

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas  
Mestrado Profissional

Dissertação de Mestrado

*“METODOLOGIA PARA MITIGAR OS EFEITOS ADVERSOS GERADOS PELO  
DESMONTE DE ROCHA COM EXPLOSIVOS EM MINERAÇÕES A CÉU ABERTO”*

Autor: **Alexandro Fortes Simões da Silva**

Orientador: **Dr. Professor Carlos Arroyo**

Agosto de 2019

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas  
Mestrado Profissional

Alexandro Fortes Simões da Silva

“METODOLOGIA PARA MITIGAR OS EFEITOS ADVERSOS GERADOS PELO  
DESMONTE DE ROCHA COM EXPLOSIVOS EM MINERAÇÕES A CÉU ABERTO”

Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas – Mestrado Profissional, da Universidade Federal de Minas Gerais como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas

Área de concentração: **Lavra de Mina**

Orientador: Dr. Professor Carlos Arroyo

Belo Horizonte  
Escola de Engenharia da UFMG  
2019

S586m Silva, Alexandro Fortes Simões da.  
Metodologia para mitigar os efeitos adversos gerados pelo desmonte de rocha com explosivos em minerações a céu aberto [recurso eletrônico] / Alexandro Fortes Simões da Silva. – 2019.  
1 recurso eletrônico (89 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: Carlos Arroyo.

Dissertação (mestrado profissional) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Anexos: f. 73-89.

Bibliografia: f. 71-72.  
Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Engenharia de minas - Teses. 2. Tecnologia mineral - Teses.  
3. Mineração a céu aberto - Teses. 4. Minas e mineração - Aspectos ambientais - Teses. 5. Detonação - Teses. I. Ortiz, Carlos Enrique Arroyo. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.  
CDU: 622(043)

Dedicatória

A Deus, a Nossa Senhora Aparecida e a minha família, que estão sempre comigo.

" Aquele que decide parar até que as coisas melhorem, verá mais tarde que aqueles que não pararam e colaboraram com o tempo, estão tão adiantados que jamais poderão ser alcançados."

(Autor Desconhecido)

## AGRADECIMENTOS

A Deus, que me deu a oportunidade da vida.

Quero agradecer ao professor Carlos Enrique Arroyo Ortiz por todos os ensinamentos em sala e pela extrema competência e amizade desde o primeiro momento.

A minha turma de mestrado profissional UFMG/2017, pelo respeito, amizade e conhecimentos repassados durante todo o curso.

A todos os professores do Departamento de Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas da UFMG pelas excelentes aulas durante todo o curso.

Aos meus pais Paulo Simões e Maria Bernadete, pelo carinho, princípios e valores ensinados para toda a vida.

A minha amada esposa Milene Rodrigues Cunha Fortes, que me dá o equilíbrio necessário para trabalhar, estudar e saber que sempre terei apoio incondicional.

Meus filhos Sophia e Arthur, que são meus maiores presentes de Deus, que tornam meus dias melhores e me incentivam a ser sempre um bom pai, um bom cidadão e acreditar que o futuro será de grandes glórias.

Muito obrigado!!!!

## SUMÁRIO

<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	vi
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	x
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	xi
<b>RESUMO</b> .....	xii
<b>ABSTRACT</b> .....	xiii
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	14
<b>2. OBJETIVO</b> .....	15
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	15
<b>3.1. Introdução</b> .....	15
<b>3.2. Caracterização da onda de choque</b> .....	17
<b>3.2.1. Tipos de Ondas</b> .....	18
<b>3.3. Caracterização geomecânica do maciço rochoso</b> .....	19
<b>3.4. Relação danos estruturais e a atividade de desmonte de rocha por explosivos</b> .....	21
<b>3.5. Influência da distância na frequência associada e amplitude de vibrações das ondas de choque induzidas no maciço</b> .....	29
<b>3.5.1. Efeitos da distância na energia de propagação das ondas de choque</b> .....	29
<b>3.6. Superposição de Ondas</b> .....	36
<b>3.6.1. Determinação do tempo de retardo capaz de gerar uma onda composta destrutiva</b> .....	38
<b>4. Apresentação do Problema</b> .....	39
<b>5. Metodologia</b> .....	39
<b>5.1. Avaliação técnica da norma brasileira, ABNT NBR 9653/2018</b> .....	39
<b>5.2. Classificação de empreendimento mineiros conforme a criticidade socioambiental</b> .....	45
<b>5.2.1. Características Locais</b> .....	49
<b>5.2.2. Distância – comunidades</b> .....	49
<b>5.2.3. Presença de estruturas e edificações sensíveis</b> .....	50

<b>5.3.</b>	<b>Características Operacionais.....</b>	<b>51</b>
<b>5.3.1.</b>	<b>Diâmetro do Furo.....</b>	<b>51</b>
<b>5.3.2.</b>	<b>Caracterização do maciço rochoso - Grau de Resistencia à Compressão Simples (MPa). .....</b>	<b>52</b>
<b>5.3.3.</b>	<b>Número de Desmontes por semana. ....</b>	<b>53</b>
<b>5.3.4.</b>	<b>Número de Desmontes por Dia.....</b>	<b>53</b>
<b>5.3.5.</b>	<b>Carga por Espera.....</b>	<b>53</b>
<b>5.3.6.</b>	<b>Frequência da Onda de Choque.....</b>	<b>54</b>
<b>5.4.</b>	<b>Principais itens indicados e necessários a serem observados para a elaboração e execução de desmontes de rocha com a utilização de explosivos.....</b>	<b>55</b>
<b>5.4.1.</b>	<b>Avaliação Prévia – Planejamento.....</b>	<b>58</b>
<b>5.4.2.</b>	<b>Identificar e mapear pontos críticos.....</b>	<b>58</b>
<b>5.4.3.</b>	<b>Determinar curvas de isso valores para as velocidades de partícula e frequências.....</b>	<b>58</b>
<b>5.4.4.</b>	<b>Determinar a localização e número adequado para os pontos fixos e moveis de monitoramento. ....</b>	<b>59</b>
<b>5.4.5.</b>	<b>Determinar as equações de atenuação da onda para os diversos pontos críticos identificados.....</b>	<b>59</b>
<b>5.4.6.</b>	<b>Determinar a frequência de vibração das ondas de choque nos pontos críticos. 60</b>	
<b>5.4.7.</b>	<b>Determinar a frequência natural das estruturas identificadas como críticas e localizadas nos pontos críticos.....</b>	<b>60</b>
<b>5.4.8.</b>	<b>Realizar a vistoria cautelar das estruturas identificadas como críticas e localizadas nos pontos críticos. ....</b>	<b>60</b>
<b>5.4.9.</b>	<b>Elaborar mapeamento e plano para o acompanhamento de propagação de trincas. 61</b>	
<b>5.4.10.</b>	<b>Litologia.....</b>	<b>61</b>
<b>5.4.11.</b>	<b>Caracterizar o maciço rochoso. ....</b>	<b>62</b>
<b>5.4.12.</b>	<b>Verificação da presença de água no maciço rochoso. ....</b>	<b>62</b>



<b>5.4.13.</b>	<b>Setorização da mina em função dos domínios litológicos e caracterizar o comportamento da onda para cada todo de grupos litológicos.....</b>	<b>62</b>
<b>5.5.</b>	<b>Parâmetros Operacionais. ....</b>	<b>63</b>
<b>5.5.1.</b>	<b>Carga por espera.....</b>	<b>63</b>
<b>5.5.2.</b>	<b>Tempos de retardo entre linhas e entre furos. ....</b>	<b>63</b>
<b>5.5.3.</b>	<b>Sequência de detonação. ....</b>	<b>64</b>
<b>5.5.4.</b>	<b>Número de furos por desmonte. ....</b>	<b>64</b>
<b>5.5.5.</b>	<b>Diâmetro dos furos.....</b>	<b>64</b>
<b>5.5.6.</b>	<b>Qualidade da perfuração. ....</b>	<b>65</b>
<b>5.5.7.</b>	<b>Qualidade da marcação da malha. ....</b>	<b>65</b>
<b>5.5.8.</b>	<b>Qualidade da face livre. ....</b>	<b>65</b>
<b>5.5.9.</b>	<b>Presença de Água.....</b>	<b>66</b>
<b>5.5.10.</b>	<b>Tipo de explosivos. ....</b>	<b>66</b>
<b>1.1.1.</b>	<b>Tipos de acessórios utilizados. ....</b>	<b>66</b>
<b>1.1.2.</b>	<b>Tipo de desmonte, primário e/ou secundário.....</b>	<b>67</b>
<b>1.1.3.</b>	<b>Horários de detonação. ....</b>	<b>67</b>
<b>6.</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>69</b>
<b>7.</b>	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>70</b>
<b>8.</b>	<b>Referências Bibliográficas .....</b>	<b>71</b>
<b>9.</b>	<b>ANEXOS .....</b>	<b>73</b>
<b>9.1.</b>	<b>ANEXO I – Technical evaluation of the Brazilian standard, ABNT NBR 9653/2018 - guide for the evaluation of the effects caused by the use of explosives in urban area mines. Trabalho submetido à revista: REM - International Engineering Journal. 75</b>	
<b>9.2.</b>	<b>ANEXO II – Fluxograma do processo de desmonte de rocha com a utilização de explosivos.....</b>	<b>89</b>

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 1: Principais fatores operacionais que influenciam a vibração do maciço. (ROSENTHAL et al., 1987) .....	26
Tabela 2: Sistema de classificação de empreendimento mineiro segundo a criticidade socioambiental em relação aos processos de desmonte de rocha com explosivos. ....	55
Tabela 3: Principais itens indicados e necessários a serem observados para a elaboração e execução de desmontes de rocha com a utilização de explosivos em empreendimentos de mineração com alta complexidade socioambiental. ....	57

**LISTA DE FIGURAS**

Figura 1– Tipos de Ondas (GOMES, 2016).....	18
Figura 2: Norma Brasileira NBR ABNT 9656 / 2018.....	28
Figura 3: Formatos das ondas de choque induzidas no maciço devido a detonações.(SISKIND et al., 2005).....	32
Figura 4: Conjuntos de formas de onda de vibração de uma matriz de propagação de sete sismógrafos (SISKIND et al., 1989). ....	33
Figura 5: Vibração próxima à ressonância da estrutura (SISKIND et al., 1989).....	36
Figura 6: Processo de superposição de ondas (KLEN, 2010).....	37
Figura 7: Determinando um atraso minimizando a vibração – Fonte: Manual do Software I-Blast. ....	39
Figura 8: Mina Capão Xavier – Vale – Zona Urbana de Nova Lima – Fonte Google. ..	41
Figura 9: Mina Kinross – Zona Urbana de Paracatu / MG – Fonte Google.....	41
Figura 10: Mina Fazendão – Vale – Zona Rural de Catas Altas – Fonte Google.....	42
Figura 11: Mina Pedra do Sino – Cimento Tupi – Zona Rural de Carandaí / MG – Fonte Google. ....	42
Figura 12: Mina do Azul – Vale – Parauapebas / PA – Fonte Google.....	46
Figura 13: Mina de Calcário – Cimento Liz – Vespasiano / MG – Fonte Google. ....	47
Figura 14: Mina Itabira – Vale – Itabira / MG – Fonte Google.....	48
Figura 15: Fluxo do processo de detonação.....	68

## RESUMO

A ausência de normas e regulamentos para a classificação de empreendimentos de mineração conforme sua complexidade socioambiental, além da ausência de metodologia para a realização de avaliação do processo de desmonte de rocha com a utilização de explosivos, indicando as atividades e etapas principais a serem observados em um processo de desmonte de rocha com a utilização de explosivos nos empreendimentos de mineração localizados em áreas urbanas e, principalmente, a indicação das principais técnicas e procedimentos para o controle efetivo dos efeitos dos desmontes, necessários para minimizar a possibilidade de geração de impactos e incômodos nas comunidades vizinhas ao empreendimento tem deixado muitas perguntas sem as devidas respostas. O desafio, em um processo de desmonte de rocha com a utilização de explosivos, está em obter um produto adequado dos desmontes com a aplicação das melhores técnicas e práticas de forma a possibilitar um controle efetivo do resultado dos desmontes tanto no que diz respeito à eficiência do desmonte, fragmentação da rocha, quanto a minimização dos incômodos e redução da possibilidade de geração de danos a estruturas vizinhas ao empreendimento.

A elaboração e disponibilização de uma metodologia cientificamente adequada que possibilite a classificação dos empreendimentos mineiros, segundo sua criticidade socioambiental, para então indicar as mais adequadas práticas de desmonte de rocha com a utilização de explosivos, principalmente em áreas urbanas é fundamental para a garantia de um processo com o mínimo de impacto ambiental possível. Esse estudo visa contribuir com a indicação de metodologias para a classificação dos empreendimentos mineiros quanto a sua complexidade socioambiental além de, a partir da classificação da complexidade socioambiental, indicar a metodologia a ser utilizada para garantir que os efeitos colaterais, provenientes do processo de detonação, sejam minimizados, reduzindo assim a possibilidade de geração de incômodos e danos estruturais em edificações localizadas próximo ao empreendimento de mineração.

Palavras-chave: Mineração a céu aberto, desmonte com explosivos, aspectos ambientais, vibração de terreno.

## **ABSTRACT**

The absence of norms and regulations for the classification of mining enterprises according to their social and environmental complexity, besides the absence of the same regulations for the evaluation of the process of rock-clearing with the use of explosives, indicating the main activities and stages to be observed in a rock-clearing process with the use of explosives in mining enterprises located in urban areas and, mainly, the indication of the main techniques and procedures for the effective control of the effects of the dismantling, necessary to minimize the possibility of generating impacts and troubles in the surrounding communities has left many questions unanswered. The challenge in a process of rock removal with the use of explosives is to obtain an adequate product of the dismantling with the application of the best techniques and practices in order to allow an effective control of the result of the dismantling both with respect to the efficiency dismantling, rock fragmentation, minimizing discomfort and reducing the possibility of damage to neighboring structures.

The elaboration and availability of a scientifically adequate methodology that allows the classification of mining enterprises to indicate the most appropriate rock-clearing practices with the use of explosives, especially in urban areas, is fundamental to guarantee a process with minimum impact possible. This study aims to contribute with the indication of methodologies for the classification of mining enterprises regarding their socio-environmental complexity and, based on the classification of socio-environmental complexity, indicate the methodology to be used to ensure that the collateral effects from the detonation process, are minimized, thus reducing the possibility of generating discomfort and structural damage in structures located near the mining undertaking.

**Keywords:** Open pit mining, blast, environmental aspect, ground vibrations.

## 1. INTRODUÇÃO

Para a realização de desmontes de rocha com a utilização de explosivos, vários parâmetros devem ser considerados de forma a possibilitar a elaboração de um plano de detonação que atenda aos requisitos de qualidade de fragmentação além de minimizar a possibilidade de geração de incômodos nas comunidades que circundam o empreendimento.

Neste contexto, o primeiro passo a ser seguido, em um planejamento do processo de desmonte de rocha com a utilização de explosivos, é a classificação do empreendimento de mineração de acordo com o potencial de geração de impactos ambientais, possibilitando assim a definição adequada dos trabalhos necessários para a realização dos desmontes de rocha com a utilização de explosivos de forma a prever e principalmente controlar os efeitos colaterais gerados pelas detonações, em estruturas naturais (cavidades), estruturas artificiais como prédios, pontes, escritórios, barragem de rejeito de minério, taludes, e principalmente nas comunidades vizinhas ao empreendimento.

O processo de desmonte de rocha com a utilização de explosivos, apesar de sua complexidade, tem alcançado progressos significativos com o desenvolvimento e aplicação de explosivos e acessórios com tecnologia cada vez melhor. O Surgimento dos acessórios de iniciação eletrônico trouxe para o setor uma vasta possibilidade de desenvolvimento de trabalhos que aliados às técnicas e metodologias corretas poderão contribuir na melhoria da área e principalmente possibilitará a realização de desmontes controlados com a geração de uma onda de choque com características previsíveis e principalmente, controláveis, possibilitando e compatibilizando o controle do impacto ambiental e a eficiência dos desmontes traduzindo em fragmentação adequada.

O Brasil passa por uma transformação em que as atividades de mineração estão cada vez mais próximas aos grandes centros urbanos, essa proximidade tem gerado conflito e favorecido uma maior pressão por parte da sociedade, no sentido de obrigar os empreendedores a adotarem novas tecnologias e metodologias para conciliar as operações

de mineração, com adequado desempenho, à prevenção e redução dos impactos ambientais gerados nas comunidades e estruturas circunvizinhas às operações.

Essa cobrança, somente não é mais efetiva pelo fato de as normas técnicas brasileiras, que regulamentam as atividades de desmonte de rocha com a utilização de explosivos, estarem defasadas e não trazerem recomendações e metodologias técnicas adequadas ao nível de tecnologia disponível hoje no mercado nacional e internacional.

Este trabalho visa contribuir no sentido de indicar e propor uma metodologia tecnicamente adequada a ser aplicado a grupos específicos de empreendimentos mineiros, classificados por sua criticidade socioambiental, de forma a possibilitar um controle efetivo e preventivo em relação aos efeitos colaterais gerados pelos desmontes de rocha com a utilização de explosivos, nas comunidades vizinhas ao empreendimento.

## **2. OBJETIVO**

Este trabalho tem por finalidade desenvolver uma metodologia que possibilite a classificação de empreendimentos mineiros quanto à sua criticidade socioambiental. Além de propor a estruturação do projeto de desmonte, conforme a classificação do empreendimento mineiro, objetivando a minimização dos efeitos adversos gerados pelos desmontes de rocha com a utilização de explosivos.

## **3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **3.1. Introdução**

O sucesso no monitoramento e controle dos efeitos das detonações, próximo a comunidades e estruturas críticas dependem do equilíbrio de dois fatores principais. Primeiro, o plano de fogo deve ser elaborado de forma a reduzir a carga por espera, além de a sequência de detonação ser realizada de forma a minimizar os efeitos colaterais gerados nas estruturas e residências próximas ao empreendimento. Em segundo lugar, a

quantidade de explosivos detonados por volume de rocha e o padrão e sequência de detonação devem ser ajustados para garantir uma fragmentação adequada (DOWDING; AIMONE, 1992).

O Maior desafio é determinar esse plano de desmonte que consiga alcançar ambos os objetivos, controle dos impactos ambientais e a otimização da produção garantindo a fragmentação adequada. Este plano de desmonte pode ser alcançado através de uma compreensão e aplicação dos princípios físicos de propagação das ondas de choque provenientes dos desmontes de rocha com explosivos no maciço rochoso (DOWDING; AIMONE, 1992).

Além disso, a frequência característica das ondas de choque, e a velocidade de partícula constituem a base para os estudos dos impactos potenciais, além de permitir e possibilitar a previsão e controles desses impactos provocados pelas detonações, a partir do completo entendimento dos fenômenos físicos e da influência do meio em seu resultado AIMONE, 1992).

A importância da frequência não pode ser subestimada, pois é tão crítica quanto a velocidade de partícula e influencia diretamente na magnitude da resposta das estruturas à passagem de uma onda de choque proveniente de um desmonte com explosivo. Para as estruturas artificiais e naturais, a frequência associada à velocidade de partícula, controlam as respostas e os efeitos sofridos por essas estruturas, além disso, tais parâmetros estão diretamente relacionados à possibilidade de geração de danos estruturais e geração de incômodos nas comunidades vizinhas ao empreendimento (DOWDING; AIMONE, 1992).

A geologia local e as características do caminho percorrido pela onda de choque, contribuem para a alteração da característica das ondas, as quais têm a amplitude e frequência das vibrações alteradas à medida que se propaga, no maciço rochoso entre o ponto da detonação ao ponto de monitoramento. Nesse processo, a influência mais importante, para a alteração da característica da onda, é a dissipação da energia da mesma,



levando à redução exponencial da amplitude de vibração provocada pelo aumento da distância entre o ponto de monitoramento e a frente desmontada (SISKIND, 2000).

Portanto, para entender com profundidade os impactos ambientais causados por um desmonte de rocha por explosivo é necessário antes entender o mecanismo físico que governam todo o processo de propagação das ondas de choque no maciço, além de entender como a alteração dos principais parâmetros do plano de fogo podem influenciar nas características da onda e na possibilidade de favorecer a ocorrência de efeitos colaterais dos desmontes de rocha com explosivos (SISKIND, 2000).

Os impactos ambientais correspondem à materialização dos efeitos colaterais de uma detonação, e estes impactos são fortemente influenciados pela qualidade da perfuração, características da rocha, tempos de retardos, tipo de explosivos, sequência de detonação, condições climáticas, presença de água etc. O processo de desmonte de rocha com a utilização de explosivos corresponde a um conjunto de atividades interdependentes, na qual cada etapa contribuirá para o resultado desejado, ou seja, um desmonte de rocha com adequado grau de fragmentação e menor geração de impactos ambientais possível.

### **3.2. Caracterização da onda de choque.**

As vibrações produzidas por desmontes de rocha com a utilização de explosivos podem ser analisadas como ondas senoidais, que se propagam radialmente a partir do ponto de desmonte. Quando estas se propagam em regime elástico, não existe movimento irreversível de material, verificando-se apenas a transferência de energia de um ponto para outro (GOMES, 2016).

Segundo (GOMES, 2016), um movimento oscilatório fica definido, quando se conhecem as seguintes características:

- Características da partícula:
  - Deslocamento;
  - Velocidade;
  - Aceleração;

- Duração da vibração da partícula.
- Características da onda:
  - Velocidade de Propagação;
  - Comprimento de onda da vibração;
  - Frequência de Propagação;
  - Atenuação da onda em função do meio de propagação.

### 3.2.1. Tipos de Ondas.

As vibrações elásticas que se propagam no maciço rochoso são compostas por ondas com características diferentes, as quais aliadas à heterogeneidade dos meios de propagação conferem à vibração um padrão pseudoaleatório. Estas podem ser divididas em dois grupos, como pode ser observado na Figura 01 (GOMES, 2016).

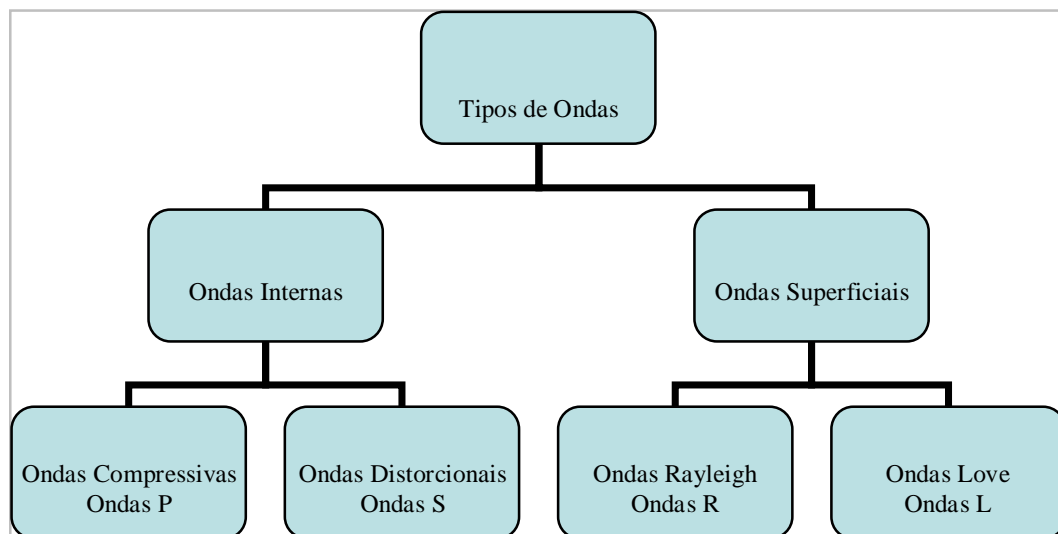


Figura 1– Tipos de Ondas (GOMES, 2016).

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

meio. As velocidades de propagação das ondas são variáveis, assumindo valores consoantes o tipo de onda bem como o tipo de meio onde se propagam (GOMES, 2016). Assim, de acordo com o comportamento e característica das ondas de choque induzidas no maciço rochoso, podem-se classificá-las como:

1. Ondas Internas;
  - a. Ondas P: Ondas compressivas promovendo uma deformação longitudinal na direção da sua propagação;
  - b. Ondas S: Ondas transversais promovendo deformações transversais à direção de propagação.
  
2. Ondas Superficiais;
  - a. Ondas R: A amplitude destas ondas é mais elevada do que as ondas internas, contudo, essa diminui rapidamente com o aumento da distância à interface.
  - b. Ondas L: Possui amplitudes elevadas e frequências baixas, diferindo apenas na velocidade de propagação.

### **3.3. Caracterização geomecânica do maciço rochoso.**

A geologia local e a geomecânica das rochas têm uma grande influência na propagação das vibrações, e a sua importância aumenta em pontos mais distantes do desmonte. A heterogeneidade das propriedades geomecânicas, bem como a existência de diferentes litologias, leva à diversificação das propriedades de propagação. Os diferentes tipos de solos e rochas acarretam um papel de filtragem de vibrações com determinadas frequências, tipicamente entre 5 e 100 Hertz (GOMES, 2016).

A existência de diferentes litologias e heterogeneidades no terreno têm, em grande parte dos casos, um efeito atenuador na propagação das vibrações no terreno. Contudo, em condições específicas, podem ocorrer fenômenos de amplificação, desencadeando assim um aumento do risco de acidentes. Um dos exemplos mais claros é, no caso de solos estratificados, a ocorrência de amplificação das vibrações quando ocorre uma diminuição da espessura dos estratos (GOMES, 2016).

Nas últimas décadas, os efeitos das cargas explosivas em estruturas naturais e estruturas artificiais ganharam considerável atenção devido ao aumento dos impactos causados pelas atividades de desmonte de rocha com a utilização de explosivos em atividade de mineração e construção civil (KUMAR et al., 2016).

As relações empíricas específicas do local, utilizadas para o cálculo de parâmetros de vibração induzidas no maciço rochoso pelo processo de detonação, como a velocidade pico de partícula e o deslocamento de pico de partícula, são comumente usados para estimar as cargas por espera adequadas para o projeto. No entanto, essas relações não são capazes de considerar a variação nos parâmetros e características das rochas e as incertezas das condições in situ (KUMAR et al., 2016).

O processo de detonação gera uma onda de choque que se propaga no terreno na forma de vibração que pode causar danos às estruturas vizinhas e incômodos nas comunidades vizinhas ao empreendimento. Nas últimas décadas, as ondas de choque induzidas no maciço pelo processo de detonações e sua propagação no maciço têm atraído cada vez mais atenção devido ao seu potencial de geração de danos e incômodos (KUMAR et al., 2016).

Os efeitos dos desmontes incluem mudanças no comportamento das rochas com implicações na estabilidade e integridade das estruturas, podendo inclusive ser considerado como gatilhos para o processo de liquefação de barragens de rejeito. Estruturas são projetadas e construídas para suportar cargas estáticas e dinâmicas, além de cuidar do assentamento de fundações dentro de limites preestabelecidos (KUMAR et al., 2016).

As cargas dinâmicas incluem carga sísmica, cargas provocadas pela vibração de equipamentos, carga explosiva etc. Os efeitos das cargas explosivas nas estruturas são causados pelas atividades de lavra na mineração e construção civil, detonação acidental de explosivos subterrâneos, ataques terroristas etc. As características das ondas que propagam no maciço rochoso são complexas e dependem diretamente dos parâmetros

adotados para elaboração do plano de desmonte além dos fatores relacionados à característica do local onde se realiza o desmonte (KUMAR et al., 2016).

O nível de vibração em um ponto localizado a uma certa distância do desmonte, depende da carga por espera, frequência de vibração da onda de choque, características da rocha (tipo, densidade, camadas, declive das camadas), condições do furo para a detonação, presença de água, da propagação da onda de choque na superfície e em subsuperfície e, em menor grau, do método de iniciação. As fraturas são desenvolvidas em rochas devido às tensões de tração e cisalhamento. Assim, estudos de vibrações do terreno induzidas por detonações em rochas tornaram-se importantes (KUMAR et al., 2016).

#### **3.4. Relação danos estruturais e a atividade de desmonte de rocha por explosivos.**

De acordo com a abordagem tradicional a causalidade entre as atividades de detonação e danos às estruturas e, portanto, responsabilidade das empresas, existe somente se o dano específico aparecesse durante a passagem da onda de choque induzida no maciço pelo processo de detonação. Em outras palavras, se houve dano antes da detonação, não há responsabilidade do empreendimento. Provas e refutações da causalidade de acordo com esta abordagem tradicional vem para fornecer resposta a duas questões básicas (STOJADINOVIC et al., 2011).

- a. O pico de velocidade de partícula induzido no maciço durante o processo de desmonte foi superior ao limite máximo estabelecido pelas normas?
- b. É possível afirmar que o dano específico existiu antes do início do processo de detonação?

A resposta para a primeira questão indica o potencial das vibrações induzidas no maciço pela detonação causar danos, enquanto a resposta à segunda questão fornece afirmação ou negação da existência de causalidade (STOJADINOVIC et al., 2011).

Essa abordagem tradicional, para determinação de causalidade, considera apenas o momento de aparecimento de novas rachaduras nas estruturas. Deste ponto de vista, esta

abordagem só pode ser justificada no caso de estruturas não danificadas, sólidas e resistentes à vibração (STOJADINOVIC et al., 2011).

No entanto, surge um problema quando a estrutura particular já está danificada e, portanto, enfraquecida ou sua resistência é degradada. Nesse caso, uma nova abordagem de monitoramento para a verificação da resposta da estrutura à passagem de uma onda de choque induzida no maciço é usada (STOJADINOVIC et al., 2011).

Esta abordagem avalia-se a resposta da estrutura à passagem de onda de choque baseando no acompanhamento da evolução das trincas e danos no momento em que a onda de choque passa pela estrutura, assim é possível determinar a causalidade com base na magnitude dessa resposta (STOJADINOVIC et al., 2011).

A existência de causalidade é comprovada por medições diretas da resposta das trincas às vibrações do terreno induzidas pela detonação. A resposta das trincas é definida como qualquer deformação permanente ou alteração nas dimensões das trincas (geralmente largura da trinca). As medições devem ser realizadas colocando medidores de deslocamento nas trincas estruturais, evitando trincas superficiais e cosméticas. A razão para isso é a diferença nas respostas dos danos estruturais e cosméticos aos fatores relacionados à detonação. Fissuras estéticas estão localizadas no gesso. Grande superfície de gesso, em relação à sua espessura, torna o reboco altamente sujeito a mudanças ambientais (temperatura e umidade) (STOJADINOVIC et al., 2011).

O recalque e acomodação do solo são os únicos fatores não diretamente relacionados ao processo de detonação que possuem o potencial de causar danos estruturais. No entanto, quando as estruturas são ancoradas em solo propício ao processo de subsidência, ou em solos soltos saturados com água, as vibrações induzidas no terreno pelo processo de detonação podem desencadear e iniciar a subsidência e o assentamento do solo que, de outro modo, permaneceria estável. Este fenômeno é conhecido como sedimentação dinâmica e o gatilho desse processo poderá ser a onda de choque induzida no terreno com velocidades das partículas das vibrações próximo a 2 mm/s (STOJADINOVIC et al., 2011).

O processo de detonação quando não adequadamente projetado, pode gerar uma onda de choque com energia suficiente para gerar incômodos nas comunidades vizinhas além de funcionar como um gatilho para o início de um processo de instabilidade atribuído a outras causas, como recalque, dilatação térmica, insuficiência de material, erro de cálculo de projeto etc. (BACCI et al., 2005a).

Em um desmonte de rocha com a utilização de explosivos, ondas de choque induzidas no maciço rochoso, sofrem o processo de dissipação de energia à medida que se propaga no maciço, em todos os casos, tanto a energia das ondas do corpo como das ondas de superfície diminuem com a distância, embora se dissipem em taxas diferentes. As ondas do corpo geralmente têm uma frequência maior que as ondas de superfície e são dominantes perto da detonação, portanto, as frequências das ondas de choque induzidas no maciço pelo desmonte, próximas ao local do desmonte serão maiores (JONES; STOKES, 2004).

À medida que a distância do ponto de detonação aumenta, as ondas do corpo se dissipam mais rapidamente que as ondas de superfície, portanto, as ondas de superfície tornam-se dominantes e as frequências (e intensidades) das ondas de choque induzidas no maciço são menores. Exceções podem ocorrer quando as ondas se propagam em solo ou rocha rígidos subjacentes e emergem como a onda dominante a grandes distâncias (JONES; STOKES, 2004).

A vibração do terreno é um movimento ondulante propagado do ponto de detonação, semelhante ao efeito de ondulação produzido por uma rocha lançada em um lago. A onda de choque que passa pelas estruturas localizadas na superfície do terreno transmite vibração a essas estruturas, fazendo-as ressoar se a frequência de vibração do terreno coincidir com a frequência natural da estrutura. Consequentemente, a amplitude da vibração pode crescer e tornar-se maior que a vibração indutora (ÁLVAREZ-VIGIL et al., 2012).

Frequência e velocidade pico de partículas (PPV) são os dois parâmetros mais utilizados para avaliar as vibrações do terreno. Alguns autores sublinham a importância particular

da frequência, dado que a resposta estrutural depende da frequência da vibração do terreno. A vibração do terreno é influenciada por vários parâmetros, como as propriedades físicas e mecânicas da massa rochosa, a natureza do explosivo usado e o projeto de detonação. É importante entender os efeitos desses parâmetros para poder usar efetivamente a energia explosiva e minimizar os efeitos indesejáveis da detonação. Parâmetros de projeto, tais como a carga por espera, tempos de retardo, tampão, carga e sequência de detonação, variam muito com cada processo de desmonte (ÁLVAREZ-VIGIL et al., 2012).

As características da massa rochosa também variam muito de um lugar para outro na mesma mina. Consequentemente, os parâmetros do projeto de detonação e as características dos explosivos precisam ser otimizados com base nas propriedades da massa rochosa, a saber: resistência, densidade, porosidade, velocidade de onda longitudinal, resposta tensão-deformação e presença de descontinuidades estruturais (ÁLVAREZ-VIGIL et al., 2012).

Segundo (ÁLVAREZ-VIGIL et al., 2012), a intensidade e a frequência das vibrações induzidas no maciço rochoso, devido a atividade de desmonte de rocha com explosivos, dependem de muitos fatores:

1. Um grupo que define as características do ambiente.
  - a. O tipo de rocha e massa de rocha (classificação de massa rochosa, RMR), já que cada terreno tem uma velocidade de transmissão e frequência dominantes que favorecem a propagação de ondas para essa frequência.
  - b. A presença de famílias de descontinuidades e suas características (essencialmente, abertura, preenchimento e água) também afetam a transmissão.
  - c. A distância a ser percorrida pela onda (entre a fonte e o ponto de controle), pois as ondas sofrem atenuação com a distância percorrida.
  - d. A presença de descontinuidades significativas (falhas), estruturas geológicas especiais tais como dobras, impulsos e níveis que podem atuar como isoladores (por exemplo, argilas).



2. Outro grupo que define a energia das ondas e está relacionado à sua fonte, neste caso, a detonação.
  - a. O tipo de explosivo, pois explosivos de alta velocidade geram uma onda de choque de maior intensidade.
  - b. A carga explosiva instantânea, que define a quantidade de energia usada na geração da onda de choque.
  - c. Geometria do plano de desmonte, definida por parâmetros como diâmetro de perfuração, comprimento do furo, espaçamento e carga.
  - d. A sequência de detonação, dado que as ondas de furos sucessivos podem se comportar de uma das três maneiras:
    - i. acumular para amplificar a onda global;
    - ii. contrabalançar uns aos outros para minimizar a vibração geral;
    - iii. agir de forma independente.

Na Tabela 1 encontram-se apresentados os principais fatores que influenciam as vibrações do terreno.

Tabela 1: Principais fatores operacionais que influenciam a vibração do maciço. (ROSENTHAL et al., 1987)

		Fatores que influenciam as vibração de terreno.		
		Importante	Moderadamente Importante	Insignificante
Variáveis Controláveis	Carga explosiva por retardo	■		
	Tempos de retardos	■		
	Parâmetros geométricos do desmorte:			
	o Afastamento e espaçamento		■	
	o Tampão (comprimento)			■
	o Tampão (granulometria do material)			■
	o Inclinação dos furos		■	
	o Diâmetro dos furos			■
	o Direção de inicialização			■
	Carga explosiva por detonação		■	
Variáveis Não Controláveis	Carga de fundo			■
	Iniciador não elétrico x convencional			■
	Confinamento das cargas	■		
	Geologia local		■	
	Tipo de material de cobertura		■	
	Espessura do material de cobertura			■
	Distância entre desmorte e ponto de interesse	■		
Variáveis Não Controláveis	Propriedades do maciço rochoso		■	
	Erro no tempo de iniciação	■		
	Superfície do terreno			■

A Tabela 1 lista uma série de fatores e sua influência e importância para a realização do controle de vibração do maciço rochoso. Destas, as três principais variáveis que afetam o movimento do terreno em qualquer região são:

- o Distância entre o ponto do desmorte e o local de interesse;
- o Carga de explosivo por espera;

- Frequência de vibração da onda.

Os principais parâmetros do plano de fogo devem ser dimensionados e adotados observando características associadas à:

1. Limite de velocidade de partícula pico;
2. Frequência da onda de choque associada;
3. Equação da distância escalonada;

A realização de desmontes de rocha com explosivos exige adoção de medidas de controle que visam minimizar a possibilidade de ocorrência de danos estruturais em edificações próximas ao empreendimento e que minimize a possibilidade de geração de incômodos às comunidades que residem próximo aos empreendimentos.

No Brasil a utilização de explosivos é controlada por regulamentos federais e estaduais que estabelecem procedimentos e limites para as atividades com a utilização de explosivos, principalmente em áreas urbanas, o pico de velocidade das partículas (PPV) associado à vibração do terreno é expresso em mm/s e é o melhor parâmetro para avaliar possíveis danos estruturais. Esse potencial de geração de danos pode ser potencializado dependendo do valor da frequência associada à onda de choque que se propaga no maciço. Os limites legais mundiais variam de 2 mm/s para edifícios históricos a 150 mm/s para concreto armado (BACCI et al., 2005b).

Os valores limites do nível de vibração do terreno não dependem apenas dos danos que a velocidade de vibração de partícula pode causar nas construções civis, mas também do tipo de construção em si, tendo sido provado que, com frequência, a vibração gerada por explosivos é apenas o instante detonador de um processo de instabilidade atribuído a outras causas, como recalque, dilatação térmica, insuficiência de material, erro de cálculo de projeto etc. (BACCI et al., 2005b).

No Brasil, a norma que estabelece limites para controle de vibração é a NBR ABNT 9653/2018 - Guia para avaliação dos efeitos provocados pelo uso de explosivos nas minerações em áreas urbanas. Tal norma considera a velocidade de partícula e a

frequência associada à onda de choque como um parâmetro de dano duplo. A norma ABNT NBR 9653/2018 foi elaborada baseando-se em dados experimental e não leva em consideração os diferentes tipos de edificações nas avaliações.

A Figura 2 apresenta o gráfico que relaciona velocidade de partícula com a frequência associada à onda de choque, adotada pela ABNT NBR 9653/2018.

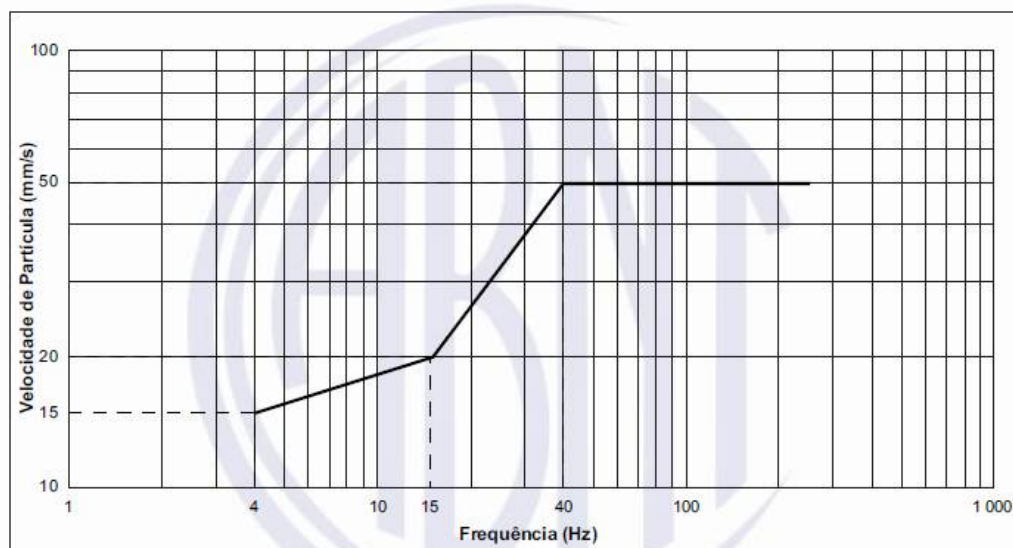


Figura 2: Norma Brasileira NBR ABNT 9656 / 2018.

Embora no Brasil tenha a norma ABNT NBR 9653 / 2018 como referência e guia para adoção de medidas para controlar os efeitos e impactos ambientais provocados pelo uso de explosivos nas minerações em áreas urbanas, a mesma é muito superficial e não traz em detalhes a indicação de metodologias e procedimentos a serem adotados afim de minimizar a possibilidade de geração de danos estruturais ou incômodos nas comunidades vizinhas ao empreendimento, tão pouco indica limites adequados para velocidade de partícula e frequência de forma a minimizar a possibilidade de geração de incômodos nas comunidades vizinhas ao empreendimento.

Sabe-se que à medida que se afasta do ponto de realização do desmonte as ondas de choque induzidas no maciço rochoso de baixa frequência e superficiais prevalecem, dessa forma a possibilidade de ocorrência do efeito da ressonância torna-se possível, sendo

necessário a incorporação, no plano de desmonte, medidas adequadas e locais para minimizar a possibilidade de ocorrência de tal fenômeno e conseqüentemente a geração de danos e incômodos nas comunidades vizinhas ao empreendimento.

### **3.5. Influência da distância na frequência associada e amplitude de vibrações das ondas de choque induzidas no maciço.**

A característica das ondas de coque, induzidas no maciço rochoso pela atividade de desmonte com explosivos, sofre alterações devido à propagação da onda no meio. A onda de choque ao se propagar no maciço rochoso sofre alterações da amplitude, frequência e duração das vibrações em função da interação com os vários meios geológicos e interfaces estruturais, e do espalhamento do trem de ondas através de dispersão e/ou absorção, que é tanto maior quanto for a frequência de propagação das ondas (DALLORA NETO, 2004).

Observa-se também que nas proximidades dos desmontes as características da vibração são afetadas pelos fatores do plano de fogo, geometria da mina, carga de explosivos detonada por espera, tempo de retardo, direção de iniciação do desmonte em relação ao ponto de monitoramento além do afastamento e espaçamento. Para distancias maiores observa-se que os fatores relacionados ao plano de fogo tornam-se menos importante e o meio de propagação composto pelo maciço e terreno de recobrimento prepondera sobre as características da onda (DALLORA NETO, 2004).

É importante apontar ainda que espesso recobrimento por solo e grandes distancias criam trens de onda de baixa frequência e grande duração (DALLORA NETO, 2004).

#### **3.5.1. Efeitos da distância na energia de propagação das ondas de choque.**

As características da onda de choque, induzidas no maciço rochoso, são alteradas devido ao princípio de atenuação das ondas em que a amplitude e frequência são alteradas em função do deslocamento da onda de choque pelo maciço e condicionado pelas características litológicas do maciço entre o ponto de realização do desmonte e o ponto de monitoramento. A influência mais importante é a dissipação da energia, onde a

quantidade finita de energia de vibração abrange um volume cada vez maior do maciço à medida que ela se desloca para fora em todas as direções, desde o ponto de realização do desmonte. A consequência é geralmente uma diminuição exponencial da amplitude de vibração com o aumento da distância do ponto de realização da detonação (SISKIND, 2000).

A representação gráfica da equação de atenuação da onda é o gráfico da amplitude de movimento do terreno versus distância. As amplitudes de pico são geralmente expressas como velocidades de partículas e as distâncias podem ser escalonadas ou não escalonadas. A determinação das características de propagação das ondas de choque induzidas no maciço em um local específico pode ser útil para controlar amplitudes em situações em que os níveis possam exceder os limites de conformidade (SISKIND et al., 1980).

A caracterização e determinação da equação ou lei de atenuação das ondas de choque é obtida com a utilização de matrizes de sismógrafos, ou alguns sismógrafos e vários desmontes. Dessa forma pode-se determinar o valor de velocidade de partícula pico PPV para várias distâncias da detonação (SISKIND et al., 1980).

Outros efeitos que contribuem para a perda da energia da onda de choque induzida no maciço são as perdas de energia por absorção e dispersão, onde diferentes componentes de frequência viajam em diferentes velocidades de propagação, e há formação de ondas de superfície. Os parâmetros com a maior influência na redução da amplitude de vibração, das ondas de choque induzidas no maciço devido à realização de desmonte de rocha com explosivos são a distância e a carga de explosivos por espera. A frequências da onda de choque induzida no maciço também é influenciada pela distância e geologia (SISKIND et al., 2005).

Para curtas distancias, até cerca de 300 m entre o ponto de monitoramento e o ponto do desmonte, as ondas de choque que se propagam no maciço são dominadas por ondas com frequências relativamente altas. A distância exata, em que às ondas de choque de frequência alta são dominantes, depende de quão “influyente” é o maciço. A tecnologia atual de iniciação das detonações ou desmonte por explosivo nos permite um controle das

características das amplitudes de vibração e da frequência dominante de vibração das ondas de choque induzidas no maciço, esse controle somente é efetivo em pontos de monitoramento próximo ao ponto de detonação. Novos iniciadores precisos podem melhorar o controle da frequência de vibração e a maiores distâncias (SISKIND et al., 2005).

Para distâncias superiores a algumas centenas de metros, mais de 300 m as ondas de superfície tendem a dominar e compor a onda de choque induzida no maciço. As ondas de superfície são tipos particulares de ondas sísmicas de baixa frequência (SISKIND et al., 2005).

Os maciços formados por solos e aterros propiciam a propagação das ondas de superfície que são ondas que se propagem com baixa velocidade. A velocidade aqui mencionada é a velocidade de propagação e não a velocidade da partícula. Onda de superfície se desenvolve em camadas mais superficiais e pouco profundas chegando a 30 m de profundidade (SISKIND et al., 2005).

Estudos de vibração em áreas de minas e pedreiras com camadas espessas de solo, material de enchimento ou depósitos de leito de córrego encontrou-se ondas de superfície com frequências de 4 a 8 Hz e maiores amplitudes comparadas a vibrações que se propagam através da rocha do solo a distâncias comparáveis (SISKIND et al., 1989).

Essas amplitudes de velocidade de partícula relativamente mais altas resultam mais do reforço de onda construtiva para cargas muito próximas umas das outras, no tempo, em comparação com seus períodos de onda relativamente longos do que de qualquer aumento de amplitude relacionado geologicamente. No sudoeste da Índia, na remoção de capeamento de carvão, foram encontrados valores de frequências de vibração dominantes com valores próximos a 4 Hz, valores identificados em áreas dominadas por depósitos glaciais (SISKIND et al., 1989).

Casos semelhantes de baixas frequências também foram encontrados na Pensilvânia e na Flórida. A Figura 03 mostra a onda de vibração com diferentes frequências e durações. A

Figura 04 mostra o desenvolvimento de ondas superficiais a distâncias maiores a partir de um único furo em uma mina de carvão de superfície (SISKIND et al., 2005).

A Figura 3 apresenta as formas das ondas de choque induzidas no maciço devido a detonação a 22 m do ponto de monitoramento, uma onda de choque gerada em um desmonte a 700 m em uma mina de carvão que favorece a propagação de ondas de baixa frequência. No primeiro desmonte a onda de choque induzida apresenta uma frequência de vibração acima de 40 Hz. O segundo registro apresenta altas e baixas frequências, e o último registro apresenta uma onda de longa duração e de baixa frequência, cerca de 4 Hz (SISKIND et al., 2005).

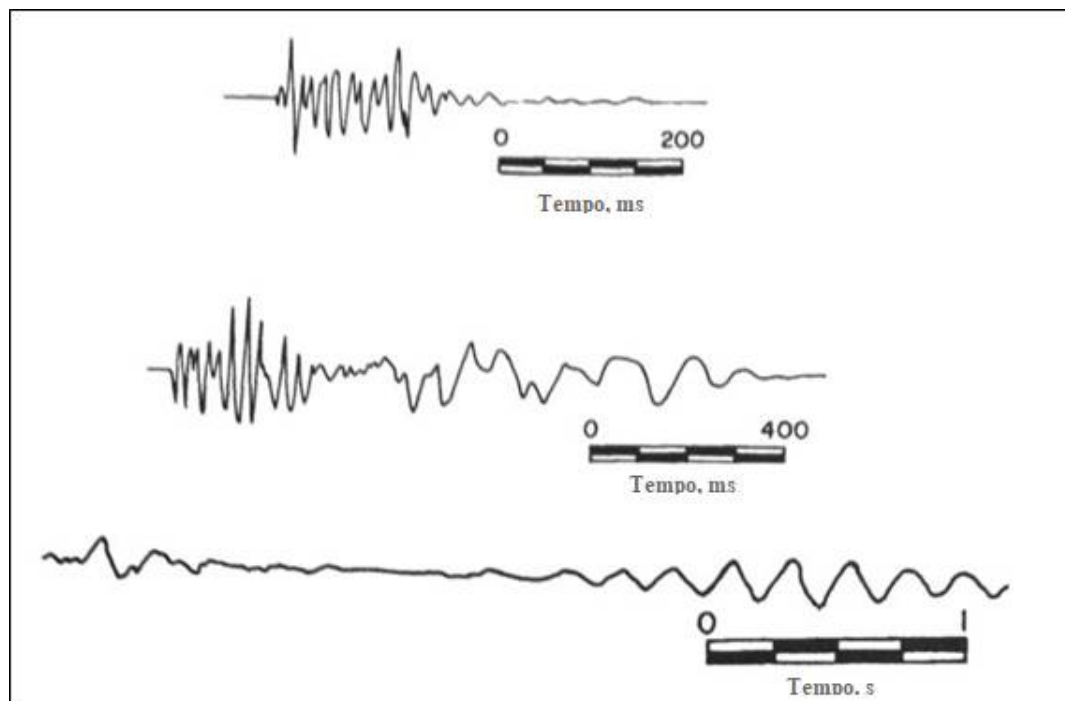


Figura 3: Formatos das ondas de choque induzidas no maciço devido a detonações.(SISKIND et al., 2005)

A figura 04 apresenta um conjunto de formas de ondas induzidas no maciço rochoso coletadas em uma matriz composta por 07 sismógrafos instalados em pontos distintos e a



diferentes distâncias de forma a demonstrar o comportamento das ondas de choque à medida que se afasta da fonte.

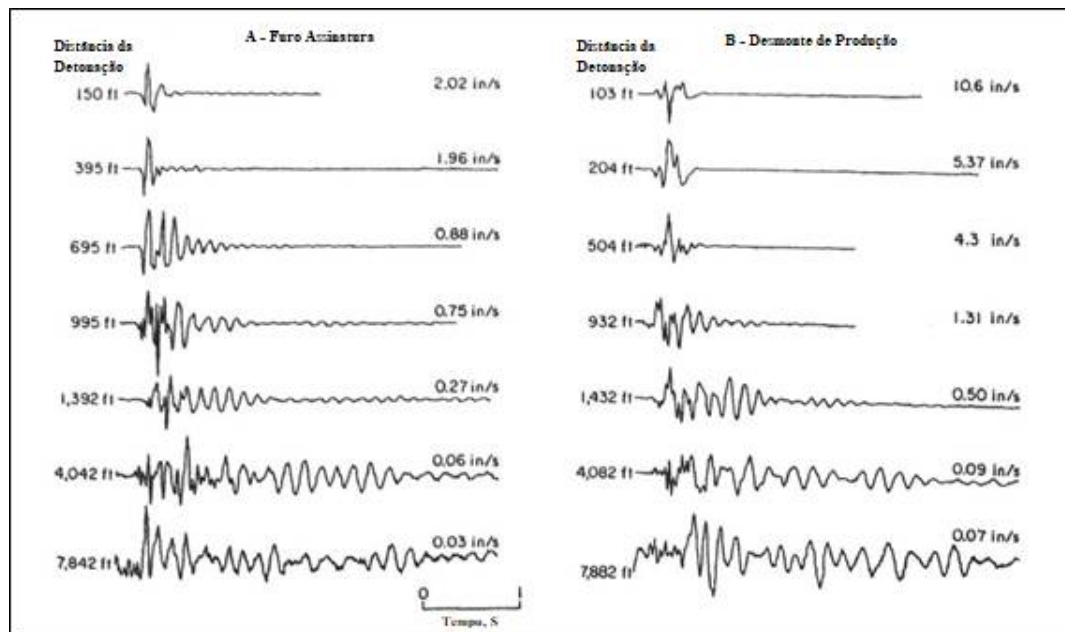


Figura 4: Conjuntos de formas de onda de vibração de uma matriz de propagação de sete sismógrafos (SISKIND et al., 1989).

Estudos mostraram que para regiões que propiciam a propagação de ondas de choque de baixa frequência os tempos de retardos próximos a 8 mms aparentemente são muito curtos para separar efetivamente as cargas. Para uma onda de 4 Hz (com um período de 250 mms), 8 mms é muito curto para criar uma interferência de onda destrutiva, nesse caso um tempo de retardo mais adequado deve estar próximo a 60 mms de forma a possibilitar a geração de uma onda composta destrutiva (SISKIND et al., 1989).

Em algumas regiões, variações nos valores reais e estimados de vibrações, aparecem nas parcelas de propagação onde tais locais parecem gerar vibrações anormalmente altas porque os tamanhos das cargas efetivas são subestimados. Uma maneira de diagnosticar isso é comparar um único disparo de carga (chamado de assinatura) com o desmonte de produção. Se as vibrações medidas forem as mesmas, as cargas efetivas (por retardo) também serão as mesmas. Onde o reforço de onda entre cargas deve ser evitado, o retardo

entre as cargas deve ser de pelo menos um quarto do período de frequência de onda dominante (SISKIND et al., 2005).

O controle adequado da característica das ondas de choque induzidas no maciço rochoso devido a desmontes com explosivos é de fundamental importância para minimizar a possibilidade de ocorrência do fenômeno da ressonância. Todo sistema elástico tem uma frequência de vibração natural, quando uma fonte promove uma onda que vibra com uma frequência coincidente à frequência natural de um determinado sistema, ela começa a vibrar com grande intensidade e diz-se que está em ressonância com a fonte (SISKIND et al., 2005).

Segundo (SISKIND et al., 2005), as estruturas reagem a uma vibração devido à sua inércia, quando aplicado por um agente externo, um único pulso para um sistema oscilante, é suficiente para esse sistema oscilar em sua frequência natural com a amplitude de oscilação diminuindo para zero com o tempo devido ao amortecimento. Quando aplicado a uma sequência contínua de pulsos, o sistema oscila forçosamente e neste caso, duas situações principais são possíveis em um sistema com oscilação forçada:

- A frequência dos pulsos aplicados pela fonte externa é bem diferente da frequência natural de vibração do sistema;
- A frequência dos pulsos aplicados pela fonte externa é igual ou quase igual à frequência natural de vibração do sistema.

No primeiro caso, o sistema oscila a uma frequência que não é coincidente com as frequências naturais de vibração da estrutura, pelo que as oscilações permanecerão de pequena amplitude. Na segunda situação, o sistema oscila com frequência igual à frequência natural da estrutura e, conseqüentemente, atinge oscilações de grande amplitude, ocorrendo fenômeno denominado ressonância.

Os fenômenos de ressonância ocorrem quando um sistema físico vibra violentamente em sua frequência natural de oscilação gerando conseqüentemente uma onda de choque com grande capacidade de gerar danos às estruturas e geração de energia muito alta para as

comunidades vizinhas possibilitando assim a geração de incômodos e possibilidade real de danos estruturais.

Estruturas fixadas ao terreno tendem a amplificar o movimento horizontal do terreno com a passagem de onda de choque induzida no maciço. A resposta da estrutura é dependente da frequência de vibração da onda, da massa e rigidez da estrutura, porém essa rigidez da estrutura não é tão prática para medir (SISKIND et al., 1989).

No entanto, parâmetros de respostas equivalentes e mais úteis da frequência natural e do amortecimento podem ser medidos diretamente. Esse potencial para o comportamento de resposta de amplificação é às vezes chamado de “resposta livre”, em contraste com o comportamento de uma parede bem fixa ao terreno por fundações bem ancoradas, que tem seu movimento de resposta restrito e amortecido pelo contato com o solo ou rocha. A resposta mais alta ocorre a partir da excitação na frequência natural da estrutura, para casas de um e dois andares está dentro da faixa de frequência de 4 a 12 Hz (SISKIND et al., 1989).

A vibração de uma estrutura induzida por uma onda proveniente de um desmonte, com a frequência da onda próximo à frequência de ressonância da estrutura e a correspondente resposta resultante da estrutura são mostradas na Figura 05. A frequência de resposta é de 5,8 Hz. O amortecimento pode ser calculado a partir da resposta livre da estrutura, idealmente, e pode ser dado pela taxa de decaimento da vibração de resposta após a passagem da onda (SISKIND et al., 1989).

A Figura 5 não é uma perfeita “resposta livre”, pois a vibração do terreno não terminou. No entanto, o decaimento é evidente com a resposta de alto nível diminuindo para 23% de amplitude após 2 ciclos. Isso corresponde ao amortecimento de 11,7%.

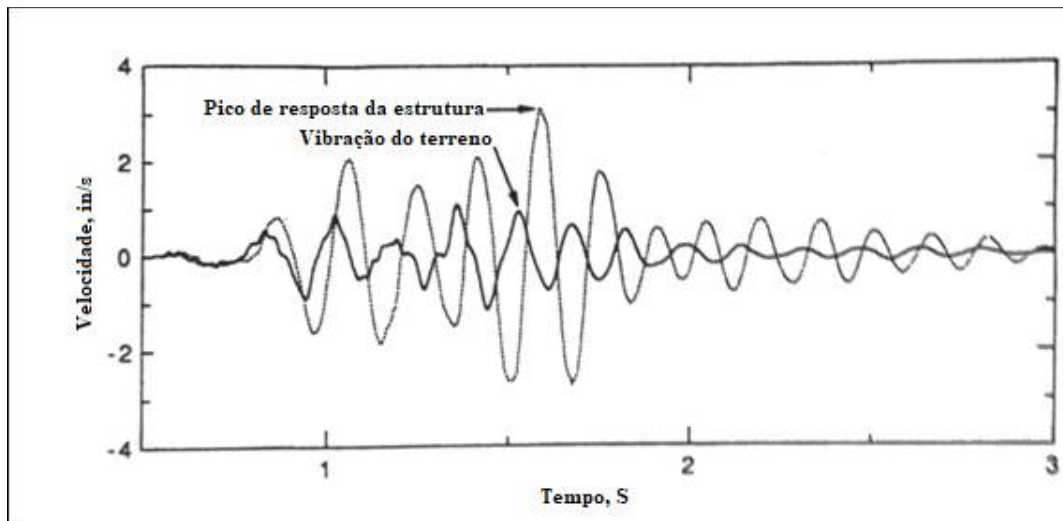


Figura 5: Vibração próxima à ressonância da estrutura (SISKIND et al., 1989).

### 3.6. Superposição de Ondas:

O princípio da superposição de ondas pode ser aplicado sempre que duas (ou mais) ondas viajam pelo mesmo meio ao mesmo tempo. As ondas passam uma pela outra sem serem perturbadas. O deslocamento da rede do meio em qualquer ponto no espaço ou no tempo é simplesmente a soma dos deslocamentos das ondas individuais. Isto é verdade para ondas que são finitas em comprimento (pulsos de onda) ou que são ondas senoidais contínuas.

O fenômeno de superposição de ondas pode ocorrer quando dois ou mais furos planejados para serem detonados em sequência são iniciados com intervalos muito próximos. Esse fenômeno é mais evidente quando realiza grandes desmontes, onde o posicionamento dos furos aliados ao tempo de saída entre os furos é muito próximo (KLEN, 2010).

A figura 6 (a) representa dois pulsos de onda propagando de forma independente, a figura 6 (b) e dois furos interferindo-se de forma construtiva.

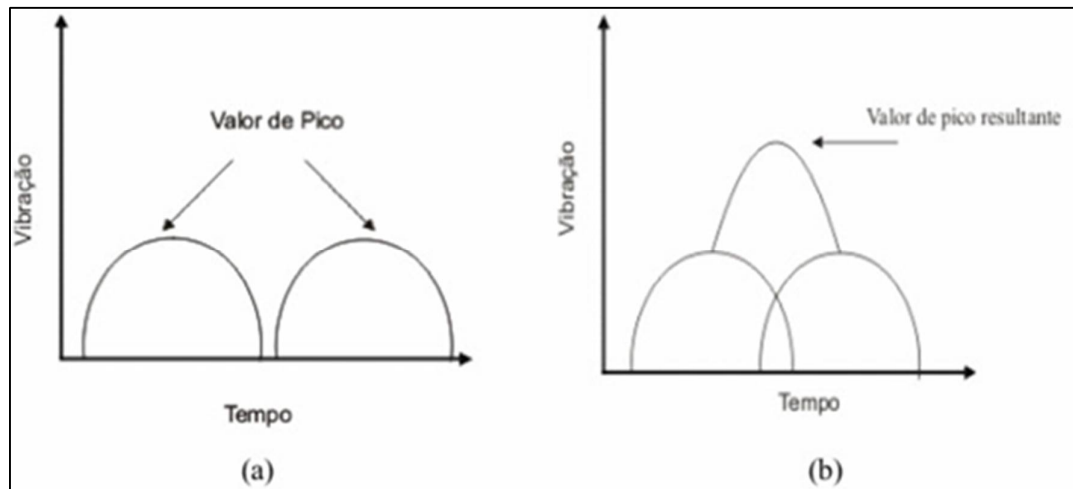


Figura 6: Processo de superposição de ondas (KLEN, 2010).

O fenômeno de superposição de ondas não é somente influenciado pelos tempos de iniciação das cargas explosivas, sendo também influenciados por:

- Velocidade de propagação da vibração pelo terreno;
- Tempo de atenuação da vibração pelo terreno;
- Distância do ponto de monitoramento ao local do desmonte;
- Geometria da carga;
- Velocidade de detonação;
- Confinamento da carga.

A superposição de ondas pode ser construtiva ou destrutiva, no primeiro caso a energia da onda é ampliada e a capacidade de geração de dano e incomodo são também ampliados, de modo oposto, a formação de uma onda composta com características destrutivas tem a energia reduzida minimizando a possibilidade de geração de danos.

Dessa forma, sempre que possível deve-se buscar a formação de uma onda composta destrutiva e quando esse não for possível, deve-se dimensionar os tempos de retardos para minimizar a possibilidade de geração de uma onda composta no ponto onde se deseja monitorar.

### **3.6.1. Determinação do tempo de retardo capaz de gerar uma onda composta destrutiva.**

O processo de otimização, para a determinação dos tempos de retardos e sequência de detonação, capazes de favorecer a formação de uma onda composta destrutiva no ponto de monitoramento é baseado no estudo da assinatura da onda. Estes furos únicos são os registros feitos em uma ou várias estações sísmicas para a detonação de um único furo representativo (para aumentar as possibilidades de análise, é recomendável fazer várias assinaturas de furos).

A partir do registro do furo assinatura, utiliza-se aplicativos que são capazes de simular e otimizar os tempos de retardo baseados nas informações de:

- Registro do furo assinatura;
- Tempo percorrido entre o disparo do furo assinatura até a chegada do mesmo ao ponto de monitoramento
- Distância exata de cada furo do plano de fogo entre o desmonte e ponto de monitoramento

O princípio usado na análise representada pela Figura 7 considera trabalhar com simulações utilizando o processo de superposição linear. Assim ao equacionar e otimizar os tempos de retardo, a partir do furo assinatura, considera por aproximação e extrapolação a assinatura sísmica de cada um dos furos que compõem o plano de fogo que queremos otimizar a sequência de tempo, assim, determina os tempos de retardo para cada furo bem como a sequência de detonação de forma a favorecer a formação de uma onda composta destrutiva no ponto onde se deseja monitorar.

A figura 7, representa a possibilidade de geração de uma onda composta produzida a partir de vários pulsos de ondas com retardos de tempos entre um pulso e outro de forma a possibilitar a formação da onda composta com característica desejada.

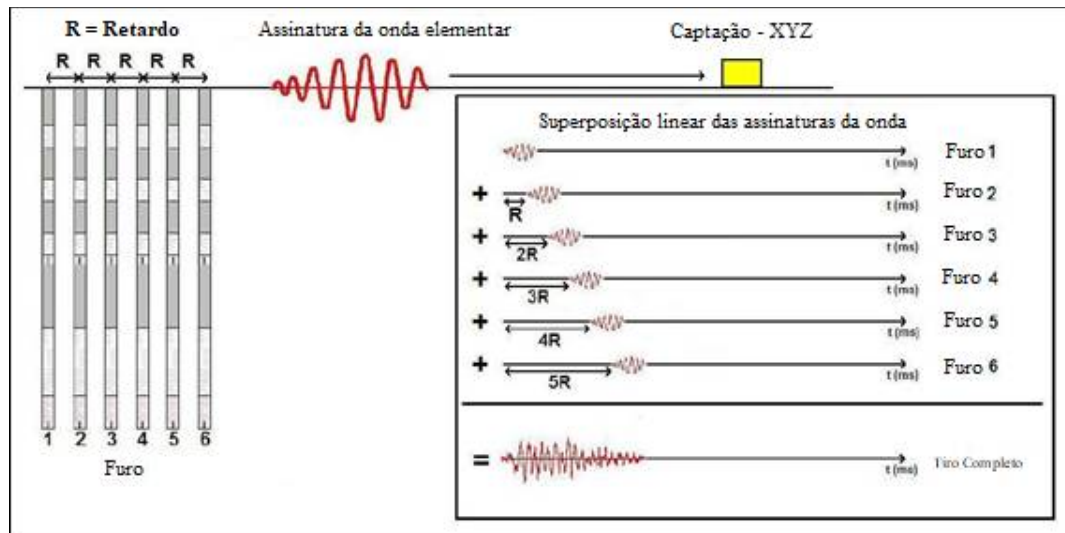


Figura 7: Determinando um atraso minimizando a vibração – Fonte: Manual do Software I-Blast.

#### 4. Apresentação do Problema:

Hoje no Brasil temos apenas duas normas que servem de guia e que direcionam e regulam os trabalhos desmonte de rocha com a utilização de explosivos, a ABNT NBR 9653/2018 e a CETESB D7.013, porém as mesmas são superficiais e mesmo com a aplicação dessas em sua integralidade não se tem garantias que os impactos gerados pelos desmontes de rocha serão minimizados e que os efeitos e impactos ambientais estarão controlados.

Dessa forma, o trabalho aqui proposto tem por objetivo propor uma metodologia para a realização da classificação de empreendimentos mineiros, segundo sua criticidade socioambiental e a partir da classificação elaborar uma proposta de itens a serem considerados para a elaboração do processo de desmonte de rocha com a utilização de explosivos. Nesse sentido, este trabalho visa complementar as normas vigentes e aplicáveis hoje no Brasil quanto ao tema de controle de vibração e redução de impactos ambientais nas comunidades vizinhas ao empreendimento.

#### 5. Metodologia;

##### 5.1. Avaliação técnica da norma brasileira, ABNT NBR 9653/2018

A norma ABNT NBR 9653/2018, embora amplamente utilizada como um guia para a avaliação dos efeitos provocados pelo uso de explosivos nas minerações em áreas

urbanas, não traz o detalhamento necessário de uma metodologia adequada para o correto e efetivo controle dos efeitos dos desmontes de rocha com a utilização de explosivos. Em uma análise mais aprofundada, deveria estar disponível no corpo da norma a materialização do título da mesma, “*Guia para avaliação dos efeitos provocados pelo uso de explosivos nas minerações em áreas urbanas*” porém verifica-se que no corpo da mesma não está disponível a indicação de metodologia adequada para avaliação dos efeitos negativos provenientes da atividade de desmonte de rocha com explosivos e muito menos a indicação de metodologias para a realização do controle desses efeitos negativos gerados pelo processo de desmonte de rocha com a utilização de explosivos.

O controle dos efeitos negativos gerados pelo processo de desmonte de rocha com explosivo, passa necessariamente pela possibilidade de obtenção da previsibilidade dos efeitos das detonações de forma a possibilitar a adoção de medidas de controles efetivas, que possam neutralizar ou minimizar a ocorrência dos mesmos, conforme especificado no escopo da norma ABNT NBR 9653/2018, capítulo 1, “*Esta Norma especifica a metodologia para reduzir os riscos inerentes ao desmonte de rocha com uso de explosivos em indústria de mineração e construção em geral, estabelecendo parâmetros a um grau compatível com a tecnologia disponível, para a segurança das populações vizinhas, referindo-se a danos estruturais e procedimentos recomendados quanto à resposta humana.* ”(ABNT NBR 9653, 2018)

Embora a norma ABNT NBR 9653/2018 apresente um título e escopo muito completo e adequado, isso não é observada no corpo da norma e a mesma não propõe uma metodologia específica e adequada para o controle efetivo dos efeitos negativos dos desmontes de rocha com explosivos. Além disso, não é mencionado em seu conteúdo a indicação de tecnologia adequada a ser aplicada para possibilitar a previsão e controle efetivo dos efeitos negativos dos desmontes de rocha com explosivo.

Outro ponto que merece destaque é o campo de aplicação da norma. No escopo da referida norma, é facultativo a aplicação da mesma para as áreas não urbanas, “*É facultativa a aplicação desta Norma nas minerações localizadas em áreas não urbanas.*” porém, em nenhuma parte do corpo da norma é definido e caracterizado área urbana, deixando uma



lacuna e pontos de sombra sobre a aplicabilidade da mesma em diversos empreendimentos que estão localizados em áreas não urbanas, mas que possuem comunidades próximas ao empreendimento e que sofrem com os efeitos negativos gerados pelos desmontes de rocha com a utilização de explosivos.

As Figuras 8 e 9 representam minas localizadas em regiões urbanas para as quais a norma ABNT NBR 9653/2018, pelo seu escopo se aplica.



Figura 8: Mina Capão Xavier – Vale – Zona Urbana de Nova Lima – Fonte Google.



Figura 9: Mina Kinross – Zona Urbana de Paracatu / MG – Fonte Google.

As Figuras 10 e 11 representam minas localizadas em áreas não urbanas, área rural, para as quais a norma ABNT NBR 9653/2018 poderiam não ser aplicadas, já que, para áreas não urbanas a aplicação da norma é facultativa. Porém, pode-se perceber, que mesmo o empreendimento não estando inserido em uma área urbana, existe comunidades próximas onde as atividades de detonações geram impactos e incômodos, dessa forma a abrangência da norma deveria também considerar essas regiões como sendo áreas de aplicação obrigatória.



Figura 10: Mina Fazendão – Vale – Zona Rural de Catas Altas – Fonte Google.



Figura 11: Mina Pedra do Sino – Cimento Tupi – Zona Rural de Carandaí / MG – Fonte Google.

Por outro lado, destaca-se positivamente o capítulo 4 da referida norma, que trata dos procedimentos. Nesse capítulo pode-se verificar a robustez com o qual foi elaborado e a riqueza de informações que compõe tal capítulo, o mesmo foi escrito de forma muito completo e nesse quesito, pode-se considerar a norma como bem robusta e com procedimentos e metodologias adequados para a execução dos monitoramentos. Essas metodologias e procedimentos disponíveis no capítulo 4 da norma refere-se aos procedimentos necessários para a realização do monitoramento, ou seja, são procedimentos para a realização de calibração dos aparelhos, indicação de necessidade de emissão de certificados de calibração por órgãos competentes e acreditados, além de indicação de escopo adequado para a confecção de relatórios de monitoramento e a necessidade de profissional capacitado e habilitado para a confecção dos laudos.

Assim, aplicando-se a norma, conforme indicação do capítulo 4, os resultados obtidos com a instrumentação serão representativos e realmente serão confiáveis e principalmente, representará a realidade no sentido de indicar os valores de velocidade de partícula, frequência e pressão acústica que chegam no terreno próximo à estrutura monitorada. Sendo assim, a norma ABNT NBR 9653/2018 se restringe e é eficaz apenas para a quantificação dos resultados dos desmontes de rocha com a utilização de explosivos no terreno próximo à estrutura onde se deseja monitorar, não propondo nenhuma metodologia para a determinação do efeito dessa vibração na estrutura da residência ou edificação a ser monitorada e não propondo nenhuma metodologia que trabalhe o planejamento para a previsão e controle dos efeitos provocados pelo uso de explosivos nas minerações em áreas urbanas.

Já o capítulo 5, “*Requisitos de Avaliação*”, se mostra muito genérico e não cumpre com o objetivo da norma. Nesse capítulo, ter-se-ia a oportunidade de propor uma metodologia para a classificação dos empreendimentos mineiros por complexidade dos processos de desmonte de rocha com a utilização de explosivos, sugerindo uma metodologia adequada a ser aplicada para grupos de empreendimentos com similaridade em termos de complexidade dos processos de desmontes com a utilização de explosivos de forma a tornar esse processo mais previsíveis e controlados.



Percebe-se ainda a ausência total de indicação da necessidade de adoção de procedimentos para a avaliação prévia do empreendimento e entorno, necessários para a elaboração de um plano de fogo adequado e compatível com a especificidade do local a ser monitorado. A norma ABNT NBR 9653/2018 traz apenas observações superficiais sobre a proibição de ocorrência de ultra lançamentos, estabelece um limite máximo de pressão acústica além de uma indicação de limites de vibração associados à frequência que visa a prevenção de danos estruturais em edificações que circundam o empreendimento.

Porém, aspectos relacionados a possibilidade de a onda de choque proveniente do desmonte de rocha funcionar não como um causador principal do dano, mas como um gatilho e detonador de um processo de instabilidade atribuído a outras causas, como recalque, dilatação térmica etc., não foram levados em consideração. Assim, trabalhos de vistorias cautelares em residências, plano de acompanhamento de propagação de trinca etc., dever-se-ia ser indicados e apontados como necessários, no corpo da norma, para possibilitar a correlação ou não da propagação de danos e a onda de choque gerado no processo de detonação.

Além disso, o capítulo 6, “*Recomendações*”, e principalmente o capítulo 6.1, “*Resposta Humana*”, se mostra muito superficial e não propõem contribuições significativas para a minimização dos efeitos dos desmontes de rocha com explosivos nas comunidades do entorno ao empreendimento e nem o estabelecimento de limites de vibração de forma a minimizar e prevenir incômodos. Dessa forma, trabalhos e metodologias adequadas para minimizar os impactos não são observados e não são abordados de forma efetiva no corpo da norma ABNT NBR 9653/2018.

Assim, quando se realiza um comparativo entre as proposições da norma, em relação à metodologia para a elaboração de desmonte de rocha com a utilização de explosivos, e a necessidade de previsibilidade e controle que o tema exige, percebe-se a grande discrepâncias e superficialidade da norma ABNT NBR 9653/2018 que é utilizadas, como um guia para a avaliação e controle dos efeitos e impactos ambientais provocados pelo uso de explosivos nas minerações em áreas urbanas, em todo o Brasil.

Assim, torna-se imperativo a necessidade de criação de uma metodologia que possibilite a classificação dos empreendimentos mineiros segundo sua criticidade socioambiental, ou seja, é necessário criar dispositivos capazes de classificar as minas e agrupá-las de forma a possibilitar a indicação dos procedimentos e metodologias para a realização do processo de desmonte de rocha com explosivos de forma adequada e minimizar a possibilidade de geração de impactos negativos nas comunidades e estruturas do entorno do empreendimento mineiro.

Empreendimentos mineiros que apresentam complexidades socioambientais distintas devem necessariamente ser tratados de forma diferente e não como acontece hoje, em que, a norma considera todos os projetos com a mesma criticidade. Obviamente, em projetos com processos de desmonte complexos precisam adotar procedimentos mais completos e complexos de forma a possibilitar um maior controle dos efeitos dos desmontes e minimizar a possibilidade de geração de danos e incômodos.

Desta maneira, a normas ABNT NBR 9653/2018 deveria trazer em seu corpo a proposição de uma classificação dos empreendimentos mineiros de forma a tratar operações diferentes de forma diferente e indicar um processo de desmonte de rocha com a utilização de explosivos mais adequadamente controlado para as operações críticas. A tabela 01, traz uma sugestão de sistema de classificação de empreendimentos mineiros segundo sua criticidade socioambiental, levando em consideração os parâmetros que influenciam diretamente na possibilidade de geração de danos ambientais e que devem ser controlados.

## **5.2. Classificação de empreendimento mineiros conforme a criticidade socioambiental.**

Todo processo de perfuração e desmonte, em sua origem, na fase de planejamento, deve-se observar as características do empreendimento mineiro de forma a possibilitar e garantir a classificação do empreendimento segundo sua criticidade socioambiental, ou seja, é necessário criar dispositivos capazes de classificar os empreendimentos mineiros e agrupá-las de forma a possibilitar a indicação dos procedimentos e a metodologia para

a realização do processo de desmonte de rocha com explosivos de forma adequada e garantir a redução da possibilidade de geração de impactos negativos nas comunidades e estruturas do entorno do empreendimento mineiro.

Como pode ser observado na Figura 12, o exemplo de uma mina com baixa criticidade socioambiental, já que, apresenta baixa probabilidade de geração de incômodos e danos estruturais. Nesse caso, os projetos de desmonte de rocha com explosivos poderá ser realizado de forma a priorizar o aumento de performance sem que isso corrobore para a geração de impactos e danos ao meio ambiente ou que gere incômodos para as comunidades vizinhas ao empreendimento. Assim, empreendimentos com baixo nível de geração de dados e incômodos a comunidades e estruturas vizinhas ao empreendimento, possuem uma maior liberdade para a realização dos trabalhos de desmonte de rocha por explosivos sem que seja necessária uma imposição de recomendações e obrigações.



Figura 12: Mina do Azul – Vale – Parauapebas / PA – Fonte Google.

A figura 13, representa uma mina com média complexidade socioambiental, ou seja, possui uma significativa probabilidade de geração de incômodos e baixa probabilidade de geração de danos estruturais. Minas com essa classificação, normalmente apresentam, baixos volumes de produção, desmontes pequenos e pouco frequentes, possui diâmetros de furação pequenos, além de serem realizado em regiões onde a característica das rochas

favorecem a geração de ondas de alta frequência, fato que minimiza o impacto potencial de danos estruturais e de geração de incômodos. No entanto, trabalhos específicos para minimizar a percepção dos desmontes devem ser adotados e as recomendações da norma ABNT NBR 9653 devem ser adotadas.



Figura 13: Mina de Calcário – Cimento Liz – Vespasiano / MG – Fonte Google.

A Figura 14, representa uma mina com alto grau de complexidade socioambiental correspondendo à uma alta probabilidade de geração de incômodos e alta probabilidade de geração de danos estruturais, em casos dessa complexidade, trabalhos específicos e detalhados devem ser adotados de forma a possibilitar a previsão dos efeitos dos desmontes nas estruturas e pessoas que circundam o empreendimento.

Em empreendimentos tão próximos às comunidades, com uma alta escala de produção, grandes volumes de materiais desmontados, trabalho com furos de grandes diâmetros de furos somados à característica litológicas na qual a característica das ondas de choque induzidas no maciço serem de baixa frequência, trabalhos completos e complexos são necessários para minimizar a possibilidade de danos e incômodos nas comunidades vizinhas ao empreendimento.



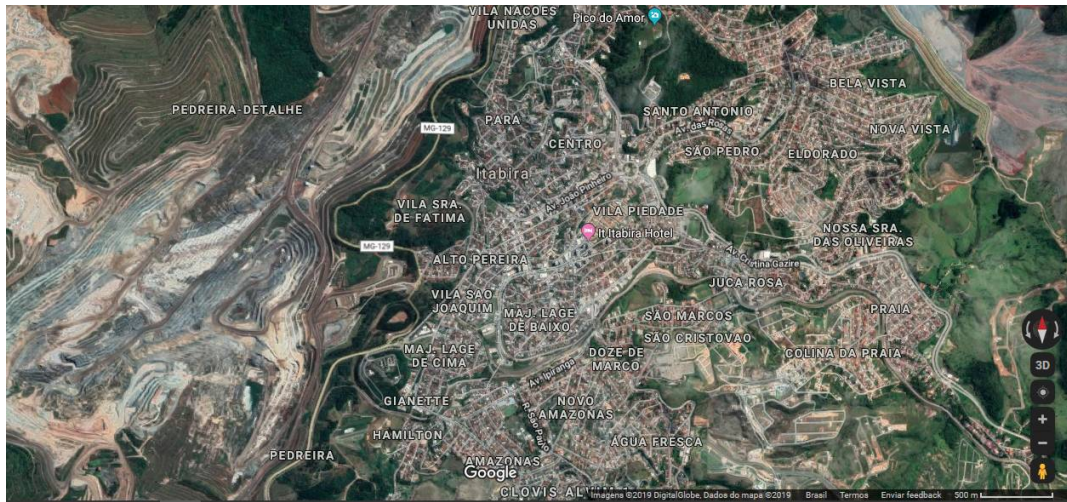


Figura 14: Mina Itabira – Vale – Itabira / MG – Fonte Google

Portanto, empreendimentos mineiros que apresentem complexidades socioambientais distintas devem necessariamente ser tratadas de forma diferente, essa classificação é fundamental para a elaboração e construção do processo de desmonte e controles adequados às especificidades do empreendimento. Assim, pode-se garantir que projetos com processos de desmonte complexos precisam adotar procedimentos mais completos e complexos de forma a possibilitar um maior controle dos efeitos dos desmontes e minimizar a possibilidade de geração de danos e incômodos.

Nesse contexto, sugere-se nesse trabalho a proposição de uma classificação dos empreendimentos mineiros de forma a tratar operações diferentes de forma diferente e indicar um processo de desmonte de rocha com a utilização de explosivos mais adequadamente controlado para as operações críticas.

Para o processo de classificação de empreendimentos mineiros segundo sua criticidade socioambiental, deve-se levar em consideração fatores relacionados às características locais além das características operacionais, assim pode-se determinar a complexidade do processo além das metodologias e técnicas a serem utilizadas para o alcance do objetivo principal do desmonte que é o atendimento ao volume, fragmentação, forma da pilha e a minimização dos efeitos colaterais.



### 5.2.1. Características Locais.

As características locais do empreendimento são fundamentais para o dimensionamento de todo o processo de desmonte, sendo assim, é necessário verificar as características locais, tais como, distância das comunidades ao empreendimento e aos pontos de desmonte, características das construções e estruturas que circundam o empreendimento, além de aspectos sociais, ou seja, dependência e grau de tolerância das comunidades do entorno com a atividade do empreendimento.

Dessa forma, pode-se estimar a tolerância da comunidade em relação à frequência das detonações, tamanho dos desmontes, aspectos visuais do processo de desmonte, percepção de incomodo em relação aos efeitos colaterais aos desmontes, vibração, poeira e ruído. Além desses fatores, deve-se verificar a existência de estruturas sensíveis, tais como, edifícios históricos, igrejas, hospitais além de estruturas que possuem valor histórico e sentimental para a região.

Além dos pontos apontados acima, deve-se também realizar a verificação da existência de estruturas naturais como cavidades, abrigos, grandes taludes e encostas, barragem de rejeito, e estruturas como pontes e viadutos que devem ser mapeados e plotados em mapas de localização.

### 5.2.2. Distância – comunidades.

Um dos principais pontos a serem observados é exatamente a distância entre o empreendimento e as comunidades. Como sabemos a energia contida em uma onda de choque induzida no maciço rochoso, sofre o efeito de atenuação e tem sua energia dissipada à medida que se afasta do furo, além disso, sabe-se que em regiões próximas ao furo, as ondas de alta frequência predominam, ao passo que as ondas de baixa frequência possuem uma velocidade de dissipação menor, aumentando o alcance da mesma.

Dessa forma verifica-se que à maiores distâncias as ondas de baixa frequências predominam. Assim, a determinação da distância das residências ao empreendimento será importante e fundamental para se elaborar o plano de controle a ser realizado.

Como mencionado a frequência, amplitude e duração das vibrações sofrem alterações com a propagação no maciço rochoso, em função da interação com os vários meios geológicos, no entanto deve-se observar que nas proximidades do desmorte as características da vibração são fortemente afetadas pelos elementos do plano de fogo, geometria da mina, carga de explosivos detonados por espera, tempos dos retardos, direção de inicialização do desmorte em relação ao ponto de monitoramento, além de sofrer forte influência do espaçamento e afastamento.

Por outro lado, à grandes distancias entre o desmorte e o ponto de monitoramento, os fatores referentes ao plano de fogo tomam-se menos críticos e o meio de propagação composto pelo maciço e solos de recobrimento prepondera sobre as características da onda de choque. Deve-se salientar ainda que a frequência de vibração, o deslocamento e a aceleração dependem fortemente do meio de propagação. Outro ponto que dever ser avaliado e verificado é o fato de que espesso recobrimento por solo e grandes distancias criam trens de onda de baixa frequência e grande duração.

### **5.2.3. Presença de estruturas e edificações sensíveis.**

Outro ponto extremamente relevante é a realização do mapeamento de todas as estruturas sensíveis que circundam o empreendimento de forma a verificar a necessidade de controles mais apurados, edifícios históricos e de alto valor sentimental para a comunidade, como igrejas, precisam ser mapeados e medidas devem ser implementadas de forma a minimizar a possibilidade de danos, já que, em eventuais ocorrências de danos ou impactos, além disso, é necessário mapear a existências de hospitais e possíveis centros cirúrgicos em que o efeito de vibrações não podem ser tolerados.

Também é bastante sensível a necessidade de mapeamento de estruturas naturais como cavidades e abrigos, que precisam ser preservados e que sofrem impactos significativos com o processo de desmorte de rocha com a utilização de explosivos. Não poderia deixar de mencionar a necessidade de mapeamento das estruturas de contenção de rejeito de minério, barragens e pilhas de estéril e grandes taludes e encostas, sabe-se que a vibração provocada pelos desmontes de rocha com explosivos funcionam como um gatilho para processos de ruptura. Logo todas essas estruturas devem ser mapeadas e classificadas

quanto ao grau de complexidade e criticidade em relação aos efeitos colaterais dos desmontes de rocha com a utilização de explosivos.

### **5.3. Características Operacionais.**

Após a realização do mapeamento das estruturas sensíveis que circundam o empreendimento e determinado a complexidade dessas estruturas, deve-se partir para a avaliação dos parâmetros operacionais de forma a definir estimativa de volume de explosivos por furo, proporcional ao diâmetro e profundidade do furo, determinar também a frequência característica da onda em diversos pontos em relação ao desmonte, próximo e distante dos pontos de desmonte, de forma a possibilitar a identificação da frequência característica da onda em diversos pontos onde se queira realizar o controle.

Sabe-se que a característica das ondas induzidas no maciço, são diretamente influenciadas pela litologia do maciço a ser desmontado e pela rocha encaixante. Além disso, rochas brandas tendem a dominar ondas de baixa energia, baixa velocidade, baixa frequência e ondas de longa duração e rochas mais compactas e densas tendem a dominar as ondas de alta velocidade e alta frequência, sendo assim, esse controle é fundamental principalmente em regiões onde tenha a possibilidade de ocorrência do fenômeno de ressonância.

Além disso, parâmetros relacionados a número de desmontes por dia, por semana e carga máxima por espera estão diretamente relacionados à capacidade de geração de incômodos e danos em estruturas que circundam o empreendimento e por isso precisam ser bem projetados e dimensionados de forma a minimizar a possibilidade de geração de danos estruturais e incômodos.

#### **5.3.1. Diâmetro do Furo.**

O diâmetro do furo é diretamente proporcional à profundidade do furo, que está intimamente ligada à altura da bancada e normalmente é proporcional à capacidade de produção do empreendimento, diâmetros maiores de perfuração quase sempre estão relacionados a bancadas maiores, máquinas de carga maiores e conseqüentemente escala de produção maiores.

Dessa forma, pode-se associar o diâmetro do furo à capacidade de geração de ondas muito energéticas capazes de gerar incômodos e danos estruturais às comunidades do entorno, obviamente que empreendimentos que trabalham próximo a centros urbanos tendem a utilizar diâmetros intermediários de forma a possibilitar um controle da vibração gerada e minimizar a possibilidade de geração de danos e incômodos. Assim, minas que adotam grandes diâmetros e se localizam próximos a centros urbanos ou que tenha mapeado nas proximidades estruturas sensíveis, apresentam uma alta complexidade e o projeto e dimensionamento do processo de desmonte de rocha com explosivo precisa ser bem elaborado, bem executado e, nesses casos, torna-se necessário a adoção de técnicas e metodologias mais complexas para garantir uma maior previsibilidade e maior controle do efeitos gerados pelas detonações.

### **5.3.2. Caracterização do maciço rochoso - Grau de Resistência à Compressão Simples (MPa).**

A característica da rocha, tanto do ponto onde se executa o desmonte quanto das rochas encaixantes, apresentam papel importante no processo de desmonte, e principalmente no controle dos efeitos colaterais, já que, o comportamento da onda de choque é condicionado pela característica do maciço em que essa onda se propaga. As ondas induzidas no maciço rochoso mais compacto e mais denso, são ondas em que se predominam as altas velocidades e altas frequências, por outro lado, em maciços compostos por litologias mais brandas e com densidades menores, observa-se a predominância de ondas induzidas com velocidades menores e frequências também menores.

Esse é um ponto a se destacar, já que, a vibração de estruturas como residências, vibram em uma frequência natural que variam entre 04 a 12 Hz, dessa forma, um pulso de onda se propagando, com frequência de vibração próxima a esse valor, pode favorecer a geração do efeito de ressonância, evento altamente desfavorável que podem promover a geração de danos estruturais ou simplesmente potencializar a propagação de danos em estruturas além de gerar incômodos pelo fato da capacidade de percepção do evento do desmonte ser aumentado. Assim, em regiões onde existe a possibilidade de ocorrência do

fenômeno de ressonância, ações complementares devem ser tomadas no sentido de minimizar a possibilidade de ocorrência desse fenômeno.

### **5.3.3. Número de Desmontes por semana.**

O número de desmontes a serem realizado por semana está diretamente relacionado à capacidade e probabilidade de geração de incômodos nas comunidades vizinhas ao empreendimento, deve-se avaliar a melhor alternativa entre realizar poucos desmontes grandes por semana ou vários desmontes menores ao longo da semana.

De forma geral, recomenda-se a realização dos desmontes preferencialmente em um menor número de dias possíveis e se possível nos mesmos horários, assim as comunidades passam a prever os desmontes e não são surpreendidas com as vibrações e ruídos, assim a possibilidade de desconforto e sustos reduzem, e reduzem também a possibilidade de reclamações. Em minas que realizam desmontes secundários, esses preferencialmente devem ser realizados concentrados no mesmo dia da semana em horários comerciais.

### **5.3.4. Número de Desmontes por Dia.**

Assim como na programação semanal dos desmontes, deve-se evitar a realização de desmontes em vários momentos por dia, as boas práticas recomendam que os desmontes sejam concentrados em uma hora específica do dia, de forma a gerar maior previsibilidade dos eventos de detonação e minimizar a possibilidade de surpresas por parte das comunidades, além disso, a realização de vários eventos de detonação ao longo do dia, gera nas comunidades desconfortos pela imprevisibilidade aumentando assim a probabilidade de reclamações em relação a desconforto e associação de danos estruturais ao excesso de desmontes ao longo dos dias, assim quanto maior o número de desmontes realizado ao longo do dia, maior e mais complexa é a atividade em relação a criticidade socioambiental.

### **5.3.5. Carga por Espera.**

Um dos principais fatores a serem avaliados em um processo de desmonte, é justamente a carga detonada por espera, ou por retardo, quanto maior a carga detonada por espera,

maior será a energia com que a onda de choque, induzida no maciço rochoso, se propagará e conseqüentemente aumentará a probabilidade de geração de incômodos e danos estruturais, assim, de forma geral, a criticidade socioambiental de um processo de desmonte é proporcional à carga por espera. Portanto, em áreas críticas, deve-se buscar a redução da carga por espera para valores compatíveis com a operação.

### **5.3.6. Frequência da Onda de Choque.**

A frequência de vibração da onda de choque induzida no maciço rochoso pelo processo de desmonte de rocha, apresenta características que a torna com maior ou menor potencial de geração de danos. Ondas de choque com baixas frequências de vibração, tem sua capacidade de geração de incomodo e danos estruturais aumentado devido à possibilidade de ocorrência do efeito de ressonância. Assim, regiões em que favorecem a propagação de ondas de baixa frequência tem sua criticidade socioambiental aumentada e trabalhos específicos para aumentar a frequência de vibração das ondas de choque devem ser adotadas.

Portanto, avaliando-se as características locais e características operacionais, pode-se classificar um empreendimento mineiro segundo a sua capacidade de geração de danos estruturais e incômodos nas comunidades e estruturas que circundam o empreendimento, assim. A tabela 02, traz uma proposta de classificação de empreendimentos mineiros de segundo sua criticidade socioambiental agrupando-as em três grupos, são eles:

**Classe I:** Apresenta baixa complexidade e baixa probabilidade de geração de incômodos e danos estruturais.

**Classe II:** Apresenta média complexidade socioambiental, significativa probabilidade de geração de incômodos e baixa probabilidade de geração de danos estruturais;

**Classe III:** Apresenta alta complexidade socioambiental, alta probabilidade de geração de incômodos e alta probabilidade de geração de danos estruturais;

Tabela 2: Sistema de classificação de empreendimento mineiro segundo a criticidade socioambiental em relação aos processos de desmonte de rocha com explosivos.

Classificação de empreendimento mineiros conforme a criticidade socioambiental em relação aos processos de desmonte de rocha com explosivos.							
Parâmetros	Classificação do Desmonte em Áreas Urbanas	Peso	Matriz de Classificação de Desmonte - Pontuação				
			0	1	2	3	4
Características Locais	Distância - Comunidades	5	> 1100 m	800 a 1100 m	500 a 800 m	200 a 500 m	< 200 m
	Presença de Edificações Sensíveis		> 1100 m	800 a 1100 m	500 a 800 m	200 a 500 m	< 200 m
		Hospitais	5				4
		Cavidades	5				4
	Edifícios Históricos	4				4	
Operacionais	Diâmetro do Furo	1	< 2,5"	2,5" a 4,5"	4,5 a 6,5"	6,5" a 8,5"	> 8,5"
	Frequência - Onda de Choque	0,5	> 50 HZ	30 a 40 HZ	20 a 30 HZ	10 a 20 HZ	< 10 HZ
	Litologia - Maciço Rochoso - Grau de Resistência à Compressão Simples (MPa)	0,5	> 250	250 a 100	100 a 50	50 a 5	< 5
	Número de Desmontes por semana (unid.)	0,5	< 1	1 a 2	2 a 3	3 a 4	> 4
	Número de Desmontes por Dia (Unid.)	1,5	< 1	1 a 2	2 a 3	3 a 4	> 4
	Carga por Espera (Kg/Retardo)	2	< 50	50 a 150	150 a 300	300 a 450	> 450
<b>Contabilização - Total</b>			<b>100</b>				
Classe	Pontos	Descrição					
Classe I	0 a 45	Apresenta baixa complexidade e baixa probabilidade de geração de incômodos e danos estruturais.					
Classe II	45 a 75	Apresenta média complexidade socioambiental, significativa probabilidade de geração de incômodos e baixa probabilidade de geração de danos estruturais					
Classe III	75 a 100	Apresenta alta complexidade socioambiental, alta probabilidade de geração de incômodos e alta probabilidade de geração de danos estruturais					

#### 5.4. Principais itens indicados e necessários a serem observados para a elaboração e execução de desmontes de rocha com a utilização de explosivos.

Após a realização da classificação do empreendimento mineiro e definido a classe que o mesmo se encontra, passa-se a elaboração do processo de desmonte de rocha ajustado à complexidade do empreendimento, deve-se salientar que para os empreendimento classificados como Classe I, trabalhos de controle dos efeitos colaterais não são necessários sendo o foco dos trabalhos de perfuração e desmonte voltado apenas para a eficiência da operação, já que, o mesmo apresenta uma baixa criticidade ambiental e pouca ou nenhuma capacidade de geração de danos e incômodos.

Para os empreendimentos classificados como empreendimentos de Classe II, o mesmo apresenta uma complexidade socioambiental moderadas, com probabilidades significativas de geração de incômodos e baixa probabilidade de geração de danos estruturais, assim, medidas adicionais de controle do processo de desmonte devem ser adotadas para minimizar a possibilidade de geração de incômodos.

Por outro lado, empreendimentos classificados como Classe III, apresentam uma alta complexidade socioambiental e nesses casos medidas completas e complexas devem ser adotadas de forma a minimizar a possibilidade de geração de danos estruturais e incômodos às comunidades vizinhas ao empreendimento. Na tabela 03 é apresentado uma comparação entre a proposição de controles sugeridos pela norma ABNT NBR 9653/2018 e a indicação complementar de itens de controle e procedimentos que deveriam ser adotados para empreendimentos de mineração classificados como classe III e que devem ser adotados quando necessário para os demais empreendimentos mineiros como menor classificação socioambiental.



Tabela 3: Principais itens indicados e necessários a serem observados para a elaboração e execução de desmontes de rocha com a utilização de explosivos em empreendimentos de mineração com alta complexidade socioambiental.

Principais itens indicados e necessários a serem observados para a elaboração e execução de desmontes de rocha com a utilização de explosivos.		
ABNT 9653/2018	5.1 <u>Ultrapassagem</u> : Não é Permitido.	
	5.2 <u>Pressão acústica</u> : Limite de 100 Pa, / 134 dBL pico.	
	5.3 <u>Velocidade de vibração de partícula</u> : limite Gráfico.	
	6.1 Resposta Humana: Recomendações.	a. Sistema de Informação à população;
		b. Estabelecimento de Registro de reclamações;
		c. Adotar medidas adequadas, sempre que necessário;
		d. Adotar técnicas e insumos apropriados sempre que necessário;
e. Capacitação dos profissionais envolvidos nos desmontes;		
f. Manutenção de registro por 01 dos desmontes;		
g. Estabelecimento de um plano de monitoramento.		
CETESB D7.013	5.2 <u>Pressão acústica</u> : Limite de 128 dB linear.	
	5.3 <u>Velocidade Resultante de Vibração de Partícula</u> : 4,2 mm/s	
Metodologia - Parâmetros Básicos	Avaliação Prévia:	Identificar e mapear pontos críticos – Hospitais, Edifícios Históricos e etc.;
	Litologia:	Determinar curvas de valor para PPV e Frequência;
		Determinar a localização e número adequado para os pontos fixos e móveis de monitoramento;
Determinar as curvas de atenuação da onda para os diversos pontos críticos identificados;		
Determinar a frequência de vibração das ondas de choque proveniente dos desmontes, nos pontos críticos;		
Parâmetros Operacionais:	Determinar a frequência natural das estruturas identificadas como críticas e localizadas nos pontos críticos;	
	Realizar a vistoria cautelar das estruturas identificadas como críticas e localizadas nos pontos críticos;	
	Elaborar mapeamento e plano para o acompanhamento de propagação de trincas.	
	Caracterizar o maciço rochoso, onde o empreendimento está inserido de forma a possibilitar a identificação do favorecimento da propagação de ondas de baixa ou alta frequência;	
	Verificar a presença de água superficial na forma de lençol freáticos ou outros e caracterizar o comportamento do maciço rochoso quando saturado pela presença de água;	
	Verificar a existência de regiões, de propagação da onda de choque, preferencial devido a presença de litologias específicas ou pela presença de água.	
Subdividir a região da mina, maciço rochoso, por domínios litológicos e caracterizar o comportamento da onda para cada todo de grupos litológicos.		
Normas Nacionais	Elaboração de plano de fogo correlacionando a influência dos principais parâmetros operacionais à característica da onda de choque nos pontos de monitoramento:	Carga por espera;
		Tempos de retardo entre linhas e entre furos;
		Sequencia de detonação;
		Número de furos por desmonte;
		Diâmetro dos furos;
		Qualidade da perfuração;
		Qualidade da marcação da malha;
		Qualidade da face livre;
		Presença de Água;
		Tipo de explosivos;
Tipo de desmonte, primário e/ou secundário;		
Tipos de acessórios utilizados;		
Horários de detonação;		

#### **5.4.1. Avaliação Prévia – Planejamento.**

Um das etapas mais críticas do processo de desmonte é a realização da avaliação prévia de forma a subsidiar a realização de todo o planejamento do processo de desmonte, nesse processo de reconhecimento da área, deve-se identificar, mapear e classificar todos os pontos críticos em relação ao processo de desmonte de rocha com a utilização de explosivos.

#### **5.4.2. Identificar e mapear pontos críticos.**

A identificação e principalmente o mapeamento dos pontos críticos para o desmonte, corresponde à primeira etapa de um processo de desmonte, onde o responsável pelo processo de desmonte com explosivo tem a oportunidade de identificar e mapear todas as estruturas críticas que sofrem influência dos desmonte e que podem ser danificadas pela atividade de detonação.

Esse trabalho corresponde à identificação e georreferenciamento dos principais pontos críticos como, igrejas, edifícios históricos, hospitais, residências, viadutos, pontes, barragens de rejeito, pilhas de estéril, taludes, rodovias, escritórios etc. Após a identificação e de os mesmos terem sido plotados em mapas georreferenciados, deve-se realizar a classificação em termos de criticidade de cada ponto levantado e identificado.

#### **5.4.3. Determinar curvas de iso valores para as velocidades de partícula e frequências.**

Paralelamente à atividade de identificação dos pontos críticos, a área do entorno do empreendimento, e inclusive a área interna do mesmo, deverá ser dividida em quadrantes considerando o domínio geológico de forma a se determinar as curvas de iso valores para a velocidade de partícula e frequência de vibração das ondas de choque induzidas no maciço, o produto desse estudo é um mapa de isolinhas com os valores de velocidade de partícula e frequência de forma a verificar as regiões que apresentam valores mais críticos, assim pode-se selecionar as regiões onde devem-se intensificar os trabalhos de monitoramento.

#### **5.4.4. Determinar a localização e número adequado para os pontos fixos e moveis de monitoramento.**

Após a realização da identificação e mapeamento dos pontos críticos e determinado as curvas de isovalores para a velocidade de partícula e frequência das ondas de choque induzidas no maciço pelo desmonte de rocha com a utilização de explosivos, passa-se à definição do número adequado de pontos fixos a serem monitorados, além de possibilitar a determinação e dimensionamento do número de pontos a ser utilizado para a instalação dos sismógrafos. Além disso, realizando a sobreposição entre o mapa com a localização dos pontos críticos e o mapa de isovalores de velocidade de partícula e frequência devem-se selecionar algumas estruturas para a realização do acompanhamento do comportamento da estrutura em função da atividade de desmonte de rocha com explosivos.

#### **5.4.5. Determinar as equações de atenuação da onda para os diversos pontos críticos identificados.**

Em seguida, já com os pontos de monitoramento fixos bem definidos, e as estruturas a serem acompanhadas definidas, passa-se ao processo de determinação do modelo de simulação da equação de atenuação da onda para cada configuração de quadrante de desmonte possível com os respectivos pontos de controle e monitoramento, dessa forma, após a definição da equação de atenuação e essa estar bem calibrada, pode-se simular e prever o comportamento da onda em cada ponto definido para monitoramento, associado ao ponto, ou quadrante do empreendimento onde será realizado o desmonte.

Essa segmentação do empreendimento mineiro e comunidades vizinhas ao empreendimento em quadrantes é fundamental para a melhoria da assertividade entre os valores previstos de vibração e os valores realizados. Assim, pode-se realizar o planejamento dos desmontes considerando e prevendo os valores de velocidade de partícula em cada ponto específico. Esse fato possui extrema relevância, principalmente em empreendimentos onde a frequência característica da onda é alta e o controle necessário e efetivo é apenas o controle de energia da onda de choque induzida no maciço.

#### **5.4.6. Determinar a frequência de vibração das ondas de choque nos pontos críticos.**

Tão importante quanto a velocidade de particular, a frequência característica da onda de choque induzida no maciço pode contribuir para potencializar a geração de danos em estrutura e geração de incômodos às comunidades e estruturas vizinhas ao empreendimento. Ondas de baixa frequência ao se propagar no maciço possuem a capacidade de promover uma amplificação da energia da onda, devido a possibilidade de ocorrência do efeito do fenômeno de ressonância. Dessa forma, é fundamental conhecer a frequência dominante das ondas induzidas no maciço rochoso em pontos com distâncias variadas em relação do ponto de detonação. Sabe-se que para distâncias de até 600 metros, existe uma predominância das ondas de alta frequência.

Por outro lado, para maiores distâncias verifica-se uma alteração da característica da onda e as ondas de baixa frequência passam a predominar, assim, para a realização de controles a maiores distâncias principalmente em regiões onde a predominância de propagação de ondas de baixa frequência.

#### **5.4.7. Determinar a frequência natural das estruturas identificadas como críticas e localizadas nos pontos críticos.**

Após a realização do mapeamento das estruturas críticas, passa-se a definir a frequência natural de vibração das estruturas, assim, após a caracterização das ondas de vibração deve-se determinar a frequência natural das estruturas mapeadas como crítica de forma a garantir que a frequência de vibração das ondas não estará coincidente com a frequência natural de vibração das estruturas.

#### **5.4.8. Realizar a vistoria cautelar das estruturas identificadas como críticas e localizadas nos pontos críticos.**

Após a realização de todo o estudo de caracterização das características das ondas de choque induzidas no maciço rochoso, deve-se apontar e selecionar as estruturas mais críticas e representativas dos quadrantes da comunidade e realiza-se a vistoria cautelar das residências de forma a possibilitar a identificação de trincas e danos nas estruturas, assim, após a realização do mapeamento das trincas passa-se à fase de elaboração do

plano de acompanhamento das trincas de forma a verificar a propagação das mesmas após os eventos de desmontes de rocha por explosivos.

#### **5.4.9. Elaborar mapeamento e plano para o acompanhamento de propagação de trincas.**

Após a identificação e mapeamentos das trincas ou pontos de fragilidades em estruturas que circundam o empreendimento, deve-se elaborar um plano de monitoramento de forma a possibilitar a verificação de propagação de danos após o evento dos desmontes, dessa forma pode-se evidenciar a relação de casualidade entre o processo de desmonte e a evolução ou aparecimento de novas trincas. Dessa forma, torna se possível afirmar se os possíveis danos possuem correlação com os desmontes ou não.

As edificações podem apresentar trincas ou danos estruturais decorrentes de variações ambientais tais como temperatura, umidade, ventos e acomodação da fundação, assim a realização da vistoria cautelar antes mesmo do início das operações, e das atividades de detonação, é fundamental para a determinação do nexos causal entre o aparecimento e propagação das trincas e danos ao processo de desmonte por explosivos.

#### **5.4.10. Litologia.**

Um dos fatores que devem ser avaliados no processo de desmonte de rocha por explosivos, é exatamente a litologia, sabe-se que o comportamento das ondas de choque é diretamente influenciadas pela litologia, rochas com compacidade diferentes respondem de forma diferente à passagem da onda de choque, assim as características das ondas de choque, tais como a frequências característica, velocidade de propagação, amplitude e alcance estão diretamente relacionada às características do maciço rochoso, fato que torna o processo de caracterização do maciço rochoso uma das etapas fundamentais para o adequado controle do processo de desmonte de rocha por explosivos.

#### **5.4.11. Caracterizar o maciço rochoso.**

A caracterização do maciço rochoso, corresponde ao procedimento de descrever as características do maciço rochoso e divididos em domínios rochosos distintos, com propriedades distintas de forma a possibilitar a previsibilidade das características das ondas de choque em todas as regiões do empreendimento e do ponto de monitoramento em especial. Assim, pode-se identificar domínios de rocha onde a propagação de ondas de choque de baixa frequência é favorecida, ou regiões que favorecem a propagação de ondas de alta frequência, nesse caso, o processo de controle se torna mais favorável e mais facilitado.

Por outro lado, em domínios de rocha que favorecem a propagação de ondas de baixa frequência, os trabalhos se tornam mais complexos. Assim, a correta caracterização dos domínios de rocha que integram a região do empreendimento e dos pontos de controle, já indicam a necessidade da adoção de trabalhos mais apurados, detalhados e complexos a serem adotados. Além de indicar possíveis caminhos preferencias de propagação da onda de choque induzida no maciço rochoso.

#### **5.4.12. Verificação da presença de água no maciço rochoso.**

Juntamente com a caracterização do maciço rochoso, é fundamental a identificação e localização dos níveis de lençol freático, a presença de rochas saturadas, ou aquíferos confinados. Esse procedimento é fundamental, já que, a existência de regiões com material saturado ou estrutura com água armazenada interfere no comportamento e direção de propagação das ondas de choque. Em regiões saturadas com água a onda tende a se propagar a uma velocidade maior e tende a atingir distancias maiores antes de sofrer um intenso efeito de atenuação, assim, pode-se afirmar que um maciço quando saturado, interfere e modifica o comportamento da onda ao se propagar pelo mesmo.

#### **5.4.13. Setorização da mina em função dos domínios litológicos e caracterizar o comportamento da onda para cada todo de grupos litológicos.**

Assim, após a realização da caracterização do macio rochoso, e após a delimitação dos domínios de rocha, deve-se setorizar a mina de forma a caracterizar o comportamento da

onda em cada domínio rochoso, além disso, deve-se elaborar um modelo matemático que possibilite a simulação do comportamento da onda de choque considerando todas as combinações possíveis entre os diversos pontos de desmontes e os pontos de monitoramento.

Dessa maneira, estará mapeado e disponível para cada par de configuração as equações de atenuações de vibrações, tornando o processo mais assertivo e mais preciso.

### **5.5. Parâmetros Operacionais.**

Os parâmetros operacionais, correspondem a um conjunto de etapas e processos que compõem o plano de desmonte e que influenciam de forma decisiva no objetivo do desmonte, seja ele a fragmentação adequada, controle ambiental ou ambos, ou seja, que atinja a fragmentação desejada sem a geração de efeitos colaterais.

#### **5.5.1. Carga por espera.**

A carga por espera, corresponde à quantidade de explosivos detonados ao mesmo instante, esse fato é extremamente importante já que, a energia da onda de choque está diretamente relacionada à quantidade de explosivos utilizados para a geração do pulso, ou seja, quanto maior for a carga por espera mais energética é a onda de choque, dessa forma a carga máxima por espera deve ser dimensionada considerando as características do desmonte e os objetivos do mesmo, ou seja, em regra geral quanto maior a necessidade de controle ambiental menor deverá ser a carga por espera. Em regiões onde o controle ambiental, vibração, não é mandatório, pode-se aumentar a carga por espera de forma a atingir o objetivo predefinido.

#### **5.5.2. Tempos de retardo entre linhas e entre furos.**

Os tempos de retardo correspondem ao intervalo entre a detonação de um furo em relação ao outro, ou o tempo entre a detonação de uma linha e outra. Os tempos de retardos podem ser otimizados tanto para melhorar e potencializar a eficiência dos desmontes quanto podem ser dimensionados para o favorecimento da formação de uma onda composta destrutiva em pontos críticos onde um controle efetivo é necessário.

Os tempos de retardo devem ser cuidadosamente definidos no planejamento de desmontes maiores, com número elevados de furos, onde o intervalo entre um furo e outro poderá favorecer a superposição de ondas e com energia de vibração maior que a originalmente definida, baseando na carga por espera definida no plano de fogo.

### **5.5.3. Sequência de detonação.**

Ao projetar um desmorte, a sequência de detonação deve ser projetada de forma a direcionar a onda de choque para direções opostas aos pontos críticos, e pontos onde se deseja preservar, além disso, a sequência de detonação, possui papel fundamental para a formação da pilha de material desmontado, possibilita a separação de matérias de qualidades distintas reduzindo assim a diluição. Assim, o efeito da sequência de detonação em um desmorte deve bem avaliado de forma a possibilitar o alcance do objetivo do desmorte, seja ele de controle ambiental ou atendendo a necessidade de otimização da produtividade do equipamento de carga.

### **5.5.4. Número de furos por desmorte.**

Outro fator de muita relevância, para o projeto de desmorte, é o número de furos detonados por desmorte, sabe-se que o número de furos é proporcional ao tamanho da área a ser detonada, sendo que para grandes áreas são necessários um número elevado de furos. Em áreas onde o controle dos efeitos colaterais dos desmontes é necessário e crítico, tende-se a reduzir o número de furos minimizando a geração de impactos e incômodos.

### **5.5.5. Diâmetro dos furos.**

Ao realizar o planejamento do processo de desmorte, o diâmetro dos furos deve ser dimensionado para atender aspectos relacionados à necessidade produção, e controle de impacto ambiental. O diâmetro dos furos é dimensionado em função do comprimento do furo e altura da bancada, que por sua vez está relacionada à necessidade de produção. Assim, grandes diâmetros significam grandes cargas por espera, aumento da energia liberada pelo desmorte e maior possibilidade de geração de incômodos e danos nas estruturas vizinhas ao empreendimento.



#### **5.5.6. Qualidade da perfuração.**

A malha de perfuração, e a qualidade da perfuração, exercem papel fundamental tanto na qualidade do desmonte, quanto na possibilidade de geração de impactos nas comunidades e estruturas vizinhas ao empreendimento, dessa forma, medidas adicionais devem ser adotadas para a garantia de uma marcação e execução de malhas aderentes ao projeto, e que os furos sejam executados conforme a programação de profundidade e paralelismo, evitando-se o máximo a ocorrência de desvios. Os desvios dos furos provocam uma alteração na malha projetada para a base do plano de desmonte de forma a possibilitar o confinamento das cargas, gerando aumento da vibração além de redução da eficiência de quebra, ocasionando repés e formação de blocos.

Em empreendimentos onde o controle do processo de desmonte é crítico quanto a capacidade de geração de impacto ambiental, deve-se reduzir, a depender do tipo de material, a utilização de subperfuração, já que, explosivos detonados confinados possui a capacidade de gerar uma onda de choque refletida e de maior magnitude.

#### **5.5.7. Qualidade da marcação da malha.**

A qualidade do desmonte está diretamente relacionada à aderência entre a malha planejada e a malha executada, deve-se executar a marcação da malha sempre pela equipe de topografia de forma a garantir que os furos estão sendo realizados conforme o programado, além disso, sempre que possível, deve-se utilizar equipamentos com GPS de alta precisão instalado de forma a minimizar a possibilidade de erros com marcação manuais.

#### **5.5.8. Qualidade da face livre.**

No processo de fragmentação de rocha, a face livre exerce papel fundamental, já que, a eficiência do desmonte está diretamente ligada a existência de face livre e a qualidade da mesma. Desmontes realizados sem face livre ou com material escorando a face do talude, reduz a eficiência do desmonte, aumenta a probabilidade de ocorrência de ultralaçamentos além de aumentar a geração de ondas devido ao confinamento das cargas explosivas.

Dessa forma, em regiões onde o controle de vibrações é crítico, todos os desmontes devem ser realizados com a face livre limpa e sem excesso de material, esse fato, deve ser mandatório para o início do carregamento dos furos com explosivos.

#### **5.5.9. Presença de Água.**

A presença de água, durante o carregamento dos furos, condiciona à utilização de explosivos mais energéticos e com maiores densidades e resistentes à água, além desse ponto, deve-se levar em consideração a possibilidade de a onda de choque induzida no maciço propagar por uma direção preferencial provocando danos e incômodos nas comunidades e estruturas do entorno ao empreendimento.

#### **5.5.10. Tipo de explosivos.**

Os tipos de explosivos utilizados devem ser compatíveis com a criticidade socioambiental da área de influência da onda de choque que propaga no maciço rochoso. Explosivos mais densos liberam, no seu processo de detonação, uma onda mais energética podendo impactar de forma acentuada as comunidades vizinhas ao empreendimento.

Por outro lado, o tipo de explosivo a ser utilizado para a realização do desmonte é condicionado pela qualidade da rocha, rochas muito fraturadas, brandas e sem a presença de água, deve-se optar pelos explosivos menos energéticos e com mais volume gasoso, já para rochas compactas e sem fraturamentos excessivos, deve-se utilizar explosivos de maior densidade, assim a qualidade do explosivo influencia além da possibilidade de geração de danos e incômodo nas comunidades que circundam o empreendimento, também exerce alta influencia na qualidade do desmonte.

#### **1.1.1. Tipos de acessórios utilizados.**

Para a realização do dimensionamento dos desmontes de rocha por explosivos, deve-se observar o tipo de acessórios a serem utilizados de forma a atender à necessidade e particularidade do desmonte. Em regiões onde o controle dos efeitos colaterais dos desmontes de rocha por explosivos são críticos, deve-se utilizar a espoletas eletrônicas de forma a garantir a mínima dispersão e a possibilidade de um furo ser detonado em

momentos inadequados e estar confinado. Além disso a utilização da espoleta eletrônica possibilita um maior aproveitamento

### **1.1.2. Tipo de desmonte, primário e/ou secundário.**

Em um planejamento de desmonte o tipo de desmonte a ser realizado deve ser verificado, desmontes secundários tendem a gerar maiores níveis de ruído do que os desmontes primários, assim, medidas para minimizar o impacto deve ser adotadas tais como a utilização de rompedores hidráulicos, restrição de números de dias a se realizar os desmontes secundários além de realização em concomitância com os desmontes primários. Quando se realiza os desmontes secundários concomitantemente aos desmontes primários, o nível de ruído serve como alerta para as comunidades que passam a esperar pela vibração, assim, mesmos os desmontes que poderiam ser despercebidos pela comunidade passam a ser perceptíveis pelo alerta dos ruídos dos desmontes primários.

### **1.1.3. Horários de detonação.**

Os desmontes devem, sempre que possível, ser concentrados em horários específicos do dia de forma a evitar ruídos e vibrações ao longo de todo o dia, assim, quando se realiza desmontes sempre nos mesmos horários, a sensação de incomodo somente é gerada uma vez a cada dia, fato que contribui para minimização dos conflitos e reclamações.

A figura 14 representa o fluxo do processo ideal para os trabalhos de desmonte de rocha por explosivos. Cada rota de processo se desenvolve conforme a complexidade e a necessidade de controle dos processos de desmonte de rocha coma a utilização de explosivos.

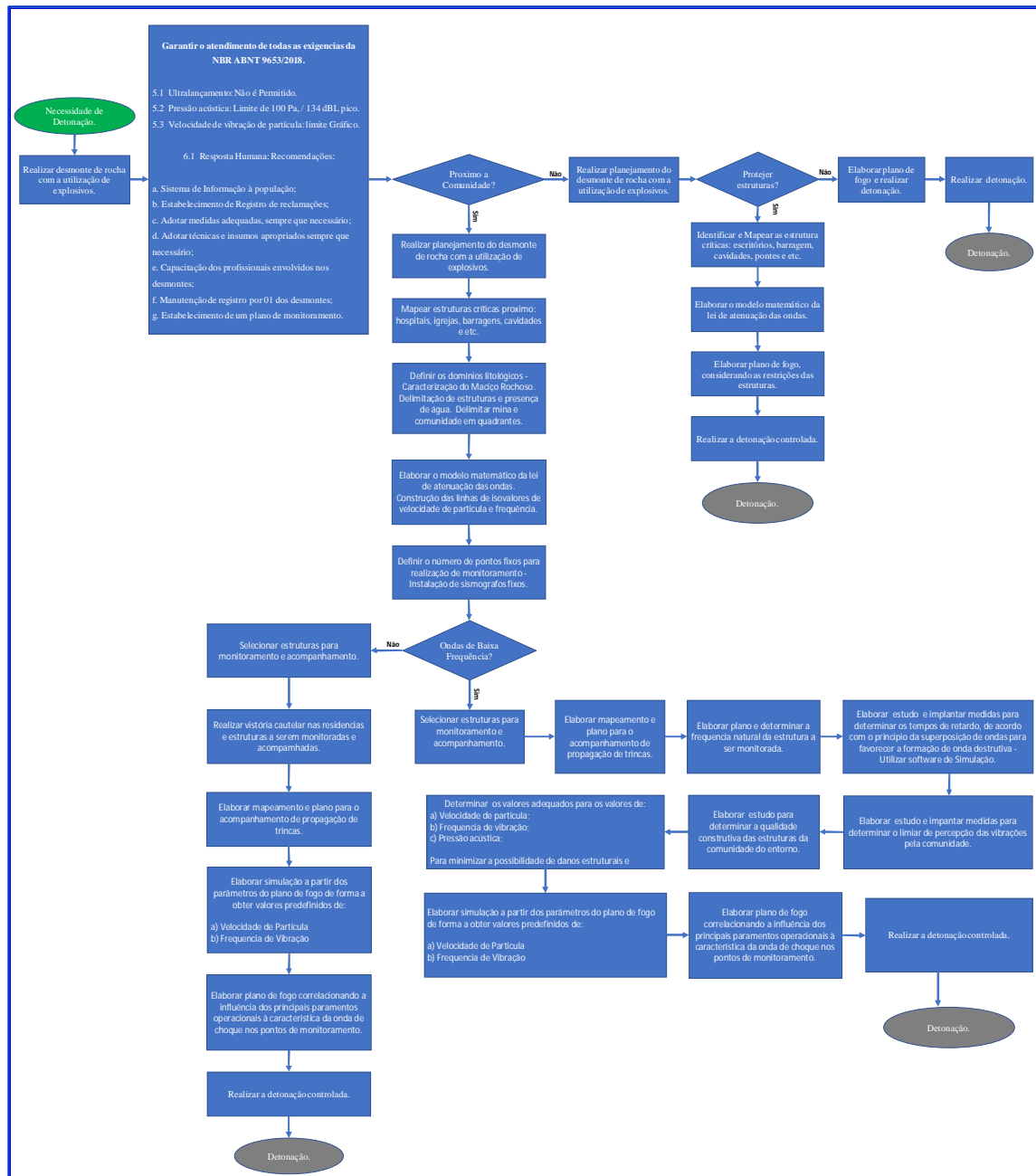


Figura 15: Fluxo do processo de detonação.

## 6. CONCLUSÕES

Os desmontes de rocha com a utilização de explosivos, principalmente em áreas urbanas constitui um desafio, já que, a sociedade está cada vez mais exigente em relação aos incômodos provocados pelas atividades de mineração e nesse sentido, a complexidade das atividades de desmonte aumentam substancialmente.

Juntamente com esse aumento da criticidade do tema espera-se uma melhor estruturação das empresas no sentido de atender as necessidades de desenvolvimento da área de desmonte e possibilitar uma convivência harmoniosa entre os empreendimentos de mineração e as comunidades.

Nesse contexto, é imperativo que as normas brasileiras, e principalmente a ABNT NBR 9653/2018 seja atualizada de forma a possibilitar um controle efetivo dos desmontes compatível com o nível de desenvolvimento tecnológico disponível no mercado nacional e internacional.

A norma, a partir de suas recomendações, deveria ser um caminho para incentiva a realização de estudos específicos e detalhados dos processos de desmonte de rocha com a utilização de explosivos, melhorando e contribuindo para o entendimento do comportamento do maciço rochoso quando submetido a um processo complexo de detonação possibilitando assim a criação e adoção de metodologias para a realização do controle de vibração observando as melhores práticas e garantindo a minimização da possibilidade de geração de impactos ambientais e danos às estruturas circunvizinhas ao empreendimento.

Esse desenvolvimento passa necessariamente pela elaboração de um modelo de classificação das minas conforme sua criticidade socioambiental e a determinação da metodologia adequada segundo matriz de classificação dos empreendimentos mineiros, compatível com a criticidade dos processos de desmontes de rocha com a utilização de explosivos em cada empreendimento mineiro.

## 7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Os seguintes temas são propostos para trabalhos futuros:

- Criar metodologias para a determinação da frequência natural de vibração das estruturas;
- Criar metodologias para a determinação de limites de vibração considerando o limite de percepção;
- Criar modelo de simulação para a determinação da variação da frequência de vibração das ondas de choque, em função da distancias e da variação dos tempos de retardos.
- Desenvolves rotinas que permitam estimar os níveis de vibração e fragmentação após simulação dos parâmetros do plano de fogo;
- Avaliação da dispersão dos detonadores eletrônicos e desenvolvimentos de modelos para a previsão da criação de ondas compostas a partir do princípio da superposição de ondas;
- Criar metodologia de análise de sismogramas de forma a possibilitar a identificação da ocorrência do processo de superposição de ondas.

## 8. Referências Bibliográficas

ABNT NBR 9653, D. E. ABNT NBR 9653/2018. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, p. 8, 2018.

ÁLVAREZ-VIGIL, A. E. et al. Predicting blasting propagation velocity and vibration frequency using artificial neural networks. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, v. 55, p. 108–116, 2012.

BACCI, D. DE L. C. et al. Principais normas e recomendações existentes para o controle de vibrações provocadas pelo uso de explosivos em áreas urbanas: parte II. **Rem: Revista Escola de Minas**, v. 56, n. 2, p. 131–137, 2005a.

BACCI, D. DE L. C. et al. Principais normas e recomendações existentes para o controle de vibrações provocadas pelo uso de explosivos em áreas urbanas: parte I. **Rem: Revista Escola de Minas**, v. 56, n. 2, p. 131–137, 2005b.

CRUM, S. V et al. Blast Vibration Measurements At Far Distances and. 1997.

DALLORA NETO, C. Análise das vibrações resultantes do desmonte de rocha em mineração de calcário e argilito posicionada junto à área urbana de Limeira (SP) e sua aplicação para a minimização de impactos ambientais. 2004.

DOWDING, C. H.; AIMONE, C. T. Rock breakage: explosives. **Mining engineering handbook**, p. 722–737, 1992.

GOMES, J. P. Metodologia Para a Nálise De Vibrações P Rovocadas Por Desmontes Com Recurso a Explosivos. p. 89, 2016.

JONES; STOKES. Transportation and construction-induced vibration guidance manual. n. 43, p. 20–30, 2004.

KLEN, A. M. APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE SIMULAÇÃO PARA ANÁLISE DA SUPERPOSIÇÃO DE ONDAS SÍSMICAS GERADAS EM DESMONTE DE ROCHA PELA DISPERSÃO DOS TEMPOS DE RETARDO UTILIZANDO O MÉTODO DE MONTE CARLO. 2010.

KUMAR, R. et al. Determination of blast-induced ground vibration equations for rocks using mechanical and geological properties. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, v. 8, n. 3, p. 341–349, 2016.

OLIVEIRA, C. C. V. G. et al. Análise Comparativa Dos Níveis De Vibração E Ruído Em Perímetro Urbano E Ambiente De Mineração. **Tecnologia em Metalurgia**

- Materiais e Mineração**, v. 15, n. 3, p. 264–270, 2018.
- ROSENTHAL, M. F. et al. **BLASTING GUIDANCE MANUAL**. n. 303, 1987.
- SISKIND, B. D. E. et al. Structure response and damage produced by ground vibration from surface mine blasting. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**, v. 18, n. 4, p. 76, 2005.
- SISKIND, D. E. et al. Structure response and damage produced by air blast from surface mining. v. Report of, p. 118, 1980.
- SISKIND, D. E. et al. Report of Investigation 9226: Comparative Study of Blasting Vibrations from Indiana Surface Coal Mines. p. 44, 1989.
- SISKIND, D. E. **Vibrations from blasting**. [s.l.] International Society of Explosives Engineers, 2000.
- STOJADINOVIC, S. et al. A new approach to blasting induced ground vibrations and damage to structures. **Acta Montanistica Slovaca**, v. 16, n. 4, p. 344–354, 2011.



## 9. ANEXOS

**ANEXO I – Technical evaluation of the Brazilian standard, ABNT NBR 9653/2018 - guide for the evaluation of the effects caused by the use of explosives in urban area mines.** Trabalho submetido à revista: REM - International Engineering Journal.

ANEXO II – Fluxograma do processo de desmonte de rocha com a utilização de explosivos.

## ANEXO I

9.1. ANEXO I – **Technical evaluation of the Brazilian standard, ABNT NBR 9653/2018 - guide for the evaluation of the effects caused by the use of explosives in urban area mines.** Trabalho submetido à revista: REM - International Engineering Journal.

**Technical evaluation of the Brazilian standard, ABNT NBR 9653/2018 - guide for the evaluation of the effects caused by the use of explosives in urban area mines.**

Alexandro Fortes Simões da Silva.  
Mestrando – Departamento de Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas da UFMG  
E-mail: [alexandrofortes@yahoo.com.br](mailto:alexandrofortes@yahoo.com.br)

Carlos Enrique Arroyo Ortiz  
Professor Titular do Departamento de Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas da UFMG  
E-mail: [carroyo@ufop.edu.br](mailto:carroyo@ufop.edu.br)

## ABSTRACT

Today in Brazil, great pressure from a civil society increasingly aware of their rights, has forced entrepreneurs to seek new technologies and methodologies to reconcile mining operations with an adequate performance to minimize the environmental impacts generated in communities and structures surrounding the operations. This demand is no longer effective because the Brazilian technical regulations about rock-explosive blasting activities in Brazil are out of date and do not bring adequate technical recommendations and methodologies to the level of technology available today in the national and international market. This article aims to contribute to the elaboration of a critical evaluation of the Brazilian standard, NBR ABNT 9653/2018, in order to provoke a critical discussion about the need to update it.

Keywords: mining, environmental impact, explosives, ground vibrations, regulations.

## INTRODUCTION

In order to carry out rock blasting with the use of explosives, several parameters must be considered in order to obtain a properly fragmented product generating the least possible environmental impact. The success in monitoring and controlling the effects of clearing near communities and critical structures depends on the balance of two main factors. First, the blasting plan must be designed in order to reduce the maximum charge per delay, in addition to the detonation sequence being carried out in order to reduce the negative effects generated in the structures and residences close to the project. Second, the amount of explosives per rock volume and the detonation standard and sequence must be adjusted to ensure proper fragmentation. Therefore, at the same time, rock explosive blasting must meet the fragmentation quality and shape patterns of the pile avoiding that the generated effects constitute negative environmental impacts (DOWDING; AIMONE, 1992)

In this context, the greatest challenge is to determine the adequate blasting plan, capable of achieving both objectives, controlling environmental impacts and optimizing production, ensuring adequate fragmentation. This adequate blasting plan can only be achieved through an understanding and application of the physical principles of shock wave propagation from rock explosive blasting in the rocky massif. This science represents the correct correlation between the effects of vibration, structure responses to the passage of these shockwaves, and the desired explosive blasting result. (DOWDING; AIMONE, 1992)

Therefore, detailed studies of the local geology and the characterization of the rocky massifs should be evaluated, since they have a direct influence on the characteristics of the waves that propagate in the massif from the rock blasting with the use of explosives. According to the British Standard BS 5228-2, vibrations transmitted through soft soils usually have a low frequency characteristic, whereas in denser soils or rocks the frequency of the wave is considerably higher. In general, the norm establishes the influence of the propagation of the vibration according to the physical condition of the rock and/or soil. For soft soils and fine sand the shock wave frequency values are lower, for altered rock and gravels, intermediate values are present, and for dense rock, soils and dense sands, high values of vibration frequency are presented. (OLIVEIRA et al., 2018)

In studies conducted by researchers from the U.S. Bureau of Mines, vibration data from different rock-blasting projects with explosives has been compared and it was noted that some variations in design factors may influence the amplitude and frequency characteristics of vibrations at monitoring points near blasting fronts. On the other hand, the changes in the blasting plan parameters did not affect the dominant frequencies of vibrations in the ground recorded in more distant points, being consistently between 4 and 6 Hz. This is possibly the natural frequency range of the local soil and suggests that geological factors eventually dominated the vibration frequencies of the detonations. (CRUM et al., 1997)

Therefore, in a rock blasting operation with the use of explosives, the environmental impacts correspond to the materialization of the negative effects generated, and these are strongly influenced by the quality of the drilling, rock characteristics, delay times, type of explosives, blasting sequence, climatic conditions, presence of water, etc. The blasting process corresponds to an interdependent set of operations, in which each stage will contribute to the success or failure of the process. A rock blasting operation with an adequate degree of fragmentation and less generation of environmental impacts can only be achieved by observing the correct sizing of each step that compose the process, besides the correct definition of the parameters of the blasting plan. (CRUM et al., 1997)

Thus, it is imperative and necessary to carry out a study capable of controlling the main parameters that influence and act to negatively alter the result of the blasting operation. Rock explosive blasting when not properly designed can generate a shock wave that propagates in the massif with energy sufficient to generate annoyances in the neighboring communities besides generating damages in the structures of the buildings and sensitive structures located near the project, potentially leading to irreparable damages.

In Brazil, the ABNT NBR 9653/2018 standard directs activities to control the impacts and effects caused by the use of explosives in mines developed in urban areas throughout the country. This standard is primarily based on the particle vibration speed (mm/s) to determine the potential for damage and discomfort as a result of rock explosive blasting. However, only particle speed values, without adequate methodology to control and

evaluate the negative effects of rock stripping on communities and structures, are not very effective in achieving proper blasting.

The Brazilian Association of Technical Standards (*“Associação Brasileira de Normas Técnicas”*), through its technical studies committee, has been collecting technical data from national and international bibliographies in order to enable the evolution of the standard and make it representative and compatible with the reality of the operations and constructive characteristics of the main structures and Brazilian residences. However, this standard is still superficial and ineffective in the fulfillment of its objectives insofar as it does not propose an adequate classification of the mining projects for the structuring of the process of rock-blasting with explosives compatible with the socio-environmental complexity of each project. Much effort has been directed towards developing the chapters on calibration and procedures for monitoring the operation, but this same effort has not been verified when proposing and elaborating adequate methodologies for the forecasting and effective control of the results of rock explosive blasting, especially in the form of disturbances.

Similar to ABNT NBR 9653/2018, the CETEDB D7.013 standard does not offer a proposal to control the effects of rock blasting and does not propose the need to adopt adequate and necessary methodologies or processes to be used for rock blasting with explosives that allow effective controls of its negative effects. All the standards used to regulate rock explosive blasting activities in Brazil nowadays are superficial and their full application is not a guarantee of effective control of their effects. However, CETESB D7.013 will not be discussed in this article.

#### METHODOLOGY.

For this article, a technical evaluation of the Brazilian standard ABNT NBR 9653/2018 was carried out, and from excerpts of the standards, a critical analysis was done pointing out the parts that in the view of the authors should be approached in a more detailed and complete way, aiming at all the steps of rock explosive blasting, from planning to monitoring. Then, based on case studies, bibliographic reviews and authors' experience,

it was proposed to adopt methodologies and practices to complement the ABNT NBR 9653/2018 standard in order to make it more robust and complete, allowing an effective control of the effects caused by use of explosives in mines in urban areas.

## RESULTS AND DISCUSSION

The ABNT NBR 9653/2018 standard, although widely used as a guide for the evaluation of the effects caused by the use of explosives in mining in urban areas, does not provide the necessary detail of an adequate methodology for the correct and effective control of the effects of rock blasting with the use of explosives. In further analysis, it should be available in the standard the materialization of its title, "*Guide for evaluation of the effects caused by the use of explosives in mining projects in urban areas*". However, the indication of an adequate methodology to evaluate the negative effects of the rock-blasting activity with explosives is not present in the text of the standard, even less the indication of methodologies for the control of these negative effects generated by the rock-blasting process with the use of explosives.

The control of the negative effects generated by the rock blasting process necessarily involves the possibility of obtaining the predictability of the effects of the detonations in order to allow the adoption of effective control measures that can neutralize or minimize their occurrence. specified in the scope of ABNT NBR 9653/2018, Chapter 1, "*This Standard specifies the methodology for reducing the risks inherent in rock blasting operations with the use of explosives in the mining and construction industry in general by establishing parameters to a degree compatible with available technology for the safety of neighboring populations, referring to structural damage and recommended human response procedures.*" (ABNT NBR 9653, 2018)

Although ABNT NBR 9653/2018 has a very complete and adequate title and scope, this complexity is not observed in the body of the standard's text and it does not propose a specific and adequate methodology for the effective control of the negative effects of rock explosive blasting operations. Moreover, there is no mention in its content of the appropriate technology to be applied in order to allow for the effective forecasting and control of the negative effects of rock explosive blasting operations.

Another point worth mentioning is the scope of the standard. In the scope of this standard, *“It is optional to apply this Standard to mining projects located in non-urban areas.”*. However, in no part of the body of the standard is an urban area defined or characterized, leaving a gap and shady points on its applicability in several projects that are located in non-urban areas but are close to communities that might be affected by the negative effects of rock blasting with the use of explosives.

On the other hand, chapter 4 of the aforementioned standard, which deals with procedures, is a positive one. In this chapter one can verify the robustness with which it was elaborated and the richness of information that compose this chapter. It was written in a very complete way and, in this aspect, the standard can be considered robust and with adequate procedures and methodologies for monitoring. These methodologies and procedures available in Chapter 4 of the standard refer to the procedures necessary to carry out the monitoring. In other words, they are procedures for device calibration, indication of the need for issuing calibration certificates by competent and accredited bodies, as well as an indication of adequate scope for the preparation of monitoring reports and the need for a qualified professional to prepare the reports.

Thus, by applying the standard, as indicated in Chapter 4, the results obtained with the instrumentation will be representative and will really be reliable and, mainly, will represent the reality in order to indicate the values of particle speed, frequency and acoustic pressure that arrive near the monitored structure. Therefore, ABNT NBR 9653/2018 is restricted and is only effective for the quantification of the results of rock blasting with the use of explosives in the soil close to the monitored structure, not proposing any methodology to determine the effect of this vibration in the structure of the residence or building to be monitored and not proposing any methodology that focuses on planning for the forecast and control of the effects caused by the use of explosives in mining projects located in urban areas.

Chapter 5, "Evaluation Requirements", is very generic and does not comply with the purpose of the standard. In this chapter, it should be possible to propose a methodology for the classification of mining projects by complexity of the rock explosive blasting



processes, suggesting a suitable methodology to be applied to groups of similar projects in terms of complexity of the rock blasting processes with the use of explosives in order to make this process more predictable and controlled.

There is also noticed the total absence of indication of the need to adopt procedures for the previous evaluation of the project and its surroundings, necessary for the elaboration of an adequate blasting plan and compatible with the specificity of the place to be monitored. The ABNT NBR 9653/2018 standard only contains superficial observations on the prohibition of ultra-launches, establishes a maximum sound pressure limit in addition to an indication of vibration limits associated with the frequency that aims to prevent structural damage in buildings surrounding the project.

However, aspects related to the possibility of the shock wave coming from the rock blasting work not as a main cause of the damage, but as a trigger and detonator of a process of instability attributed to other causes such as repression, thermal expansion, etc. have not been taken into account. Thus, precautionary surveys in homes, a crack propagation monitoring plan etc., should be indicated and pointed out as necessary in the standard, to enable the correlation (or the lack of one) of damage propagation and the shock wave generated in the blasting process.

In addition, Chapter 6, "Recommendations", and especially section 6.1, "Human Response", is very superficial and does not propose significant contributions to minimize the effects of rock explosive blasting in communities around the project and the establishment of vibration limits in order to minimize and prevent discomfort. Thus, adequate means and methodologies to minimize impacts are not observed and are not effectively addressed in the ABNT NBR 9653/2018 standard.

Therefore, when a comparison is made between the propositions of the standard, in relation to the methodology for the preparation of rock blasting with the use of explosives, and the need for predictability and control that the theme requires, one can perceive the great discrepancies and superficiality of the ABNT NBR 9653/2018 standard as a guide for the evaluation and control of the environmental effects and impacts caused by the use of explosives for mining in urban areas throughout Brazil.

Allied to the above, it becomes imperative to create a methodology that allows the classification of mining projects according to their socio-environmental criticality. In other words, it is necessary to create devices capable of classifying and grouping the mines in order to allow the indication of the procedures and methodologies to carry out the process of rock blasting with explosives in an adequate way and to minimize the possibility of generating negative impacts in the communities and structures surrounding the mining enterprise.

Currently, the standard considers that all projects have the same criticality. However, mining ventures that have distinct social and environmental complexities must necessarily be treated distinctly. Obviously, in projects with complex blasting processes, there is a need to adopt more complete and complex procedures in order to allow greater control of the effects of the blasting operation and minimize the possibility of damage and inconvenience.

Thus, ABNT NBR 9653/2018 should propose a classification of mining enterprises in order to treat different operations differently and indicate a more properly controlled rock explosive blasting process for critical operations. Table 1 presents a suggestion of a classification system for mining enterprises according to their socio-environmental criticality, taking into consideration the parameters that directly influence the possibility of generating environmental damages that should be controlled.

Table 01: Mining enterprise classification system according to the socio-environmental criticality in relation to the rock explosive blasting processes.

Classification of mining enterprises according to socio-environmental criticality in relation to the processes of rock blasting with explosives.							
Parameters	Urban Area Blasting Classification	Weight	Blasting Classification Matrix - Points				
			0	1	2	3	4
Local Characteristics	Distance - Communities	5	> 1100 m	800 to 1100 m	500 to 800 m	200 to 500 m	< 200 m
			> 1100 m	800 to 1100 m	500 to 800 m	200 to 500 m	< 200 m
	Presence of Sensitive Buildings	5	Hospitals				4
			Cavities				4
			Historical Buildings				4
Operational	Hole Diameter	1	< 2,5"	2,5" to 4,5"	4,5 to 6,5"	6,5" to 8,5"	> 8,5"
			> 50 HZ	30 to 40 HZ	20 to 30 HZ	10 to 20 HZ	< 10 HZ
	Frequency - Shock Wave	0,5	> 250	250 to 100	100 to 50	50 to 5	< 5
			< 1	1 to 2	2 to 3	3 to 4	> 4
	Lithology - Rock - Comprehensive Strength (MPa)	0,5	< 1	1 to 2	2 to 3	3 to 4	> 4
			< 1	1 to 2	2 to 3	3 to 4	> 4
	Blastings per week (unit)	0,5	< 1	1 to 2	2 to 3	3 to 4	> 4
< 1			1 to 2	2 to 3	3 to 4	> 4	
Blastings per day (unit)	1,5	< 50	50 to 150	150 to 300	300 to 450	> 450	
		< 50	50 to 150	150 to 300	300 to 450	> 450	
Charge per delay (Kg/delay)		2	< 50	50 to 150	150 to 300	300 to 450	> 450
<b>Total</b>			<b>100</b>				

Class	Points	Description
Class I	0 to 45	Presents low complexity and low probability of generating disturbance and structural damages.
Class II	45 to 75	Presents medium socio-environmental complexity, significant probability of disturbance and low probability of generating structural damages.
Class III	75 to 100	Presents high socio-environmental complexity, high probability of disturbance and high probability of generating structural damages.

Tables 02 and 03, respectively, present a comparison between the proposition of controls suggested by ABNT NBR 9653/2018 and an indication of control items and procedures that should be used for mining projects with high social and environmental complexity.

Table 2: Main recommendations established by ABNT NBR 9653 for evaluation and control of the effects caused by the use of explosives in mining projects in urban areas.

ABNT NBR 9653/2018 Recommendations		
ABNT 9653/2018	5.1 Flyrock: Not allowed	
	5.2 Acoustic Pressure: Limit of 100 Pa. / 134 dBL peak	
	5.3 Particle vibration speed: graphic limit	
	6.1 Human Response: Recommendations	a. Populational Information System
		b. Establishment of complaints register
		c. Take appropriate action whenever necessary
		d. Adopt appropriate techniques and inputs whenever necessary
e. Training of professionals involved in blasting		
f. Record keeping for each blasting		
g. Establishment of a monitoring plan		

Table 3: Main items indicated and necessary to be observed for the elaboration and execution of rock blasting with the use of explosives in mining enterprises with high socio-environmental complexity.

Main items indicated and necessary to be observed for the elaboration and execution of rock blasting with the use of explosives.		
NATIONAL STANDARDS	ABNT 9653/2018	5.1 Flyrock; Not allowed
		5.2 Acoustic Pressure; Limit of 100 Pa. / 134 dBL peak
		5.3 Particle vibration speed; graphic limit
		6.1 Human Response; Recommendations
		6.1 Human Response; Recommendations
CETESB D7.013		5.2 Acoustic Pressure; Limit of 128 dB (linear)
		5.3 Particle vibration speed: 4.2 m/s
		5.3 Particle vibration speed: 4.2 m/s
METHODOLOGY - BASIC PARAMETERS	Previous Evaluation	Identify and map critical points: hospitals, historic buildings, etc.
		Determine isovalue curves for PPV and Frequency
	Lithology	Determine the location and appropriate number for the fixed and mobile monitoring points
		Determine the wave attenuation curves for the various critical points identified
		Determine the vibration frequency of the blasting shock waves at critical points
		Determine the natural frequency of structures identified as critical and located at critical points
		Carry out the precautionary inspection of the structures identified as critical and located at critical points
		Develop mapping and plan for tracking crack propagation
		Characterize the rocky massif where the project is inserted in order to allow the identification of the favoring of low or high frequency waves propagation
		Check the presence of surface water in the form of water table or other and characterize the behavior of the rocky massif when saturated by the presence of water
Check for the existence of preferential shock wave propagation regions due to the presence of specific lithologies or the presence of water		
Operational Parameters	Elaboration of a blasting plan correlated with the influence of the main operating parameters on the characteristic of the shock wave at the monitoring points:	Charge per delay
		Delay time between lines and holes
		Blasting sequency
		Number of holes per blasting
		Hole diameter
		Drilling quality
		Grid marking quality
		Slot quality
		Presence of water
		Type of explosive
Blasting type, primary and/or secondary		
Types of accessories		
Blasting hours		

## CONCLUSION

Rock blasting with the use of explosives, especially in urban areas, is a challenge, as society is increasingly more rigorous when it comes to the disruption caused by mining activities. Therefore, the complexity of dismantling activities increases substantially and, with this increase in the criticality of the theme, a better structuring of the companies is expected in order to meet the development needs of the blasting area and to allow a harmonious coexistence between the mining enterprises and the communities.

In this context, it is imperative that the Brazilian standards, and especially ABNT NBR 9653/2018, be updated in order to enable effective control of the blasting operations,

becoming compatible with the level of technological development available in the national and international markets. The standard, based on its recommendations, should be a way to encourage specific and detailed studies of rock blasting processes with the use of explosives, improving and contributing to the understanding of rock mass behavior when submitted to a complex detonation process, enabling the creation and adoption of methodologies for the performance of vibration control observing the best practices and ensuring the minimization of the possibility of generating environmental impacts and damages to the structures surrounding the project. This development necessarily involves the elaboration of a mining classification model according to its socio-environmental criticality and the determination of the appropriate methodology according to the classification matrix of the mining enterprises, compatible with the criticality of the rock explosive blasting processes in each mining enterprise.

Therefore, it is necessary to update the ABNT NBR 9653/2018 standard in order to make it more comprehensive and effective in proposing methodologies for the proper control of the effects of rock explosive blasting, and especially by adjusting the contents of the standard to the title and its scope, especially in the chapters referring to the requirements and recommendations. It is not acceptable that the chapter "human response" is considered as a recommendation and not as a chapter capable of bringing greater security to operations and more comfort and tranquility for the communities surrounding the project.

## REFERENCES

ABNT NBR 9653, D. E. ABNT NBR 9653/2018. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, p. 8, 2018.

ÁLVAREZ-VIGIL, A. E. et al. Predicting blasting propagation velocity and vibration frequency using artificial neural networks. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, v. 55, p. 108–116, 2012.

BACCI, D. DE L. C. et al. Principais normas e recomendações existentes para o

controle de vibrações provocadas pelo uso de explosivos em áreas urbanas: parte II.

**Rem: Revista Escola de Minas**, v. 56, n. 2, p. 131–137, 2005a.

BACCI, D. DE L. C. et al. Principais normas e recomendações existentes para o controle de vibrações provocadas pelo uso de explosivos em áreas urbanas: parte I.

**Rem: Revista Escola de Minas**, v. 56, n. 2, p. 131–137, 2005b.

CRUM, S. V et al. Blast Vibration Measurements At Far Distances and. 1997.

DOWDING, C. H.; AIMONE, C. T. Rock breakage: explosives. **Mining engineering handbook**, p. 722–737, 1992.

GOMES, J. P. Metodologia Para a Nálise De Vibrações P Rovocadas Por Desmontes Com Recurso a Explosivos. p. 89, 2016.

JONES; STOKES. Transportation and construction-induced vibration guidance manual. n. 43, p. 20–30, 2004.

**KLEN, A. M. APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE SIMULAÇÃO PARA ANÁLISE DA SUPERPOSIÇÃO DE ONDAS SÍSMICAS GERADAS EM DESMONTE DE ROCHA PELA DISPERSÃO DOS TEMPOS DE RETARDO UTILIZANDO O MÉTODO DE MONTE CARLO.** [s.l: s.n.].

KUMAR ET AL. Determination of blast-induced ground vibration equations for rocks using mechanical and geological properties. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, v. 8, n. 3, p. 341–349, 2016.

**NETO, C. D. ANÁLISE DAS VIBRAÇÕES RESULTANTES DO DESMONTE DE ROCHA EM MINERAÇÃO DE CALCÁRIO E ARGILITO POSICIONADA JUNTO À ÁREA URBANA DE LIMEIRA (SP) E SUA APLICAÇÃO PARA A MINIMIZAÇÃO DE IMPACTOS AMBIENTAIS.** [s.l: s.n.].

OLIVEIRA, C. C. V. G. et al. Análise Comparativa Dos Níveis De Vibração E Ruído

Em Perímetro Urbano E Ambiente De Mineração. **Tecnologia em Metalurgia Materiais e Mineração**, v. 15, n. 3, p. 264–270, 2018.

ROSENTHAL, M. F. et al. **BLASTING GUIDANCE MANUAL**. n. 303, 1987.

SISKIND, B. D. E. et al. Structure response and damage produced by ground vibration from surface mine blasting. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**, v. 18, n. 4, p. 76, 2005.

SISKIND, D. E. et al. Structure response and damage produced by air blast from surface mining. v. Report of, p. 118, 1980.

SISKIND, D. E. et al. Report of Investigation 9226: Comparative Study of Blasting Vibrations from Indiana Surface Coal Mines. p. 44, 1989.

SISKIND, D. E. **Vibrations from blasting**. [s.l.] International Society of Explosives Engineers, 2000.

STOJADINOVIC, S.; ZIKIC, M.; PANTOVIC, R. A new approach to blasting induced ground vibrations and damage to structures. **Acta Montanistica Slovaca**, v. 16, n. 4, p. 344–354, 2011.

## ANEXO II



## 9.2. ANEXO II – Fluxograma do processo de desmonte de rocha com a utilização de explosivos.

