.

Fonte: VMA - Engenharia de Explosivos e Vibrações, 2018.

Em uma das áreas estudadas, foi traçado o gráfico da figura C-3 abaixo relativa à atenuação das vibrações provocadas pelo tráfego de caminhões com a distância.

**Figura C-3 - Atenuação de vibrações no fluxo de passagem de caminhões.**



Fonte: VMA - Engenharia de Explosivos e Vibrações, 2018.

## C2 - VIBRAÇÕES DE CARREGADEIRAS

Para as carregadeiras, foram realizadas diversas instrumentações em minerações com equipamentos de diversos tamanhos. Já para outro grupo de 02 (duas) minerações a vibrações provocadas pela operação de carregadeiras durante os trabalhos realizados nessas duas áreas de estudo, foram monitorados dois tipos de equipamentos. Assim, foi realizado um total de 24 instrumentações: nesses monitoramentos, realizados a distâncias de **1,7 m** (um metro e sete) decímetros a **15 m** (quinze) metros, somente em 03 (três) ensaios o sismógrafo foi acionado, todas a **10 m** (dez) metros, sendo valor máximo registrado par essa fonte foi de **Vpi = 0,841 mm/s**. Em área urbana, a 2 m (dois) metros instrumentou-se o valor de **Vpi = 1,434 mm/s**, e a 5 m **Vpi = 0,985 mm/s**.

Figura C-4 - Instrumentação de carregadeiras sobre pneus.



Carregadeira de pequeno porte em área urbana.



Carregadeira de grande porte em mineração.

Fonte: VMA - Engenharia de Explosivos e Vibrações, 2018.

### C3 - VIBRAÇÕES DE MOTONIVELADORAS

Para esse tipo de equipamento, foi realizado o monitoramento em área urbana, tendo sido obtido os valores de  $V_{pi} = 1,592 \text{ mm/s}$  a  $2 \text{ m}$  (dois) metros de distância,  $V_{pi} = 1,167 \text{ mm/s}$  a  $5 \text{ m}$  (cinco) metros e de  $V_{pi} = 0,426 \text{ mm/s}$  a  $10 \text{ m}$  (dez) metros.

Figura C-5 - Instrumentação de motoniveladora.



Motoniveladora em operação, com registro de vibração de  $V_{pi} = 1,167 \text{ mm/s}$  a  $5$  (cinco) metros e  $V_{pi} = 0,426 \text{ mm/s}$  a  $10 \text{ m}$  (dez) metros

Fonte: VMA - Engenharia de Explosivos e Vibrações, 2018.

#### C4 - ESCAVADEIRAS

Para as escavadeiras, no grupo de duas minerações estudadas conjuntamente, foram monitorados pelo menos dois tipos desses equipamentos. Assim, foi realizado um total de 130 (cento e trinta) instrumentações, sendo em 21 (vinte e uma) delas inferiores ao nível mínimo de acionamento do sismógrafo foi programado para. Nos demais 109 (cento e nove) ensaios os sismógrafos registraram vibrações. Nesses monitoramentos, realizados a distâncias de 1,3 m (um metro e três) decímetros a 87 m (oitenta e sete) metros, o valor máximo registrado dessa fonte foi de  **$V_{pi} = 2,62 \text{ mm/s}$** , a uma distância de **15 m** (quinze) metros. A maior distância em que ocorreu o registro foi de **75 m** (setenta e cinco) metros, com valores de  **$V_{pi} = 1,13 \text{ mm/s}$** . Já em outra mineração, o monitoramento a **6 m** (seis) metros forneceu o valor de  **$V_{pi} = 0,244 \text{ mm/s}$** .

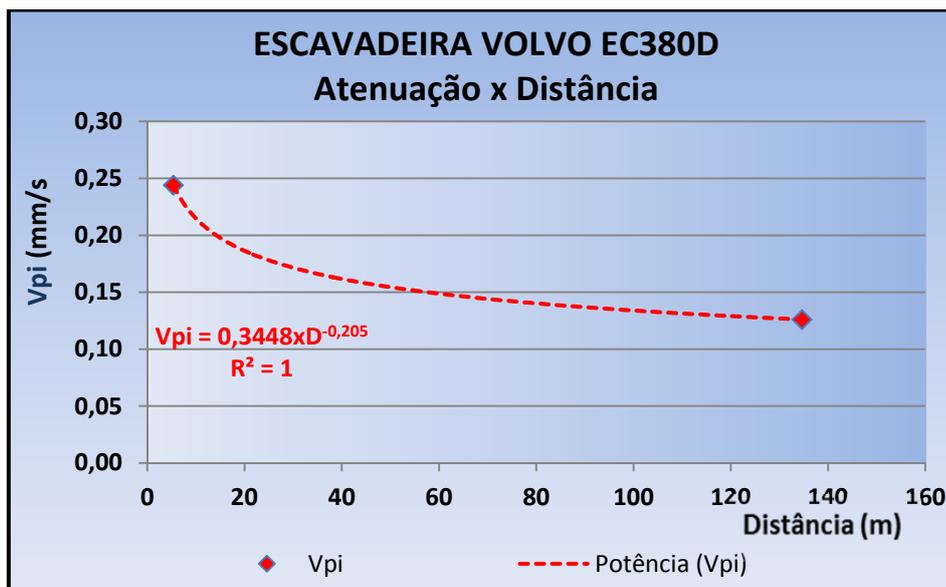
Figura C-6 - Instrumentação de escavadeira sobre esteira.



Fonte: VMA - Engenharia de Explosivos e Vibrações, 2018.

Para uma das áreas estudadas, obteve-se o gráfico da figura C-7 abaixo relativa à operação de escavadeiras.

Figura C-7 - Instrumentação de escavadeiras.



### C5 - TRATORES, COM OU SEM “RIPPER”

Tratores de esteira constituem-se normalmente em um dos equipamentos que geram a maior vibração pelo o terreno dentro os equipamentos execução de obras e apoio em lavras. Em algumas instrumentações em minerações, foram efetuados registros a distâncias variáveis, sendo que o maior valor ocorreu a **15 m**, com **Vpi = 3,279 mm/s**. Nos estudos envolvendo 02 (duas) minerações, foram monitoradas vibrações de trator de porte médio tipo D-6 com um total de 205 (duzentos e cinco) instrumentações. Nesses monitoramentos, realizados a distâncias de **1 m** (um) metro a **60 m (sessenta) metros**, o valor máximo registrado dessa fonte foi de **Vpi = 2,30 mm/s** a uma distância de **10 m** (dez) metros. A maior distância em que ocorreu o registro foi de **40 m** (quarenta) metros, onde foram registradas vibrações de até **Vpi = 1,52 mm/s**.

Figura C-8 - Instrumentação de trator sobre esteira.



Fonte: VMA - Engenharia de Explosivos e Vibrações, 2018.

## C6 - PERFURATRIZES

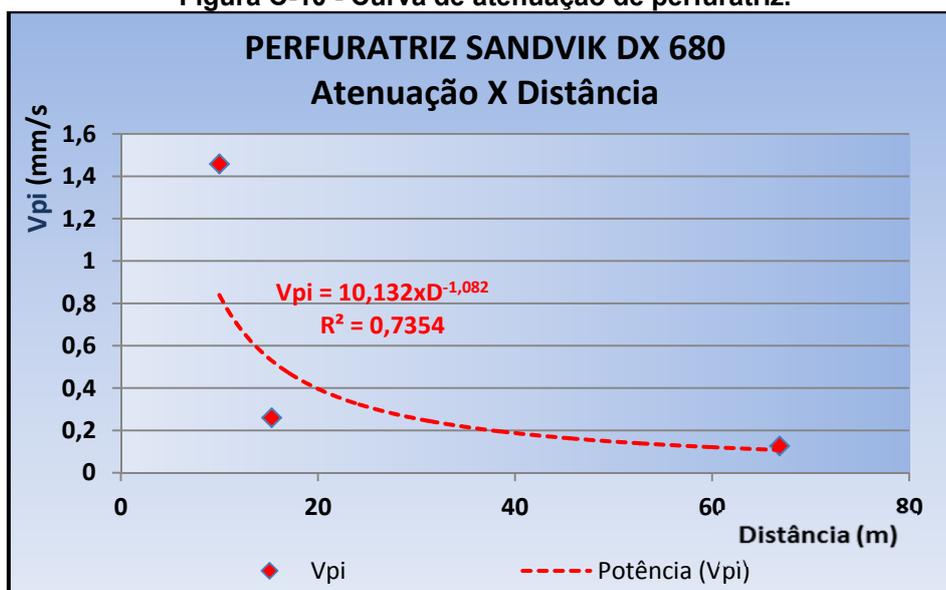
Para esse equipamento nas duas minas estudadas em conjunto, foi realizado um total de 14 (quatorze) instrumentações tendo ocorrido 13 (treze) com registros de vibrações, todos a **5 m** (cinco) metros. Nesses monitoramentos, as distâncias foram de **5 m** (cinco) metros a **10 m** (dez) metros, o valor máximo registrado dessa fonte para a velocidade de um canal foi de  **$V_{pi} = 1,27 \text{ mm/s}$** . A instrumentação a **10 m** (dez) metros não acionou o sismógrafo. Em outra mineração, foi obtido o valor de  **$V_{pi} = 1,458 \text{ mm/s}$**  a **10 m** (dez) metros da fonte. Num outro estudo, a 5 m (cinco) metros foi registrado o valor de  **$V_{pi} = 1,44 \text{ mm/s}$**  e a **10 m** (dez) metros a  **$V_{pi} = 0,665 \text{ mm/s}$** . A figura C-9 apresenta imagens desses monitoramentos, a figura C-10 apresenta a atenuação dessa fonte.

Figura C-9 - Instrumentação de trator sobre esteira.



Fonte: VMA - Engenharia de Explosivos e Vibrações, 2018.

Figura C-10 - Curva de atenuação de perfuratriz.



## C7 - MARTELOS ROMPEDORES HIDRÁULICOS

Considerado um equipamento que pode ser importante numa lavra e obra mecanizadas, pois podem executar serviços complementares no chamado “desmonte a frio”, sem o uso de explosivos. Para o conjunto de duas minerações, foram monitoradas vibrações de um rompedor hidráulico de duas toneladas montado em escavadeira. Para esse equipamento, foi realizado um total de 101 (cento e uma) instrumentações, Nesses monitoramentos, realizados a distâncias de **1 m** (um) metro a **45 m** (quarenta e cinco), o valor máximo registrado dessa fonte foi de **Vpi = 3,43 mm/s**, a uma distância de **2 m** (dois) metros. A maior distância em que ocorreu o registro foi de **22 m** (vinte e dois) metros, onde foram registradas vibrações de até **Vpi = 0,683 mm/s**.

Figura C11 - Instrumentação de rompedor hidráulico.



Martelo hidráulico monitorado a pequena distância.

Fonte: VMA - Engenharia de Explosivos e Vibrações, 2018.

## C8 - ROLO COMPACTADOR VIBRATÓRIO

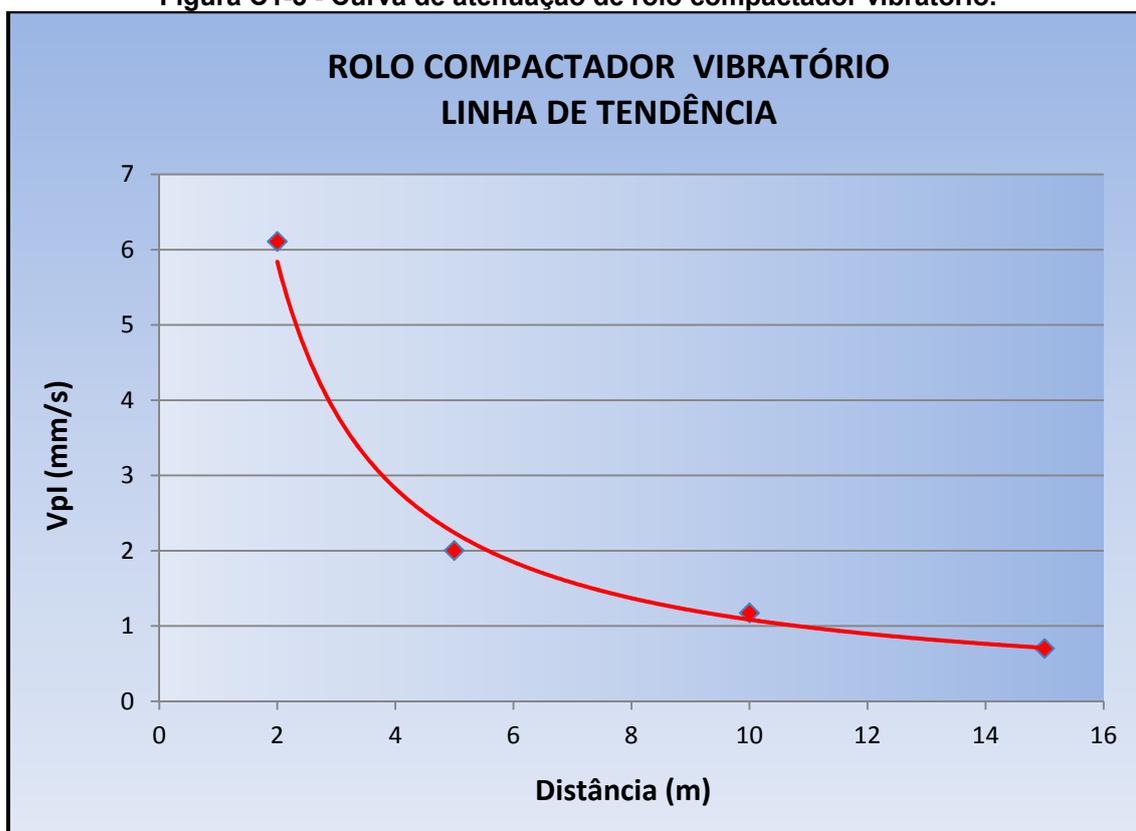
Entre os equipamentos normalmente monitorados, é o que produz as maiores intensidades de vibração. Para o conjunto das duas minas considerando-se essa fonte, foram realizados um total de 45 (quarenta e cinco) testes, com o nível mínimo de acionamento do sismógrafo programado de  $V_{pi} = 0,51 \text{ mm/s}$ , a distâncias de **5 m** (cinco) metro a **65 m** (sessenta e cinco) metros. O valor máximo registrado dessa fonte foi de  $V_i = 7,08 \text{ mm/s}$ , a uma distância de **5 m** (cinco) metros. A maior distância em que ocorreu o registro foi de **40 m** (quarenta) metros, onde foram registradas vibrações de até  $V_{pi} = 1,03 \text{ mm/s}$ . Em obra urbana, registrou-se valores de  $V_{pi} = 6,108 \text{ mm/s}$  a **2 m** (dois) metros,  $V_{pi} = 2,002 \text{ mm/s}$  a **5 m** (cinco) metros,  $V_{pi} = 1,134 \text{ mm/s}$  a **10 m** (dez) metros e  $V_{pi} = 0,071 \text{ mm/s}$  a **15 m** (quinze) metros. Numa terceira mineração, tivemos  $V_{pi} = 7,37 \text{ mm/s}$  a **5 m** (cinco) metros e  $V_{pi} = 0,552 \text{ mm/s}$  a **40 m** (quarenta) metros.

**Figura C-12 - Instrumentação de rolpedor hidráulico.**



Fonte: VMA - Engenharia de Explosivos e Vibrações, 2018.

**Figura C1-3 - Curva de atenuação de rolo compactador vibratório.**

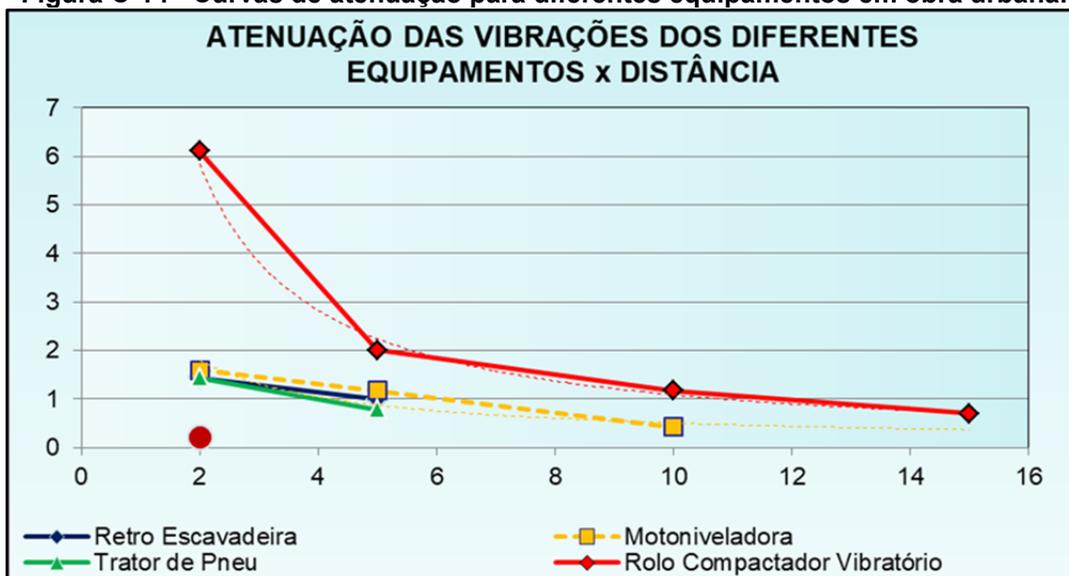


Fonte: VMA - Engenharia de Explosivos e Vibrações, 2018.

## C9 - ASPECTOS GERAIS E ANÁLISE

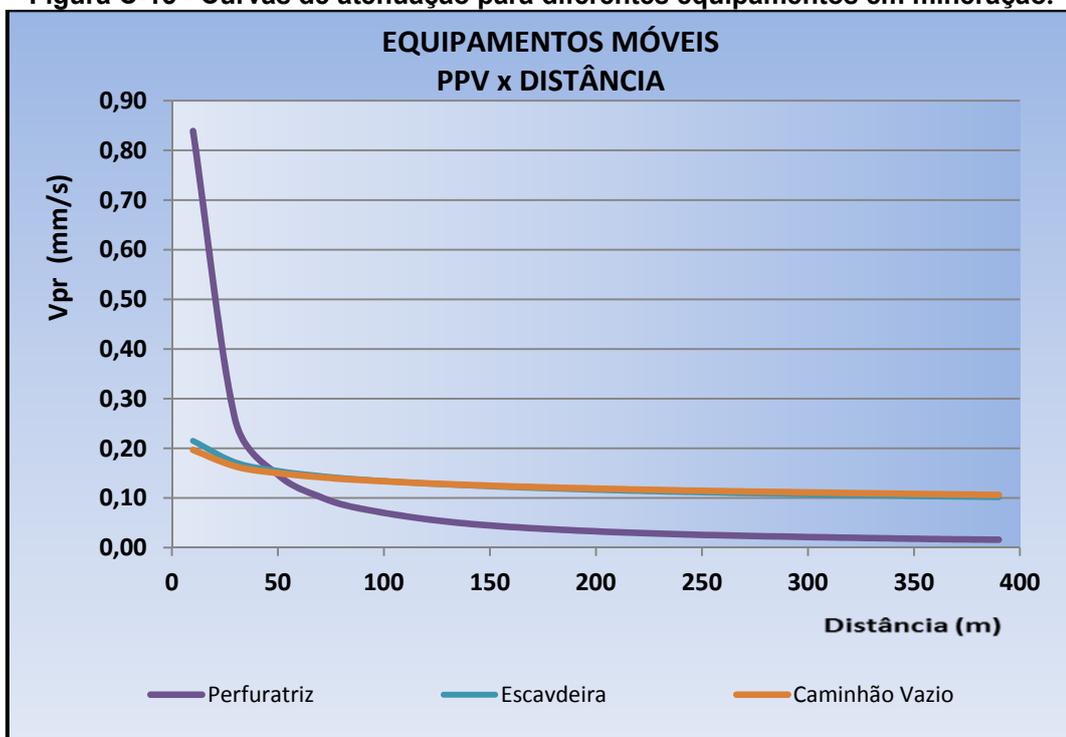
Para algumas das obras e minerações estudadas com relação a vibrações de fontes e equipamentos diversos, foi possível a comparação de fontes diversas, conforme apresentado nos gráficos das figuras C-14 e C-15. Nesses estudos, nota-se que esse tipo de vibrações se atenua rapidamente com o aumento da distância.

**Figura C-14 - Curvas de atenuação para diferentes equipamentos em obra urbana.**



Fonte: VMA - Engenharia de Explosivos e Vibrações, 2018.

**Figura C-15 - Curvas de atenuação para diferentes equipamentos em mineração.**



Fonte: VMA - Engenharia de Explosivos e Vibrações, 2018.

## APÊNDICE D - Ensaio Fotográfico

**Vista geral da área do Projeto Bloco 8.**



**Fonte: VMA - Engenharia de Explosivos e Vibrações, 2018.**

**Antiga sondagem / atual piezômetro da área do projeto**



**Fonte: VMA - Engenharia de Explosivos e Vibrações, 2018.**

**Ensaio Fotográfico \_ Continuação**

**Afloramento de metadiamictito na área do projeto.**



**Fonte: VMA - Engenharia de Explosivos e Vibrações, 2018.**

**Fragmentos de metadiamictido na área do Projeto**



**Fonte: VMA - Engenharia de Explosivos e Vibrações, 2018.**

**Ensaio Fotográfico \_ Continuação**

**Vertente junto à cavidade CM 10.**



**Fonte: VMA - Engenharia de Explosivos e Vibrações, 2018.**

**Idem anterior, detalhe da rocha.**



**Fonte: VMA - Engenharia de Explosivos e Vibrações, 2018.**

**Ensaio Fotográfico \_Continuação**

**Cavidade CM 10, interior.**



**Fonte: VMA - Engenharia de Explosivos e Vibrações, 2018.**

**Cavidade, detalhe interior.**



**Fonte: VMA - Engenharia de Explosivos e Vibrações, 2018.**

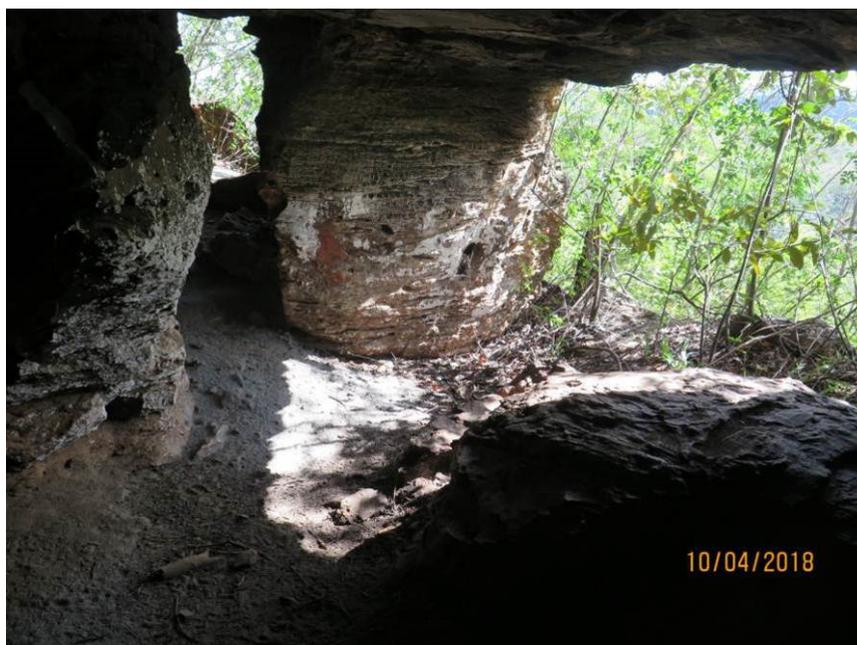
### Ensaio Fotográfico \_Continuação

Cavidade, vista para abertura.



Fonte: VMA - Engenharia de Explosivos e Vibrações, 2018.

Cavidade CM 10, vista para abertura. Notar bloco caído na parte inferior da foto, fato normal na gênese e evolução de cavidades.



Fonte: VMA - Engenharia de Explosivos e Vibrações, 2018.

**Ensaio Fotográfico \_Continuação**

**Área da futura barragem de rejeito Mundo Novo.**



**Fonte: VMA - Engenharia de Explosivos e Vibrações, 2018.**

**Área da ombreira da barragem Mundo Novo.**



**Fonte: VMA - Engenharia de Explosivos e Vibrações, 2018.**

### Ensaio Fotográfico \_Continuação

Escarpa e vertente da área do projeto junto às cavidades CM 01, CM 10 e CM 02.



Fonte: VMA - Engenharia de Explosivos e Vibrações, 2018.

Idem, detalhe.



Fonte: VMA - Engenharia de Explosivos e Vibrações, 2018.

**Ensaio Fotográfico \_Continuação**

Vista do galpão de testemunhos.



Fonte: VMA - Engenharia de Explosivos e Vibrações, 2018.

Testemunho de sondagem da crosta goetítica / limonítica no capeamento da área



Fonte: VMA - Engenharia de Explosivos e Vibrações, 2018.

### Ensaio Fotográfico \_Continuação

**Minério / metadiamectito friável.**



Fonte: VMA - Engenharia de Explosivos e Vibrações, 2018.

**Minério / metadiamectito semi compacto a compacto.**



Fonte: VMA - Engenharia de Explosivos e Vibrações, 2018.

### Ensaio Fotográfico \_Continuação

Minério compacto enriquecido.



Fonte: VMA - Engenharia de Explosivos e Vibrações, 2018.

Parte final do furo, metadiametrito com presença de magnetita, de amígdalas / vesículas e clastos de quartzo e xisto estirados / alinhados na região basal.



Fonte: VMA - Engenharia de Explosivos e Vibrações, 2018.

### Ensaio Fotográfico \_Continuação

Detalhe do anterior, com metadiamectito estéril.



Fonte: VMA - Engenharia de Explosivos e Vibrações, 2018.

Região de futuro dique



Fonte: VMA - Engenharia de Explosivos e Vibrações, 2018.

## ANEXOS

ANEXO A - ART do Contrato.....	83
ANEXO B - Imagem Georeferenciada.....	84
ANEXO C - Valores máximo de vibrações pelo terreno em função da frequência de Pico.....	85

ANEXO A - ART do Contrato

Via do Profissional  
Página 1/1

 **Anotação de Responsabilidade Técnica - ART CREA-MG**  
Leinº 6.496, de 7 de dezembro de 1977  
Conselho Regional de Engenharia e Agronomia de Minas Gerais

**ART de Obra ou Serviço**  
14201800000004486384

1. Responsável Técnico  
**ALEXANDRE ANTONINI**  
Título profissional:  
ENGENHEIRO CIVIL;  
RNP: 1403433615  
Registro: 04.0.0000039702  
Empresa contratada:  
VMA - SOCIEDADE TECNICA DE VENDAS LTDA  
Registro: 11622

2. Dados do Contrato  
Contratante: SAM -SUL AMERICA METAIS S/A  
Logradouro: AVENIDA CONTORNO  
Complemento: 10º ANDAR  
Cidade: BELO HORIZONTE  
Contrato: MINA\_VRP007-1010-G-C  
Valor: \_\_\_\_\_  
Bairro: FUNCIONÁRIOS  
UF: MG  
CEP: 30110927  
CNPJ: 08.289.492/0003-50  
Nº: 005919  
Celebrado em: 13/03/2018  
Tipo de contratante: PESSOA JURÍDICA DE DIREITO PRIVADO

3. Dados da Obra/Serviço  
Logradouro: RODOVIA BR 251 - KM 374 - FAZENDA CANCELA-S/N -  
Cidade: GRÃO MOGOL  
Data de início: 13/03/2018  
Finalidade: OUTRO-DETALHAR CAMPO 5 OBSERV.  
Proprietário: SUL AMERICA DE METAIS S/A  
Bairro: VALE DAS CANCELAS  
UF: MG  
CEP: 39570000  
Nº: 000000  
CNPJ: 08.289.492/0004-31

4. Atividade Técnica  
1 - CONSULTORIA  
MONITORAMENTO, MINERAÇÃO, DESMONTE DE ROCHAS C/EXPLOSIVO  
Quantidade: 1.00  
Unidade: h/d

Após a conclusão das atividades técnicas o profissional deverá proceder a baixa desta ART

5. Observações  
CONSULTORIA NA AVALIAÇÃO SISMOGRAFICA E SIMULAÇÕES PROJEIONAIS, PROJETO FERRO VALE DO RIO PARDO, EM  
GRAO MOGOL/MG

6. Declarações

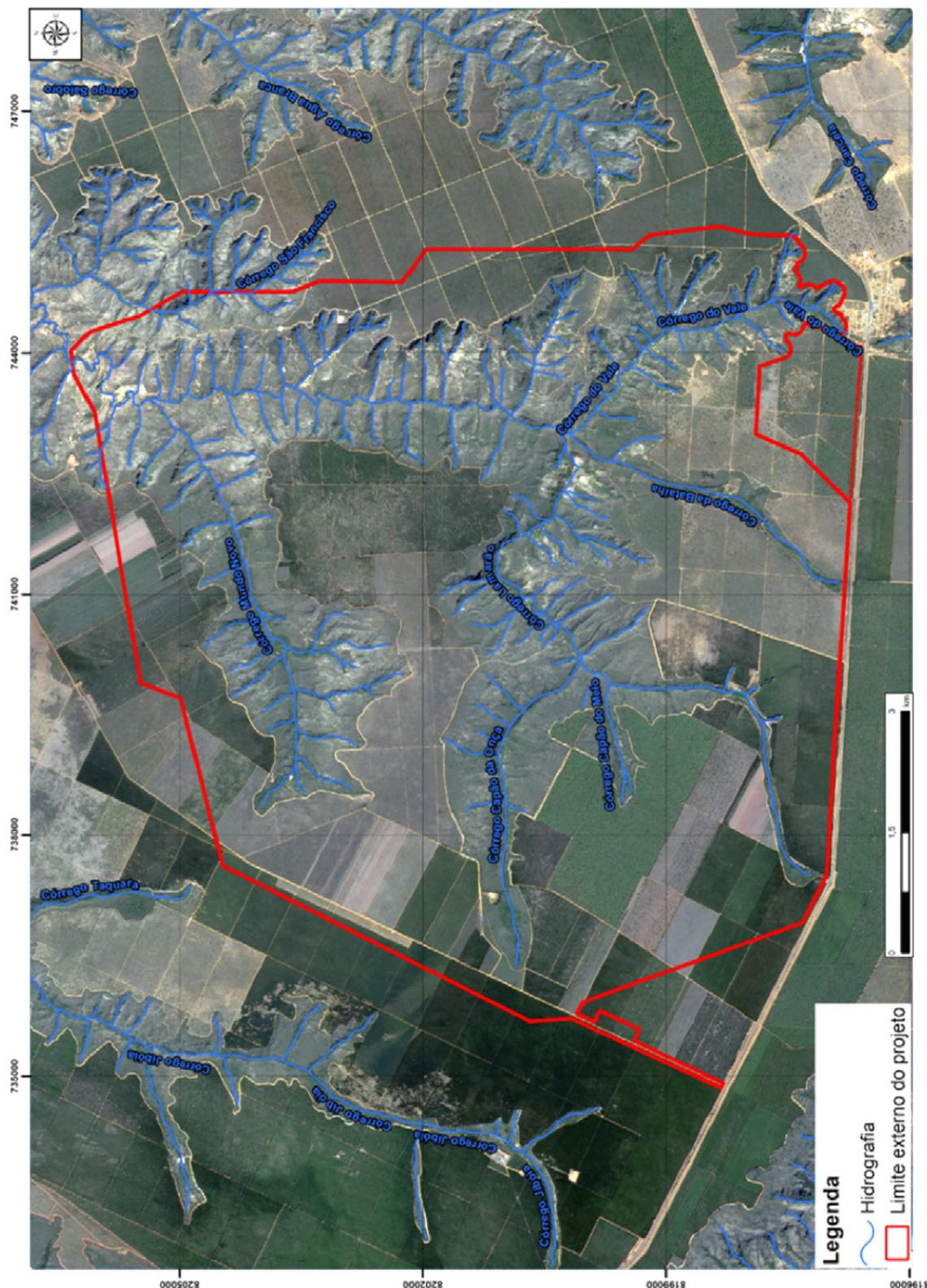
7. Entidade de Classe  
SEM INDICAÇÃO DE ENTIDADE DE CLASSE

8. Assinaturas  
Declaro ser verdadeiras as informações acima  
30 de Abril de 2018  
Eng. Alexandre Antonini  
ALEXANDRE ANTONINI DIRETOR TÉCNICO RNP: 1403433615  
CREA-MG 39.702/D  
SAM -SUL AMERICA METAIS S/A CNPJ: 08.289.492/0003-50  
Valor da ART: 218,54 Registrada em: 30/04/2018 Valor Pago: 218,54 Nosso Número: 000000004385926

9. Informações  
- A ART é válida somente quando quitada, mediante apresentação do comprovante do pagamento ou conferência no site do Crea.  
- A autenticidade deste documento pode ser verificada no site [www.crea-mg.org.br](http://www.crea-mg.org.br) ou [www.confrea.org.br](http://www.confrea.org.br)  
- A guarda da via assinada da ART será de responsabilidade do profissional e do contratante com o objetivo de documentar o vínculo contratual.  
VALOR DA OBRA: R\$ \_\_\_\_\_ ÁREA DE ATUAÇÃO: CIVIL,  
  
[www.crea-mg.org.br](http://www.crea-mg.org.br) | 0800.0312732

Fonte: CREA-MG, 2018.

**ANEXO B - Imagem georeferenciada\_SAM**



**Sul Americana de Metais - SAM - 2018.**

**ANEXO C - Valores máximo de vibrações pelo terreno em função da frequência de Pico**

 <b>Valores máximos permitidos para velocidade de partícula de pico em relação a faixa de frequência - ABNT - 9653/2005</b>	
Frequência (Hz)	Velocidade de partícula (mm/s)
4	15,0
5	15,5
6	15,9
7	16,4
8	16,8
9	17,3
10	17,7
11	18,2
12	18,6
13	19,1
14	19,5
15	20,0
16	21,2
17	22,4
18	23,6
19	24,8
20	26,0
21	27,2
22	28,4
23	29,6
24	30,8
25	32,0
26	33,2
27	34,4
28	35,6
29	36,8
30	38,0
31	39,2
32	40,4
33	41,6
34	42,8
35	44,0
36	45,2
37	46,4
38	47,6
39	48,8
40	50,0
50	50,0
100	50,0
200	50,0
300	50,0
400	50,0

Fonte: VMA - Engenharia de Explosivos e Vibrações, 2018.

**Nota 1:** As avaliações contidas neste relatório são válidas apenas para os desmontes nos quais foram utilizados explosivos na mesma quantidade e com as mesmas características, em locais com geometria e geologia equivalentes.

**Nota 2:** É vedada a reprodução parcial ou integral deste relatório sem autorização da VMA - Engenharia de Explosivos e Vibrações.

<b>Histórico de Revisões</b>		
<b>Revisão</b>	<b>Data</b>	<b>Descrição</b>
00	25/05/18	Emissão inicial
01	08/06/18	Revisão geral do texto



---

**Eng. Alexandre Antonini**  
Diretor Técnico/Comercial  
Responsável Técnico  
CREA nº. 39.702/D



---

**Eng. Bruno Duarte Martins**  
Gerente Técnico  
CREA nº. 76.392/D



## TRABALHO ELABORADO PELA:



Av. Getúlio Vargas nº 874 13º andar, Bairro Funcionários, Ed. Diamond Arch  
Belo Horizonte - Minas Gerais - Brasil  
CEP: 30112-021  
Fone: (0xx) 31 3221.2000 -  
E-mail: [vma@vmasismo.com.br](mailto:vma@vmasismo.com.br)  
Web site: [www.vmasismo.com.br](http://www.vmasismo.com.br)