



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E DO DESPORTO**  
**Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto**  
**Departamento de Engenharia de Minas**  
**Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral – PPGEM**

---



## **MODELAGEM ESTOCÁSTICA APLICADA NA ESTIMATIVA DO RAIOS DE PROTEÇÃO DE CAVIDADES NATURAIS SUBTERRÂNEAS**

**Autor: EDSON JOSÉ DOS SANTOS JÚNIOR**  
**Orientador: prof. Dr. HERNANI MOTA DE LIMA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação do Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mineral.

Área de concentração:  
**Lavra de Minas**

Ouro Preto/MG

Abril de 2017

S237m Santos Júnior, Edson José dos.  
Modelagem estocástica aplicada na estimativa do raio de proteção de cavidades naturais subterrâneas [manuscrito] / Edson José dos Santos Júnior. - 2017.  
117f.: il.: color; graf.; tabs; mapas.  
Orientador: Prof. Dr. Hernani Mota de Lima.  
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia de Minas. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral.  
Área de Concentração: Engenharia Mineral.  
1. Lavra de minas - Construção subterrânea. 2. Rochas - Escavação. 3. Modelagem Estocástica. I. Lima, Hernani Mota de. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU: 622.01

Catálogo: [www.sisbin.ufop.br](http://www.sisbin.ufop.br)

**“MODELAGEM ESTOCÁSTICA APLICADA NA ESTIMATIVA  
DO RAIOS DE PROTEÇÃO DE CAVIDADES NATURAIS  
SUBTERRÂNEAS”**

**AUTOR: EDSON JOSÉ DOS SANTOS JÚNIOR**

Esta dissertação foi apresentada em sessão pública e aprovada em 24 de abril de 2017, pela Banca Examinadora composta pelos seguintes membros:



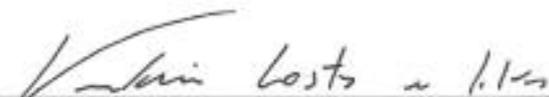
---

**Prof. Dr. Hernani Mota de Lima (Orientador) – UFOP**



---

**Dr. Marcelo Roberto Barbosa (Membro) – VALE SA**



---

**Dr. Valdir Costa e Silva (Membro) – VALMON Consultoria e Treinamento LTDA**

## **DEDICATÓRIA**

Dedico esta dissertação primeiramente a Deus, por sempre guiar meus passos. Aos meus pais, Edson e Lourdes, e a minha noiva Priscila.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus, por iluminar os meus caminhos e me possibilitar vencer desafios cada vez maiores. Agradeço aos meus pais e irmãos por sempre acreditarem em mim, sendo um suporte fundamental na minha vida. Agradeço a minha amada noiva Priscila pelo amor, carinho, compreensão e paciência, me apoiando em todos os momentos.

Agradeço ao meu orientador Prof. Hernani pela oportunidade, e pelo aprendizado adquirido durante este trabalho. Agradeço aos amigos Kaick Navio e Leandro Canaan, pela ajuda durante todo o curso de mestrado.

Agradeço a equipe da Vale SA, especialmente ao senhor Iuri Brandi pela oportunidade da realização deste trabalho, e todo suporte oferecido nessa caminhada.

Por fim agradeço a todos que colaboraram de alguma forma para que eu conseguisse alcançar mais este objetivo.

## RESUMO

A atual legislação ambiental brasileira determina que na ausência de estudos técnicos específicos fica estabelecido um raio mínimo de 250 m de proteção, delimitado a partir da projeção horizontal das cavidades naturais subterrâneas. Esta imposição é contestada por diversos segmentos produtivos brasileiros, em especial a indústria da mineração, já que a adoção do raio de proteção exigido por lei pode restringir de forma significativa as reservas minerais lavráveis, em alguns casos inviabilizando todo um empreendimento.

É consenso entre os estudiosos do tema que a estimativa de um raio mínimo de proteção de 250 m é arbitrária, por não considerar as especificidades de cada cavidade natural subterrânea, bem como das operações desenvolvidas no seu entorno. Neste sentido, este trabalho apresenta uma proposta de metodologia de estimativa do raio mínimo de proteção, considerando as especificidades geomecânicas das cavidades naturais subterrâneas, com vistas a reduzir o potencial de impacto na integridade física das cavidades frente às operações de avanços de lavra, em especial às vibrações ocasionadas por desmontes de rochas com explosivos.

Este estudo apresenta um modelo estocástico de estimativa de valores de velocidade de pico de partícula associado a parâmetros definidos no desmonte de rochas com explosivos, e um modelo estocástico de estimativa de velocidade crítica de vibrações que considera as especificidades geomecânicas e físicas da cavidade analisada. Uma análise integrada a partir de técnicas de simulação, dos modelos propostos, permite a estimativa do raio mínimo de proteção às cavidades naturais subterrâneas, pautado em critérios estocásticos.

## **ABSTRACT**

The current Brazilian environmental legislation determines that in the absence of specific technical studies a minimum radius of 250 m of protection is established, delimited from the horizontal projection of the natural underground cavities. This imposition is contested by several Brazilian productive segments, especially the mining industry, since the adoption of the radius of protection required by law may significantly restrict the mineral reserves, in some cases rendering an entire enterprise unfeasible.

It is a consensus among scholars that the estimate of a minimum radius of protection of 250 m is arbitrary because it does not consider the specificities of each natural underground cavity as well as the operations carried out in its surroundings. In this sense, this work presents a proposal for a methodology for estimating the minimum radius of protection, considering the geomechanical specificities of the natural underground cavities, in order to guarantee the physical integrity of the cavities in front of the mining operations, especially to the vibrations caused by Clearing of rocks with explosives.

This study presents a stochastic prediction model of peak particle velocity values associated to parameters defined in the dismantling of rocks with explosives and a stochastic model of critical velocity estimation of vibrations that considers the geomechanical and physical specificities of the analyzed cavity. An integrated analysis based on simulation techniques, of the proposed models, allows the estimation of the minimum radius of protection to the natural underground cavities, based on stochastic criteria.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Mapa das regiões cársticas do Brasil. ....	21
Figura 2 - Distribuição por tipo litológico de cavernas registradas no Brasil até 2013. ....	23
Figura 3 - Localização das províncias espeleológicas de Carajás e do Quadrilátero Ferrífero. Pontos em vermelho registram cavidades cadastradas no Cadastro Nacional de informações espeleológicas. ....	24
Figura 4 - Província espeleológica da Serra dos Carajás e principais distritos espeleológicos ferríferos. ....	26
Figura 5 - Sismografia no entorno de cavidades naturais subterrâneas. ....	33
Figura 6 – Propagação esférica de ondas sísmicas. ....	36
Figura 7 - Modelo de deformação do terreno produzido pela propagação de ondas (P). ....	37
Figura 8 - Deformação produzida no terreno pela propagação de onda Secundárias (S). ....	38
Figura 9 - Componentes do deslocamento induzido pela propagação de ondas secundárias. ....	38
Figura 10- Deformação do terreno pelo efeito da propagação de uma onda Rayleigh. ....	39
Figura 11 - Deformação do terreno pelo efeito da propagação de uma onda Love. ....	40
Figura 12 - Limites de Velocidade de Pico da Partícula permitidos para cada faixa de frequência. ....	42
Figura 13 - velocidade de Pico da Partícula x frequência de vibração. ....	43
Figura 14- Principais equações de estimativa de velocidades de pico de partícula. ....	51
Figura 15 - Correlação entre o fator $J_v$ e dimensão de blocos no maciço. ....	56
Figura 16 - Classificação geomecânica do maciço através do RMR. ....	57
Figura 17- Processo de simulação simplificado. ....	59
Figura 18 - Um modelo estocástico que usa variáveis de input para gerar variáveis de output. ....	61
Figura 19 - Localização de Parauapebas - PA. ....	63
Figura 20 - Mapa geológico simplificado da Província Mineral de Carajás. ....	64
Figura 21 - Distribuição dos corpos de minério de ferro em meio a cobertura laterítica do sistema Serra Norte. ....	65
Figura 22 - Fluxograma de elaboração e execução do modelo estocástico de $V_{pp}$ . ....	66
Figura 23 - Fluxograma de elaboração e execução de estimativa de velocidade crítica de vibração. ....	67

Figura 24 - Planilha de matrizes analíticas elaboradas a partir da organização do banco de dados. .....	68
Figura 25 - Utilização da ferramenta boxplot do Minitab no tratamento de dados sismográficos da Caverna Piloto.....	69
Figura 26 - Utilização da ferramenta Crystal Ball para as simulações do modelo estocástico.	71
Figura 27 - Diagrama de correlação entre velocidade crítica de vibração e RMR, proposto por .....	75
Figura 28 - Fluxograma de estimativa do raio de proteção para caverna analisada. ....	77
Figura 29 - Gráfico de frequências e probabilidades acumulativas para valores de $V_{pp}$ . Nota-se pelos marcadores de porcentagens que 10 % dos valores estimados são inferiores a 1,31 mm/s, 50 % inferiores a 3,88 mm/s e 10 % superiores a 15,39 mm/s.....	81
Figura 30 – Histograma de frequências observadas para valores de $V_{pp}$ . Nota-se que 129 registros ou 63 % dos valores se distribuem na classe de $V_{pp}$ que vai de 0 a 5 mm/s. ....	82
Figura 31 - Gráfico de frequência acumulativa para valores de $V_{pp}$ . Destacando no mesmo que 10 % dos valores obtidos foram inferiores a 2,65 Hz, 50 % dos valores foram inferiores a 3,63 Hz e apenas 10 % dos valores foram superiores a 7,51 Hz. ....	84
Figura 32 - Histograma de frequências de vibração (Hz) da Caverna Piloto. Nota-se que 173 registros, ou aproximadamente 59 % dos valores se encontram na classe de frequências entre 2 e 4 Hz.....	85
Figura 33 - Gráfico da equação prognóstica de velocidade de pico de partícula para o banco de dados da Caverna Piloto. Nota-se que o ajuste dos dados fica comprometido em função da grande dispersão apresentada. ....	89
Figura 34 - Gráfico de resíduos gerados no ajuste de dados da Caverna Piloto. Destacando a presença de valores extremos elevados, o que justifica o grau de correlação encontrado. ....	90
Figura 35 - Histograma de resíduos do ajuste de dados Caverna Piloto. Observa-se elevada concentração entre os valores de -0,2 e 0,2. ....	90
Figura 36 - Curva de distribuição de probabilidades de ocorrência para velocidade de pico de partícula, Caverna Piloto. Nota-se o valor de 4,06 mm/s como valor médio das 100.000 simulações. ....	92
Figura 37 - Frequência e probabilidade acumulativa para valores estimados de $V_{pp}$ . Destacando-se que apenas 5 % dos valores foram superiores a 6,18 mm/s, valor médio de 4,06 mm/s, e 95 % dos valores superiores a 2,46 mm/s. ....	94

Figura 38 - Gráfico da distribuição de probabilidades para valores estimados de velocidade crítica de vibração para a Cavidade Piloto. Destaca-se o valor médio das 100.00 simulações, como sendo 49,42 mm/s. ....	96
Figura 39 - Gráfico de frequência e probabilidade acumulativa para valores de velocidade crítica de vibração para Cavidade Piloto. Destacando-se o valor médio das 100.000 simulações, como sendo 49,42 mm/s. ....	97
Figura 40 - Diagrama velocidade crítica de vibração x RMR para Cavidade Piloto. ....	99

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Estimativa do potencial espeleológico brasileiro. ....	22
Tabela 2 - Relação proposta por ASP Blastronics (1997) para Velocidade de pico da partícula associada ao dano do maciço.....	44
Tabela 3 - Relação proposta por Hoek & Brown em 1981, para Velocidade de pico da partícula associada ao dano do maciço.....	44
Tabela 4 - Relação proposta por SME em 1992, para Velocidade de pico da partícula associada ao dano do maciço. ....	45
Tabela 5 - Relação entre velocidade de pico de partícula e danos em escavações subterrâneas, Singh(2001). ....	45
Tabela 6 - Relação entre velocidade de pico de partícula e danos ao maciço rochoso, proposto por Jimeno <i>et al.</i> (1995).....	45
Tabela 7 - Relação de velocidade de pico de partícula e danos ao maciço rochoso proposto por Adhikari <i>et al.</i> (1994). ....	46
Tabela 8 - Relação entre RQD (%) e a qualidade do maciço. ....	55
Tabela 9 - Cenários adotados para a estimativa do raio de proteção às cavidades.....	76
Tabela 10 - Resumo estatístico das velocidades de pico da partícula (mm/s) da série de dados de campo.....	79
Tabela 11 - Intervalo de confiança para a média amostral de velocidade de pico de partícula. ....	79
Tabela 12- Percentis para velocidade de pico de partícula.....	80
Tabela 13 - Estatísticas das componentes vertical, transversal, e longitudinal da velocidade de vibração. ....	82
Tabela 14 - Resumo estatístico das frequências de vibração (Hz) da série de dados de campo, Caverna Piloto. ....	83
Tabela 15 - Percentis para frequências de vibração (Hz), Caverna Piloto .....	84
Tabela 16 - Estatísticas de carga máxima por espera para a série de dados.....	85
Tabela 17 - Sumário do modelo de regressão ajustado a série de dados da Caverna Piloto. .	88
Tabela 18 - Parâmetros do modelo estocástico de estimativa de valores de velocidade de pico de partícula. ....	91
Tabela 19 - Estatísticas para valores previstos de velocidade de pico de partícula, Caverna Piloto.....	93

Tabela 20 - Percentis para valores de velocidade de pico de partícula simuladas, Cavidade Piloto.....	93
Tabela 21 – Matriz de informações da Cavidade Piloto.....	95
Tabela 22 - Estatísticas para estimativas de velocidade crítica de vibração, Cavidade Piloto.	97
Tabela 23 - Percentis do valores previstos para velocidade crítica de vibração, Cavidade Piloto. .....	98
Tabela 24 - Estimativa de raio mínimo de proteção Cavidade Piloto - CME 250 kg, Cenário A. .....	101
Tabela 25 - Estimativa de raio mínimo de proteção Cavidade Piloto - CME 250 kg, Cenário B. .....	102
Tabela 26 - Estimativa de raio mínimo de proteção Cavidade Piloto - CME 500 kg, Cenário A. .....	103
Tabela 27 –Estimativa de raio mínimo de proteção Cavidade Piloto - CME 500 kg, cenário B. .....	104
Tabela 28 - Estimativa de raio mínimo de proteção Cavidade Piloto - CME 750 kg, cenário A. .....	105
Tabela 29 - Estimativa de raio mínimo de proteção Cavidade Piloto - CME 750 kg. Cenário B. .....	106
Tabela 30 - Estimativa de raio mínimo de proteção Cavidade Piloto - CME 1000 kg. ....	107
Tabela 31 - Segunda estimativa de raio mínimo de proteção Cavidade Piloto - CME 1000 kg. .....	108
Tabela 32 – Simulações dos cenários A e B para estimativa do raio mínimo de proteção a Cavidade Piloto. ....	109

## LISTA DE SIGLAS

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

CANIE: Cadastro Nacional de Informações Espeleológicas.

CECAV: Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas.

CONAMA: Conselho Nacional de Meio Ambiente.

IBAMA: Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis.

ICMBIO: Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade.

ISRM: *International Society for Rock Mechanics*.

MMA: Ministério do Meio Ambiente.

PPV: *Peak Particule Velocity*.

RQD: *Rock Quality Designation*.

RMR: *Rock Mass Rating*.

USBM: *United States Bureau of Mines*.

UCS: *Uniaxial Compressive Strength*.

## Sumário

1	INTRODUÇÃO.....	16
1.1	Relevância e Justificativa.....	18
1.2	Objetivos.....	19
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	20
2.1	Cavidades naturais subterrâneas no Brasil.....	20
2.1.1	Inventário do patrimônio espeleológico brasileiro .....	22
2.1.2	Cavidades naturais subterrâneas em formações ferríferas.....	23
2.1.3	Província espeleológica da Serra dos Carajás – PA .....	25
2.2	Aspectos jurídicos de proteção ao patrimônio espeleológico nacional .....	27
2.3	Mineração x cavidades naturais subterrâneas .....	31
2.4	Vibrações e ondas geradas nas detonações.....	33
2.4.1	Propagação e transmissão da energia de ondas .....	35
2.4.2	Tipos de ondas geradas nas detonações.....	36
2.5	Estimativa de danos provocados pelas vibrações .....	40
2.5.1	Estimativa de danos em maciços rochosos associados a vibrações .....	43
2.5.2	Equações prognósticas de níveis críticos de vibração em maciços rochosos.....	46
2.5.3	Equações prognósticas da atenuação de vibrações.....	49
2.6	Classificação geomecânica de maciços rochosos .....	53
2.6.1	Rock Quality Designation (RQD) .....	54
2.6.2	Rock Mass Rating (RMR) .....	56
2.7	Simulação computacional .....	58
2.7.1	O Método de Monte Carlo.....	60
3	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	63
3.1	Localização .....	63

3.2	Contextualização geológica .....	63
3.3	Sistema serra norte .....	64
4	METODOLOGIA.....	66
4.1	Aquisição e preparação de dados .....	67
4.2	Tratamento e análise de dados .....	68
4.3	Elaboração dos modelos de estimativa de velocidade de pico de partícula.....	69
4.4	Elaboração do modelo de estimativa de velocidade crítica de vibração.....	72
4.5	Estimativa do raio de proteção de cavidades .....	75
5	ESTUDO DE CASO .....	78
5.1	Análise do banco de dados da Cavidade Piloto .....	78
5.1.1	Resultados obtidos.....	86
5.2	Aplicação do modelo convencional de estimativa de velocidade de pico de partícula 87	
5.3	Resultados obtidos .....	91
5.4	Aplicação do modelo estocástico de estimativa de velocidade de pico de partícula .	91
5.5	Aplicação do modelo estocástico de estimativa de velocidade crítica de vibração ...	94
5.6	Estimativa do raio de proteção para cavidade piloto .....	99
6	CONCLUSÕES .....	111
7	REFEÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	112

# 1 INTRODUÇÃO

A atividade de mineração à medida que expande suas fronteiras encontra novos desafios, a lavra de minérios em regiões de ocorrência de cavidades naturais é cada vez mais comum, e requer um constante aperfeiçoamento das operações, a fim de otimizar o aproveitamento das jazidas e garantir a preservação do patrimônio ambiental, social e cultural.

O arcabouço jurídico que discorre sobre a proteção das cavidades naturais subterrâneas brasileiras vem sofrendo alterações substanciais ao longo dos últimos anos, que visam, segundo o legislador, a compatibilização dos interesses da união, sociedade e indústria, nas esferas econômica, ambiental, social e cultural. As alterações mencionadas têm adaptado a legislação vigente a uma nova realidade, uma vez que se partiu de um cenário de completa impossibilidade de intervenção em áreas de ocorrência de cavidades naturais subterrâneas, para um cenário que admite a intervenção consciente e analítica nas áreas supracitadas.

As cavidades naturais subterrâneas que integram o patrimônio espeleológico nacional, são consideradas bens da união, e estão protegidas pela Constituição Federal de 1988, no seu artigo 20, inciso X, sendo consideradas ecossistemas complexos por possuírem elementos internos específicos, compartilhados com o ambiente externo, ou seja, meio epígeo, sendo essas interações realizadas através da dinâmica hídrica, biológica e genética. A legislação brasileira impõe a obrigatoriedade de licenciamento ambiental prévio, pelo órgão competente, a qualquer empreendimento com potencial poluidor, ou degradador do patrimônio espeleológico, ou de sua área de influência.

A resolução Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) N° 347/2004 estabelece que para a finalidade do licenciamento ambiental exigido, na ausência de estudos específicos que delimitem a área de influência no entorno das cavidades, pelo princípio da precaução, visando salvaguardar a integridade física, e ecológica da cavidade natural subterrânea, fica definido que o raio mínimo de proteção no entorno da mesma será de 250 m. Ainda segundo a Instrução Normativa número 2 do Ministério do Meio Ambiente, a delimitação da área de influência das cavidades deve ser realizada compreendendo aspectos bióticos e abióticos, superficiais e subterrâneos, necessários à manutenção e equilíbrio ecológico e da integridade física do ambiente cavernícola.

O impacto decorrente da resolução supracitada em atividades de mineração pode assumir elevada magnitude, tendo em vista que a adoção do raio de proteção exigido por lei pode impactar de forma significativa as reservas minerais lavráveis, e em alguns casos inviabilizar um empreendimento de mineração.

As cavidades naturais subterrâneas tendem a ocorrer em regiões com predomínio de feições cársticas, compostas de forma predominante por rochas solúveis. No Brasil, em função da grande variabilidade geomorfológica e climática, regiões com ascendência de arenitos, quartzitos e formações ferríferas, tem também apresentado elevada susceptibilidade à formação de cavidades naturais subterrâneas. Segundo dados de 2016, do Cadastro Nacional de Informações Espeleológicas (CANIE) os estados de Minas Gerais e Pará, os dois maiores estados mineradores do país, abrigam 56,26 % das cavidades registradas no Brasil, sendo 40,28 % das ocorrências em Minas Gerais, e 15,88% no Pará. Ainda segundo o CANIE, 87% das cavidades cadastradas no estado do Pará são registradas em áreas de ocorrência de formação ferrífera, enquanto em Minas Gerais, 22% das cavidades encontram-se em situação semelhante.

É esperado nos próximos anos, significativo incremento nos dados apresentados, uma vez que o aumento dos registros de cavidades naturais subterrâneas em regiões de pujante atividade mineral está associado ao aumento do número de estudos e requerimentos de licenciamentos ambientais. A elevada ocorrência de cavidades naturais em regiões que abrigam grandes empreendimentos da indústria mineral brasileira vem exigindo aprimoramentos nos métodos de lavra, visando a máxima redução de impactos, nas mesmas, e seu entorno, bem como a máxima recuperação do minério lavrável.

No que tange a preservação da integridade física das cavidades, as operações de desmonte de rochas com explosivos representam a maior ameaça potencial, uma vez que as vibrações ocasionadas nos desmontes podem causar danos estruturais irreversíveis. Neste sentido esta dissertação apresenta uma metodologia de estimativa do raio de proteção às cavidades, a partir de critérios que individualizem as análises, considerado as especificidades geomecânicas de cada cavidade, alinhado aos parâmetros do plano de fogo, através de modelos estocásticos e técnicas de simulação.

## **1.1 Relevância e Justificativa**

A adoção de uma metodologia de estimativa do raio mínimo de proteção às cavidades naturais subterrâneas, no qual as especificidades geomecânicas das cavidades, bem como os parâmetros do plano de fogo sejam considerados é de extrema importância para a indústria mineral brasileira. A atual legislação ambiental brasileira impõe que seja preservado um raio mínimo de 250 m a partir da projeção horizontal da cavidade, esta imposição é frequentemente contestada, uma vez que não leva em conta as particularidades de cada cavidade e operação mineira desenvolvida no seu entorno.

A partir da elaboração de uma metodologia estocástica, este trabalho espera estimar o raio mínimo de proteção às cavidades naturais subterrâneas a partir de uma análise individualizada, podendo em alguns casos, os resultados sugerirem a redução do limite de proteção a valores inferiores aos 250 m previstos na lei, ou mesmo sugerir a ampliação deste.

## **1.2 Objetivos**

Esse estudo objetiva apresentar uma metodologia de estimativa do raio mínimo de proteção de cavidades naturais subterrâneas em áreas de mineração, baseado em que considerem as especificidades geomecânicas das cavidades, bem como os parâmetros dos planos de fogo utilizados.

Em adição esse estudo apresenta um modelo estocástico de estimativa de valores de velocidade de pico de partícula, no qual as principais constantes da equação prognóstica de vibrações são tratadas como variáveis aleatórias dentro de uma distribuição triangular de probabilidades. Esse modelo confronta o convencional, de natureza determinística, apresentando resultados que conferem maior grau de confiança para as tomadas de decisões nas operações de desmonte de rochas com explosivos.

Um modelo estocástico de estimativa de velocidade crítica de vibração, ou velocidade de pico de partícula a partir da qual a cavidade pode experimentar um aumento no potencial de instabilidade estrutural, também é proposto nesse estudo, a fim de se aumentar o grau de confiança das análises de resistência as vibrações das cavidades naturais subterrâneas.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Cavernas naturais subterrâneas no Brasil**

De acordo com a definição estabelecida pelo Decreto Federal número 6.640, de 07/11/2008, “Entende-se por cavidade natural subterrânea todo e qualquer espaço subterrâneo acessível pelo ser humano, com ou sem abertura identificada, popularmente conhecida como caverna, gruta, lapa, toca, abismo, furna ou buraco, incluindo seu ambiente, conteúdo mineral e hídrico, a fauna e a flora ali encontrados e o corpo rochoso onde os mesmos se inserem desde que tenham sido formados por processos naturais, independentemente de suas dimensões ou tipo de rocha encaixante”.

Ainda segundo a União Internacional de Espeleologia, caverna consiste em uma abertura natural formada em rocha abaixo da superfície do terreno, larga o suficiente para a entrada do ser humano. Essa definição é muito criticada pela comunidade científica, por se tratar de uma definição estritamente antropogênica.

As cavernas naturais subterrâneas constituem sítios arqueológicos, geológicos e paleontológicos de extrema importância, podendo apresentar em sua maioria considerável potencial de armazenamento de água, além de abrigarem inúmeras espécies endêmicas e/ou ameaçadas de extinção, podendo ser agrupadas em distritos e províncias espeleológicas (MARRA,2008).

Segundo Karmann & Sánchez (1979) o termo Província Espeleológica pode ser entendido como: região pertencente a uma mesma formação geológica, apresentando ocorrência de grandes corpos de rochas susceptíveis a ação cárstica. Ainda segundo esses autores, determinados setores que compõem uma Província Espeleológica específica, apresentam maior incidência de cavernas em detrimento de outros, sendo então classificados como Distritos Espeleológicos, constituindo dessa forma uma subdivisão do termo amplo, Província Espeleológica.

O estudo de Karmann & Sánchez (1979), é considerado um marco dentro do conhecimento espeleológica nacional, uma vez que trouxe à luz um sistema de classificação e subdivisão de

regiões com registros de ocorrência de cavidades naturais subterrâneas. No entanto, em função da época em que foi desenvolvido, os conceitos apresentados foram elaborados estritamente com base em padrões de ocorrência em rochas carbonáticas, não englobando, cavernas em quartzitos, arenitos, e minério de ferro.

Auller *et al.* (2001), caracterizaram com base em mapas mais detalhados e informativos, uma nova divisão das áreas brasileiras de ocorrência de cavidades naturais subterrâneas. Segundo os mesmos, a denominação região cárstica, referindo-se a regiões com características específicas de composição geomorfológica, hidrológica e litológica, favoráveis ao desenvolvimento de cavernas, não exclusivamente em rochas carbonáticas, seria mais confluyente com os recentes registros de cavidades naturais subterrâneas, em litologias ferríferas, por exemplo.

O Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas (CECAV), uma unidade descentralizada do Instituto Chico Mendes, trabalha com a delimitação de dezenove regiões cársticas no Brasil, partindo do refinamento e ampliação da metodologia proposta por Auller *et al.* (2001). O mapa proposto pelos analistas do CECAV, exibe a inclusão de cinco novas regiões de formações não carbonáticas incluídas dentre as regiões cársticas, totalizando dezenove regiões cársticas em território nacional, a saber: Formação Caatinga, Formação Carajás, Formação Salinas, Formação Vazante, Grupo Açungui, Grupo Apodi, Grupo Araras, Grupo Bambuí, Grupo Brusque, Grupo Corumbá, Grupo Paranoá, Grupo Rio Pardo, Grupo Ubajara, Grupo Una, Grupo Vargem Grande, Grupo Xambioá, Região Cárstica de São João Del Rei, Região Cárstica Quadrilátero Ferrífero e Supergrupo Canudos, (Figura 1).

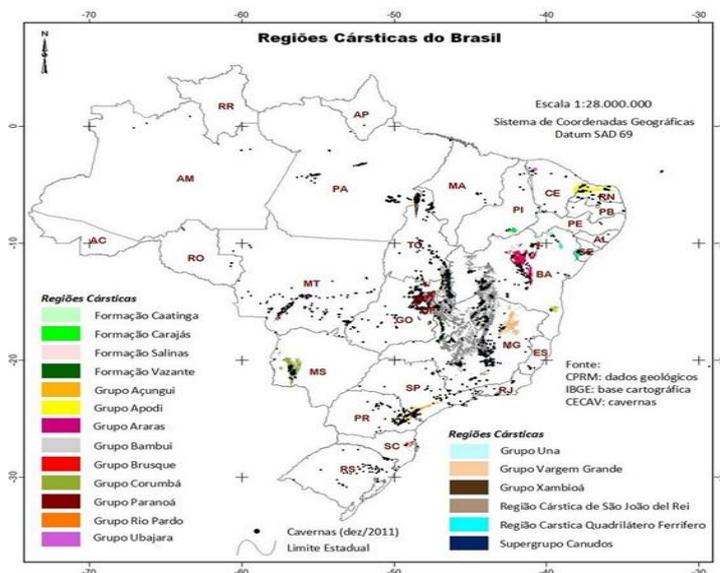


Figura 1- Mapa das regiões cársticas do Brasil. CECAV, 2009.

### 2.1.1 Inventário do patrimônio espeleológico brasileiro

O Brasil em função da elevada variedade geomorfológica e climática, apresenta apreciável potencial espeleológico, segundo o relatório estatístico de 2016 do Cadastro Nacional de informações Espeleológicas (CANIE) existem cerca de 16.191 cavidades naturais subterrâneas registradas no país, o estado de Minas Gerais lidera o ranking com 39 % das ocorrências, seguido pelo estado do Pará com 15,30 %, e Bahia com 8,02 %.

Estimativas do Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas (CECAV), apontam que apenas 5% do potencial espeleológico brasileiro esteja registrado. Uma análise do cadastro espeleológico nacional revela uma forte tendência observada no que tange o aumento de registros de cavidades naturais subterrâneas em regiões não carbonáticas nos últimos anos, notadamente em regiões de formações ferríferas.

A tabela 1 apresenta a estimativa do potencial espeleológico brasileiro, relacionando as cavidades naturais subterrâneas já conhecidas, e as litologias de ocorrência. Segundo a mesma, as formações ferríferas figuram em segundo lugar quanto ao número de cavernas já conhecidas, o que muitas vezes representa conflitos de interesse entre diversos estratos da sociedade, já que essas formações abrigam os maiores empreendimentos da mineração nacional.

*Tabela 1- Estimativa do potencial espeleológico brasileiro. Adaptada de CECAV.*

<b>Litologia</b>	<b>Cavernas conhecidas</b>	<b>Provável potencial</b>	<b>Porcentagem de cavernas conhecidas</b>
<b>Carbonatos</b>	7.000	> 150.000	< 5%
<b>Quartzitos</b>	400	> 50.000	< 1%
<b>Arenitos</b>	400	> 50.000	< 1%
<b>Formação Ferrífera</b>	2.000	> 10.000	< 20%
<b>Outras litologias</b>	<b>200</b>	<b>&gt; 50.000</b>	<b>&lt; 0,5 %</b>

A figura 2 apresenta a distribuição das cavidades naturais subterrâneas por litologias, já conhecidas no Brasil, até o ano de 2013. Nota-se claro predomínio de ocorrências em litologias carbonáticas, que correspondem ao denominado Carste tradicional, perfazendo as mesmas um

total de 70% das cavernas já registradas no país, merecem destaque as ocorrências registradas em formações ferríferas, ou Carste não tradicional, totalizando 20% do montante conhecido até o ano de 2013.

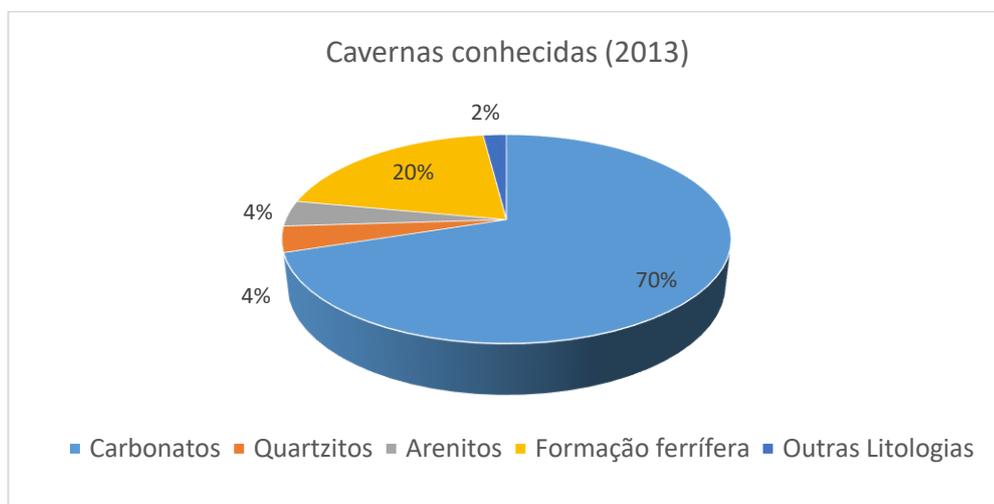


Figura 2 - Distribuição por tipo litológico de cavernas registradas no Brasil até 2013.

Os estados de Minas Gerais e Pará, se destacam em âmbito nacional pela maciça presença de cavidades naturais subterrâneas associadas a formações ferríferas. Segundo Valentim e Olivito (2011), o Quadrilátero ferrífero, em uma área total de 595 km<sup>2</sup> apresentava o montante de 1.086 cavidades naturais subterrâneas, perfazendo uma densidade superficial média de 1,83 cavernas/km<sup>2</sup>, já a Serra dos Carajás apresenta um densidade média de 0,40 cavernas/km<sup>2</sup>, correspondendo a um total de 1.440 cavidades distribuídas em uma área de 3.621 km<sup>2</sup>.

### 2.1.2 Cavidades naturais subterrâneas em formações ferríferas

De acordo com Auler e Piló (2005), o conhecimento científico a respeito de cavidades naturais subterrâneas em rochas ferríferas ainda é escasso, visto que estas ocorrências são pouco estudadas até então, muito em função das reduzidas dimensões apresentadas por essas cavidades, além da falta de atrativos esportivos e turísticos, principalmente se comparado às ocorrências em rochas calcárias. Porém, em decorrência do crescente número de estudos espeleológicos realizados pelos mais diversos empreendimentos, como parte integrante das exigências para se conseguir o licenciamento ambiental necessário à instalação de projetos variados, notadamente de mineração, tem sido gerado um expressivo banco de dados sobre a ocorrência de cavidades naturais subterrâneas em formações ferríferas no Brasil.

O Brasil é um dos maiores produtores e exportadores de minério de ferro do mundo e figura em segundo lugar no ranking das maiores reservas globais até o momento, atrás apenas da Austrália. Entretanto, um novo cenário começa a se desenhar dado a recentes estudos sobre o elevado potencial espeleológico em regiões associadas a formações ferríferas, principais produtoras de minério de ferro no país. Nesse cenário, a preocupação e a legislação de preservação das cavidades naturais impõem, em alguns casos, numa considerável redução da reserva lavrável.

O grande número de ocorrências já registradas de cavidades naturais subterrâneas em regiões com predomínio de rochas com formação ferrífera deve-se muito ao fato do elevado potencial econômico associado a formações ferríferas, sendo estas, alvos de grandes empreendimentos minerários, que acabam reportando um maior número de informações decorrentes dos estudos ambientais quando do licenciamento do empreendimento.

Segundo Calux (2013), o Brasil possui aproximadamente quatro mil cavernas associadas a formações ferríferas cadastradas em acervos públicos e privados, distribuídas principalmente nas províncias espeleológicas da Serra dos Carajás, na Amazônia, e no Quadrilátero Ferrífero em Minas Gerais, exibidos na figura 3. Ainda são encontradas ocorrências pouco expressivas de cavidades naturais subterrâneas em formações ferríferas, nas regiões de Caetité na Bahia e Porteirinha, no norte de Minas Gerais.

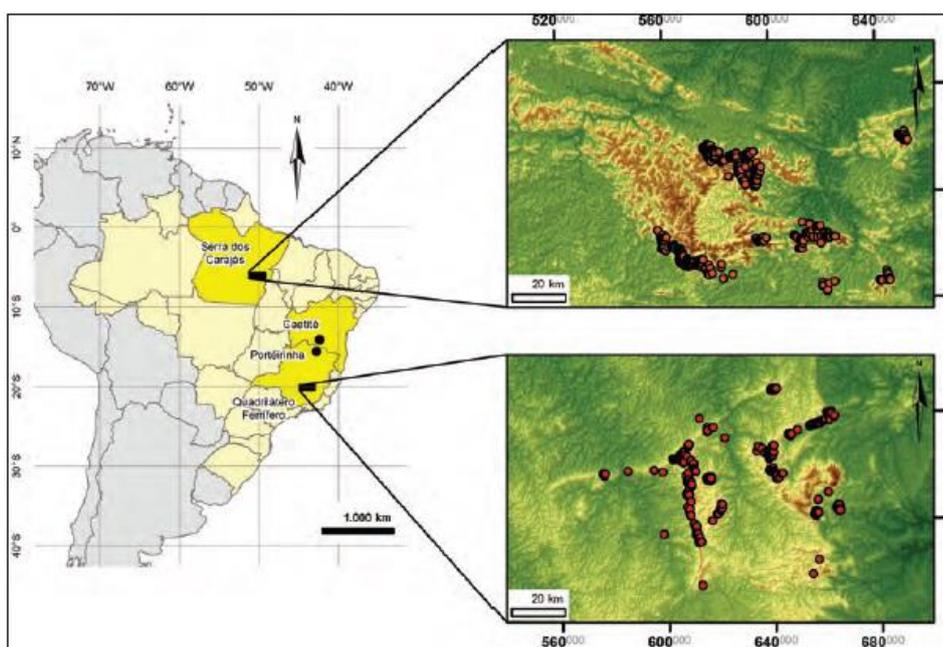


Figura 3 - Localização das províncias espeleológicas de Carajás e do Quadrilátero Ferrífero. Pontos em vermelho registram cavidades cadastradas no Cadastro Nacional de informações espeleológicas. (Patrimônio Espeleológico em Rochas Ferruginosas, 2015).

De acordo com Dutra (2013) a espeleogênese está relacionada a uma gama variada de processos, dentre eles, erosão, abatimento, lixiviação e dissolução hidrotermal. Entretanto, a espeleogênese de regiões de formação ferrífera ainda necessita de maiores estudos e discussões, diferentemente do tradicional carste carbonático, amplamente estudado. O conhecimento científico, acadêmico e técnico acerca deste fenômeno em áreas ferríferas carece de maiores aprofundamentos.

As cavidades naturais subterrâneas em formações ferríferas podem se desenvolver tanto em Itabiritos/hematitas em geral, uma vez que muitas das cavernas registradas não distinguem os dois termos e Cangas, havendo registros de desenvolvimento de cavernas no contato itabirito/canga. Ainda segundo Auler *et al.* (2014) o processo de espeleogênese em formações ferríferas pode estar associado a uma iniciação hipogênica, com estágios tardios vadosos elaborados em zona saturada profunda.

Segundo Piló e Auller, (2009), as cavidades naturais subterrâneas desenvolvidas em formações ferríferas se destacam por algumas singularidades características que as diferenciam das ocorrências de litologias distintas, usualmente apresentam reduzidas dimensões, com médias de projeções horizontais na faixa de 30 m. Esse estudo foca as cavidades naturais subterrâneas pertencentes a província espeleológica da Serra dos Carajás, no estado do Pará.

### **2.1.3 Província espeleológica da Serra dos Carajás – PA**

Do ponto de vista geomorfológico, a província espeleológica da Serra dos Carajás está inserida no domínio do Planalto dissecado do Sul do Pará, apresentando como características principais, maciços residuais de topo aplainado, além de cristas e picos interpenetrados por faixas de terrenos rebaixados (BOA VENTURA, 1974).

A província espeleológica da Serra dos Carajás já é considerada uma das regiões com a maior concentração de cavernas em formações ferríferas no Brasil, esta é subdividida em sete distritos espeleológicos: Serra Norte, Serra Leste, Serra Sul, Serra do Rabo-Estrela, Serra da Bocaina, Serra Arqueada e Serra do Cinzento, representados na figura 4.

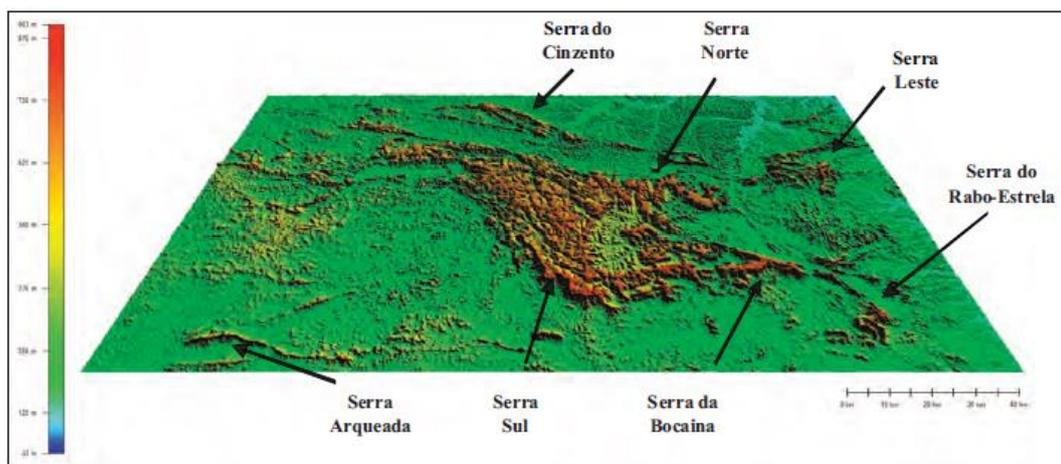


Figura 4 - Província espeleológica da Serra dos Carajás e principais distritos espeleológicos ferríferos. (Patrimônio Espeleológico em Rochas Ferruginosas, 2015).

As cavidades naturais subterrâneas encontradas na Serra dos Carajás distribuem-se em formações de jaspelito e canga dentrítica, podendo se desenvolver também no contato entre duas formações. O padrão típico de cavidades na Serra dos Carajás é composto de estruturas com dimensões reduzidas, em geral 70% das cavidades da região não ultrapassam 30 m de projeção horizontal, sendo muito incomuns cavidades com projeções horizontais acima dos 100 m.

Segundo Piló & Andrade (2006) as cavidades naturais subterrâneas desenvolvidas nas formações ferríferas da Serra dos Carajás apresentam uma diversificada assembleia mineralógica, principalmente se comparado a cavidades desenvolvidas em rochas carbonáticas. É destacável o predomínio da ocorrência de hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) seguido de goethita ( $\text{FeO}(\text{OH})$ ), existem também registros que apontam a presença, em menor proporção de minerais fosfatados, bem como de gibbsita ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ ).

As cavidades naturais subterrâneas na região da Serra dos Carajás, em geral apresentam aspecto seco em sua maioria, excetuando as cavidades próximas a igarapés que apresentam atividade hídrica ativa. Os depósitos sedimentares associados as cavidades da região são variados, podendo assumir classificações diversificadas entre autogênicos e alogênicos, existem também registros de depósitos orgânicos associados as cavidades da região. Em função da pouca atratividade até então por parte das cavidades em formação ferrífera, estudos mais detalhados relativos a fauna e flora ainda são escassos. Mas, levantamentos recentes apontam para existência de uma fauna diversificada, inclusive com a presença de triglomórficos.

## **2.2 Aspectos jurídicos de proteção ao patrimônio espeleológico nacional**

As cavidades naturais subterrâneas sempre despertaram a curiosidade dos seres humanos, que ao longo do tempo tem usufruído de tais estruturas das mais variadas formas. A preocupação com a manutenção e preservação das cavidades no Brasil é anterior a promulgação da Carta Magna. Os anseios da comunidade espeleológica nacional começaram a ser considerados já no ano de 1986, quando da publicação da Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente CONAMA nº 009/1986.

De acordo com Aquino (2012), foi instituída através da referida resolução a comissão especial para tratar de assuntos relativos ao patrimônio espeleológico nacional, constituído pela Sociedade Brasileira de Espeleologia, Secretaria Especial de Meio Ambiente, Instituto Brasileiro de Desenvolvimento Florestal, Governo do Estado de Minas Gerais, Departamento Nacional de Produção Mineral, e mais diversas instituições alinhadas a causa.

Medidas mais assertivas com relação a preservação e conservação das cavidades naturais subterrâneas brasileiras foram tomadas com a publicação da Resolução do CONAMA nº 005/1987. Seu conteúdo visava claramente a proteção do acervo espeleológico nacional, uma vez que encerrava em si diversas medidas preservacionistas, como a implantação do Programa Nacional de Preservação do Patrimônio Espeleológico, a exigência obrigatória da apresentação da elaboração de Estudos de Impactos Ambientais para empreendimentos nas proximidades de cavidades, além da inclusão de troglóbios no status de ameaçados de extinção.

No ano de 1988 com a redação da nova Constituição Federal, o embasamento legal, faltante no que tangia a preservação e conservação das cavidades naturais subterrâneas, foi estabelecido, uma vez que a Carta Magna em seu artigo 20, inciso X incluía as cavidades naturais entre os bens da união.

As determinações da Constituição Federal de 1988 no tocante as questões envolvendo o patrimônio espeleológico nacional, sinalizaram uma nova percepção no contexto ambiental, visto que as cavidades naturais subterrâneas passariam a ser reconhecidas como recursos ambientais e não mais apenas como potencial fonte de aproveitamento econômico. No entanto, o texto não apresentava distinção entre quais cavidades naturais seriam consideradas bens da

união, refletindo uma subjetividade que interferia de forma direta nos processos de licenciamento requeridos.

A Constituição Federal pode ser considerada uma constituição ambientalista, uma vez que muito além de determinar o domínio do patrimônio e as competências dos entes federados, definiu entre os elencados aqueles que receberiam a designação de bens ambientais (MARRA,2008).

A legislação de proteção e conservação das cavidades naturais mostrou grande avanço quando da criação no início da década de noventa, do Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA), o órgão criado foi responsável por emitir a portaria IBAMA n° 887, que dentre outras, reafirma a obrigatoriedade da realização de estudos de impacto ambiental para ações e empreendimentos de qualquer natureza, que represente ameaça ao patrimônio espeleológico, além de trazer um definição mais abrangente de cavidades naturais. Apesar dos avanços, a legislação nacional ainda apresentava pontos de subjetividade, uma vez que não definia quais os parâmetros a serem utilizados na avaliação do empreendimento, quando da etapa de licenciamento.

O Decreto Federal n° 99556/1990, representou um avanço significativo no que tange a preservação de cavidades naturais subterrâneas brasileiras, estabelecendo de forma definitiva a definição legal de cavidade natural, proposta pela portaria IBAMA n° 887, a saber: "Parágrafo único. Entende-se como cavidade natural subterrânea todo e qualquer espaço subterrâneo penetrável pelo homem, com ou sem abertura identificada, popularmente conhecido como caverna, incluindo seu ambiente, conteúdo mineral e hídrico, a fauna e a flora ali encontrados e o corpo rochoso onde os mesmos se inserem, desde que a sua formação haja ocorrido por processos naturais, independentemente de suas dimensões ou do tipo de rocha encaixante. Nesta designação estão incluídos todos os termos regionais, tais como gruta, lapa, toca, abismo, furna e buraco."

Além da definição acima, o Decreto Federal n° 99556/1990 ainda trouxe a luz diversas outras medidas, de extrema significância no sentido da preservação do patrimônio espeleológico nacional, definindo entre outras, o órgão regulamentador das atividades em áreas de ocorrências

de cavidades naturais, e a elevação das cavidades naturais a patrimônio cultural brasileiro promovendo integralmente a preservação das mesmas (AQUINO, 2014).

O avanço do conhecimento acadêmico e científico, além da expansão de empreendimentos sobre áreas de ocorrência de cavidades naturais subterrâneas, levou o IBAMA no ano de 1997 a publicar a portaria IBAMA nº 057, que instituía a criação do Centro Nacional de Estudo, Proteção e Manejo de Cavernas (CECAV). O órgão foi enquadrado na categoria de Unidade Descentralizada do IBAMA, que tem como principal objetivo, através de sua equipe técnica especializada, auxiliar na promoção de avanços no que tange a preservação e conservação do patrimônio espeleológico brasileiro.

Mesmo com significativos avanços, a legislação nacional ainda permanecia subjetiva quando analisada de forma criteriosa, e a criação do IBAMA e, posteriormente do CECAV representaram conquistas na ótica conservacionista. Porém o empreendedor brasileiro ainda carecia de uma legislação mais precisa.

No intuito de promover melhorias, foi formulada a resolução CONAMA nº 347 de 2004 que visava uma adequação da resolução CONAMA nº 005 de 1987. O principal avanço proposto pela nova resolução foi a padronização e organização das atividades e empreendimentos em áreas de ocorrências de cavidades naturais subterrâneas, ainda sem distinção quanto a classificação das mesmas, e seu grau de relevância.

Os parâmetros de análise instituídos na reformulada resolução, estabeleciam um referencial importante na ótica da preservação das cavidades naturais subterrâneas - as análises deveriam considerar critérios específicos sobre aspectos locais e regionais, como, geologia, morfologia, evidências arqueológicas, aspectos biológicos, ecológicos dentre outros. A resolução supracitada, ainda instituiu em seu Art 4º que a área de influência sobre o patrimônio espeleológico será definida pelo órgão ambiental competente que poderá, para tanto, exigir estudos específicos, às expensas do empreendedor, e que na ausência destes, a mesma fica delimitada como sendo a projeção horizontal da caverna acrescida de um entorno de 250 m, em forma de poligonal convexa.

Com o advento da resolução CONAMA n° 347/2004 o licenciamento ambiental de empreendimentos que apresentassem algum potencial de dano ao patrimônio espeleológico nacional estava padronizado. Porém as cavidades naturais ainda estavam definidas como patrimônio cultural, não havendo até o momento mecanismos ou critérios que classificassem as mesmas quanto ao grau de relevância.

Essa questão já era alvo de tensões entre a comunidade científica brasileira e a iniciativa privada, principalmente grandes empresas de mineração e construção, uma vez que a não possibilidade em hipótese alguma, da supressão de cavidades naturais subterrâneas, representava um cenário de inviabilidade para diversos empreendimentos.

No intuito de melhor atender as demandas de todas as esferas da sociedade, uma vez que a preservação das cavidades naturais se constitui uma causa nobre, mas a inviabilização de inúmeros empreendimentos também encerra em si diversos fatores adversos complicadores, o legislador propôs alterações substanciais na legislação vigente, através do Decreto Federal n° 6.640 de 2008, que conferia uma nova redação aos artigos 1°, 2°, 3°, 4°, 5° presentes no Decreto Federal n° 99.556/1990, além de acrescentar no novo texto os artigos 5-A e 5-B.

O advento do novo Decreto Federal acirrou ainda mais as discussões entre a comunidade científica brasileira, sociedade civil, setor empresarial e governo. De fato, várias determinações contidas no novo texto foram vistas com maus olhos, principalmente por ambientalistas, uma vez que a partir deste seria possível a supressão de determinadas cavidades, mediante estudos específicos, e compensações por danos ambientais, além da adesão de um sistema de classificação das cavidades quanto ao grau de relevância, e a exclusão das cavidades naturais como parte integrante do patrimônio cultural brasileiro.

A fim de complementar o estabelecido no Decreto Federal n° 6.640 de 2008, foi instituída em 20/08/2009 a Instrução Normativa n° 2 do Ministério de Meio Ambiente (M.M.A), que estabelece a metodologia para classificação do grau de relevância das cavidades naturais subterrâneas (art. 5° do Decreto n° 6.640/2008), além da Instrução Normativa n° 30/2012 do Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBIO), a qual estabelece procedimentos administrativos e técnicos para a execução de compensação espeleológica (art. 4° § 3°), também regulamentada no referido decreto.

### **2.3 Mineração x cavidades naturais subterrâneas**

A mineração é uma atividade essencial à sobrevivência e evolução humana, seus benefícios podem ser observados em praticamente todos os períodos da história do homem moderno. Muito embora seja uma cadeia produtiva de extrema importância para qualquer nação, principalmente no Brasil, a mineração como um todo ainda sofre com o massivo desconhecimento a respeito da atividade pela maioria esmagadora da população. Esses cenários de pouca informação, aliados a eventos negativos pontuais ao longo da história, corroboram para o estabelecimento de um quadro de rejeição da sociedade para com a indústria extrativista mineral, configurando um paradoxo insolúvel, onde o consumidor quer o produto, mais não quer a produção.

A constante demanda por bens minerais em um quadro geral, tem levado a uma inevitável expansão das fronteiras minerais, o que certamente gera conflitos nas esferas social, ambiental e econômica, inerentes a atividade. As operações desenvolvidas nas mineradoras provocam sensível perturbação ao meio no qual estão inseridas, o que ocasiona em diversas oportunidades, conflitos decorrentes dos impactos ambientais provocados pela atividade.

Segundo o conceito clássico e legal definido pela Resolução CONAMA no 01/86, em seu Art. 1º, “considera-se impacto ambiental qualquer alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente, causada por qualquer forma de matéria ou energia resultante das atividades humanas que, direta ou indiretamente, afetam: (i) a saúde, a segurança e o bem-estar da população; (ii) as atividades sociais e econômicas; (iii) a biota; (iv) as condições estéticas e sanitárias do meio ambiente; (v) qualidade dos recursos ambientais.”

Auler e Piló (2014), afirmam que o aproveitamento de recursos minerais no Brasil, principalmente minério de ferro, atualmente é restrito devido a existência de cavidades naturais subterrâneas. Segundo o autor, a maior parte das cavernas registradas no país nos últimos anos, foram associadas a estudos ambientais conduzidos por empresas de mineração.

No Brasil, segundo a legislação em vigor, os avanços de lavra em regiões de ocorrência de cavidades naturais subterrâneas, devem realizar-se respeitando a área de influência da cavidade, sendo a mesma definida segundo o Artigo 2º da Resolução CONAMA nº 347/2004:

*IV - área de influência sobre o patrimônio espeleológico: área que compreende os elementos bióticos e abióticos, superficiais e subterrâneos, necessários à manutenção do equilíbrio ecológico e da integridade física do ambiente cavernícola;*

A resolução supracitada ainda determina as diretrizes a serem seguidas quando do processo de licenciamento de empreendimentos em áreas de ocorrência de cavidades naturais subterrâneas, em seu Artigo 4º, segundo a redação:

*§ 2o “A área de influência sobre o patrimônio espeleológico será definida pelo órgão ambiental competente que poderá, para tanto, exigir estudos específicos, a expensas do empreendedor”.*

*§ 3o “Até que se efetive o previsto no parágrafo anterior, a área de influência das cavidades naturais subterrâneas será a projeção horizontal da caverna acrescida de um entorno de duzentos e cinquenta metros, em forma de poligonal convexa”.*

A determinação da área mínima necessária com vistas a preservação e manutenção da integridade física, e do equilíbrio ecológico da cavidade, encerra em si notável importância diante de um contexto onde a alteração das características ambientais da área de inserção da mesma se mostra inevitável (AULER, 2006).

Porém, o raio de 250 m para o perímetro de proteção da cavidade, estabelecido provisoriamente pela legislação em vigor, pode ser excessivo em algumas situações, ou mesmo insuficiente em outras, tendo em vista que não considera relevante características da cavidade, como litologia e local de inserção da mesma.

Com vistas a preservação e manutenção da integridade física e biológica das cavidades naturais subterrâneas, frente aos principais impactos potenciais inerentes as operações de avanços de lavra, a determinação da área de influência das cavernas deve ser baseada na preservação da integridade física, da dinâmica evolutiva, do ecossistema subterrâneo e do contexto natural e cênico.

Alinhado ao objetivo proposto nessa dissertação, será dado enfoque ao estudo da preservação e manutenção da integridade física das cavidades, frente as operações de desmonte de rochas com explosivos, empreendidas nos avanços de lavra, uma vez que a determinação da área de influência sob ótica de dinâmica evolutiva, ecossistema subterrâneo e contexto natural e cênico fogem ao escopo desse estudo.

Entende-se por preservação da integridade física, a manutenção do aspecto morfológico original da cavidade, preservando formações secundárias como espeleotemas, ou sedimentos clásticos, bem como piso, paredes e teto das mesmas.

O desmonte de rochas com o uso de explosivos, empregado nas operações de avanços de lavra, representa o maior potencial de dano a integridade física da cavidade. A energia gerada no desmonte de rochas é transferida ao maciço rochoso via propagação de ondas sísmicas que submetem as cavidades naturais subterrâneas a um ciclo de esforços de carregamento dinâmico, podendo induzir danos estruturais irreversíveis. A figura 5 apresenta as três dimensões de análise sismográfica no entorno de cavidades, fonte emissora da vibração, propagação e atenuação pelo terreno, e alvo receptor das vibrações.



Figura 5 - Sismografia no entorno de cavidades naturais subterrâneas. CECAV 2016.

O conhecimento do comportamento sismográfico e geomecânico das cavidades frente aos desmontes de rochas por explosivos é fator crucial na elaboração de planos de avanços de lavra alinhados aos objetivos da empresa e as normas de proteção ao patrimônio espeleológico.

## 2.4 Vibrações e ondas geradas nas detonações

As operações de desmonte de rochas com a utilização de explosivos liberam quantidades apreciáveis de energia. Porém, somente uma fração reduzida da mesma é efetivamente utilizada

na fragmentação do maciço rochoso, sendo a maior parte transferida ao meio adjacente a partir do centro da detonação, na forma de ondas de choque.

O mecanismo de detonação consiste em uma reação química altamente exotérmica, gerando produtos gasosos com elevada força de expansão e temperaturas compreendidas entre 1500 °C e 4000 °C. A transmissão dessa energia através do maciço rochoso se dá através da geração de ondas de choque capazes de induzir tensões na ordem de 2 GPa a 10 GPa, nas proximidades dos furos de detonação (LIMA,2000).

A deflagração de uma carga explosiva confinada em um furo gera ondas de tensões responsáveis por causar distorções e fissuras permanentes no maciço rochoso no campo próximo ao ponto de detonação, geralmente distâncias inferiores a nove vezes o diâmetro do furo. A grandes distâncias do ponto central de carga, não são observadas deformações permanentes, e sim uma rápida atenuação das ondas de tensão, desde que a perturbação vibracional não resulte em esforços solicitantes que superem a resistência a carregamentos dinâmicos do meio.

Segundo Rezende (2002), estimativas comprovam que apenas 20 % a 30 % da energia produzida pelos explosivos é efetivamente convertida em energia de fragmentação da rocha. Parcela considerável desta energia é transmitida ao meio na forma de ondas mecânicas, sendo denominadas ondas sísmicas, quando se propagam em meios sólidos e elásticos como as formações rochosas.

A propagação de ondas mecânicas decorrentes da energia liberada pela detonação de cargas explosivas, transmitidas ao maciço rochoso, pode provocar perturbações no meio adjacente às operações de desmonte de rochas com explosivos. Essas perturbações se manifestam pela movimentação das partículas constituintes entorno da posição de equilíbrio, que assume caráter vibracional, e é tão mais acentuada quanto maior for a intensidade da perturbação, dentro do campo de limite de resistência elástico do meio (CAETANO, 2004).

As vibrações ocasionadas pelas operações de desmonte de rochas com o uso de explosivos podem causar danos estruturais significantes, em estruturas civis e maciços rochosos situadas nas adjacências da área desmontada.

Segundo Tejada Cervantes (2011), estruturas situadas principalmente no campo afastado das detonações, geralmente em raios superiores a 100 m do centro da detonação, experimentam vibrações com frequências de oscilação reduzidas, mas compreendidas em intervalos que muitas vezes contemplam a frequência natural de vibração do meio. Frequências de vibração próximas a frequência natural de vibração do meio podem induzir as estruturas a experimentar o fenômeno de ressonância, sendo este caracterizado como a tendência de um sistema oscilar em máximas amplitudes, que podem ocasionar danos estruturais irreversíveis.

#### **2.4.1 Propagação e transmissão da energia de ondas**

O mecanismo de propagação de uma onda mecânica em um meio sólido apresenta intrínseca relação com diversas propriedades do mesmo, sendo sua velocidade e direções de propagação e atenuação, variáveis governadas pela interação da onda com o meio no qual a mesma propaga. Segundo Klen (2010), as ondas mecânicas, classe à qual pertencem as ondas geradas no desmonte de rochas com explosivos, conferem às partículas do meio elástico submetido a propagação da onda, um movimento vibracional, no qual parte do meio se desloca em relação a sua posição de origem, ocasionando desta forma um movimento oscilatório, em torno da posição de equilíbrio natural.

A velocidade de propagação, bem como os processos de atenuação e transmissão da energia de uma onda mecânica, apresenta elevado grau de correlação com a elasticidade e a inercia do meio no qual a onda propaga, sendo as propriedades elásticas do meio as responsáveis pelas ações de forças restauradoras, que em conjunto com as propriedades inerciais características determinam a resposta do meio em relação à perturbação provocada pela onda.

O meio perturbado pela onda mecânica voltará ao seu estado natural sem deformação permanente, somente se as tensões induzidas, em virtude do carregamento dinâmico provocado pela vibração do sistema, estiverem compreendidas dentro do limite elástico de resistência do mesmo. Caso contrário, o meio experimentará deformações permanentes, ocasionado muitas vezes danos estruturais irreversíveis em obras civis e maciços rochosos.

## 2.4.2 Tipos de ondas geradas nas detonações

As vibrações geradas em um terreno hipotético, considerado homogêneo e isotrópico, como resposta às perturbações provenientes das operações de desmonte de rochas com explosivos, são transmitidas por meio de ondas sísmicas, cuja frente de onda se desloca radialmente partindo do ponto de detonação da carga. Nessa conjuntura, o processo de atenuação das ondas se daria somente pelo efeito do propagação esférica da mesma, mostrado na figura 6.

Porém, em situações reais os meios de propagação das ondas de choque geradas nas detonações é heterogêneo e anisotrópico, o que torna ainda mais complexo a quantificação dos fatores de atenuação e amplificação da energia transportada.

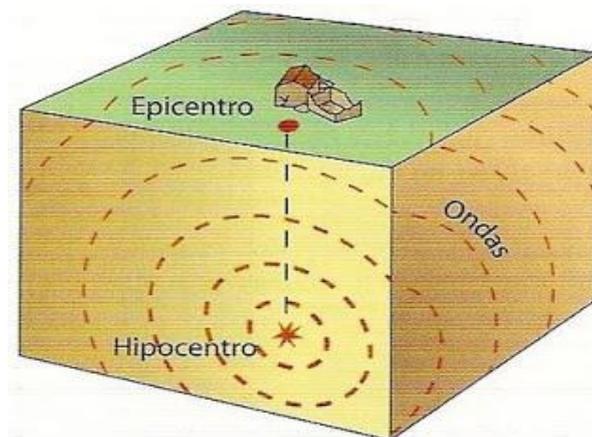


Figura 6 – Propagação esférica de ondas sísmicas. Para entender a terra. 6ª edição.

As ondas sísmicas geradas são então classificadas em dois grupos principais: ondas de volume ou internas, e ondas de superfície (JIMENO *et al.* 1995). As ondas de volume, também classificadas como ondas internas são subdivididas em dois grupos, ondas primárias, de compressão, ou simplesmente ondas P, e ondas secundárias, transversais ou cisalhantes, comumente chamadas de ondas S. As ondas que se propagam majoritariamente na superfície do meio, são também subdivididas em dois tipos principais, as ondas *Love* e ondas *Rayleigh*.

As ondas P, também designadas como primárias ou de compressão, são ondas de alta velocidade, sendo as primeiras a chegar ao ponto de observação, fato que justifica sua nomenclatura. O processo de propagação das ondas primárias consiste de uma compressão seguida de uma distensão com amplitudes e períodos baixos, podendo essa, se propagar em meios sólidos, líquidos e gasosos. As deformações impostas ao meio pela propagação de uma

onda primária são puramente volumétricas, ou seja, o meio exposto a propagação da onda experimenta uma alteração de volume e não de forma como resposta a perturbação produzida pela onda. A figura 7 ilustra o mecanismo de propagação de ondas primárias.

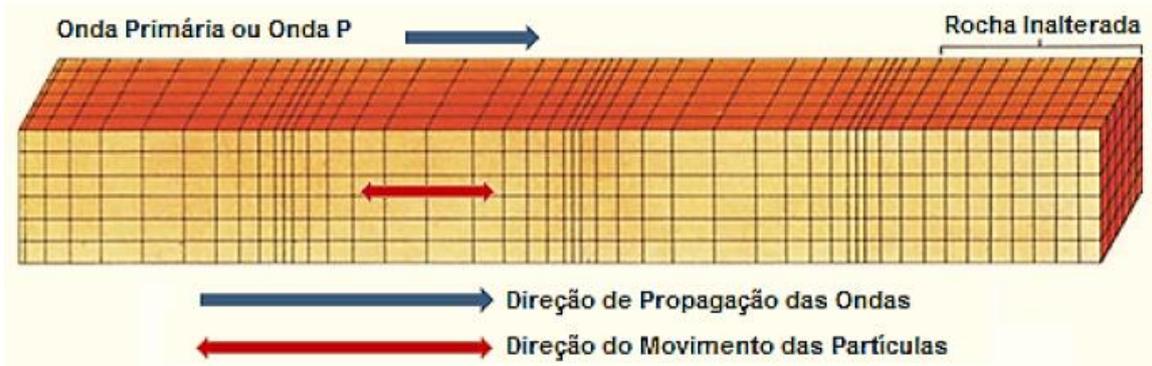


Figura 7 - Modelo de deformação do terreno produzido pela propagação de onda Primária (P). (Adaptado de Andrade 2012).

As ondas Primárias, constituintes do grupo de ondas volumétricas, se propagam em todas as direções do meio. A velocidade de propagação de uma onda primária pode chegar a 5.000 m/s no granito, podendo em um dado meio genérico ser estimada utilizando-se os parâmetros de resistência do meio. A equação (1), como demonstrado por Persson *et al.* (1994) é adotada para cálculo da velocidade de propagação de uma onda primária:

$$\mu = \sqrt{\frac{Ex(1 - \nu)}{\rho x(1 - 2\nu)x(1 + \nu)}} \quad (1)$$

Onde:

$\mu$  = Velocidade de propagação de ondas primárias (m/s);

$E$  = Módulo de Young da rocha (Pa);

$\rho$  = Densidade da rocha (kg/m<sup>3</sup>);

$\nu$  = Coeficiente de Poisson.

As ondas secundárias, transversais ou ainda, ondas S, assim como as ondas primárias, pertencem a classe de ondas volumétricas ou internas. As ondas secundárias apresentam como característica marcante, a propriedade de induzir às partículas constituintes do meio um movimento de vibração transversal a direção de propagação da onda.

Em decorrência da propagação de ondas secundárias, o meio no qual a onda se propaga, é submetido a uma série de esforços cisalhantes, apreciando mecanismos de deformação volumétrica, fato este que confina a propagação de ondas secundária somente em meios no estado sólido, uma vez que os fluidos não suportam forças de cisalhamento.

A figura 8 mostra os esforços induzidos ao meio em virtude da propagação de uma onda secundária, sua velocidade de propagação é aproximadamente de 60% daquela das ondas P.

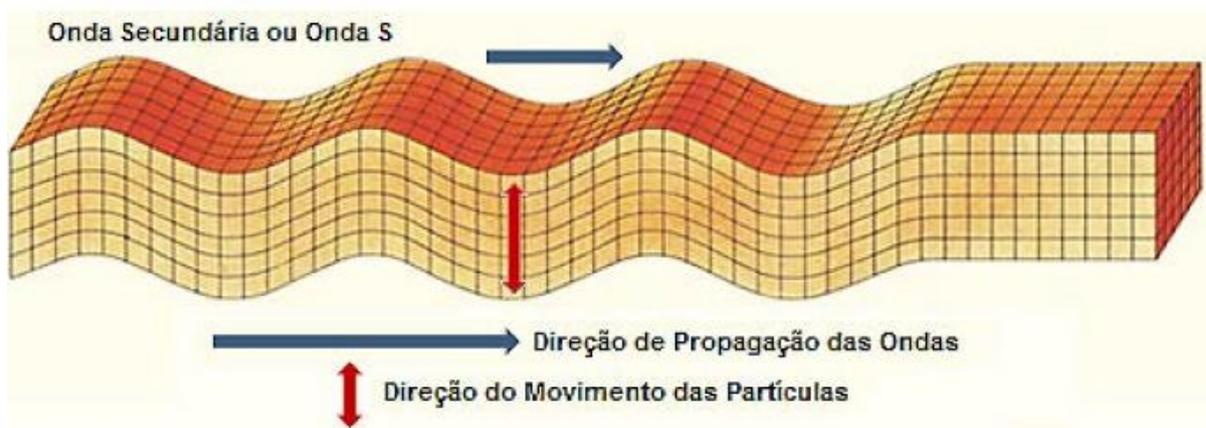


Figura 8 - Deformação produzida no terreno pela propagação de onda Secundárias (S). (Adaptado de Andrade 2012).

O movimento das partículas submetidas a um estado de vibração decorrente da propagação de ondas S, pode apresentar componentes normal e vertical ao plano de propagação da onda, sendo usual a decomposição do vetor velocidade em duas componentes, uma inscrita no plano vertical de propagação (SV) e a outra, normal ao referido plano (SH), assim como ilustrado na figura 9.

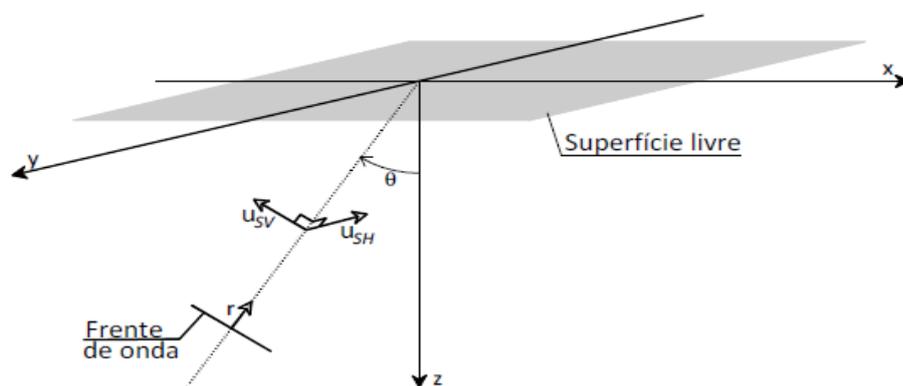


Figura 9 - Componentes do deslocamento induzido pela propagação de ondas secundárias. (Costa 2011).

As ondas S, possuem velocidades de propagação entre 2.000 e 5.000 m/s, e tal como nas ondas primárias, Persson *et al.* (1994) propõe que a velocidade de propagação de ondas secundárias em um meio genérico, dado em (m/s) pode ser estimada através de parâmetros geomecânico da rocha, com a aplicação da equação (2).

$$V_s = \sqrt{\frac{E}{2 \times \rho \times (1 + \nu)}} \quad (2)$$

Além das ondas volumétricas, as ondas superficiais também merecem atenção quando da análise do fenômeno de propagação de ondas sísmicas. Segundo Jimeno (2003) as ondas de superfície são produzidas a partir de ondas longitudinais e transversais nas proximidades da superfície do terreno. Essas ondas se propagam comumente em profundidades próximas ao seu comprimento de onda, e possuem menores velocidades de propagação quando comparadas as ondas internas ou de volume.

Em geral as velocidades das ondas de superfície atingem 60 % da velocidade das ondas primárias, apresentam como característica notável as baixas frequências de propagação, porém, estimativas apontam que as ondas de superfície transportam de 70 a 80 % da energia produzida nas vibrações.

As ondas de superfície são comumente representadas pelas ondas *Rayleigh* ou ondas R, e *Love* ou ondas L. As ondas Love possuem como característica a velocidade de propagação levemente superior se comparada a velocidade de ondas R. Essas ondas induzem as partículas do meio esforços de torção, provocando distorções momentâneas na superfície de propagação, (Figura 10).

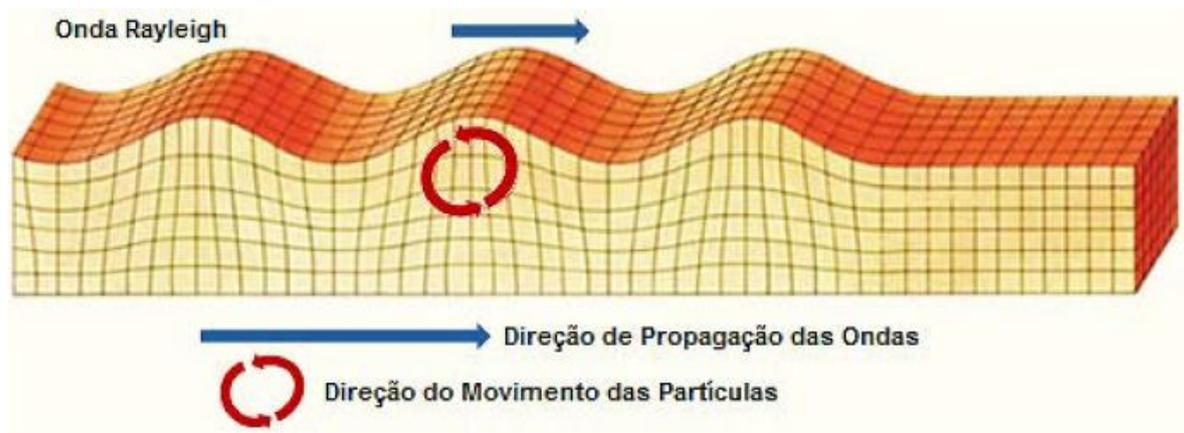


Figura 10- Deformação do terreno pelo efeito da propagação de uma onda Rayleigh. (Adaptado de Andrade 2012).

As ondas R geralmente se propagam em velocidades ligeiramente inferiores as velocidades de propagação de ondas S, transportando maior parte da energia de vibração, a baixas frequências.

A velocidade de propagação pode ser estimada através da equação (3) proposta por Persson (1994).

$$V_r = \frac{0,86 + 1,14\nu}{1 + \nu} \quad (3)$$

Onde  $V_r$  representa velocidade de propagação de ondas superficiais do tipo *Rayleigh* (m/s), dado em (m/s). Segundo Andrade (2012) as ondas *Love*, também constituintes do grupo de ondas superficiais, apresentam como característica principal a promoção de esforços causadores de cortes horizontais na superfície do terreno, sendo o fenômeno de reflexão interna total nas camadas do terreno, o principal responsável pela concentração da energia da onda na superfície, figura 11.

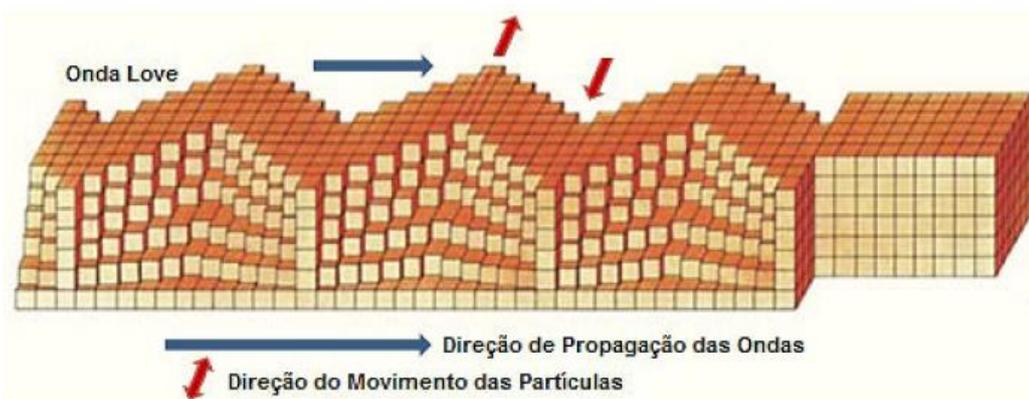


Figura 11 - Deformação do terreno pelo efeito da propagação de uma onda Love. (Adaptado de Andrade 2012).

## 2.5 Estimativa de danos provocados pelas vibrações

A estimativa dos efeitos provocados em maciços rochosos e estruturas civis, em virtude das operações de desmonte de rochas com explosivos, tem se mostrado uma tarefa complexa, tendo em vista que os modelos teóricos de estimativa de velocidade de pico de partícula muitas vezes não apresentam correlações satisfatórias com resultados de campo. Um aprofundamento no entendimento dos mecanismos de propagação, atenuação e transferência de energia de ondas mecânicas, em diversos meios distintos, é de fundamental importância para a concepção de leis e modelos de estimativa de velocidade de pico de partícula confiáveis.

Segundo Tejada Cervantes (2011), a avaliação do potencial de dano em estruturas civis, decorrentes dos esforços a que estas são submetidas quando situadas nas adjacências de um

desmonte de rochas com explosivos, baseia-se majoritariamente na análise dos valores de vibração experimentados pelo meio, quantificados através da determinação da velocidade de pico da partícula ou *Peak Particle Velocity* (PPV) normalmente medido em (mm/s), a análise da aceleração e deslocamentos das partículas, além de medições dos níveis de frequência associados as ondas, também são usualmente utilizados na estimativa e avaliação de danos estruturais em decorrência das operações de desmonte de rochas.

O estabelecimento dos níveis aceitáveis de vibração do solo e estruturas civis é realizado através da aplicação de leis específicas para este fim, observa-se neste contexto, a existência de uma grande variabilidade nas mesmas, uma vez que a maioria dos países têm tratamentos específicos com esta finalidade. Estas normas são elaboradas com fundamentos em pesquisas que relacionam o pico da velocidade de vibração, e as respostas estruturais observadas, em faixas específicas de frequências de vibração.

No Brasil a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) estabeleceu normas, válidas a partir de 31/10/2005, (ABNT NBR 9653) para reduzir os riscos inerentes ao desmonte de rochas com uso de explosivos em minerações. Os parâmetros aceitáveis de vibrações são baseados na análise da velocidade de pico da partícula e no campo de frequências de vibração associados a estas.

A velocidade de pico da partícula é definida, segundo a NBR 9653:2005, como o máximo valor instantâneo da velocidade de uma partícula em um ponto durante um determinado intervalo de tempo, considerado como sendo o maior valor dentre os valores de pico das componentes de velocidade de vibração da partícula para o mesmo intervalo de tempo.

Além da velocidade de pico da partícula, a norma supracitada ainda faz referência a velocidade de vibração resultante da partícula, como a onda de tensão resultante do desmonte de rochas que se propaga em todas as direções. Essa apresenta três componentes do vetor velocidade, sendo a vibração resultante obtida pela soma vetorial das três maiores componentes ortogonais simultâneas de velocidade de vibração de partícula, considerado ao longo de um determinado intervalo de tempo, podendo ser determinada pela equação (4).

$$V = \sqrt{(Vl)^2 + (Vt)^2 + (Vv)^2} \quad (4)$$

Onde:

V = Velocidade resultante de vibração da partícula (mm/s);

Vl = Velocidade de vibração da partícula na direção longitudinal (mm/s);

Vt = Velocidade de vibração da partícula na direção transversal (mm/s);

Vv = Velocidade de vibração da partícula na direção vertical (mm/s);

A NBR 9653:2005, ainda considera extremamente relevante conjugar a análise da velocidade de pico da partícula com as faixas de frequência de propagação das ondas, tendo em vista que estruturas situadas no campo afastado da detonação experimentam ondas de baixa frequência de vibração, representam, de forma geral, elevado risco a estruturas, devido ao fenômeno de ressonância, uma vez que a frequência natural de estruturas se encontra geralmente em valores abaixo de 10 Hz.

A figura 12 mostra que os valores de PPV (*Peak Particule Velocity*), recomendados pela NBR 9653:2005, apresentam uma estreita relação com a faixa de frequência de vibração observada. Notoriamente, valores mais elevados de velocidade de pico da partícula são permitidos quando associados a frequências mais elevadas, em função do fenômeno de ressonância.

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

Figura 12 - Limites de Velocidade de Pico da Partícula permitidos para cada faixa de frequência. (NBR 9653:2005, ABNT).

A figura 13, apresenta a relação entre as velocidades de vibração das partículas e as frequências de vibração observadas, destacando a progressão linear das velocidades em faixas estritas de frequências de vibração, segundo a NBR 9653:2005.

Ressalta-se que essa norma não faz referência aos procedimentos e recomendações normativas referentes a prática de desmonte de rochas com o uso de explosivos em áreas de ocorrência de cavidades naturais subterrâneas. Esse aspecto é de extrema relevância na indústria mineral, uma vez que práticas e procedimentos aplicados quando da estimativa de valores de velocidade de

pico de partícula em desmontes próximos a estruturas civis, podem não refletir o comportamento de cavidades naturais subterrâneas quando exigidas por esforços de origem semelhante.

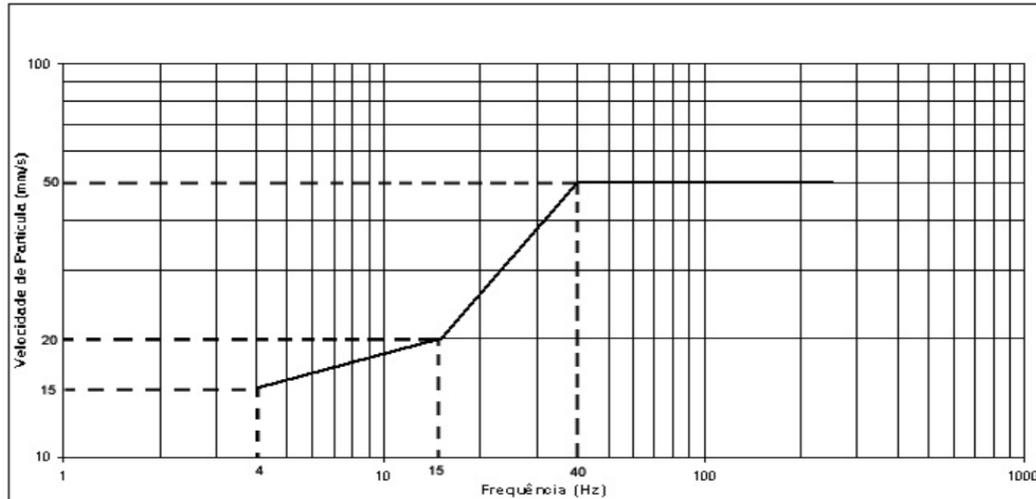


Figura 13 - velocidade de Pico da Partícula x frequência de vibração. (NBR 9653:2005, ABNT).

### 2.5.1 Estimativa de danos em maciços rochosos associados a vibrações

A resposta de maciços rochosos quando submetidos aos esforços gerados por vibrações ainda não é completamente entendida. Inúmeras análises de resistência ao carregamento dinâmico, pautadas no critério de velocidade de pico da partícula têm sido realizadas com intuito de se estabelecer padrões aceitáveis de vibração de rochas e solos, sobretudo em taludes de mineração e túneis. Segundo Tejada Cervantes (2011) estudos de estimativa de danos em taludes de mineração, têm sido fundamentados na determinação da velocidade de pico da partícula associada a análise da velocidade de propagação de ondas sísmicas no meio rochoso, constituindo assim uma alternativa prática para a estimativa de danos induzidos por vibrações em minerações a céu aberto.

A determinação de índices críticos de velocidade de pico da partícula em maciços rochosos, a partir dos quais se observam danos estruturais, sejam estes manifestados através de dilatação de fraturas pré-existentes, ou mesmo colapso estrutural, é de difícil determinação, visto que as interações entre as condições geomecânicas e estruturais do maciço, e do desmonte de rochas com explosivos ainda não são completamente entendidas.

Em 1997 a ASP Blastronics (1997) com a utilização de ferramentas geofísicas, estabeleceu uma série de valores padrões para a estimativa de danos em taludes com relevada homogeneidade litológica com apenas três sistemas de juntas, os resultados obtidos são apresentados na tabela 2. Observa-se que os valores apresentados na tabela 2 foram obtidos em condições muito específicas, tendo portanto validade como dados de orientação, porém não refletem com grande confiabilidade resultados observados em campo, quando aplicados a maciços rochosos mais complexos.

*Tabela 2 - Relação proposta por ASP Blastronics (1997) para Velocidade de pico da partícula associada ao dano do maciço. (Tejada Cervantes 2011).*

<b>DANO</b>	<b>Vpp (mm/s)</b>
Sem perigo na rocha	< 250
Lasqueamento por tração	250 - 650
Rupturas e fissuras	650 – 2.500
Ruptura de talude	> 2.500

A quantificação de valores críticos de velocidade de pico de partícula para maciços rochosos, principalmente taludes de mineração, é uma tarefa complexa, visto que estruturas geológicas apresentam como característica, elevada heterogeneidade litológica e anisotropia, além de descontinuidades como juntas, falhas, trincas, o que faz com que a resposta aos esforços dinâmicos seja de difícil estimativa.

Hoek & Brown (1981) apresentaram uma proposta de correlação entre o dano observado no maciço rochoso, e os valores de velocidade de pico de vibração são apresentados na tabela 3. Observa-se que os valores propostos apresentam elevada semelhança quando comparados com os dados da tabela 2, valores de vibração menores que 130 mm/s seriam incapazes de provocar danos em maciços rochosos.

*Tabela 3 - Relação proposta por Hoek & Brown em 1981, para Velocidade de pico da partícula associada ao dano do maciço. (Tejada Cervantes 2011).*

<b>DANO</b>	<b>Vpp (mm/s)</b>
Fissura na rocha	2500
Início da fissura	650
Queda de blocos	300
Dano menor	130

A tabela 4 apresenta a estimativa de danos observados em maciços rochosos em virtude de vibrações segundo a *Society for Mining, Metallurgy & Exploration Inc* (SME). Destacam-se os reduzidos valores de velocidade de pico da partícula capazes de produzir queda de blocos, de acordo com os autores.

*Tabela 4 - Relação proposta por SME em 1992, para Velocidade de pico da partícula associada ao dano do maciço. (Tejada Cervantes 2011).*

<b>DANO</b>	<b>Vpp (mm/s)</b>
Queda de blocos	5 - 100
Queda de blocos persistentes	130 - 380
Danos em rochas pouco resistentes	>600
Dano em rochas resistentes	> 2.500

A tabela 5 mostra a relação entre velocidade de pico de partícula e danos em escavações subterrâneas proposta por Jeong e Singh (2001).

*Tabela 5 - Relação entre velocidade de pico de partícula e danos em escavações subterrâneas, Singh(2001).*

<b>DANO</b>	<b>Vpp (mm/s)</b>
Dano pequeno	5 - 400
Dano médio	200 - 700
Dano severo	600 - 2000

Jimeno *et al.* (1995) propõe o estabelecimento de limites críticos de vibração permitidos em maciços rochosos, associando valores de velocidade de pico de partícula a características geomecânicas da rocha, os resultados são apresentados na tabela 6.

*Tabela 6 - Relação entre velocidade de pico de partícula e danos ao maciço rochoso, proposto por Jimeno et al(1995).*

<b>TIPO DE ROCHA</b>	<b>PRESEÇA DE JUNTAS</b>	<b>Vpp (mm/s)</b>
Pouco resistente	Poucas juntas	400
Medianamente resistente	Poucas juntas	700 – 800
Muito resistente	Muitas juntas	1000

Por fim, Adhikari *et al.* (1994) propõe uma análise do dano induzido ao maciço rochoso relacionando os valores de velocidade de pico de partícula em mm/s ao *Rock Mass Rating* (RMR) do maciço rochoso. Os autores dividiram a análise em duas classes distintas de qualidade do maciço, sendo estas: rochas fortes (RMR = 60) e rochas relativamente fracas (RMR = 38). Os resultados desta análise são apresentados na tabela 7.

Tabela 7 - Relação de velocidade de pico de partícula e danos ao maciço rochoso proposto por Adhikari et al (1994).

Tipos de danos	Velocidade de pico de partícula (mm/s)	
	RMR = 60	RMR = 38
Sem danos	< 153	< 52
Abertura de juntas	153 – 217	52 – 195
Queda de blocos	217 – 367	195 – 297
Rupturas	367 – 604	297 – 557
Dano excessivo	> 604	> 557

Diante do exposto, conclui-se que a determinação de valores limite de velocidade de pico de partícula, a partir do qual maciços rochosos começam a apresentar danos estruturais é uma tarefa complexa, tendo em vista que diferentemente da avaliação de danos em estruturas civis, quando se considera estruturas geológicas inúmeras variáveis intrínsecas ao meio exercem influência significativa nos índices de resistências aos esforços dinâmicos provocados pelas vibrações.

### 2.5.2 Equações prognósticas de níveis críticos de vibração em maciços rochosos

Segundo Persson *et al.* (1994), o desmonte de rochas com explosivos produz ondas de choque que se propagam nas adjacências do ponto de detonação. Essa ondas transportam uma quantidade de energia que é proporcional aos parâmetros do plano de fogo. Observa-se que a amplitude e a energia da onda de choque experimentam um decréscimo de intensidade com o aumento da distância do ponto do desmonte de rochas.

Ao se propagar em diferentes meios com impedâncias distintas, parte da energia transportada pela onda é transmitida ao meio e parte refletida. E, a impedância de um meio a passagem de uma onda de choque, ou impedância acústica, pode ser definida como a resistência ou dificuldade imposta pelo meio à passagem de ondas sonoras, sendo esta diretamente proporcional a densidade do meio no qual a onda se propaga, e a velocidade de propagação de ondas de choque no mesmo.

A energia transferida ao meio pela onda de choque impõe ao mesmo um estado de tensão dinâmica ( $\sigma$ ), que é relacionado com a velocidade de pico da partícula ( $v$ ), velocidade de propagação de ondas primárias ( $\mu$ ) e densidade do meio ( $\rho$ ) por meio da equação (5) (PEARSON *et al.*, 1994).

$$\sigma = \rho \times \mu \times v \quad (5)$$

O maciço rochoso experimentará um dano crítico se a tensão dinâmica induzida pela onda de choque superar a resistência a esforços dinâmicos do mesmo. A tensão induzida ao meio por ocasião da propagação da onda de choque pode ser estimada como a razão entre a velocidade de pico da partícula e a velocidade de propagação de ondas primárias no meio em questão, observando que quanto maior a velocidade de pico da partícula for frente a velocidade de propagação de ondas primárias, maior será a tensão dinâmica induzida ao meio (PEARSON *et al.*, 1994).

Ainda segundo Persson, o coeficiente de dilatação ( $\varepsilon$ ) do maciço rochoso submetido a esforços vibracionais é fortemente influenciado pela velocidade de pico da partícula ( $V_p$ ), e pela velocidade de propagação de ondas primárias ( $\mu$ ), podendo este ser estimado pela equação (6).

$$\varepsilon = \frac{V_p}{\mu} \quad (6)$$

Persson *et al.* (1994), propôs uma correlação entre parâmetros geomecânicos do maciço rochoso e a velocidade de propagação de ondas primárias a fim de se determinar um valor de velocidade de pico da partícula crítico, a partir do qual a rocha experimentaria dano estrutural irreversível através do rompimento por tração. Segundo o autor a máxima velocidade de partícula ( $V_c$ ) em mm/s, suportada pela rocha sem prejuízo estrutural, apresenta relação direta com a resistência a tração da rocha e a velocidade de propagação de ondas primárias na mesma ( $\mu$ ) em m/s, sendo inversamente proporcional ao módulo de elasticidade da rocha ( $E$ ) em (GPa), o que pode ser expresso pela equação (7).

$$V_c = \frac{\mu \times \sigma}{E} \quad (7)$$

A equação (7) é mundialmente consagrada em trabalhos de avaliações de danos causados por desmonte de rochas em escavações subterrâneas. A literatura concentra diversas publicações atestando a confiabilidade do método de Holmberg – Persson como é chamado. Os valores obtidos usualmente apresentam-se elevados uma vez que a análise é pautada em parâmetros de resistência obtidos em ensaios de rocha intacta.

Silva 2004, propôs a adequação da equação de determinação da velocidade crítica de vibração de partícula. Segundo o autor fraturas preexistentes no maciço rochosos podem se propagar e dilatar sobre a influência de vibrações de menor intensidade, nesse caso seria interessante a determinação da velocidade de pico da partícula mínima, acima da qual o processo descrito acima ocorre.

A velocidade de pico da partícula mínima ( $V_{mim}$ ) apresenta relação direta com a tensão principal maior na ruptura ( $\sigma$ ) em Pa, sendo inversamente proporcional a velocidade de propagação de ondas primárias no maciço ( $\mu$ ) em m/s, e a densidade ( $\rho$ ) em  $g/cm^3$  do mesmo, segunda a equação (8).

$$V_{mim} = \frac{0,021\sigma}{\mu \times \rho} \quad (8)$$

Os valores de velocidade de pico da partícula decorrentes da aplicação da equação (8) são fruto de uma análise mais conservadora, uma vez que valores relativamente baixos podem provocar danos estruturais no maciço rochoso.

Segundo Jimeno *et al.* (1995), o maciço rochoso reage majoritariamente de duas formas quando submetido a esforços solicitantes provocados por ondas de choque. As vibrações podem afetar os parâmetros de resistência do mesmo, ou caso estas sejam de elevada magnitude, podem provocar o colapso das estruturas. O autor propõe que a estimativa da velocidade crítica de vibração ( $V_c$ ), a partir da qual danos estruturais podem ser ocasionados, seja calculado com base na resistência a tração do maciço rochoso ( $R_t$ ) em MPa, densidade do mesmo ( $\rho$ )  $kg/cm^3$ , e velocidade de propagação de ondas primárias ( $\mu$ ) em mm/s, conforme a equação (9).

$$V_c = \frac{R_t}{\rho \times \mu} \quad (9)$$

Entretanto, a equação (9) apresenta características altamente conservadoras, uma vez que considera como valor crítico de vibração, o valor mínimo de velocidade de pico de partícula capaz de provocar pequenos danos ao maciço rochoso, como a dilatação de juntas e fraturas pré-existentes.

### 2.5.3 Equações prognósticas da atenuação de vibrações

A metodologia de avaliação do dano induzido a estruturas, decorrentes dos esforços provocados por vibrações, analisando valores de velocidade de pico de partícula é amplamente difundida. A determinação de índices críticos a partir dos quais a integridade física das estruturas é ameaçada, muitas vezes é realizada de forma experimental e os resultados obtidos subsidiam o processo de concepção de equações prognósticas, capazes de representar com aceitável grau de confiabilidade, o padrão de atenuação das ondas sísmicas em pontos distantes do centro de detonação.

A determinação de leis e equações prognósticas de atenuação e propagação de ondas sísmicas, em diferentes meios constitui-se de uma ferramenta imprescindível para o estudo e o controle de vibrações em maciços. São conhecidos uma gama muito variada de métodos de estimativa usados na construção de equações de atenuação, em sua grande maioria apresentam procedimentos relativamente simples e de grande utilidade na prevenção de danos estruturais decorrente de vibrações (JIMENO *et al.* 1995).

Diversos parâmetros exercem influência nos valores de velocidade de pico de partícula do solo provocados pelo desmonte de rochas com explosivos. Alguns parâmetros podem ser controlados, como a carga máxima por espera, a razão de carregamento, o tipo de explosivos e tempo de retardo, além de variáveis geométricas do plano de fogo. Porém, características geológicas e geomecânicas do meio, têm grande influência nos valores de velocidade de pico de partícula, e são considerados variáveis de difícil controle.

Jimeno (2003) atribui a Morris (1950) a responsabilidade pelo desenvolvimento de uma das primeiras equações de estimativa de atenuação de vibrações no terreno baseados na amplitude de vibração da partícula, correlacionando o deslocamento experimentado pela partícula com os valores de distância do centro de detonação e a carga máxima detonada, através da equação (10).

$$A = k x \frac{\sqrt{Q}}{D} \quad (10)$$

Onde:

A = Amplitude de deslocamento vertical da partícula (mm);

K = Constante intrínseca ao meio, variando de 0,57 para rochas duras até 3,4 para solos inconsolidados;

Q = Carga máxima por espera detonada (Kg);

D = Distância do desmonte ao ponto de registro (m).

Quando o registro é efetuado em pontos situados a grandes distâncias do desmonte de rochas, os efeitos de superposição de ondas e inadequações no plano de fogo são pronunciados, podendo aumentar em 25 % os valores de deslocamento da partícula, principalmente em função do comportamento heterogêneo e isotrópico do meio. Lima (2000) sugeriu a utilização de um fator de correção para a aplicação da equação anterior, na tentativa de minimizar as distorções provocadas pelos efeitos supracitados, a equação (11) exhibe a utilização do fator de correção proposto.

$$A = 1,25 \times k \times \frac{\sqrt{Q}}{D} \quad (11)$$

Apesar da estimativa de vibração utilizando a amplitude de deslocamento máxima da partícula proposta por Morris (1950) apresentar resultados satisfatórios no campo teórico, diversos autores sugerem alterações na equação exposta no intuito de melhor adapta-la a condições específicas de uso.

Merece destaque a relação proposta por Langefors, Kihlstrom e Westerberg em 1967 que, em medições em campo, verificaram que a velocidade de pico da partícula era proporcional ao produto do deslocamento máximo e a frequência.

Com base nos resultados foi proposto a lei de atenuação relacionando a velocidade de pico da partícula com a distância e a carga máxima por espera utilizada no desmonte de rochas com explosivos, através da aplicação da equação (12).

$$Vp = k \times \left( \frac{Q}{D^{1,5}} \right)^{0,5} \quad (12)$$

Diversos autores se dedicaram a estudar e estabelecer leis de propagação que apresentassem alto grau de confiabilidade. Os variados resultados obtidos consagraram equações que relacionam a velocidade de pico da partícula com a carga máxima por espera e a distância do

desmorte, através do uso de constantes empíricas que refletem características do meio de propagação da onda, bem como de parâmetros do plano de fogo.

Segundo Silva (2004) a análise da velocidade de pico de partícula em pontos situados a grandes distâncias do desmorte de rochas, pode ser efetuada com elevado grau de confiabilidade através do uso da equação (13).

$$Vp = k \times \left( \frac{D}{Q^{\frac{1}{\alpha}}} \right)^{-\beta} \quad (13)$$

Onde

$Vpp$  = Velocidade da partícula (mm/s);

$D$  = Distância ao ponto de medição (m);

$Q$  = Carga máxima por espera (kg);

$k, \alpha, \beta$  = Constantes empíricas.

A equação (13) pode ainda ser adaptada as condições de carregamento do furo, a partir de relações geométricas das cargas usadas, bem como a critérios específicos do projeto do plano de fogo, via ajuste das constantes da equação.

A figura 14 apresenta as mais consagradas equações de predição de velocidade de pico de partícula, utilizadas em diversas partes do mundo, Onde  $v$  é a velocidade de pico da partícula (mm/s),  $Q_{Max}$  é a carga máxima por espera (kg),  $R$  é a distância ao ponto de monitoramento (m), e  $K$  e  $B$  são constantes empíricas determinadas através da análise de regressões lineares.

<b>USBM (Durvall and Fogelson, 1962)</b>	$V = K \times \left( \frac{D}{\sqrt{Q}} \right)^{-B}$
<b>Ambraseys-Hendron (1968)</b>	$V = K \times \left( \frac{D}{\sqrt{Q^{\frac{1}{3}}}} \right)^{-B}$
<b>Langefors-Kihlstrom (1978)</b>	$V = K \times \left( \sqrt{\frac{Q}{R^{\frac{2}{3}}}} \right)^B$
<b>Indian Standard Predictor (1973)</b>	$V = K \times \left( \frac{Q}{R^{\frac{2}{3}}} \right)^B$

Figura 14- Principais equações de estimativa de velocidades de pico de partícula. Adaptado de Silva (2004).

A análise da velocidade de pico de partícula, é comumente realizada através do estudo da correlação entre a velocidade da partícula, e da distância escalonada, termo este que se refere a razão entre a distância ao ponto de medição, e a carga máxima por espera utilizada. No Brasil a NBR 9653 recomenda o cálculo da distância escalonada através da equação (14).

$$DE = D/\sqrt{Q} \quad (14)$$

Onde:

$DE$  = Distância escalonada (m/ $\sqrt{\text{kg}}$ );

$D$  = Distância ao ponto de medição (m);

$Q$  = Carga máxima por espera (kg).

Observa-se que as mais diversas equações prognósticas de atenuação de vibrações apresentam o mesmo aspecto, utilizando variáveis inerentes ao meio de propagação. Consideram as variáveis de difícil controle, e parâmetros do plano de fogo utilizado, como carga máxima por espera e distância ao ponto de registro.

A partir da adaptação proposta pela legislação brasileira, através da norma NBR 9653, pode-se simplificar a equação de estimativa da velocidade de pico de partícula, relacionando parâmetros referentes ao do plano de fogo, e ao meio de propagação da ondas de choque através da equação (15).

$$Vp = k x \left( \frac{D}{Q^{\frac{1}{2}}} \right)^{-\beta} \quad (15)$$

Observa-se que a equação obtida é idêntica à proposta pelo United States Bureau of Mines (USBM), evidenciando claramente que a mesma foi adotada como referência pela ABNT quando da criação da NBR 9653.

As diversas equações de estimativa de velocidade de pico de partícula apresentadas neste capítulo apresentam uma estrita dependência da qualidade dos trabalhos de aferição de resultados feitos em campo, uma vez que todas elas são elaboradas a partir da construção de uma curva que proporcione o melhor ajuste aos dados analisados.

Nesse sentido, imprecisões na etapa de aferição dos valores registrados nos sismógrafos podem provocar sensíveis distorções na nuvem de dados a ser ajustada, colaborando significativamente

para a diminuição do grau de correlação entre as variáveis, normalmente expresso pelo coeficiente de Pearson da equação.

Observa-se na prática operacional que, quando o banco de dados que vai compor a nuvem de ajuste de pontos a curva de regressão é tomado em um intervalo de distâncias elevadas, e principalmente em ambientes de litologias extremamente heterogêneas e anisotrópicas, o ajuste do modelo dificilmente conduz a altos índices de correlação, uma vez que os pontos citados contribuem de forma significativa para alterar o padrão de propagação e atenuação das ondas de choque geradas no desmonte de rochas com explosivos.

## **2.6 Classificação geomecânica de maciços rochosos**

Um maciço rochoso é altamente heterogêneo, anisotrópico e descontínuo, podendo ser definido como um conjunto de blocos de rocha, justapostos e articulados, sendo estes blocos constituídos por uma matriz rochosa, ou rocha intacta, e delimitado por descontinuidades.

A classificação geomecânica é utilizada para caracterizar o maciço rochoso com base em um conjunto de propriedades identificadas por observação direta e ensaios realizados *in situ*, ou amostras recolhidas através de campanhas de sondagens, tendo como principal objetivo sistematizar um conjunto de elementos geotécnicos de interesse num determinado maciço rochoso.

O maciço rochoso deve ser dividido em regiões específicas, com a finalidade de uniformizar as características de análise. Comumente as fronteiras entre as regiões pré-estabelecidas coincidem com a presença de falhas, diques, zonas de cisalhamento etc. (ZACARIAS, 2003).

O estudo do contorno estrutural dos maciços rochosos se faz imprescindível em projetos de engenharia geotécnica, entender a influência das descontinuidades é de fundamental importância, já que estas estruturas condicionam o comportamento do maciço rochoso especialmente em relação a deformabilidade, resistência estrutural e permeabilidade, exercendo significativa influência na estabilidade do meio rochoso (ABGE, 1998).

Serão apresentados nos itens subsequentes dois dos principais sistemas de classificação geomecânica de maciços rochosos utilizados na engenharia geotécnica, o *Rock Quality Designation* (RQD) e o *Rock Mass Rating* (RMR).

### 2.6.1 Rock Quality Designation (RQD)

O índice de qualidade da rocha, RQD (*Rock Quality Designation*) foi inicialmente proposto por Deere (1967) com o intuito de englobar em um só parâmetro critérios de fraturamento e do estado de alteração da rocha. A concepção do mesmo tinha como objetivo a avaliação da qualidade de rochas ígneas, sendo recomendado elevado cuidado quando da utilização do mesmo na avaliação da qualidade de rochas metamórficas e sedimentares, uma vez que sob circunstâncias distintas da proposta inicialmente, os resultados podem apresentar elevado grau de inexatidão (ZACARIAS,2003).

O RQD tem ampla utilização devido a sua simplicidade de execução e análise, considera-se nesta metodologia o material produto de um furo de sonda, onde são relevantes a fins de análise todos os testemunhos recuperados com comprimento superior a 10 cm.

O somatório total destes testemunhos é então obtido como porcentagem do comprimento total perfurado, refletindo a qualidade da rocha. Cada pedaço individual de testemunho deverá ser medido ao longo da linha central do corpo, para padronização das medidas e dos próprios valores do RQD. Os testemunhos menores que resultam de diaclasamento, descontinuidades bem próximas, e do intemperismo não são considerados (ABGE, 1998).

O valor do índice de qualidade da rocha (RDQ) é então obtido como uma porcentagem, compreendendo intervalos de 0 a 100%. Logo, um elevado RDQ, ou seja, valores próximos a 100% indicam boa qualidade do maciço analisado, quanto ao grau de fraturamento e estado de alteração. A equação (16) resume o procedimento para o cálculo do RDQ.

$$RQD = \frac{\sum Li}{Lt} \times 100 \quad (16)$$

Onde:

$RQD$  = Índice de Qualidade da Rocha;

$L_i$  = Fragmentos do testemunho de sondagem superiores a 10 cm;

$L_t$  = Comprimento total do testemunho em cm.

Segundo a Associação Internacional de Mecânica das Rochas (ISRM) a validação da determinação do RDQ é feita apenas em sondagens com a utilização de duplos barriletes de diâmetro NX (54 mm) ou superiores, segundo (Bieniawski, 1989).

Para diâmetros diferentes do mencionado, é recomendável a adaptação do tamanho das amostras a serem analisadas, nota-se ainda que o RQD é um parâmetro dependente da direção da amostragem, logo, os valores obtidos podem apresentar elevadas discrepâncias com a variação da direção da sondagem. A tabela 8 apresenta a classificação do maciço segundo o seu valor de RQD.

*Tabela 8 - Relação entre RQD (%) e a qualidade do maciço. (Adaptado de Tejada Cervantes 2011).*

RQD (%)	Qualidade do maciço
0 -25	Muito ruim
25-50	Ruim
50-75	Regular
75-90	Bom
90-100	Excelente

Palmstrom (1975) sugere uma correlação aproximada entre o RQD e o número de descontinuidades por metro cúbico presentes no maciço, para o caso onde não seja possível proceder uma campanha de sondagens, podendo ser estimada através da equação (17).

$$RQD = 115 - Jv \quad (17)$$

Onde  $Jv$  é o número total de descontinuidades por metro cúbico do maciço, o parâmetro ainda é definido como medida de densidade de descontinuidade ou grau de fraturamento do maciço rochoso. A figura 15, mostra a relação existente entre o parâmetro  $Jv$  e o tamanho do bloco analisado.

$J_v$	Descrição
< 1	Blocos muito grandes
1 – 3	Blocos grandes
3 – 10	Blocos de tamanhos médios
10 – 30	Blocos pequenos
> 30	Blocos muito pequenos

Figura 15 - Correlação entre o fator  $J_v$  e dimensão de blocos no maciço. (Adaptado de Tejada Cervantes 2011).

Priest e Hudson (1976) com base em medidas de espaçamento das descontinuidades em afloramentos de rocha, propõem uma estimativa do RQD da equação (18).

$$RQD = 100 \times e^{-\frac{0,1}{S}} \times \left( \left( \frac{0,1}{S} \right) + 1 \right) \quad (18)$$

Onde o fator  $S$  representa o espaçamento das descontinuidades observadas em metros, a equação acima foi elaborada através da construção e análise de um histograma de espaçamentos das descontinuidades, tendo a distribuição exponencial negativa (Poisson) como a distribuição de probabilidades que melhor se ajustava a frequência de dados observadas. Segundo Nonato (1994) recomenda se o uso da mesma somente em situações onde o espaçamento médio das descontinuidades seja maior que 0,06 m.

## 2.6.2 Rock Mass Rating (RMR)

O *Rock Mass Rating* (RMR) foi proposto pela primeira vez por Bieniawsk em 1973 em seu artigo “*Engineering Classifications of Jointed Rock Masses*” e posteriormente aprimorada pelo próprio autor, sendo a versão mais atual, publicada em 1989.

O sistema de classificação é baseado na análise de seis parâmetros inerentes ao maciço em estudo, a cada parâmetro um é atribuída uma pontuação, o somatório ponderado dos pontos obtidos na análise, reflete a qualidade da rocha avaliada segundo a metodologia do RMR. Este sistema de classificação permite uma estimativa preliminar de parâmetros de deformação, resistência e capacidade de auto suporte para escavações, a partir da utilização dos seguintes parâmetros:

- Resistência a compressão uniaxial da rocha;
- Espaçamento das descontinuidades;
- “RQD” *Rock Quality Designation*”;
- Condição das descontinuidades (preenchimento, abertura, persistência, etc);
- Condição de água subterrânea;
- Orientação relativa das descontinuidades.

Segundo Tejada Cervantes (2011) o sistema RMR de classificação geotécnica foi desenvolvido inicialmente para a aplicação na avaliação das condições de estabilidade de túneis em obras de engenharia escavados em rochas pouco profundas e pouco fraturadas, posteriormente, a análise e classificação segundo o RMR foi difundida para a verificação da estabilidade de taludes e diversas estruturas subterrâneas e escavações não só de mineração.

O valor máximo alcançável a partir da análise e classificação pelo RMR é 100, e o mínimo 13, segunda a última revisão proposta pela metodologia, os maiores valores refletem a boa qualidade do maciço, ao passo que valores baixos de RMR indicam um maciço com qualidade inferior.

Segundo Hoek & Brown (1980) o sistema RMR não apresenta resultados satisfatórios quando aplicado em maciços rochosos que apresentem condições laterais de ruptura, em função de altas tensões induzidas, expansão ou fluência.

Porém, o sistema tem grande aplicabilidade em trabalhos diversos na engenharia geotécnica, uma vez que concentra em si relativa simplicidade de execução e análise, classificando o maciço ao fim da análise em cinco classes de qualidades. A figura 16 apresenta a classe do maciço a partir da soma total dos pontos no RMR.

<b>CLASSE DO MACIÇO À PARTIR DA SOMA TOTAL DOS PESOS</b>					
<b>Somatória dos Pesos Relativos</b>	100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	< 20
<b>Classes</b>	I	II	III	IV	V
<b>Descrição</b>	Muito bom	Bom	Regular	Ruim	Muito ruim

Figura 16 - Classificação geomecânica do maciço através do RMR.

Os sistemas de classificação apresentados são mundialmente consagrados na engenharia geotécnica.

Nesse estudo aplicou-se na estimativa da velocidade crítica de vibração, o valor limítrofe de velocidade de pico de partícula permitido, a partir do qual a cavidade tem potencial para experimentar danos estruturais pequenos como, dilatação de juntas e fraturas pré-existentes, o que pode ocasionar a perda de coesão entre os blocos formadores do maciço rochoso, e consequente eventuais abatimentos.

## **2.7 Simulação computacional**

A modelagem e análise através da simulação, é o processo de reprodução e experimentação, com a utilização de métodos computacionais, de um sistema físico real. A simulação consiste de uma imitação confiável da operação de um processo real, ou sistema ao longo do tempo. É uma ferramenta valiosa no processo de tomada de decisão, a partir da qual, através da utilização de um modelo que represente um sistema ou processo em análise, inferências acerca do comportamento do mesmo podem ser obtidas (BANKS,1998).

A análise de sistemas reais muitas vezes se torna demasiadamente complexa e onerosa, ou mesmo inviável quando se pretende estudá-lo sob inúmeras condições distintas. As operações de desmonte de rochas com explosivos são um belo exemplo, visto que os custos e os aparatos de segurança exigidos, inviabilizam a execução de um número suficientemente grande de experimentos em campo. Consequentemente, a construção de um banco de dados robusto capaz de fornecer informações preciosas para a tomada de decisão, é tarefa demorada e muitas vezes inviável. Nesse sentido, descrever essa operação através de um modelo que represente com grande fidelidade o sistema real, permite estudá-lo sob diferentes enfoques, aplicando a simulação de sistemas.

Segundo Kelton, Sadowski & Sadowski (2004), simulação é o processo de projetar e criar um modelo computacional de um sistema, ou processo, real ou proposto, com a finalidade de conduzir experimentos numéricos a fim de se obter uma melhor compreensão do comportamento do sistema analisado, ou fenômeno sob uma série de condições específicas.

Através do uso de técnicas de simulação é permitido avaliar resultados extremamente próximos dos que serão encontrados em situações reais, aumento o grau de compreensão do comportamento do sistema modelado. A simulação ainda proporciona a verificação e manipulação das variáveis que compõem o modelo sob análise, o que permite averiguar a sensibilidade e o comportamento do sistema frente essas variações, (SANTOS, 1992).

O processo de simulação pode ser definido pela existência de três etapas chave: a construção do modelo de simulação, a programação computacional do modelo concebido e a sua experimentação e validação.

A concepção do modelo a ser utilizado na análise de simulação é um ponto crítico dentro do processo, uma vez que o mesmo deve representar com elevado grau de confiança, o processo real a ser simulado. Sob uma ótica simplista, o processo de simulação pode ser resumido como a atividade na qual dados de entradas oriundos de amostragens significativas alimentam um modelo matemático, gerando dados de saídas que serão analisados e atuam como subsídios para o processo de tomada de decisão, ilustrado na figura 17.

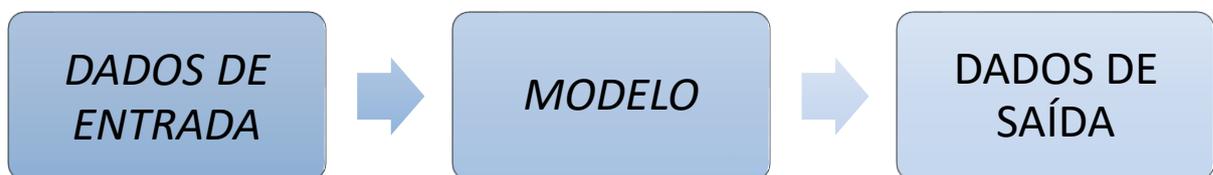


Figura 17- Processo de simulação simplificado.

Segundo Banks *et al.* (1996), o processo de simulação deve seguir uma sequência de passos bem definidos e delimitados, a fim de se conseguir os melhores resultados possíveis. Todas as etapas envolvidas na simulação precisam ser bem desenvolvidas, uma vez que a interdependência entre as mesmas é ponto crucial no projeto simulado.

Ainda segundo o autor, a construção e execução de um projeto de simulação deve ser orientada por etapas básicas, a definição do problema real a ser analisado, objetivos a serem alcançados com a simulação, a amostragem de dados de entrada, e a concepção de um modelo, são passos iniciais dentro da construção de um projeto de simulação. Especialmente a etapa de concepção do modelo representa um fator crítico no processo, existindo variados modelos de simulação, destacando-se os modelos determinísticos, estocástico, estático e dinâmico.

Os modelos determinísticos não contém variáveis aleatórias, portanto, para um conjunto conhecido de dados de entrada será fornecido único conjunto de resultados de saída, revestindo como principal desvantagem, é que no caso de valores médios, não se consegue observar ou considerar o impacto individual que cada valor do dado provoca no sistema, e isto pode ser bastante significativo. Já os modelos estocásticos possuem uma ou mais variáveis aleatórias como entrada, que levam a saídas aleatórias. Dessa forma as saídas da simulação estocástica representam estimativas estatísticas das características reais de um sistema.

Após as etapas iniciais já descritas, o projeto de simulação deve seguir uma nova sequência de passos a fim de se realizar as simulações e análises desejadas. O modelo concebido em etapas anteriores deve ser implementado, verificado e validado, assim o mesmo estará apto à etapa de experimentação, findada esta, os resultados obtidos podem finalmente ser analisados e documentados, subsidiando o processo de tomada de decisão (BANKS *et al.* 1996).

### **2.7.1 O Método de Monte Carlo**

Segundo Fernandes (2005), o Método de Monte Carlo, nome alusivo ao famoso cassino localizado na cidade homônima, nasceu oficialmente na década de quarenta, sob autoria de John Von Neumann e Stanislaw Ulam. As origens do método de simulação são relacionadas a aplicação de uma técnica matemática já conhecida, ao projeto Manhattan, no qual o método foi utilizado em pesquisas acerca do comportamento da difusão aleatória de nêutrons em matérias radioativos durante os trabalhos de desenvolvimento da bomba atômica, na segunda guerra mundial.

O Método de Monte Carlo, é um algoritmo de simulação que consiste de uma técnica estatística com amplo aproveitamento nas pesquisas de previsibilidade de modelos estocásticos, por isso tem elevada aplicabilidade nos mais variados campos da ciência, resolvendo problemas físicos ou matemáticos através da simulação de processos aleatórios.

É característica marcante do método de Monte Carlo a simplicidade da estrutura do algoritmo de geração de números aleatórios, constrói-se um programa para a realização de um evento aleatório que se repete N vezes preservando a independência entre as experiências, sendo a

incerteza estatística associada ao método inversamente proporcional ao número de realizações (TAKEDA, 2006).

No Método de Monte Carlo, os dados amostrais são gerados de forma artificial, empregando para isso um gerador de números aleatórios, e uma função de probabilidade que descreve o comportamento das variáveis de interesse, estas atuam como parâmetros de entrada do modelo (*input*), gerando como resultados um conjunto de observações (*output*) figura(18).

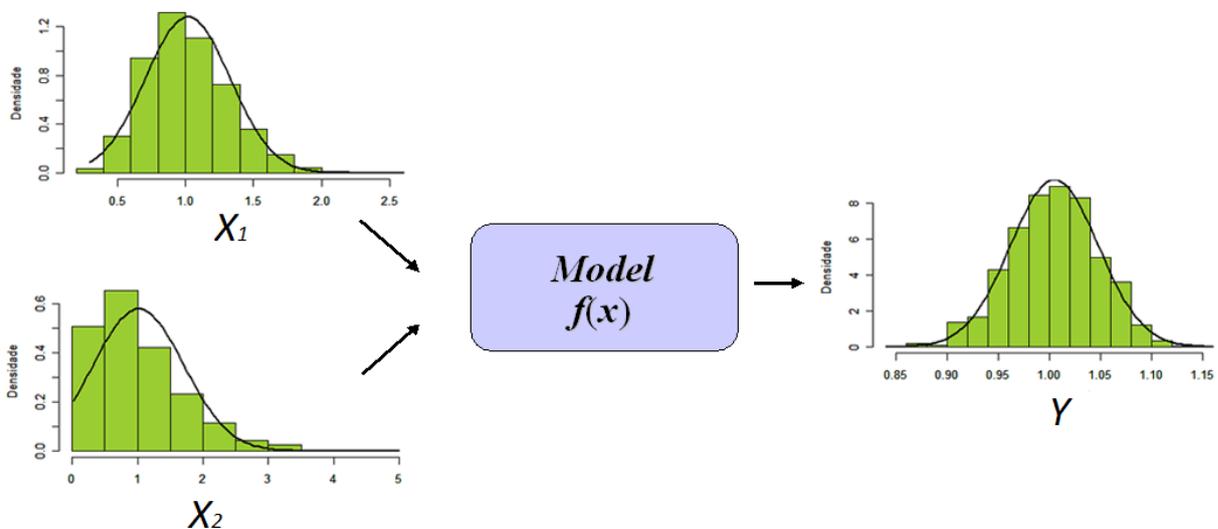


Figura 18 - Um modelo estocástico que usa variáveis de input para gerar variáveis de output. Adaptado de Takeda (2006).

Ainda segundo Takeda (2006), o gerador de números aleatórios é o de maior importância para a aplicação do método, o mesmo deve ser capaz de gerar valores aleatórios independentes e com iguais probabilidades de ocorrência no intervalo de 0 a 1, estando o sucesso da simulação estreitamente relacionado com a escolha do correto gerador de números aleatórios.

A larga utilização do método de Monte Carlo é realizada com o emprego de *softwares* especificamente desenvolvidos com esta finalidade, onde a geração de números aleatórios é feita por meio de algoritmos, o que acaba não conferindo caráter estritamente aleatório aos valores gerados. Em decorrência disso os números gerados são comumente chamados de números pseudo-aleatórios, porém estatisticamente, a comparação entre conjuntos de valores aleatórios e pseudo-aleatórios não apresenta diferenças para o processo (TAHA, 2008).

A simulação de modelos pelo Método de Monte Carlo apresenta relativa simplicidade de aplicação, uma vez que no mesmo, a única exigência é que o sistema ou processo seja modelado

fazendo-se o uso de funções de densidade de distribuição de probabilidades. Conhecidas estas funções o método pode se desenvolver realizando amostragens aleatórias a partir das mesmas. Esse processo prossegue por um número expressivo de vezes, gerando resultados de interesse baseados em informações estatísticas das realizações, como média, desvio padrão, variância, etc.

Com o advento de computadores cada vez mais potentes, as análises através de métodos de simulação foram facilitadas, inclusive a aplicação do Método de Monte Carlo.

### 3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

#### 3.1 Localização

Esse estudo se deu a partir da análise de parte do banco de dados do monitoramento sismográfico e geomecânico de cavidades naturais subterrâneas na província mineral de Serra dos Carajás, mais precisamente no sistema Serra Norte do complexo Carajás, onde a Vale explora e beneficia minério de ferro de altos teores.

A região da Serra dos Carajás está situada no sudeste do estado do Pará no município de Parauapebas, situada a 700 km da capital Belém como apresentado na figura 19.



Figura 19 - Localização de Parauapebas - PA. Adaptado de UFPA.

O acesso ao sistema Serra Norte pode ser por rodovias nacionais até a cidade de Parauapebas, posteriormente, pela estrada Raymundo Mascarenhas até o Complexo Mineral de Carajás, o acesso através do aeroporto de Carajás também é possível.

#### 3.2 Contextualização geológica

Segundo Macambira (2003), a Província Mineral de Carajás está localizada no Cráton Amazônico, mais precisamente na borda SE do mesmo, apresentando como característica marcante a presença de cinco sequencias vulcano-sedimentares arquenanas do Supergrupo Itacaiúnas em seus depósitos minerais, sendo estes os grupos: Salobo, Pojuca, Grão Pará,

Igarapé Bahia e Buritirama (figura 20). A mesma é constituída por embasamento mesoarqueano de seqüências vulcano-sedimentares neoarqueanas em associação de alto grau com complexos máficos e ultramáficos com idades entre 3 e 2.8 Ma. (CPRM,2008).

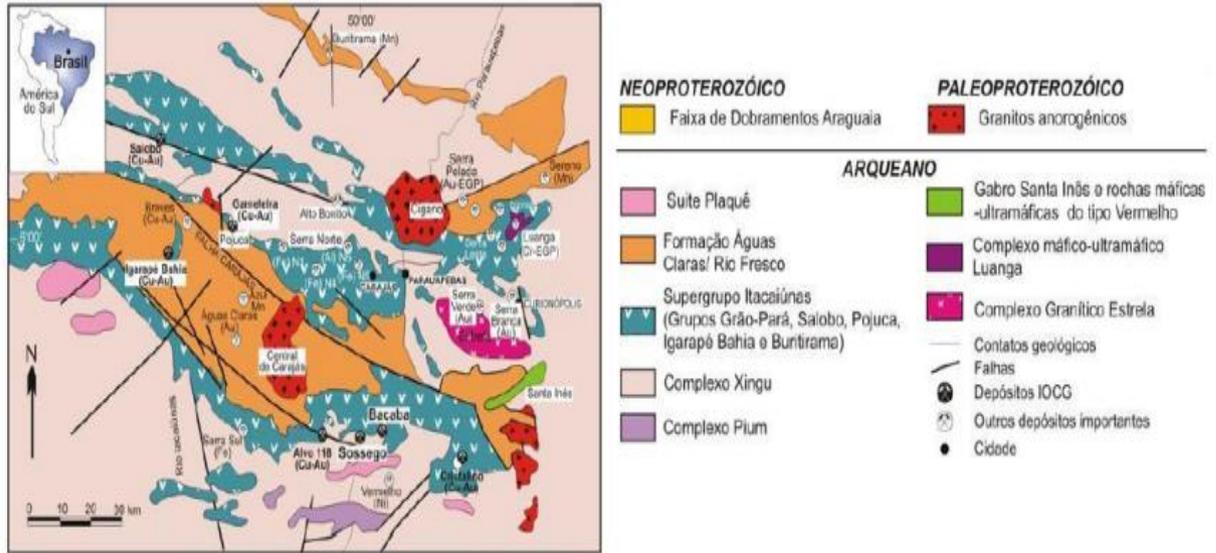


Figura 20 - Mapa geológico simplificado da Província Mineral de Carajás. Dardenne e Schobbenhaus (2001).

A topografia da Província Mineral de Carajás encerra em si aspecto peculiar, apresentando platôs que constituem um grande contraste geomorfológico no sudeste do estado do Pará, com cotas médias de 700 m cercado por áreas adjacentes com cotas na faixa de 350 m, além da presença de encostas abruptas.

O topo dos platôs nos quais se localizam as minas de ferro operadas pela empresa Vale SA, apresenta cobertura laterítica típica, resistente aos processos erosivos e destacando-se pela presença de cavidades naturais subterrâneas.

### 3.3 Sistema serra norte

Segundo Macambira (2003) a formação Carajás se faz presente no sistema Serra Norte através de nove platôs enumerados de um a nove. Os platôs que vão de N1 a N5 ocupam uma faixa extensa na parte central da área de direção E-W, com estimativas de 1 a 3 km de largura, o mesmo se bifurca dando origem ao platô N4WS, como apresentado na figura 21. A Formação Carajás é recoberta discordantemente pela Formação Igarapé Azul entre N1 e N2 e interrompida através de falhas transcorrentes entre N4 e N5.

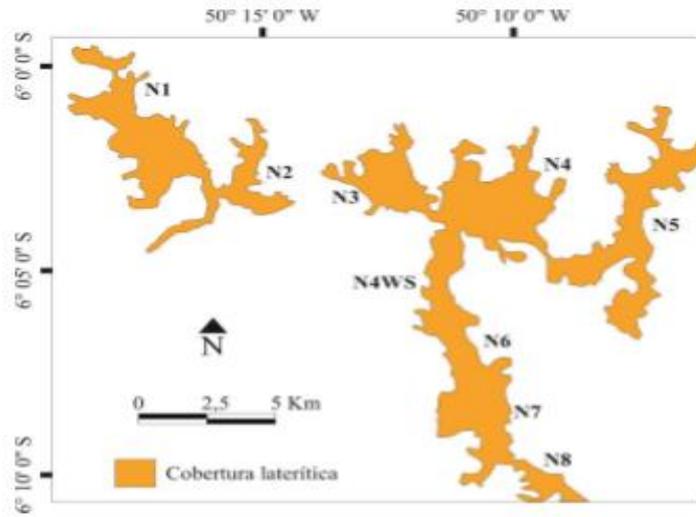


Figura 21 - Distribuição dos corpos de minério de ferro em meio a cobertura laterítica do sistema Serra Norte.

## 4 METODOLOGIA

Nesse estudo é apresentado uma proposta de metodologia de estimativa do raio de proteção, com enfoque na manutenção da integridade física de cavidades naturais subterrâneas, baseado em critérios estocásticos que considerem as especificidades geomecânicas de cada cavidade, bem como os parâmetros de cada plano de fogo utilizado no desmonte de rochas com explosivos.

O ponto inicial deste estudo se deu a partir do levantamento e análise bibliográfica acerca do tema e da área de estudo, foi identificado que o objetivo proposto, de uma nova metodologia de estimativa do raio mínimo de proteção às cavidades naturais subterrâneas, só seria possível se fosse desenvolvido em um primeiro momento, um modelo de estimativa de velocidades de pico de partícula mais confiável, e que oferecesse mais subsídios para a tomada de decisão quando do projeto do plano de fogo, frente aos modelos convencionais utilizados.

Nesse sentido foi elaborado um modelo estocástico de estimativa de velocidade de pico de partícula ( $V_{pp}$ ), onde as variáveis de entrada: carga máxima por espera e distância, alimentariam um modelo de caráter aleatório, no qual, a partir da realização de ciclos de simulação, sendo gerados resultados amplos e também estocásticos, permitindo uma análise mais completa para a tomada de decisão (figura 22).

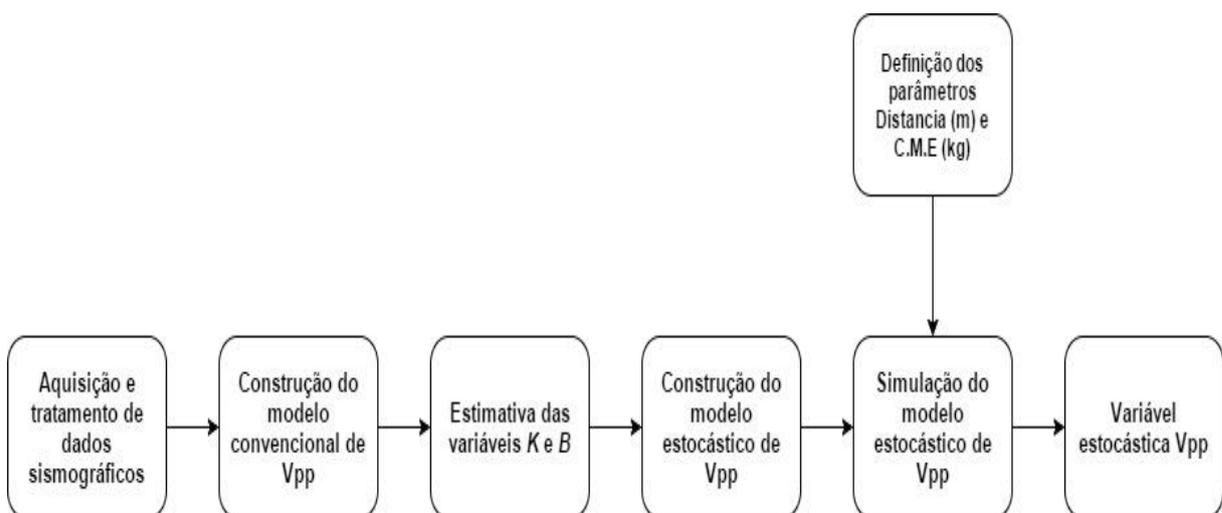


Figura 22 - Fluxograma de elaboração e execução do modelo estocástico de  $V_{pp}$ .

Posteriormente, foi elaborado um modelo de estimativa de níveis críticos de vibração a ser aplicado na cavidade sob análise. Mais uma vez optou-se por elaborar um modelo estocástico semelhante ao elaborado para a estimativa de velocidades de pico de partícula, frente ao maior grau de confiabilidade do mesmo. Nesse modelo as especificidades geomecânicas e físicas de cada cavidade eram consideradas na análise, portanto a máxima vibração permitida foi estabelecida com base na avaliação individual de parâmetros geomecânicos e físicos das mesmas (figura 23).

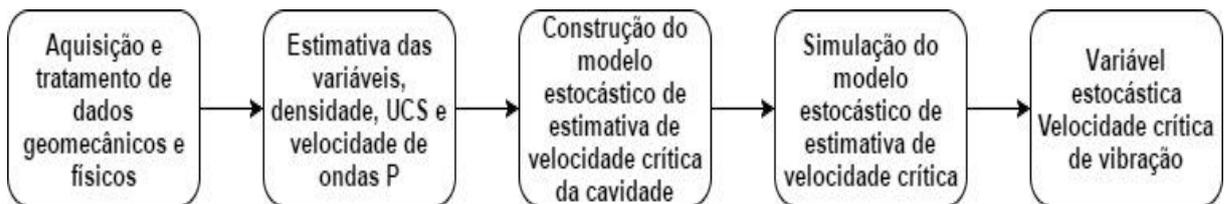


Figura 23 - Fluxograma de elaboração e execução de estimativa de velocidade crítica de vibração.

A estimativa do raio mínimo de proteção sugerida pela metodologia deste trabalho se dá a partir da análise integrada dos modelos estocásticos de estimativa de velocidades de picos de partícula, e estimativa de velocidade crítica de vibração. Os procedimentos citados acima serão descritos detalhadamente nas páginas subsequentes.

#### 4.1 Aquisição e preparação de dados

A Vale S.A, já empreende em cumprimento a legislação ambiental campanhas de monitoramento contínuo de cavidades em diversos projetos, tanto no sistema norte, quanto no sistema sul. Medições sismográficas no interior e no entorno de cavidades previamente selecionadas, localizadas nas adjacências das operações mineiras da empresa, têm sido realizadas com o intuito de estabelecer valores limítrofes de vibrações sismográficas que não causem danos às cavidades, associadas à prática de desmonte de rochas com explosivos. Foram analisados 1.222 registros, entre informações sismográficas, geomecânicas e físicas de cavidades que compõe parte do banco de dados da Vale SA, mais precisamente da região de Serra Norte, minas N4 e N5, no estado do Pará.

Primeiramente os dados foram organizados em planilhas de matrizes analíticas, através da utilização do software Excel como mostra a figura 24.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
	Data	Cavidade	Distância (m)	CME (kg)	Desl. Transversal (mm)	Desl. Vertical (mm)	Desl. Longitudinal (mm)	Freq. Transversal (Hz)	Freq. Vertical (Hz)	Freq. Longitudinal (Hz)	VT (mm/s)	VV (mm/s)	VL (mm/s)	VP (mm/s)	D. Escalonad. (m/kg)
4	02/08/2014	N4E-0026	494,6257544	240	0,122	0,113	0,113	3,438	3,625	4,5	2,667	3,302	3,937	4,687	31,9279551
5	02/08/2014	N4E-0026	480,1944905	240	0,119	0,106	0,135	4,5	3,87	3,5	3,175	2,54	3,81	5,287	30,9964210
6	04/08/2014	N4E-0026	547,5383008	232	0,0094	0,039	0,074	3,563	4,688	3,625	2,54	1,778	2,413	3,526	35,9476505
7	04/08/2014	N4E-0026	535,6083111	232	0,061	0,024	0,109	3,688	3,813	3,5	1,651	0,889	2,667	2,86	35,1644083
8	08/08/2014	N4E-0026	556,3693452	250	0,071	0,029	0,054	3,5	4,37	6,5	2,159	1,143	2,28	2,373	35,1878870
9	08/08/2014	N4E-0026	545,0036494	250	0,055	0,025	0,075	6,5	3,625	3,5	1,778	0,889	2,413	2,505	34,4690573
10	12/08/2014	N4E-0026	524,9588508	250	0,001	0,002	0	2	223,5	2,375	1,016	2,159	0,508	2,207	33,2013129
11	12/08/2014	N4E-0026	507,5590756	250	0,089	0,035	0,124	2,375	2,875	2,563	1,524	1,016	2,413	2,621	32,1008545
12	14/08/2014	N4E-0026	569,7617217	250	0,063	0,041	0,060	2,75	3,75	3,5	1,905	1,27	1,524	2,087	36,0348952
13	14/08/2014	N4E-0026	551,6318215	250	0,064	0,042	0,089	3,5	3,75	3,375	1,524	1,143	1,778	2,247	34,8882597
14	18/08/2014	N4E-0026	608,1361906	240	0,139	0,04	0,106	2,688	5,188	2,625	2,286	1,27	2,286	2,634	39,2550223
15	18/08/2014	N4E-0026	589,5985292	240	0,121	1,905	0,141	2,625	5,125	2	2,032	1,143	1,905	2,304	38,0584214
16	19/08/2014	N4E-0026	481,028014	130	0,068	0,057	0,081	4,25	4,25	3,375	2,159	2,032	2,159	2,546	42,1889477
17	19/08/2014	N4E-0026	466,816349	130	0,055	0,038	0,087	3,25	10	4,25	1,905	1,524	2,54	2,727	40,9425022
18	21/08/2014	N4E-0026	481,028014	148	0,27	0,27	0,263	8,563	2,75	2	8,89	8,763	5,842	12,97	39,5402591
19	21/08/2014	N4E-0026	466,816349	148	0,206	0,269	0,383	5,125	2,75	2	6,731	10,67	6,985	11,49	38,3720675
20	27/08/2014	N4E-0026	513,5921957	210	0,099	0,052	0,057	2,438	4,25	4,563	2,667	2,54	2,54	2,8	35,4412285
21	27/08/2014	N4E-0026	501,2040238	210	0,069	0,039	0,088	4,625	4,125	2,438	1,778	1,397	2,286	2,524	34,5863635
22	28/08/2014	N4E-0026	525,1640762	160	0,079	0,041	0,047	3,563	3,563	4,938	2,921	2,54	1,778	3,147	41,5178656
23	28/08/2014	N4E-0026	509,9044028	160	0,062	0,041	0,092	3,625	3,5	2,375	1,27	1,651	2,159	2,524	40,3114825
24	28/08/2014	N4E-0026	119,6682922	130	0,167	0,325	0,234	3,438	3,188	3,5	5,906	9,144	8,382	9,795	10,4956035
25	28/08/2014	N4E-0026	166,5880845	130	0,173	0,330	0,131	3,875	3,35	5,688	3,330	6,333	4,573	6,366	14,6107416

Figura 24 - Planilha de matrizes analíticas elaboras a partir da organização do banco de dados. Vale S.A.

## 4.2 Tratamento e análise de dados

O banco de dados foi submetido a etapas de tratamentos estatísticos visando a apuração das informações, nesta fase procurou-se estabelecer padrões de ocorrências e correlações variadas entre aspectos relativos aos parâmetros como carga máxima por espera e distância da detonação utilizados nos planos de fogo, litologias presentes e valores de velocidade de pico de partícula aferidos.

As análises estatísticas dos registros de eventos sismográficos foram tratadas com a utilização do software Minitab. Visando o incremento da confiabilidade das informações obtidas através das amostras de dados, procurou-se refinar os resultados através de técnicas clássicas de tratamento estatístico, como a identificação e exclusão de *outliers*, além da obtenção de importantes parâmetros de controle estatístico relativos às amostras, como média, variância, desvio padrão, moda e etc.

As etapas de identificação e exclusão de valores *outliers* foram realizadas no software Minitab através do uso da ferramenta de análise gráfica por *boxplot*, na qual a partir da análise estatística descritiva dos dados são fornecidas informações a respeito de características importantes do

conjunto de dados como: localização, dispersão, assimetria, comprimento da cauda e *outliers*. A figura 25 apresenta a utilização da ferramenta *boxplot* do Minitab utilizada nesse estudo.

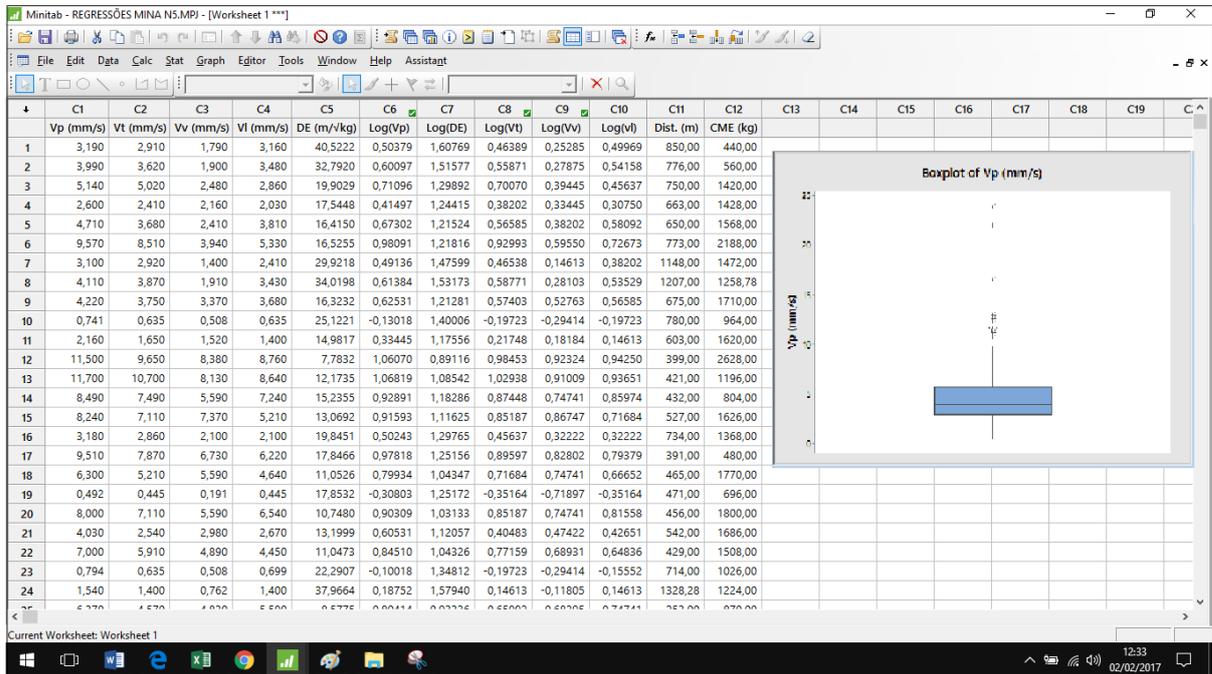


Figura 25 - Utilização da ferramenta *boxplot* do Minitab no tratamento de dados sismográficos da Cavidade Piloto.

Posteriormente ao tratamento estatístico prévio, a Cavidade Piloto foi alvo de uma análise visando a observação e identificação de padrões das variáveis monitoradas. Foram gerados histogramas, curvas de distribuição de probabilidades, gráficos de frequências e probabilidades acumulativas, tabelas de percentis e estatística descritiva das variáveis: velocidade de pico de partícula, frequência de vibração e carga máxima por espera.

### 4.3 Elaboração dos modelos de estimativa de velocidade de pico de partícula

Após o banco de dados referentes à Cavidade Piloto ter sido submetido as etapas de tratamento e análise estatística, foi possível elaborar os modelos de estimativa de valores de velocidade de pico de partícula. Em um primeiro momento utilizou-se da metodologia convencional, na qual os registros sismográficos de velocidade de pico de partícula aferidos em campo, foram plotados juntamente com os valores de distância escalonada, a construção do referido modelo de regressão foi baseada na equação (19), sendo a mesma recomendada pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) no Brasil, e pelo *United States Bureau of Mines* (USBM), nos Estados Unidos da América.

$$Vp = K x (DE)^{-\beta} \quad (19)$$

A escolha se deu uma vez que esta curva de regressão já é consagrada na engenharia de desmonte de rochas, e apresenta bons índices de correlação estatística entre as variáveis. Na mesma, a variável distância escalona representa a relação entre a carga máxima por espera e a distância ao desmonte, as variáveis  $K$  e  $\beta$  são constantes dependentes das condições do meio de propagação das vibrações, como condições lito-estruturais e parâmetros do plano de fogo, como geometria, tempos de retardos e direção de detonação.

Como a equação mencionada acima é uma função de potência, não pode ser originada de um ajuste linear simples, e para tal, foi necessário a aplicação da transformação logarítmica às variáveis, de forma a linearizar os resultados, segundo a equação (20).

$$\log(Vp) = \log(K) + \beta x \log(DE) \quad (20)$$

Após a transformação mencionada foi utilizado o software Minitab na etapa de regressão linear, objetivando a obtenção da curva de melhor ajuste de pontos. Dessa forma foram aferidos os valores das variáveis  $K$  e  $\beta$  correspondentes ao ajuste de dados referentes a Cavidade Piloto.

A partir da obtenção das variáveis supracitadas, os modelos de estimativa de valores de velocidade de pico de partícula foram avaliados quanto a qualidade e confiabilidade, neste sentido foram elaborados gráficos de equações prognosticas de atenuação de vibrações conjuntamente com intervalos de confiança e estimativa, com 95 % de confiança. Também foram realizadas análises gráficas de resíduos gerados nos ajuste de dados, afim de se obter detalhes sobre a influência da nuvem de pontos na qualidade do ajuste conseguido.

Posteriormente a elaboração do modelo convencional de estimativa de valores de velocidade de pico de partícula, foi elaborado o modelo estocástico com a mesma função. A elaboração do mesmo foi possível a partir da utilização dos parâmetros estatísticos da variáveis  $K$  e  $\beta$  gerados na modelagem convencional, como a análise de regressão do Minitab gera para cada variável do modelo um intervalo de confiança, este foi usado para a inferência da distribuição de probabilidades ajustada as variáveis  $K$  e  $\beta$ , assumindo que ambas as variáveis seguem uma distribuição aproximadamente triangular, sem prejuízo as demais distribuições de probabilidades.

A distribuição triangular tem uso difundido em modelos probabilísticos de engenharia, visto que a mesma é utilizada quando se dispõe de um número de amostras limitadas. A mesma é uma distribuição contínua caracterizada pelos parâmetros mínimo, mais provável e máximo, estes valores são facilmente definidos a partir de uma amostra de dados limitados.

Assumindo as premissas descritas no parágrafo anterior, utilizou-se o software Crystal Ball para a realização das simulações do modelo estocástico. O Crystal Ball é um software que possui interface com o Microsoft Excel, portanto é uma aplicação de planilha consagrada mundialmente, aplicado na modelagem de previsões, simulações e otimizações de diversos projetos de indústrias como óleo e gás, naval, economia, entre outras.

O Crystal Ball executa uma série de simulações utilizando a geração de números aleatórios a partir do método de Monte Carlo. O modelo estocástico de estimativa de valores de velocidade de pico de partícula foi submetido a uma série de 100.000 simulações, visto que os resultados são mais confiáveis se executados um número elevado de simulações. Para valores pré-definidos de distância (m) e carga máxima por espera (kg), que seriam definidos a partir de premissas básicas do plano de fogo, afim de testar a aderência do mesmo aos registros de campo, como mostrado na figura 26.

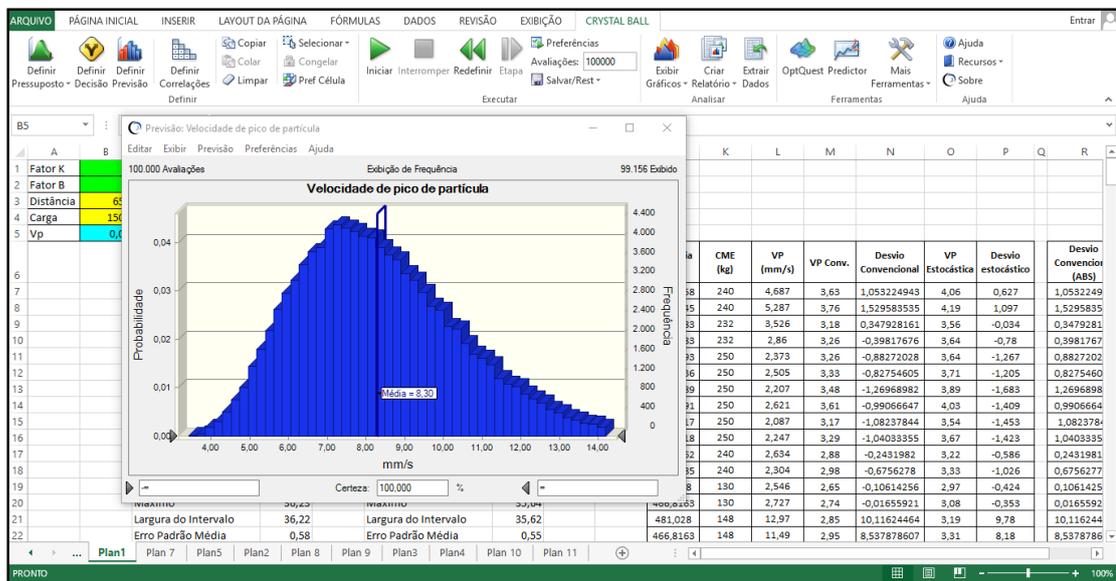


Figura 26 - Utilização da ferramenta Crystal Ball para as simulações do modelo estocástico.

Após as simulações foi possível analisar os relatórios estatísticos de resultados, quando adotou-se como premissa que o valor mais provável de ocorrência seria o valor médio das 100.000 simulações, esta abordagem conferiu ao modelo um alto grau de confiabilidade, uma vez que

os resultados simulados mostraram satisfatória aderência aos resultados aferidos em campo. Através das simulações do modelo estocástico no Crystal Ball, foi possível gerar tabelas de agrupamento de valores por percentis, e análises de probabilidades e frequências acumulativas, sendo possível determinar a probabilidade de ocorrência de valores de velocidade de pico de partícula em um intervalo estatístico com 95 % de confiança.

#### **4.4 Elaboração do modelo de estimativa de velocidade crítica de vibração**

O ponto crucial desse estudo foi a elaboração de um modelo de estimativa de velocidade de crítica de vibração aplicável a cavidades naturais subterrâneas, uma vez que este projeto apresenta uma metodologia de estimativa do raio mínimo de proteção de cavidades subterrâneas, pautado nas especificidades geomecânicas das mesmas, e nos parâmetros do plano de fogo.

A determinação de um modelo confiável é sem dúvida um ponto crítico e merece atenção especial. Foi realizada uma pesquisa bibliográfica com o intuito de levantar os modelos de engenharia geotécnica que associassem os danos causados aos maciços rochosos a partir da interação dos mesmos com as ondas de choque oriundas do desmonte de rochas com explosivos.

Constatou-se como já apresentado no capítulo 2.5.1 que a maioria das análises difundidas mundialmente preveem que possíveis danos estruturais só tendem a ocorrer quando o maciço rochoso é submetido a vibrações elevadas, visto que estas são realizadas considerando propriedades da rocha intacta. Neste sentido adotou-se uma postura conservadora na escolha do modelo utilizado, uma vez que as cavidades naturais subterrâneas, principalmente aquelas relacionadas a formações ferríferas ainda são pouco estudadas, e possuem banco de dados escasso.

Após uma pesquisa e posterior análise dos modelos de estimativa de velocidade críticas, decidiu-se por adaptar o modelo proposto por Jimeno *et al.* (1995) apresentado na equação (21), tendo em vista que o mesmo apresenta-se como um modelo já consagrado, e de característica conservadora.

$$V_c = \frac{Rt}{\rho x \mu} \quad (21)$$

Onde a velocidade crítica de vibração em mm/s ( $V_c$ ), a partir da qual danos estruturais podem ser ocasionados, é calculada com base na resistência a tração do maciço rochoso ( $R_t$ ) em MPa, na densidade do mesmo ( $\rho$ ) kg/cm<sup>3</sup>, e na velocidade de propagação de ondas primárias ( $\mu$ ) em mm/s.

Decidiu-se propor duas adaptações a equação (21) com o intuito de torna-la mais prática e aplicável no contexto de análise de cavidades naturais subterrâneas, a primeira alteração substitui o uso da resistência a tração de forma direta, pelo uso do resultado do ensaio de compressão uniaxial, *Uniaxial Compressive Strength* (UCS), uma vez que este é amplamente difundido e muito mais utilizado nos ensaios geotécnicos de índices de resistência de maciços rochosos.

Jaeger e Cook (1979) afirmam que a resistência a compressão uniaxial da rocha é uma das propriedades fundamentais quando do estudo de resistência das rochas. O ensaio de *Uniaxial Compressive Strength* (UCS), é ainda o método mais usual para a determinação de propriedades mecânicas da rocha, sendo normalmente realizados em amostras cilíndricas de rochas, sendo a carga de teste aplicada na direção paralela ao eixo da amostra.

Porém, foi necessário propor uma segunda adaptação afim de se evitar prejuízo nos resultados, como superdimensionamento de valores previstos para a velocidade crítica de vibração, esta constou na inclusão de um fator de ajuste na equação, responsável por correlacionar a resistência a compressão à resistência a tração da rocha.

Esta alteração só possível após a pesquisa e análise dos mais diversos modelos de correlação entre resultados de ensaios de resistência a compressão simples, e ensaios indiretos de resistência a tração. Verificou-se a existência de um número expressivo de publicações que sugerem fortes índices de correlação estatística entre as variáveis, resistência a compressão simples e resistência a tração, porém após a avaliação pode-se concluir que a proposta de Sheorey (1997) de que a resistência a tração de rochas é aproximadamente 10 % da resistência a compressão é extremamente válida, e tem muita aplicação na prática de engenharia geotécnica dada a sua simplicidade, sem prejuízo nos resultados.

Desta forma foi proposto que o modelo apresentado na equação (21) fosse alterado para o modelo apresentado na equação (22) onde  $\varphi$  representa o fator de correção sugerido nesse estudo, e UCS é a resistência a compressão uniaxial da rocha em MPa.

$$Vc = \varphi \times \frac{UCS}{\rho \times \mu} \quad (22)$$

No modelo estocástico de estimativa da velocidade de vibração crítica, as variáveis de entrada da equação (22) são consideradas variáveis aleatórias dentro de uma distribuição triangular de probabilidades. A escolha dessa distribuição é justificada pelo fato de que os valores mínimos, mais provável e máximo das variáveis de interesse são conhecidos

A partir da elaboração da equação (22) como detalhado nos parágrafos superiores, procedeu-se a análise e validação das variáveis de entrada, uma vez que o modelo de estimativa proposto nesse estudo tem caráter estocástico.

Foi realizado um tratamento estatístico no banco de dados da Cavidade Piloto, com a intenção de se aferir os parâmetros correspondentes aos valores mínimo, médio e máximo das variáveis: resistência a compressão uniaxial, densidade e velocidade de propagação de ondas primárias. Procedendo-se como na estimativa das variáveis  $K$  e  $\beta$ , foi também atribuído ao fator de conversão proposto ( $\varphi$ ) caráter aleatório segundo uma distribuição triangular no qual o mínimo é 5 %, o médio 7 % e o máximo 10 %. Essa premissa foi estabelecida com o intuito de se construir um modelo conservador, evitando assim superestimativas dos valores de velocidade crítica de vibração.

Findada a elaboração do modelo, o mesmo foi submetido a uma série de 100.000 simulações utilizando a ferramenta Crystal Ball. Assim como na análise dos valores simulados de velocidade de pico de partícula, considerou-se como valor de velocidade crítica o valor médio das 100.000 simulações.

Estimada a velocidade crítica de vibração, o resultado foi validado através da utilização do diagrama proposto por Singh (2001), no qual a máxima velocidade de pico de partícula é relacionada ao RMR do maciço rochoso, como mostrado na figura 27.

O diagrama relaciona os máximos valores permitidos para velocidades de pico de partícula como o *Rock Mass Rating* (RMR) do maciço rochoso, o autor divide o diagrama em três zonas distintas relacionadas ao dano observado em decorrência das vibrações.

Na metodologia utilizada nesse estudo, considerou-se válido o resultado oriundo do modelo de simulação, desde que o par ordenado gerado estivesse inserido dentro da zona livre de danos no diagrama.

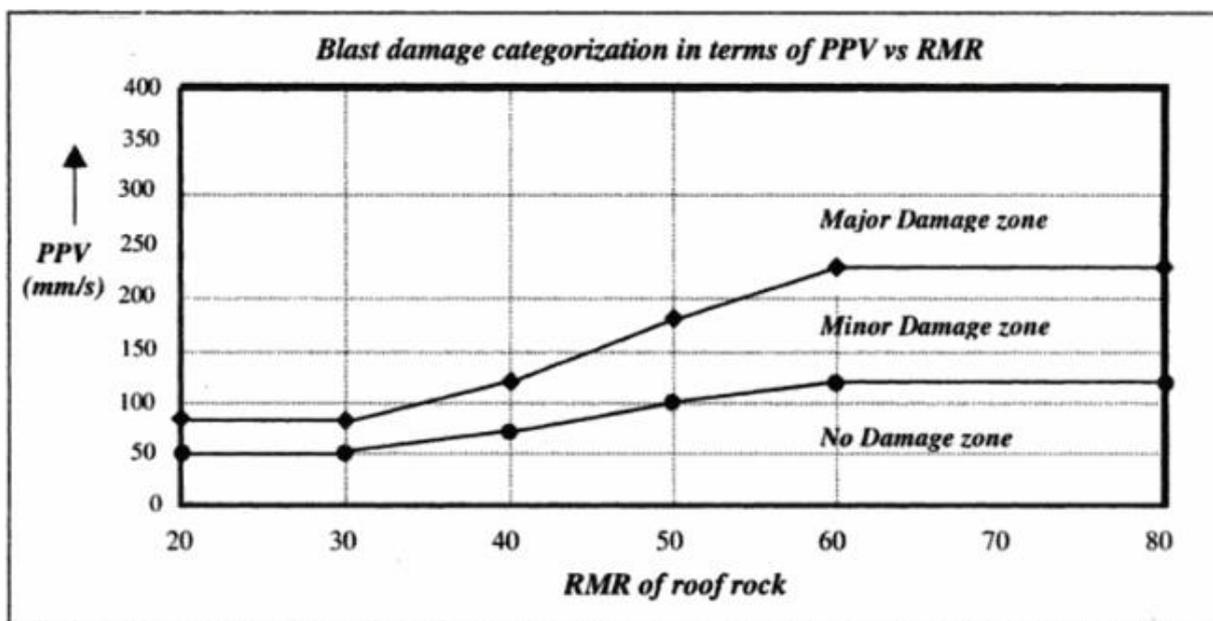


Figura 27 - Diagrama de correlação entre velocidade crítica de vibração e RMR, proposto por Singh (2001).

#### 4.5 Estimativa do raio de proteção de cavidades

A proposta de estimativa do raio mínimo de proteção de cavidades apresentada nesse estudo, sugere a adoção de uma análise onde as especificidades de cada cavidade, e de cada plano de fogo sejam consideradas.

A integração dos modelos estocásticos de estimativa de velocidade de pico de partícula, e estimativa de valores de velocidade crítica, possibilita a partir de uma avaliação criteriosa estimar o raio mínimo de proteção às cavidades sob o enfoque da integridade física das mesmas.

A metodologia de estimativa do raio de proteção às cavidades proposta nesse estudo foi realizada através da análise de dois cenários distintos, estes, bem como suas premissas básicas, são apresentados na tabela 9.

Tabela 9 - Cenários adotados para a estimativa do raio de proteção às cavidades.

<b>CENÁRIO A</b>	<b>CENÁRIO B</b>
$V_{pp} < V_c$	$V_{pp} < V_c$
Probabilidade ( $V_{pp} > V_c$ ) = Sem restrição	Probabilidade ( $V_{pp} > V_c$ ) $\leq$ 10%
$V_{pp}$ = Velocidade de pico de partícula (mm/s) $V_c$ = Velocidade crítica de vibração (mm/s)	

Para cada um dos cenários apresentados, foram executadas simulações de velocidades de pico de partícula variando os valores de carga máxima por espera, a partir do modelo estocástico elaborado para todo o banco de dados de cavidades disponibilizado pela Vale SA.

Foram simulados planos de fogo com cargas máximas por espera de 250 kg, 500 kg, 750 kg e 1000 kg, sendo então possível determinar a distância mínima necessária a fim de se respeitar as premissas estabelecidas em cada cenário analisado.

Em suma, a metodologia de estimativa de raio de proteção às cavidades proposta nesse estudo pode ser enumerada de acordo com os seguintes passos:

- I. Levantamento do banco de dados sismográfico e geomecânico da cavidade a ser analisada;
- II. Estimativa da velocidade crítica de vibração através da aplicação do modelo estocástico proposto nesse estudo;
- III. Elaboração do modelo estocástico de estimativa dos valores de velocidade de pico de partícula;
- IV. Definição do valor de carga máxima por espera a ser utilizada;
- V. Execução das simulações respeitando as premissas estabelecidas nos cenários de análise pré-definidos.

A figura 28 apresenta o fluxograma do processo de estimativa do raio de proteção de cavidades naturais subterrâneas a partir da análise integrada dos modelos estocásticos de estimativas de velocidade de pico de partícula, e velocidade crítica de vibração da cavidade.

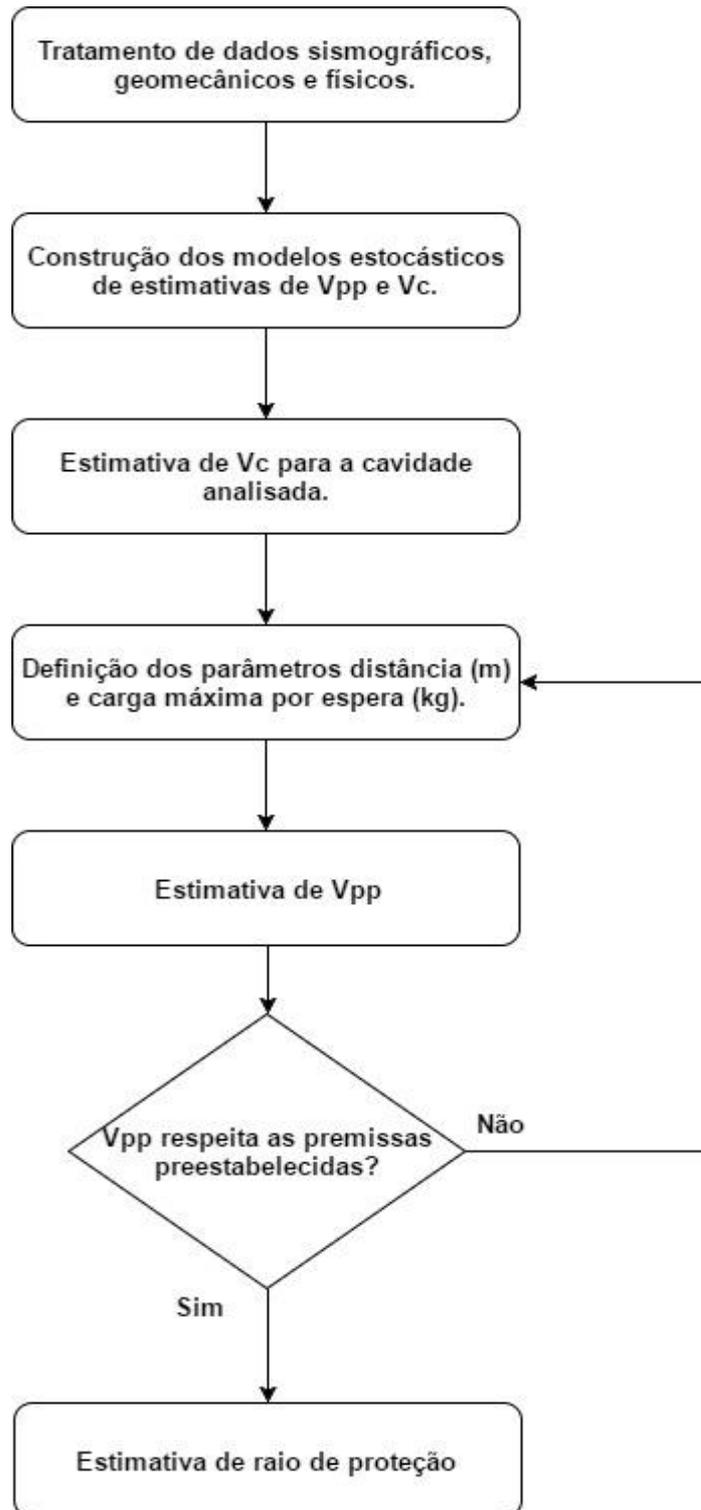


Figura 28 - Fluxograma de estimativa do raio de proteção para cavidade analisada.

A proposta de estimativa do raio mínimo de proteção às cavidades naturais subterrâneas apresentada nesse estudo, tem como finalidade maior fornecer um banco de informações, que irá subsidiar o processo de tomada de decisão quando da elaboração de planos de avanços de lavra em áreas de ocorrências de cavidades naturais subterrâneas.

## **5 ESTUDO DE CASO**

Para compor o estudo de caso deste trabalho foi utilizado o banco de dados de cavidades monitoradas do sistema Serra Norte do complexo Carajás, operado pela Vale SA. A cavidade selecionada e avaliada, integra um conjunto de cavernas que são alvos de monitoramentos e estudos contínuos, empreendidos por profissionais multidisciplinares da mineradora Vale SA.

Para a cavidade selecionada neste estudo de caso foi estimado o raio de proteção seguindo os cenários e premissas estabelecidos no capítulo 6.5. A cavidade selecionada será tratada neste estudo de caso como Cavidade Piloto, sendo esta, constituída majoritariamente por rochas ferruginosas, de acordo com registros da geologia da empresa, sendo o teto da cavidade composto predominantemente por canga detrítica. Foram analisados 344 dados, sendo 206 registros sismográficos e 138 registros geomecânicos, coletados pela equipe da Vale SA durante um período de oito meses.

### **5.1 Análise do banco de dados da Cavidade Piloto**

O banco de dados analisados é constituído por uma série de 206 registros de eventos sismográficos relacionado as velocidades, frequências e deslocamentos de pico de vibração, bem como suas componentes vertical, longitudinal e transversal, com as respectivas distâncias ao local do desmonte de rochas com explosivos, aferidos através do uso de sismógrafos estrategicamente posicionados no interior da Cavidade Piloto. Ainda compõem o banco de dados analisado 138 registros de informações geomecânicas da cavidade, como resultados de ensaios de compressão uniaxial USC e índices de qualidade do maciço rochoso como RMR.

A tabela 10 mostra o resumo estatístico descritivo obtido através da avaliação das informações de velocidade de pico de partícula aferidos em campo, relativos a Cavidade Piloto. Destacando-se o maior valor registrado foi de 71,68 mm/s, correspondente a um desmonte de rochas com explosivos realizado a uma distância de 33 m da cavidade, com carga máxima por espera de 30 kg. O valor obtido para a moda da série de dados de velocidade de pico de partícula foi de 0,51 mm/s, sendo recorrente em 5 das 206 observações.

Tabela 10 - Resumo estatístico das velocidades de pico da partícula (mm/s) da série de dados de campo.

ESTATÍSTICA	SÉRIE DE DADOS
<b>Avaliações</b>	206
<b>Média</b>	7,19
<b>Mediana</b>	3,88
<b>Moda</b>	0,51
<b>Desvio Padrão</b>	9,04
<b>Variância</b>	81,80
<b>Obliquidade</b>	3,28
<b>Curtose</b>	17,65
<b>Coefficiente de variação</b>	1,26
<b>Mínimo</b>	0,51
<b>Máximo</b>	71,68
<b>Amplitude do intervalo</b>	71,17
<b>Erro padrão da média</b>	<b>0,63</b>

De acordo com a tabela 10, observa-se que o valor médio de velocidade de pico da partícula correspondente a série de dados foi de 7,19 mm/s, apresentando desvio padrão de 9,04 mm/s. Uma análise mais detalhada acerca dos valores médios de velocidade de pico da partícula registrados foi conduzida através da criação de um intervalo de confiança para a média amostral. A elaboração do mesmo se deu a partir da determinação do índice de significância de 5 %, resultando em um intervalo de confiança de 95 % para a média amostral (tabela 11).

Tabela 11 - Intervalo de confiança para a média amostral de velocidade de pico de partícula.

Nível de significância	Nível de confiança	Erro padrão de estimação	Média amostral	Média amostral máxima	Média amostral mínima
5 %	95 %	0,63	7,19 mm/s	8,43 mm/s	5,95 mm/s

A tabela 11 ainda permite constatar uma amplitude de 1,24 mm/s associado a estimativa do valor médio de velocidade de pico de partícula, estando associado a um erro padrão de estimação de 0,63, refletindo em uma margem de erro de aproximadamente 18 %.

A tabela 12 apresenta o resultado da distribuição dos valores de velocidade de pico de partícula em percentis de 10 %, destacando que 100 % dos valores aferidos foram superiores a 0,51 mm/s,

e somente 10 % dos mesmos são superiores a 15,39 mm/s, nota-se que os valores aferidos tendem a se distribuir majoritariamente em valores de estimativa inferiores a 10,18 mm/s, totalizando apenas uma parcela de 20 % de registros superiores a este. Por fim ressalta-se que os valores que compõem o intervalo anterior ao P50 apresentam amplitude significativamente menor quando comparados aos 50 % restantes.

*Tabela 12- Percentis para velocidade de pico de partícula.*

<b>PERCENTIL</b>	<b>VALORES DE ESTIMATIVA</b>
<b>P 100</b>	0,51 mm/s
<b>P 90</b>	1,31 mm/s
<b>P 80</b>	2,21 mm/s
<b>P 70</b>	2,63 mm/s
<b>P 60</b>	3,36 mm/s
<b>P 50</b>	3,88 mm/s
<b>P 40</b>	4,76 mm/s
<b>P 30</b>	6,38 mm/s
<b>P 20</b>	10,18 mm/s
<b>P 10</b>	15,39 mm/s
<b>P 0</b>	71,68 mm/s

A figura 29 apresenta o gráfico de frequências acumulativas e probabilidades acumulativas para os valores de velocidade de pico de partícula (Vpp) da série de dados referentes a Cavidade Piloto.

A análise gráfica confere maior grau de detalhamento às avaliações conduzidas a respeito dos valores de velocidade de pico da partícula aferidos em campo. Destacam-se os marcadores dos valores referentes ao percentil de 90 %, percentil de 10 % e mediana equivalente ao percentil de 50 %.

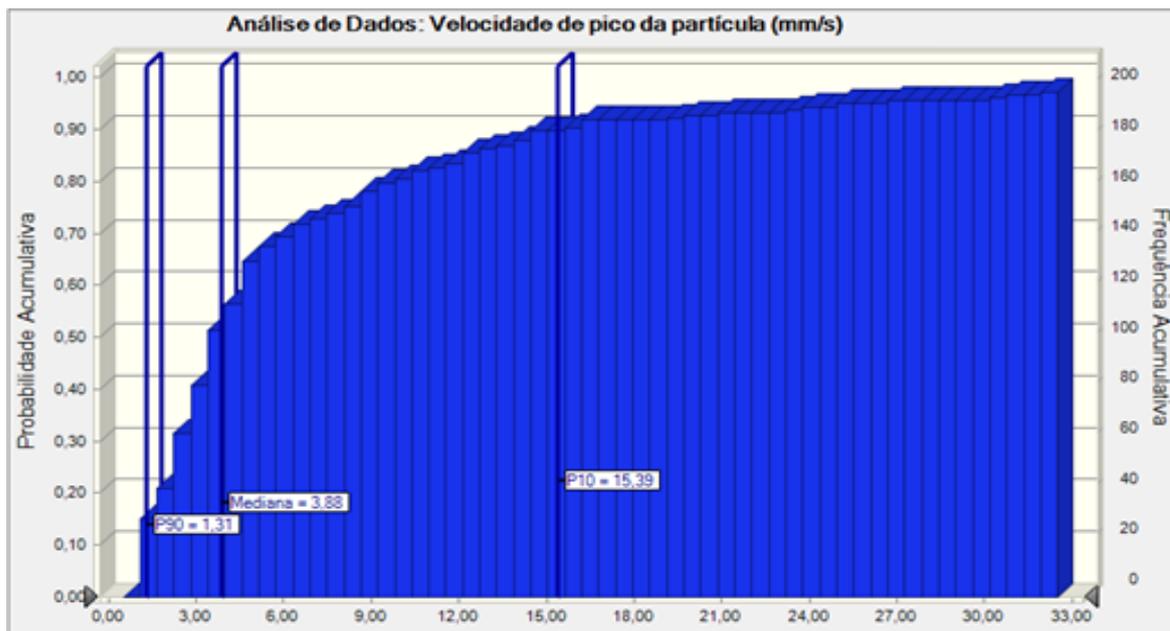


Figura 29 - Gráfico de frequências e probabilidades acumulativas para valores de Vpp. Nota-se pelos marcadores de percentagens que 10 % dos valores estimados são inferiores a 1,31 mm/s, 50 % inferiores a 3,88 mm/s e 10 % superiores a 15,39 mm/s.

Com a finalidade de se obter uma avaliação mais detalhada dos valores de velocidade de pico de partícula registrados em campo, foi elaborado o histograma de frequências observadas referentes a série de dados da Cavidade Piloto (Figura 30). A análise do mesmo complementa o estudo da distribuição de valores em percentis, e mostra que a maioria dos registros encontra-se na classe de velocidades entre 0 e 5 mm/s, totalizando 129 dados de um universo de 206, ou aproximadamente 63 %.

Da figura 30 é possível afirmar que os registros relativos a altos valores de velocidade de pico de partícula encontram-se dispersos em classes de velocidade com número reduzido de representantes.

As análises conjuntas do histograma de velocidades de pico de partícula, da tabela de distribuição de valores em percentis, e do gráfico de probabilidades e frequências acumulativas, refletem a tendência de ocorrência de valores de velocidade de pico de partícula relativamente baixos.

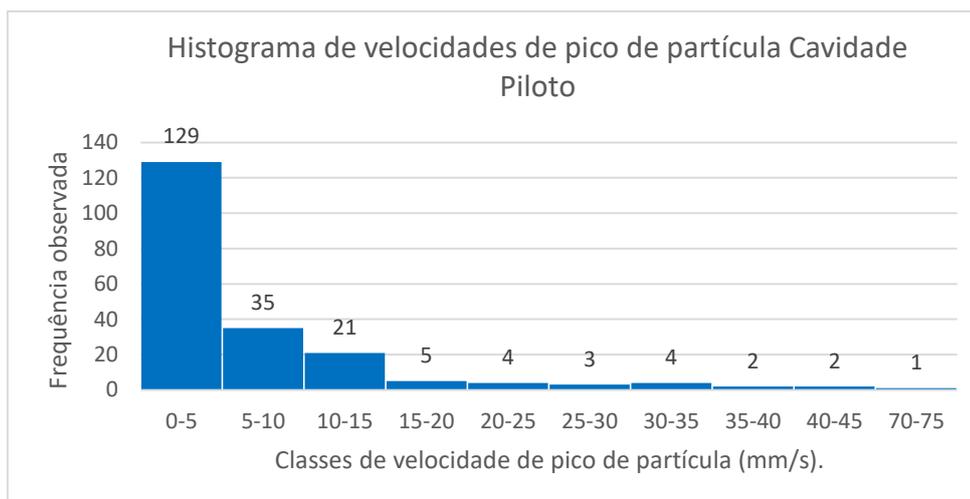


Figura 30 – Histograma de frequências observadas para valores de  $V_{pp}$ . Nota-se que 129 registros ou 63 % dos valores se distribuem na classe de  $V_{pp}$  que vão de 0 a 5 mm/s.

A análise das velocidades de pico de partícula das componentes transversal vertical e longitudinal também foi realizada com o intuito de se aumentar o grau de detalhamento do conhecimento acerca do banco de dados da Cavidade Piloto analisada.

Os diferentes padrões de comportamento quanto aos valores de velocidade de pico de partícula apresentados pelas componentes ortogonais encerra em si estreita relação com condições litoestruturais, a presença de falhas e descontinuidades colaboram para a atenuação e amplificação da vibração produzida pela onda mecânica. A tabela 13 apresenta o resumo estatístico das análises dos registros de velocidades transversal, vertical e longitudinal da série de dados da Cavidade Piloto.

Tabela 13 - Estatísticas das componentes vertical, transversal, e longitudinal da velocidade de vibração.

ESTATÍSTICA	VELOCIDADE TRANSVERSAL (mm/s)	VELOCIDADE VERTICAL (mm/s)	VELOCIDADE LONGITUDINAL (mm/s)
<b>Avaliações</b>	206	206	206
<b>Média</b>	4,81	4,72	5,37
<b>Mediana</b>	2,57	2,54	2,98
<b>Moda</b>	2,29	0,64	2,54
<b>Desvio Padrão</b>	6,07	5,68	7,16
<b>Variância</b>	26,83	32,27	51,16
<b>Obliquidade</b>	3,01	2,43	4,50
<b>Curtose</b>	13,50	9,73	33,11
<b>Coefficiente de variação</b>	1,26	1,20	1,33
<b>Mínimo</b>	0,38	0,38	0,38
<b>Máximo</b>	39,62	36,58	68,07
<b>Amplitude do intervalo</b>	39,24	36,20	67,69
<b>Erro padrão da média</b>	0,42	0,40	0,50

294 valores de frequências de vibração referentes à Cavidade Piloto também foram analisados com a finalidade de se incrementar o grau de detalhamento do conhecimento acerca dos eventos sismográficos.

O valor de registros de frequência superior aos 206 apresentados para velocidade de pico de partícula é justificado pelo fato de o banco de dados ser dinâmico e em constante atualização, refletindo na ocasião das análises em um maior número de registros relativos a frequência ante os relativos a velocidade de pico de partícula.

A tabela 14 mostra o resumo estatístico dos dados de frequência aferidos em (Hz). Observa-se que apesar da elevada amplitude no intervalo de registros, o valor médio de 4,83 Hz apresenta-se mais próximos dos valores inferiores, em detrimento dos superiores, comportamento semelhante ao observado quando da análise da velocidade de pico de partícula.

*Tabela 14 - Resumo estatístico das frequências de vibração (Hz) da série de dados de campo, Cavidade Piloto.*

<b>ESTATÍSTICA</b>	<b>SÉRIE DE DADOS</b>
<b>Avaliações</b>	294
<b>Média</b>	4,83
<b>Mediana</b>	3,63
<b>Moda</b>	3,54
<b>Desvio Padrão</b>	5,33
<b>Variância</b>	28,41
<b>Obliquidade</b>	9,67
<b>Curtose</b>	118,65
<b>Coefficiente de variação</b>	1,10
<b>Mínimo</b>	2,25
<b>Máximo</b>	75,96
<b>Amplitude do intervalo</b>	71,71
<b>Erro padrão da média</b>	0,31

A tabela 15 apresenta a distribuição dos valores de frequência em percentis, destacando-se que o montante de 100 % dos valores registrados é superior a 2,25 Hz, sendo apenas 10 % dos mesmos superior a 7,51 Hz.

Tabela 15 - Percentis para frequências de vibração (Hz), Cavidade Piloto

PERCENTIL	VALORES DE ESTIMATIVA
P 100	2,25 Hz
P 90	2,65 Hz
P 80	2,88 Hz
P 70	3,13 Hz
P 60	3,38 Hz
P 50	3,63 Hz
P 40	4,04 Hz
P 30	4,60 Hz
P 20	5,50 Hz
P 10	7,51 Hz
P 0	75,96 Hz

A figura 31 mostra o gráfico de frequência e probabilidade acumulativa para os valores de frequência de vibração registrados, destacando no mesmo que 10 % dos valores obtidos foram inferiores a 2,65 Hz, 50 % dos valores foram inferiores a 3,63 Hz e apenas 10 % dos valores foram superiores a 7,51 Hz. A análise da figura 31 ainda permite observar que grande parte dos valores, mais precisamente 90 %, se encontram em faixas de baixa frequência.

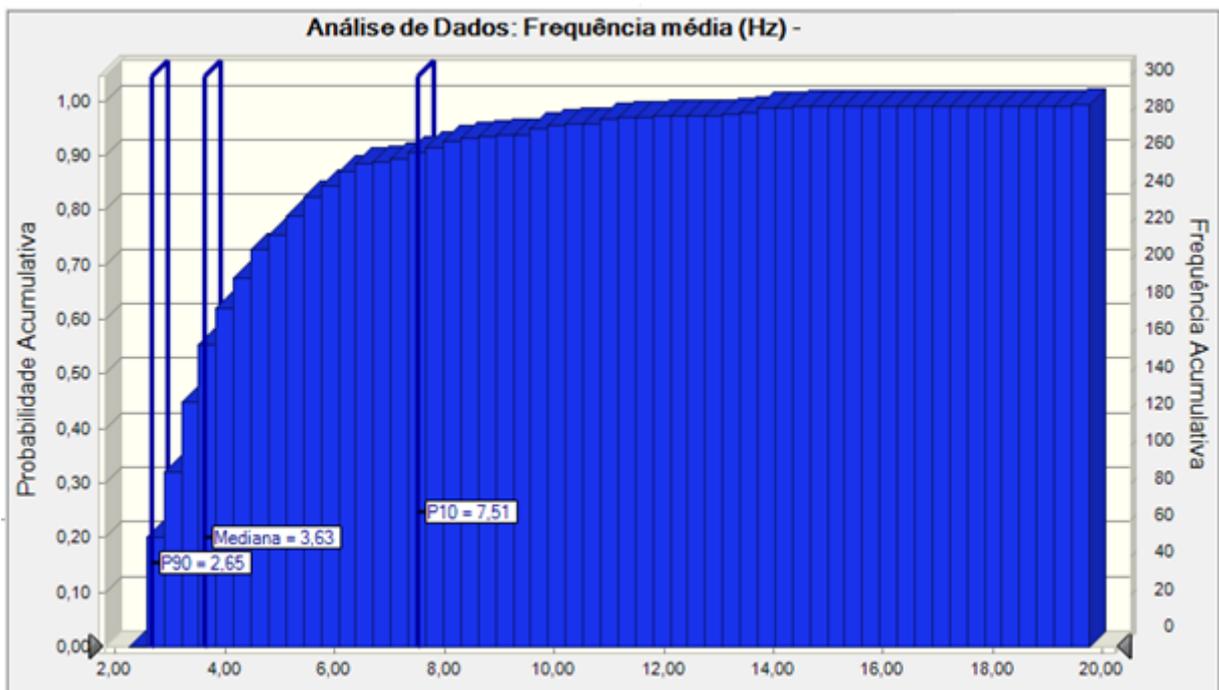


Figura 31 - Gráfico de frequência acumulativa para valores de Vpp. Destacando no mesmo que 10 % dos valores obtidos foram inferiores a 2,65 Hz, 50 % dos valores foram inferiores a 3,63 Hz e apenas 10 % dos valores foram superiores a 7,51 Hz.

A distribuição dos valores referentes aos registros de frequência de vibração em intervalos de classes foi avaliada a partir da elaboração do histograma da figura 32, no mesmo fica evidente

que a aproximadamente 59 % dos valores aferidos se encontram na primeira classe de valores de frequência de vibração.

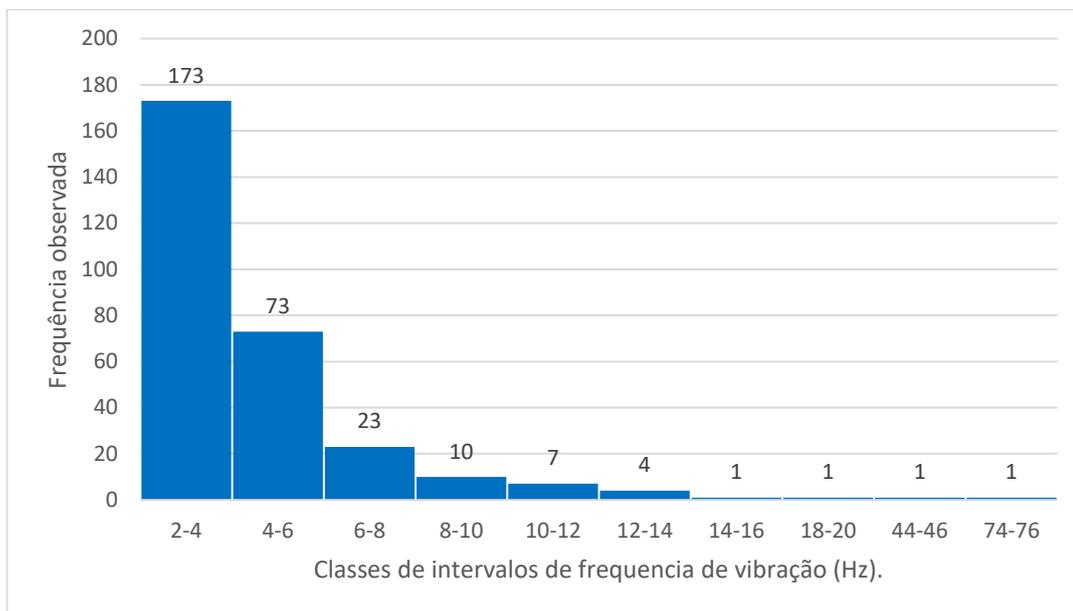


Figura 32 - Histograma de frequências de vibração (Hz) da Caverna Piloto. Nota-se que 173 registros, ou aproximadamente 59 % dos valores se encontram na classe de frequências entre 2 e 4 Hz.

Outro importante fator a ser analisado quando do estudo dos eventos sismográficos na mineração é a carga máxima por espera utilizada nos desmontes de rochas com explosivos. A tabela 16 apresenta o resumo estatístico dos registros de carga máxima por espera referente ao banco de dados de sismografia da Caverna Piloto.

Tabela 16 - Estatísticas de carga máxima por espera para a série de dados.

ESTATÍSTICA	SÉRIE DE DADOS
<b>Avaliações</b>	230
<b>Média</b>	155,69
<b>Mediana</b>	130,00
<b>Moda</b>	130,00
<b>Desvio Padrão</b>	164,99
<b>Variância</b>	27.220,61
<b>Obliquidade</b>	2,85
<b>Curtose</b>	10,86
<b>Coefficiente de variação</b>	1,06
<b>Mínimo</b>	10,00
<b>Máximo</b>	882,00
<b>Amplitude do intervalo</b>	872,00
<b>Erro padrão da média</b>	10,88

### 5.1.1 Resultados obtidos

A partir da análise do banco de dados da Caverna Piloto foi possível obter informações relevantes quanto aos valores de velocidade de pico de partícula (Vpp), frequência de vibração e carga máxima por espera, no período estudado. Os valores de velocidade de pico de partícula apresentaram média de 7,19 mm/s e desvio padrão de 9,04 mm/s, o que mostra uma dispersão razoável dos valores, muito em função da variabilidade dos dados. A análise dos percentis para velocidade de pico de partícula mostram que 90 % dos valores registrados foram inferiores a 15,39 mm/s, e apenas 20 % foram superiores a 10,18 mm/s, o que mostra que no quadro geral os valores se distribuíram próximos ao valor médio. As componentes vertical, transversal e longitudinal da velocidade de pico de partícula tiveram valores médios extremamente próximos, o que sugere semelhanças nas propriedades de propagação e atenuação de ondas nas três direções do meio analisado.

As avaliações dos valores de frequência de vibração registrados mostraram que a frequência média foi de 4,83 Hz, associada a um desvio padrão de 5,33 Hz, o que mais uma vez mostra razoável dispersão nos valores. As análises de percentis mostraram que apenas 10 % dos dados foram superiores a 7,51 Hz, ou seja, predominância de baixas frequências. O histograma de frequências observadas da Caverna Piloto ainda apontou que 173 valores, ou aproximadamente 59 % se distribuíram no intervalo entre 2 Hz e 4 Hz, reforçando a observação de predominância de valores de baixa frequência.

Os valores de carga máxima por espera analisados apresentaram grande desvio padrão, 164,99 kg, o que já era esperado, uma vez que a carga máxima por espera deve atender aos requisitos de produção do plano de fogo, portanto, como os dados analisados são dados reais, de operação de mina, o elevado desvio padrão observado é perfeitamente aceitável.

Todas as análises apresentadas foram realizadas com a aplicação de técnicas de estatística descritiva, evidentemente a confiabilidade das mesmas cresce à medida que o banco de dados também cresce, uma vez que mais amostras de uma população poderão ser analisadas, o que certamente implicará em uma maior proximidade entre os resultados estimados e os resultados reais. A grande variabilidade dos dados estudados, uma vez que os mesmos são dados

operacionais e não de testes, aliada ao alto grau de complexidade das relações estabelecidas entre estes e o meio físico, justificam os níveis de dispersão apresentados nas análises.

## **5.2 Aplicação do modelo convencional de estimativa de velocidade de pico de partícula**

Os registros de sismografia que compõem o banco de dados referentes a Cavidade Piloto subsidiaram a elaboração do modelo convencional de obtenção de curvas de equação prognóstica para análises de velocidade de pico de partícula.

No capítulo 6.3 aplicou-se uma transformação logarítmica nas variáveis velocidade de pico de partícula e distância escalonada, a fim de se obter um ajuste linear dos dados. A regressão linear que possibilitou a obtenção da curva de melhor ajuste a série de dados foi realizada no software Minitab, onde procurou-se avaliar o grau de correlação entre as variáveis e a significância do modelo de regressão obtido.

Um primeiro ajuste de dados foi realizado sem nenhum tratamento estatístico prévio. Na ocasião foram utilizados 206 registros de velocidades de pico de partícula, distância relativa entre o desmonte e a Cavidade Piloto e cargas máximas por espera praticadas, sendo que o modelo obtido não mostrou correlação satisfatória, apresentando  $R^2$  ajustado de 22,26 %, o que é considerado estatisticamente fraco. Esse valor reduzido de correlação encontrado, apresenta estreita relação com a grande variabilidade dos dados, visto que os mesmos são correspondentes à operações reais de produção, não sendo portanto desmontes de teste.

Com o intuito de se melhorar o ajuste dos dados, procedeu-se uma etapa de tratamento estatístico de dados, no qual foram identificados e expurgados valores considerados *outliers*. A análise consistiu da identificação de pares ordenados (velocidade de pico de partícula, distância escalonada) que produziam resíduos de regressão extremamente elevados, destoando proeminentemente dos valores médios observados. A identificação e exclusão de *outliers* possibilitou a obtenção de uma equação prognóstica de velocidade de pico de partícula com  $R^2$  de 56 % valor que ainda não pode ser considerado ideal, visto que a correlação recomendada é de valores a partir de 75 %. Porém, destaca-se que inúmeras variáveis como: variáveis geométricas do plano de fogo, aspectos estruturais, litológicos e geomecânicos exercem forte influência no grau de correlação dos dados.

A tabela 17 mostra o sumário do modelo de regressão ajustado a série de dados sismográficos da Cavidade Piloto, a equação prognóstica obtida a partir do ajuste, tratada nesse estudo como método tradicional, considera as constantes obtidas como valores determinísticos, o que acarreta em um modelo de estimativa sujeito a elevados níveis de incerteza.

As informações apresentadas na tabela 17 mostram detalhadamente os principais parâmetros e indicadores estatísticos produzidos quando do ajuste de dados ao modelo de regressão proposto, ficando evidenciado nos parâmetros erro padrão do coeficiente e desvio padrão da regressão, que a grande variabilidade dos dados utilizados como subsídios para o ajuste proposto, exercerem forte influência na qualidade do modelo de regressão gerado. Neste sentido a continuidade dos testes é essencial para se compor um banco de dados mais robusto, e consequentemente mais representativo do comportamento da cavidade analisada perante as solicitações de vibrações.

*Tabela 17 - Sumário do modelo de regressão ajustado a série de dados da Cavidade Piloto.*

<b>Modelo de regressão linear ajustado a série de dados experimentais</b>					
<b>Equação de regressão</b>		$\log(V_{pp}) = 2,262 - 1,1310 \text{ Log}(DE) \text{ [mm/s]}$			
<b>Equação transformada</b>		$V_{pp} = 182,81 \times (DE)^{-1,1310} \text{ [mm/s]}$			
<b>Ajuste dos coeficientes da equação de regressão</b>					
<b>Preditor</b>	<b>Coefficiente</b>	<b>EP. Coeficiente</b>	<b>IC 95%</b>	<b>Valor T</b>	<b>Valor P</b>
Constante	2,262	0,104	2,057; 2,467	21,76	0,000
log(DE)	- 1,1310	0,0720	-1,2731; -0,9889	-15,70	0,000
<b>Análise da correlação entre variáveis e modelo</b>					
<b>Desvio padrão da regressão</b>		<b>Coefficiente R</b>		<b>Coefficiente R<sup>2</sup></b>	
0,247229		56,37 %		56,66 %	
<b>Análise da Variância do modelo (ANOVA)</b>					
<b>Fonte</b>	<b>Graus de liberdade</b>	<b>Soma dos quadrados</b>	<b>Média dos quadrados</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor P</b>
Regressão	1	15,0635	15,0635	246,45	0,000
Erro	189	11,5521	0,0611	-	-
Total	190	26,6156	-	-	-

O modelo convencional obtido subsidiará a elaboração do modelo estocástico de estimativa de velocidade de pico de partícula, desta forma, procedeu-se a análise do mesmo com a finalidade de avaliar a qualidade da equação prognóstica obtida. A avaliação da qualidade do ajuste do modelo de regressão à série de dados sismográficos da Cavidade Piloto, foi realizada com enfoque na análise dos resíduos gerados em cada ponto de observação. É interessante que estes sejam os menores possíveis para se conseguir um ajuste, e consequentemente uma equação prognóstica de atenuação de vibrações com elevado grau de confiabilidade.

A figura 33 apresenta a curva de melhor ajuste a série de dados analisadas, bem como os seus intervalos de confiança e estimativa, ambos em 95 %, onde se observa uma elevada variabilidade dos pontos, o que inevitavelmente desfavorece a qualidade do ajuste dos dados. Ainda é possível a partir da análise da figura 33 observar que a elevada disseminação dos registros induz a construção de um intervalo de previsão de grande amplitude, diminuindo a confiabilidade do modelo.

Os modelos convencionais determinísticos de estimativa de valores de velocidade de pico de partícula, apresentam sensível limitação uma vez que a curva de regressão obtida tem seus coeficientes angular e linear invariáveis, portanto, se mostram pouco aderentes, apresentando fracas correlações estatísticas em muitas situações onde a nuvem de pontos composta pelos pares ordenados (velocidade de pico de partícula, distância escalonada) tem alto grau de dispersão, neste sentido o modelo estocástico reduz significativamente este problema.

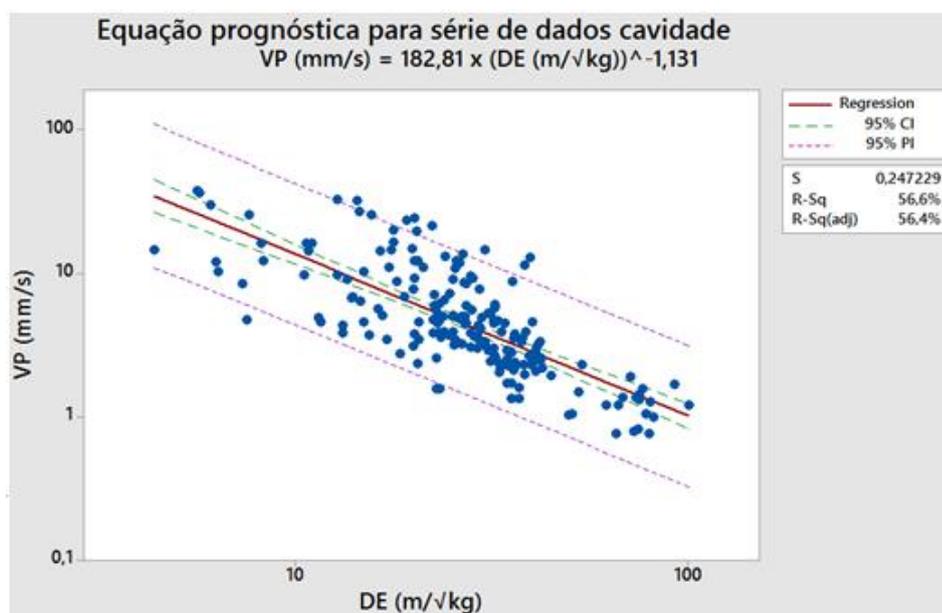


Figura 33 - Gráfico da equação prognóstica de velocidade de pico de partícula para o banco de dados da Cavidade Piloto. Nota-se que o ajuste dos dados fica comprometido em função da grande dispersão dos pontos apresentados.

A figura 34 apresenta os resíduos gerados por ordem de observação, quando do ajuste da série de dados, destaca-se que quão melhor é um ajuste de dados, mais próximos de zero devem estar os resíduos.

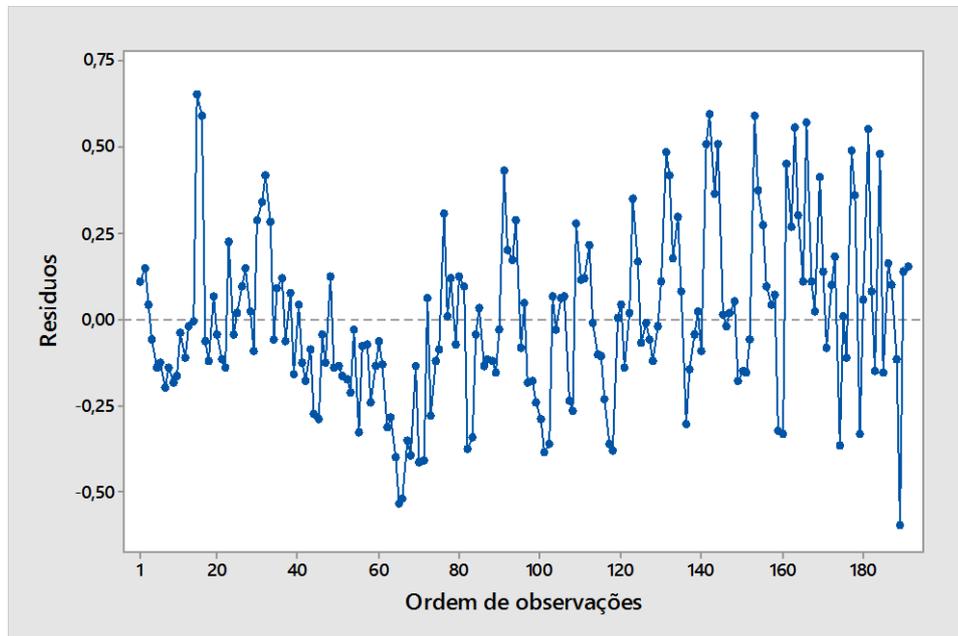


Figura 34 - Gráfico de resíduos gerados no ajuste de dados da Caverna Piloto. Destacando a presença de valores extremos elevados, o que justifica o grau de correlação encontrado.

A partir da avaliação detalhada dos resíduos gerados no ajuste de dados a curva de regressão foi possível elaborar um histograma de frequências observadas de resíduos, sendo possível observar que os mesmos se distribuem principalmente entre o intervalo -0,2 e 0,2 (Figura 35). Observa-se que em geral a aplicação da série de registros sismográficos referentes a Caverna Piloto conduziu a um ajuste de dados com a geração de resíduos aceitáveis, mas que comprometem a qualidade e confiabilidade do modelo de estimativa utilizado.

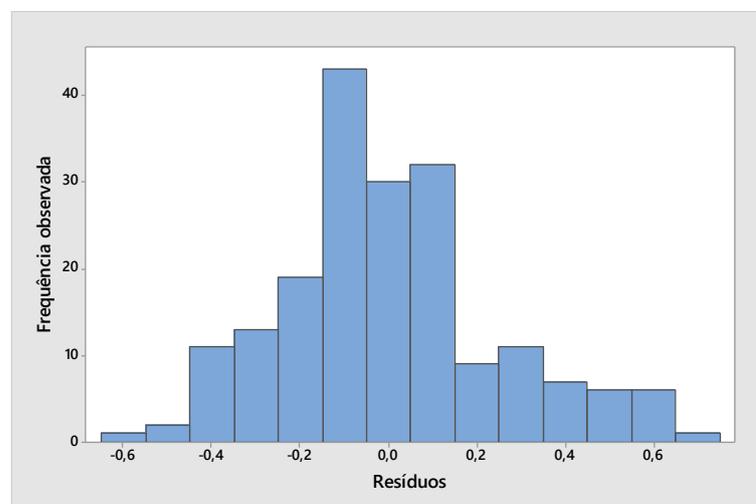


Figura 35 - Histograma de resíduos do ajuste de dados Caverna Piloto. Observa-se elevada concentração entre os valores de -0,2 e 0,2.

### 5.3 Resultados obtidos

O modelo convencional construído a partir do ajuste de dados da Cavidade Piloto, apresentou 56 % de correlação  $R^2$ , o resultado foi fortemente influenciado pela grande variabilidade de dados, e pela elevada heterogeneidade do meio físico de propagação das vibrações.

O ajuste gráfico dos pontos mostrou uma sensível dispersão dos mesmos, ocasionando a geração de resíduos expressivos na regressão linear, o que faz com que a definição da reta de melhor ajuste seja mais imprecisa, isso, aumenta o grau de incerteza quando da estimativa de velocidade de pico de partícula com o uso do modelo convencional.

### 5.4 Aplicação do modelo estocástico de estimativa de velocidade de pico de partícula

O banco de dados sismográfico da Cavidade Piloto foi submetido a avaliação através do modelo estocástico de estimativa de velocidade de pico de partícula, como já mencionado no capítulo 6. O modelo proposto avalia os fatores  $K$  e  $\beta$  como variáveis aleatórias que seguem uma distribuição triangular de probabilidades, com valores máximo, mínimo e mais provável conhecidos, sendo estes parâmetros mencionados aferidos quando da geração da curva de melhor ajuste aos dados, através do método de regressão linear.

A partir do modelo de regressão elaborado através do software Minitab, apresentado na seção 5.2, no qual já foi efetuada a identificação e exclusão de *outliers*, foi possível aferir os parâmetros das variáveis  $K$  e  $\beta$  que irão compor o modelo estocástico de estimativa de valores de velocidade de pico de partícula (Tabela 18).

Tabela 18 - Parâmetros do modelo estocástico de estimativa de valores de velocidade de pico de partícula.

<b>Análise dos coeficientes K e <math>\beta</math> do modelo estocástico de estimativa de vibrações</b>				
<b>Coeficiente</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Mais provável</b>	<b>Máximo</b>	<b>Significância</b>
<b><math>K</math></b>	114,02	182,81	293,09	5 %
<b><math>\beta</math></b>	0,98	1,13	1,27	5 %
<b>Modelo estocástico de estimativa de velocidade de pico de partícula</b>				
<b>Equação prognóstica</b>	$V_{pp} \text{ (mm/s)} = \text{Tri}(114,02;182,82;293,09) \times (DE)^{-\text{Tri}(0,98;1,13;1,27)}$			

Com a utilização do software Crystal Ball foi possível executar simulações dos prováveis valores de velocidade de pico da partícula esperados para diferentes configurações de distância e carga máxima por espera, a partir da aplicação do modelo estocástico elaborado. O modelo estocástico aumenta substancialmente o grau de confiança das previsões, visto que o caráter aleatório dentro de uma distribuição de probabilidades conferido as variáveis  $K$  e  $\beta$  varre um amplo intervalo de possibilidades. O modelo estocástico de estimativa de velocidade de pico de partícula foi aplicado ao banco de dados da Caverna Piloto. A precisão das estimativas foi avaliada segundo o desvio produzido no ajuste, ou seja o módulo da diferença entre o valor real medido em campo, e o valor estimado através do modelo estocástico. O desvio médio observado na avaliação dos 206 dados sismográficos da Caverna Piloto foi de 1,68 mm/s, apresentado desvio padrão de 2,39 mm/s.

A simulação conduzida no modelo estocástico de estimativa de velocidade de pico de partícula se deu a partir da equação prognóstica de atenuações probabilística, exibida na tabela 18, para fins de exibição da metodologia, foi simulado um desmonte de rochas com a utilização de 240 kg de carga máxima por espera, a uma distância de 494 m. Foram executadas 100.000 simulações com base no método de Monte Carlo, com nível de confiança de 95 % considerando como valor mais provável, o valor médio obtido nas mesmas.

A figura 36 apresenta o resultado gráfico das 100.000 simulações executadas nas configurações descritas acima, verifica-se que o valor médio de velocidade de pico de partícula caso se execute um desmonte de rochas nestas condições é de 4,06 mm/s,

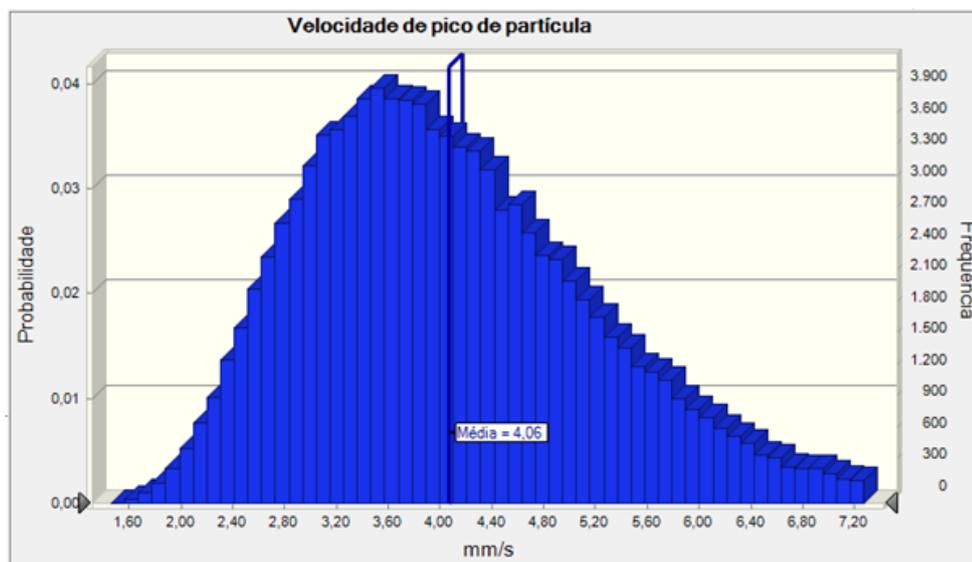


Figura 36 - Curva de distribuição de probabilidades de ocorrência para velocidade de pico de partícula, Caverna Piloto. Nota-se o valor de 4,06 mm/s como valor médio das 100.000 simulações.

O resumo estatístico descritivo para a série de valores de velocidade de pico de partícula simulados é apresentado na tabela 19. A análise dos valores permite destacar a pequena amplitude do intervalo de variação frente ao número de simulações. Destacando-se o erro padrão de estimativa da média, tendo o mesmo valor insignificante.

*Tabela 19 - Estatísticas para valores previstos de velocidade de pico de partícula, Cavidade Piloto.*

<b>ESTATÍSTICA</b>	<b>SÉRIE DE DADOS</b>
<b>Avaliações</b>	100.000
<b>Média</b>	4,06
<b>Mediana</b>	3,91
<b>Moda</b>	---
<b>Desvio Padrão</b>	1,14
<b>Variância</b>	1,30
<b>Obliquidade</b>	0,68
<b>Curtose</b>	3,41
<b>Coefficiente de variação</b>	0,28
<b>Mínimo</b>	1,47
<b>Máximo</b>	9,27
<b>Amplitude do intervalo</b>	7,8
<b>Erro padrão da média</b>	0,00

A tabela 20 apresenta os percentis de distribuição dos valores de velocidade de pico de partícula obtidos através das simulações do modelo estocástico. Observa-se que para as configurações de plano de fogo utilizadas, ou seja, distância de 494 m da cavidade e carga máxima por espera de 240 kg, tem-se apenas 10 % dos valores superiores a 5,64 mm/s, destacando-se que 100% dos valores gerados foram inferiores a 9,45 mm/s.

*Tabela 20 - Percentis para valores de velocidade de pico de partícula simuladas, Cavidade Piloto.*

<b>PERCENTIL</b>	<b>VALORES DE ESTIMATIVA</b>
<b>P 100</b>	1,46 mm/s
<b>P 90</b>	2,71 mm/s
<b>P 80</b>	3,07 mm/s
<b>P 70</b>	3,36 mm/s
<b>P 60</b>	3,63 mm/s
<b>P 50</b>	3,91 mm/s
<b>P 40</b>	4,22 mm/s
<b>P 30</b>	4,56 mm/s
<b>P 20</b>	4,99 mm/s
<b>P 10</b>	5,64 mm/s
<b>P 0</b>	9,45 mm/s

A figura 37 apresenta a análise gráfica de probabilidades e frequências acumulativas previstas para os valores de velocidade e pico de partícula gerados nas simulações, destacando-se que apenas 5 % dos valores previstos para o desmorte com as configurações já mencionadas são superiores a 6,18 mm/s, também aparecem como marcadores no gráfico o valor para o P95 e o valor médio obtido, 2,46 mm/s e 4,06 mm/s respectivamente.

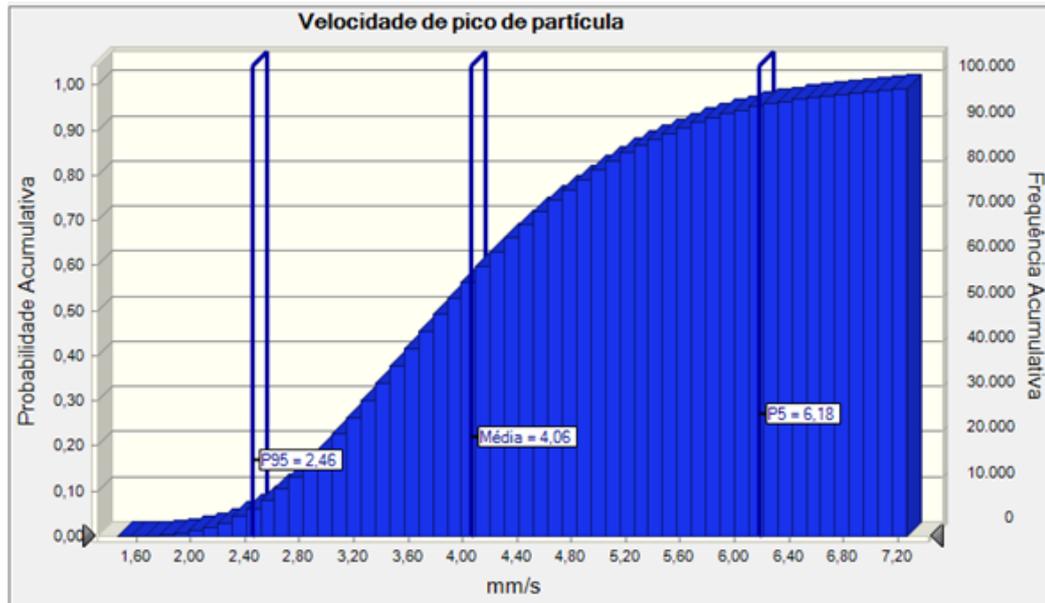


Figura 37 - Frequência e probabilidade acumulativa para valores estimados de Vpp. Destacando-se que apenas 5 % dos valores foram superiores a 6,18 mm/s, valor médio de 4,06 mm/s, e 95 % dos valores superiores a 2,46 mm/s.

## 5.5 Aplicação do modelo estocástico de estimativa de velocidade crítica de vibração

A estimativa da velocidade crítica de vibração para a Cavidade Piloto foi realizada segundo metodologia descrita no capítulo 4.4. O modelo considera os parâmetros, resistência a compressão uniaxial, densidade da rocha e velocidade de propagação de ondas primárias, variáveis aleatórias dentro de uma distribuição de probabilidades pré-definida. Pretende-se a partir desta análise estimar os prováveis valores máximos de velocidade de pico de partícula suportado pela cavidade, com base em suas especificidades geomecânicas e estruturais.

A aferição dos parâmetros fundamentais da distribuição de probabilidades das variáveis mencionadas acima foi realizada através da análise de dados fornecidos pela Vale SA, e consultas a pesquisas anteriormente desenvolvidas nas minas do complexo Serra Norte em Carajás, pelos autores Brandi *et al.*(2015) e Lima *et al.* (2013), no total foram analisados 82 dados de UCS, velocidade de propagação de ondas P e densidade, da Cavidade Piloto.

A partir da avaliação das informações obtidas, e após as etapas de agrupamento e tratamento estatístico dos dados, foi possível gerar a matriz de parâmetros fundamentais da Cavidade Piloto, apresenta na tabela 21.

Tabela 21 – Matriz de informações da Cavidade Piloto.

<b>Descrição da cavidade analisada</b>			
<b>Cavidade</b>	Cavidade Piloto		
<b>Litologias presentes</b>	Canga estruturada, Canga detrítica e Formação Ferrífera Bandada		
<b>Parâmetros físicos</b>			
<b>Variáveis</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Mais provável</b>	<b>Máximo</b>
<b>Densidade</b>	2,34 g/cm <sup>3</sup>	3,17 g/cm <sup>3</sup>	3,64 g/cm <sup>3</sup>
<b>Velocidade Ondas P</b>	2.884 m/s	4.558 mm/s	6.279 m/s
<b>Parâmetros Geomecânicos</b>			
<b>Variáveis</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Mais provável</b>	<b>Máximo</b>
<b>RMR</b>	25	44	64
<b>UCS</b>	16 MPa	57 MPa	200 Mpa

Os dados apresentados na tabela 21 subsidiaram a elaboração da equação (23) de determinação da velocidade crítica de vibração com modelagem probabilística, na qual as variáveis seguem uma distribuição triangular de probabilidades tendo como parâmetros os valores, mínimo, mais provável e máximo, a mesma é apresentada abaixo.

$$Vc = \varphi x \frac{\sigma}{\rho x \mu} \quad (23)$$

Onde:

Vc = Velocidade crítica de vibração (mm/s).

$\varphi$  = Fator de conversão proposto pelo autor: (0,05;0,07;0,1).

$\sigma$  = Resistência a compressão uniaxial (UCS) em (MPa): (16;57;200).

$\rho$  = Densidade em (kg/m<sup>3</sup>): (2.340;3.170;3.640).

$\mu$  = Velocidade de propagação de ondas P em (m/s): (2.884;4558;6.279).

O modelo estocástico de estimativa de velocidade crítica apresentado acima foi submetido a etapa de simulação com a utilização do software Crystal Ball, foram rodadas 100.000 simulações a fim de se obter o valor mais provável para a velocidade de pico de partícula a partir da qual a Cavidade Piloto passaria a experimentar aumento no potencial de dano estrutural, como dilatação de juntas e discontinuidades pré-existentes.

A figura 38 apresenta o resultado gráfico das 100.000 simulações do modelo estocástico de estimativa de velocidade crítica de vibração, destaca-se o valor de 49,42 mm/s como valor médio, ou seja valor de velocidade de pico de partícula limite, a partir do qual danos estruturais podem ocorrer.

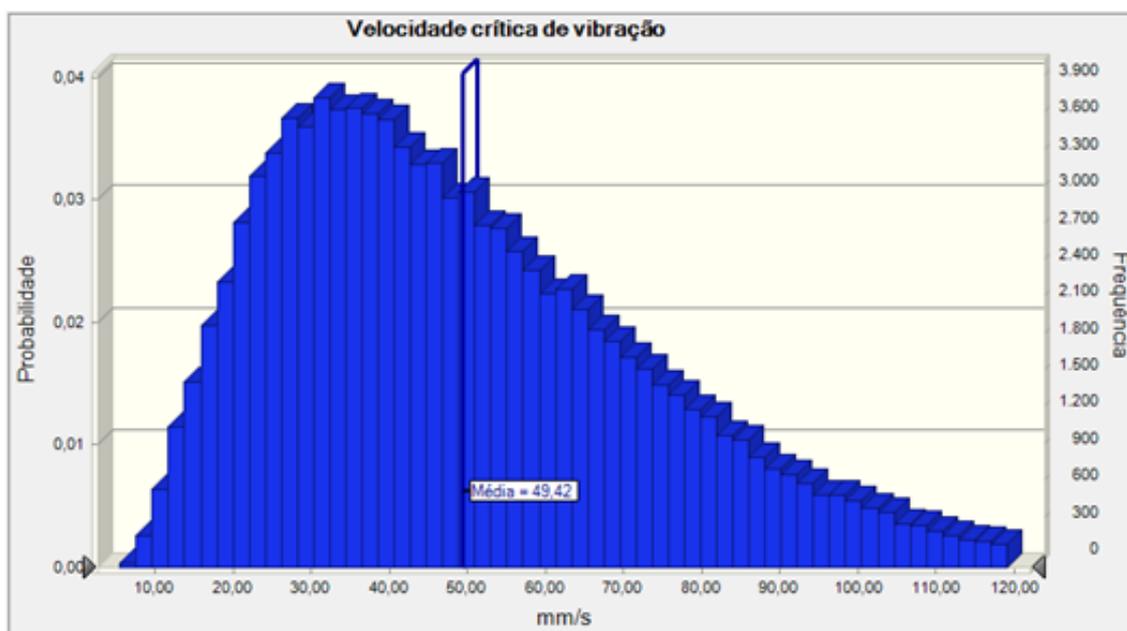


Figura 38 - Gráfico da distribuição de probabilidades para valores estimados de velocidade crítica de vibração para a Cavidade Piloto. Destaca-se o valor médio das 100.00 simulações, como sendo 49,42 mm/s.

A figura 39 mostra o gráfico de frequências e probabilidades acumulativas previstas a partir das 100.000 simulações para valores previstos de velocidade crítica de vibração da Cavidade Piloto. Destacando-se o valor de 49,42 mm/s como valor de velocidade crítica de vibração para a cavidade analisada, segundo a metodologia sugerida neste estudo.

Ainda segunda a figura 39, podemos observar que aproximadamente 40 % dos valores gerados nas simulações é superior ao valor tomado como crítico. Este resultado mostra que existe uma alta probabilidade de a cavidade suportar valores superiores ao estimado.

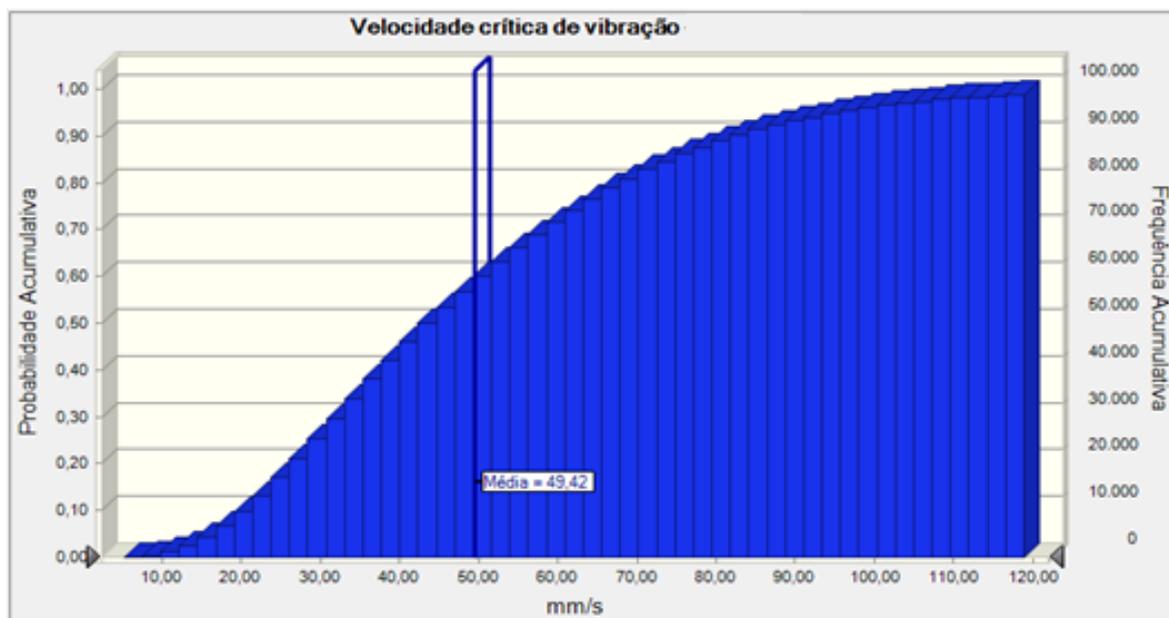


Figura 39 - Gráfico de frequência e probabilidade acumulativa para valores de velocidade crítica de vibração para Cavityde Piloto. Destacando-se o valor médio das 100.000 simulações, como sendo 49,42 mm/s.

Com a finalidade de se obter um maior detalhamento acerca da estimativa dos valores prováveis de velocidade crítica de vibração, foi elaborada a tabela 22 que apresenta um resumo estatístico das 100.000 simulações executadas, destacando-se o baixo valor associado ao erro padrão de estimação do valor médio.

Tabela 22 - Estatísticas para estimativas de velocidade crítica de vibração, Cavityde Piloto.

ESTATÍSTICA	SÉRIE DE DADOS
<b>Avaliações</b>	100.000
<b>Média</b>	49,42
<b>Mediana</b>	44,76
<b>Moda</b>	----
<b>Desvio Padrão</b>	24,82
<b>Variância</b>	616,20
<b>Obliquidade</b>	0,9406
<b>Curtose</b>	3,94
<b>Coefficiente de variação</b>	0,50
<b>Mínimo</b>	5,21
<b>Máximo</b>	205,52
<b>Amplitude do intervalo</b>	200,31
<b>Erro padrão da média</b>	0,08

A avaliação dos valores de estimativa de velocidades de pico de partículas gerados nas simulações, segundo agrupamentos em percentis de 10 % foi conduzida visando o aumento do grau de detalhamento das informações.

A tabela 23 apresenta a distribuição por percentis dos valores de velocidade crítica de vibração previstos para a Caverna Piloto após o modelo estocástico ser submetido a 100.000 simulações. Observa-se que o valor médio estimado, 49,42 mm/s se encontra próximo ao P40, ou seja aproximadamente 60 % dos valores gerados são inferiores ao valor estimado de velocidade crítica de vibração.

*Tabela 23 - Percentis do valores previstos para velocidade crítica de vibração, Caverna Piloto.*

<b>PERCENTIL</b>	<b>VALORES DE ESTIMATIVA</b>
<b>P 100</b>	5,52 mm/s
<b>P 90</b>	21,52 mm/s
<b>P 80</b>	27,26 mm/s
<b>P 70</b>	33,25 mm/s
<b>P 60</b>	38,80 mm/s
<b>P 50</b>	44,81 mm/s
<b>P 40</b>	51,45 mm/s
<b>P 30</b>	59,38 mm/s
<b>P 20</b>	69,28 mm/s
<b>P 10</b>	83,90 mm/s
<b>P 0</b>	212,97 mm/s

Após as análises e resultados exibidos acima, pode se inferir com base nos critérios apresentados que a velocidade crítica de vibração para a Caverna Piloto é 49,42 mm/s, segundo a metodologia proposta, sendo este valor fruto da submissão de um modelo estocástico de previsões de valores de velocidade crítica de partícula a uma série de 100.000 simulações.

O resultado encontrado é validado quando da análise do diagrama proposto por Singh (2001), consagrado mundialmente, no qual o valor máximo de velocidade de pico de partícula permitido para um maciço rochoso é correlacionado com o valor do *Rock Mass Rating* RMR correspondente ao mesmo.

Tomando como 44 o valor médio de RMR para a Caverna Piloto, como apresentado na tabela 21, observamos que o valor crítico de vibração sugerido pelo modelo estocástico, 49,42 mm/s se situa dentro da zona de segurança, de acordo com o diagrama da figura 40, ou seja sendo incapaz de causar danos estruturais.

Ainda de acordo com a análise do diagrama, percebe-se que parametrizando a velocidade crítica de vibração junto ao RMR, a Caverna Piloto poderia suportar, sem danos, vibrações da ordem de 80 mm/s, valor este aproximadamente 61 % superior ao valor proposto pelo modelo estocástico.

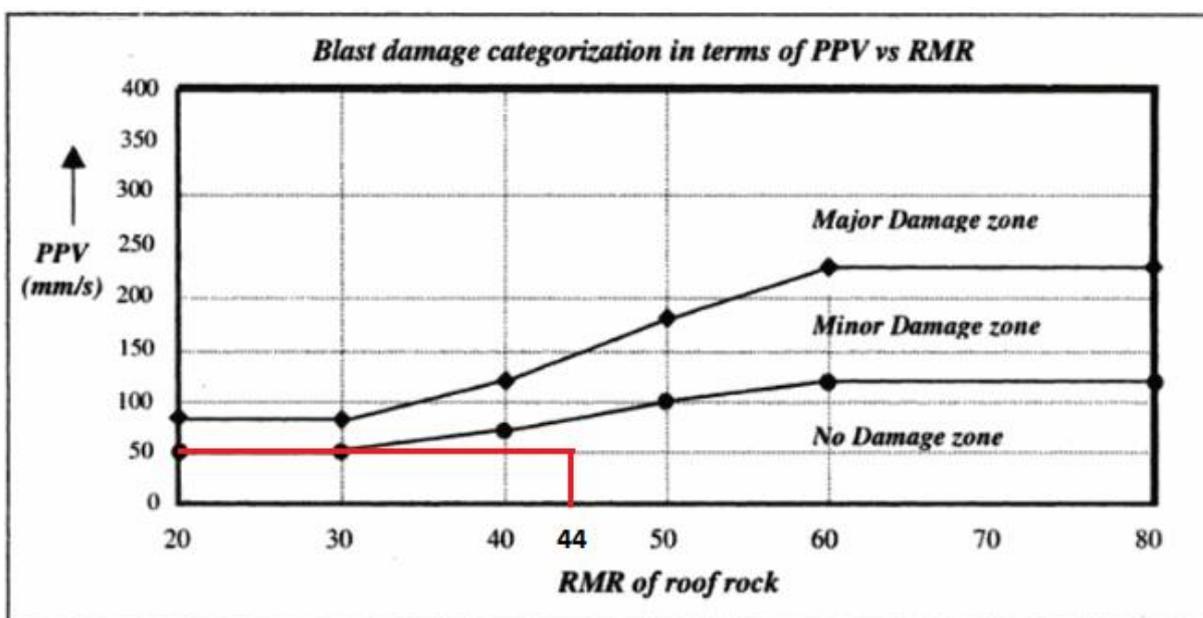


Figura 40 - Diagrama velocidade crítica de vibração x RMR para Caverna Piloto.

Cabe ressaltar a todo momento que o valor encontrado e proposto segundo o modelo estocástico, ou seja 49,42 mm/s, é razoável, uma vez que também foi validado pela análise do diagrama de correlação entre velocidade de pico de partícula e RMR. O modelo usado na estimativa do mesmo é considerado conservador uma vez que subestima parâmetros geomecânicos e físicos, visto que podem ocorrer erros associados a aferição dos mesmos.

## 5.6 Estimativa do raio de proteção para caverna piloto

A proposta de estimativa do raio mínimo de proteção de cavernas naturais subterrâneas apresentada nesse estudo, sugere a adoção de uma análise onde as especificidades físicas e

geomecânicas de cada cavidade, e parâmetros operacionais de cada plano de fogo sejam consideradas.

A integração dos modelos estocásticos de estimativa de velocidade de pico de partícula, e estimativa de valores de velocidade crítica, possibilita estimar com base em critérios estatísticos o raio mínimo de proteção às cavidades sob o ponto de vista estrutural.

A metodologia adotada na estimativa do raio mínimo de proteção a Cavidade Piloto consistiu na avaliação da vibração induzida a cavidade por desmontes realizados com cargas máximas por espera (CME) nos seguintes valores: 250 kg, 500 kg, 750 kg e 1000 kg. Assumindo 49,42 mm/s como valor de velocidade crítica de vibração para a Cavidade Piloto, adotou-se dois cenários com premissas distintas, como mostrado na tabela 9.

Em uma primeira análise, ou no cenário A, procurou-se determinar o raio mínimo de proteção à cavidade estabelecendo como critério fundamental a condição de que o valor médio de vibração previsto nas simulações fosse inferior ao valor de velocidade crítica de vibração estimado. Posteriormente foi avaliado um novo cenário, ou cenário B, e uma nova proposta de raio mínimo de proteção foi apresentada, adicionando ao critério já estabelecido, a premissa de que a probabilidade de ocorrência de valores de velocidade de pico de partícula superiores a velocidade crítica de vibração, não ultrapassasse 10 %, refletindo portanto uma postura mais conservadora.

A tabela 24 apresenta o resumo das simulações do modelo estocástico de estimativa de velocidade de pico de partícula para um desmonte com carga máxima por espera (CME) de 250 kg, foram realizadas 100.000 simulações. Observa-se que o raio mínimo de proteção exigido para um desmonte com a configuração de CME mencionada foi de 55 m, visto que a velocidade de pico de partícula estimada foi de 48,39 mm/s, inferior portanto a velocidade crítica de vibração, porém com a probabilidade de ocorrência de valores de velocidade de pico de partícula superiores a velocidade crítica foi de 42 %, o que pode ser considerado alta.

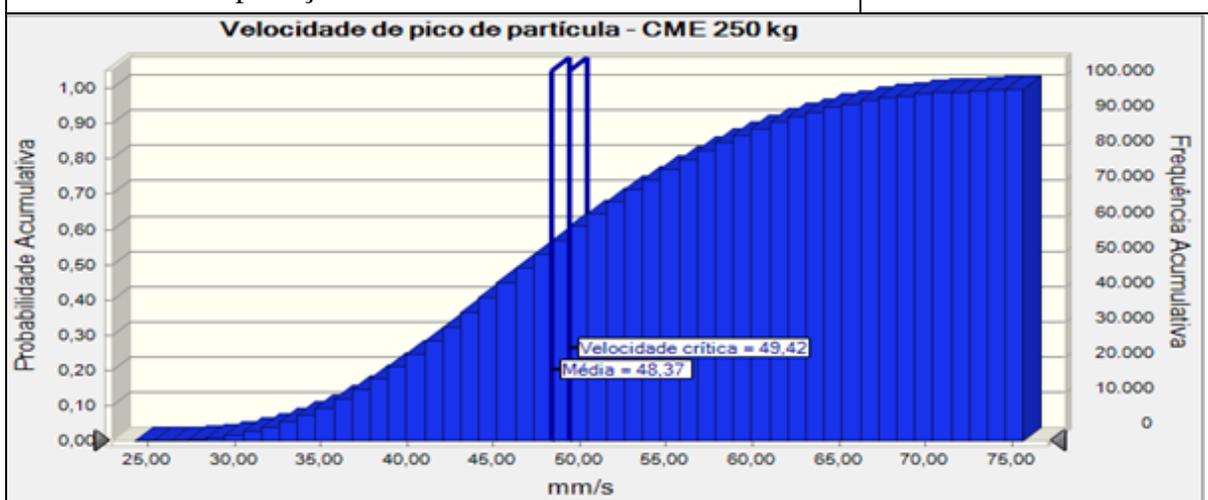
Ainda na tabela 24 é apresentada a análise gráfica de probabilidades e frequências acumulativas para os valores de velocidade de pico de partícula. Destaca-se os marcadores referentes ao valor

médio aferido das 100.000 simulações, e o marcador referente a velocidade crítica de vibração estimada.

A avaliação gráfica permite concluir que o valor estimado de velocidade de pico de partícula é bem próximo ao valor estimado de velocidade crítica de vibração, fato este que acaba refletindo em um baixo grau de segurança, observando que a probabilidade de ocorrência de valores de velocidade de pico de partícula superiores a velocidade crítica de vibração é alta.

Tabela 24 - Estimativa de raio mínimo de proteção Cavidade Piloto - CME 250 kg, Cenário A.

Cavidade analisada	Cavidade Piloto
Velocidade crítica de vibração estimada	49,42 mm/s
Carga máxima por espera simulada	250 kg
Velocidade de pico de partícula estimada	48,37 mm/s
Probabilidade de Velocidade de pico estimada > 49,42 mm/s	42 %
Raio mínimo de proteção estimado	55 m



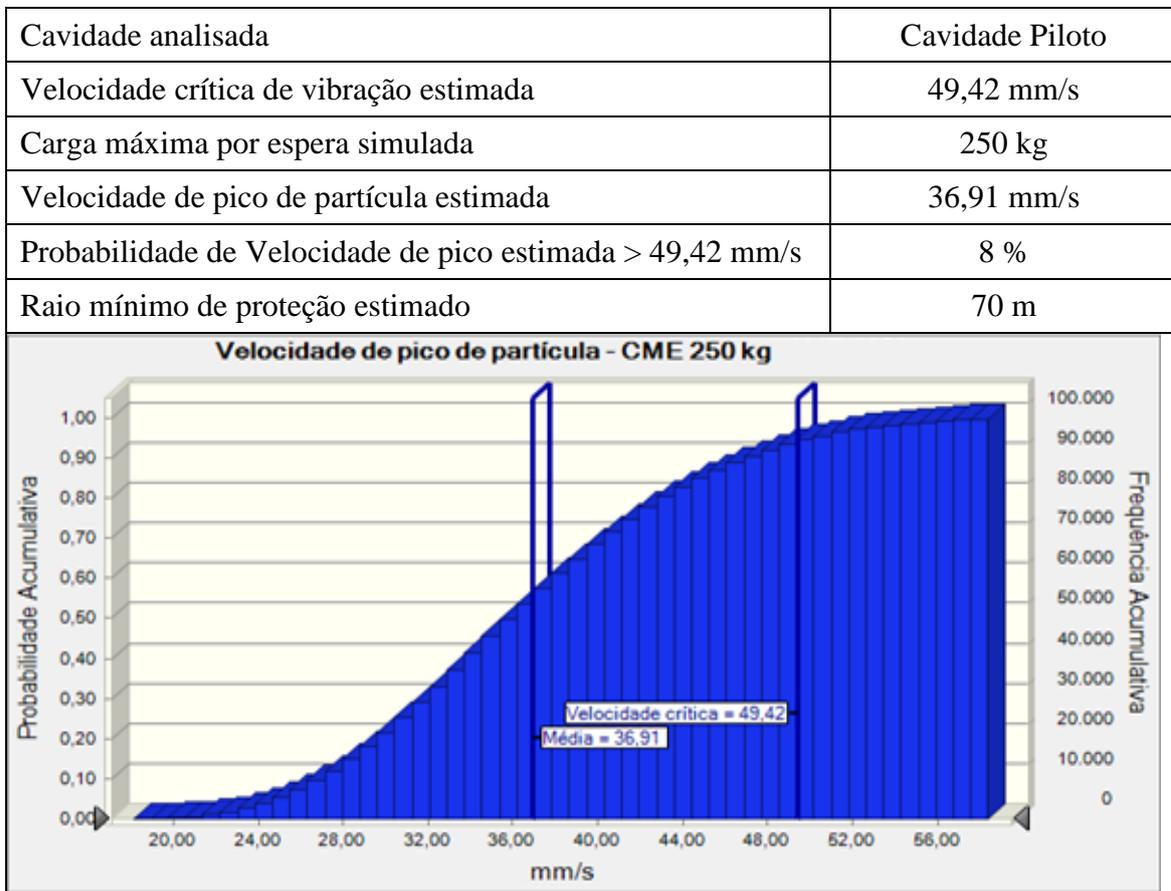
Considerando a alta probabilidade de ocorrência de valores de velocidade de pico de partícula superiores a velocidade crítica (42 %), um novo raio mínimo de proteção foi estimado, assumindo como premissas que o valor médio de velocidade de vibração previsto fosse menor que a velocidade crítica estimada, e que a probabilidade de ocorrência de valores superiores a velocidade crítica fosse menor que 10 % (cenário B).

A tabela 25 apresenta os resultados obtidos a partir de uma nova estimativa de raio mínimo de proteção para a Cavidade Piloto utilizando CME de 250 kg, adotando as premissas descritas acima. Observa-se que o valor médio estimado de velocidade de pico de partícula foi de 36,91

mm/s, 25 % inferior a velocidade crítica de vibração, e a probabilidade de valores de vibração maiores que o limite estabelecidos foi de apenas 8 %, levando a estimativa de um raio mínimo de proteção de 70 m.

Ainda segundo a tabela 25 é possível verificar através da análise gráfica o grau de afastamento entre a velocidade de pico de partícula estimada, e a velocidade crítica estimada. Esse padrão de ocorrência confere alto grau de segurança a estimativa de raio de proteção apresentada, uma vez que a probabilidade de ocorrência de valores de velocidade de pico de partícula que podem superar a velocidade crítica estimada é de somente 8 %, o que pode ser considerado como baixa probabilidade frente ao número de simulações executadas.

Tabela 25 - Estimativa de raio mínimo de proteção Cavidade Piloto - CME 250 kg, Cenário B.

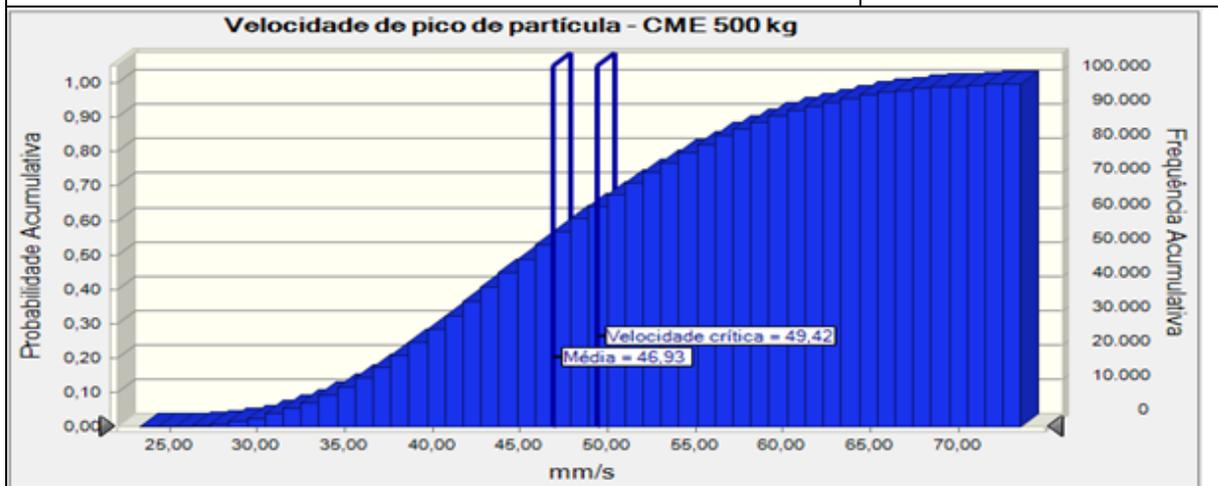


A tabela 26 mostra os resultados da estimativa de raio mínimo de proteção para a Cavidade Piloto com a utilização de CME de 500 kg, tendo sido estimado através das 100.000 simulações, o valor de 46,93 mm/s como o valor médio, com uma probabilidade de 38 % de ocorrência de valores superiores ao limite imposto pela velocidade crítica de vibração.

Ainda segundo a tabela 26, destaca-se que o raio mínimo de proteção à Cavidade Piloto estimado, foi de 80 m. Esse valor representa uma redução de 170 m, ou aproximadamente 68 % no valor mínimo exigido por lei. A velocidade crítica de vibração estimada para a Cavidade Piloto, 49,42 mm/s foi ainda aproximadamente 5 % do que a velocidade de pico de partícula estimada através do modelo estocástico.

Tabela 26 - Estimativa de raio mínimo de proteção Cavidade Piloto - CME 500 kg, Cenário A.

Cavidade analisada	Cavidade Piloto
Velocidade crítica de vibração estimada	49,42 mm/s
Carga máxima por espera simulada	500 kg
Velocidade de pico de partícula estimada	46,93 mm/s
Probabilidade de Velocidade de pico estimada > 49,42 mm/s	38 %
Raio mínimo de proteção estimado	80 m



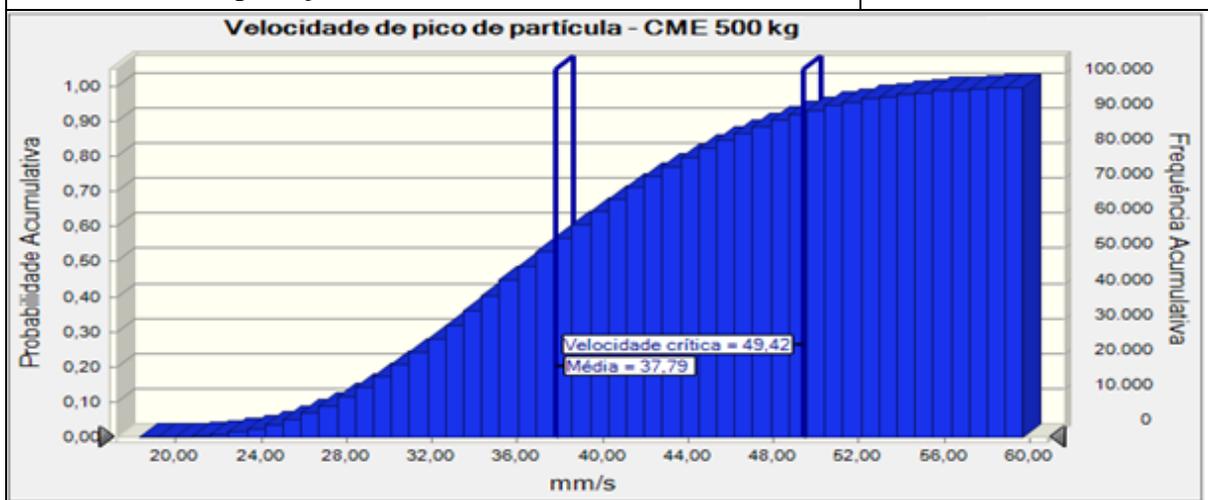
A tabela 27 apresenta os resultados obtidos a partir de uma nova estimativa de raio mínimo de proteção para a Cavidade Piloto utilizando CME de 500 kg, adotando as premissas estabelecidas no sentido de diminuir a probabilidade de ocorrência de valores de velocidade de pico de partícula superiores ao limite de velocidade crítica de vibração.

Observa-se que o valor médio estimado de velocidade de pico de partícula foi de 37,79 mm/s, 24 % inferior a velocidade crítica de vibração, e a probabilidade de valores de vibração maiores que o limite estabelecidos foi de apenas 9 %, levando a estimativa de um raio mínimo de proteção de 97 m.

A análise gráfica da tabela 27 permite verificar o grau de afastamento entre a velocidade de pico de partícula estimada, e a velocidade crítica estimada, com este padrão de ocorrência conferindo alto grau de segurança a estimativa de raio de proteção apresentada.

Tabela 27 – Estimativa de raio mínimo de proteção Cavidade Piloto - CME 500 kg, cenário B.

Cavidade analisada	Cavidade Piloto
Velocidade crítica de vibração estimada	49,42 mm/s
Carga máxima por espera simulada	500 kg
Velocidade de pico de partícula estimada	37,79 mm/s
Probabilidade de Velocidade de pico estimada > 49,42 mm/s	9 %
Raio mínimo de proteção estimado	97 m



A tabela 28 mostra os resultados obtidos através do processo de estimativa de raio mínimo de proteção para a Cavidade Piloto com a utilização de 750 kg de CME. O valor médio estimado para a velocidade de pico de partícula foi de 48,57 mm/s, com probabilidade de ocorrência de valores superiores ao limite imposto pela velocidade crítica de vibração, na ordem de 42 %, culminado com a estimativa de um raio mínimo de proteção de aproximadamente 95 m.

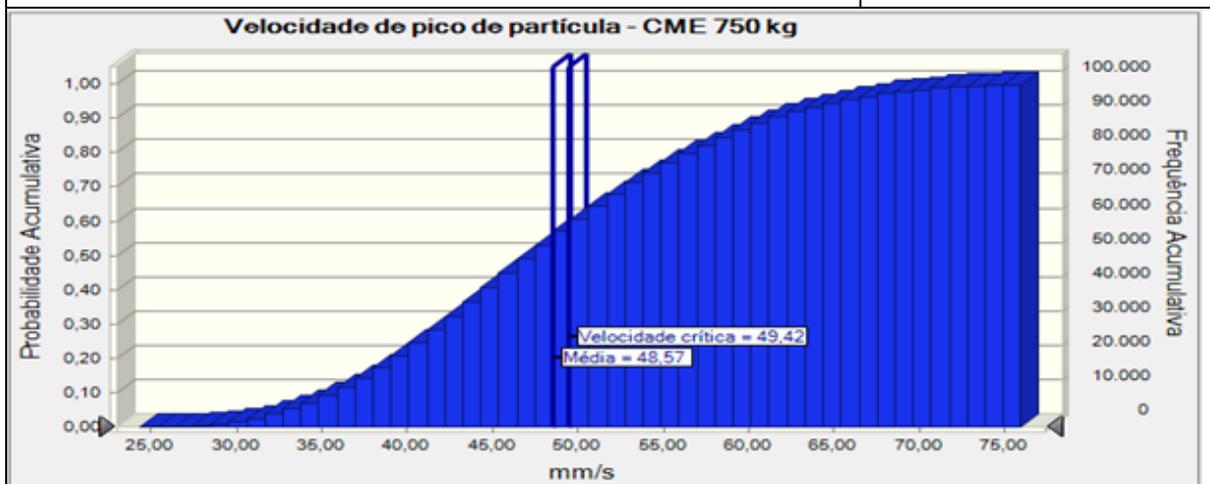
Vale ressaltar que um incremento de 250 kg no valor de carga máxima por espera, passando de 500 kg para 750 kg, ou seja uma aumento de 50 % representa uma diminuição de 15 m, passando de 80 m para 95 m de raio mínimo requerido. O resultado mostra claramente a relação estreita entre essas duas grandezas.

Ainda que se considere um raio de proteção da ordem de 95 m, apesar da alta probabilidade de a velocidade de pico de partícula, superar a velocidade crítica de vibração para a cavidade, o

mesmo representaria uma diminuição de 62 % se comparado ao limite imposto por lei que corresponde a 250 m. Evidentemente mais estudos devem ser conduzidos afim de se confirmar estas estimativas, que apontam para a possibilidade de se lavrar em limites inferiores aos estabelecidos com alta segurança operacional.

Tabela 28 - Estimativa de raio mínimo de proteção Cavityde Piloto - CME 750 kg, cenário A.

Cavidade analisada	Cavidade Piloto
Velocidade crítica de vibração estimada	49,42 mm/s
Carga máxima por espera simulada	750 kg
Velocidade de pico de partícula estimada	48,57 mm/s
Probabilidade de Velocidade de pico estimada > 49,42 mm/s	42 %
Raio mínimo de proteção estimado	95 m



A tabela 29 mostra os resultados da estimativa de raio mínimo de proteção para a Cavidade Piloto com a utilização de CME de 750 kg, na ocasião foi estimado através das 100.000 simulações o valor de 37,38 mm/s como o valor médio, com uma probabilidade de 7 % de ocorrência de valores superiores ao limite imposto pela velocidade crítica de vibração.

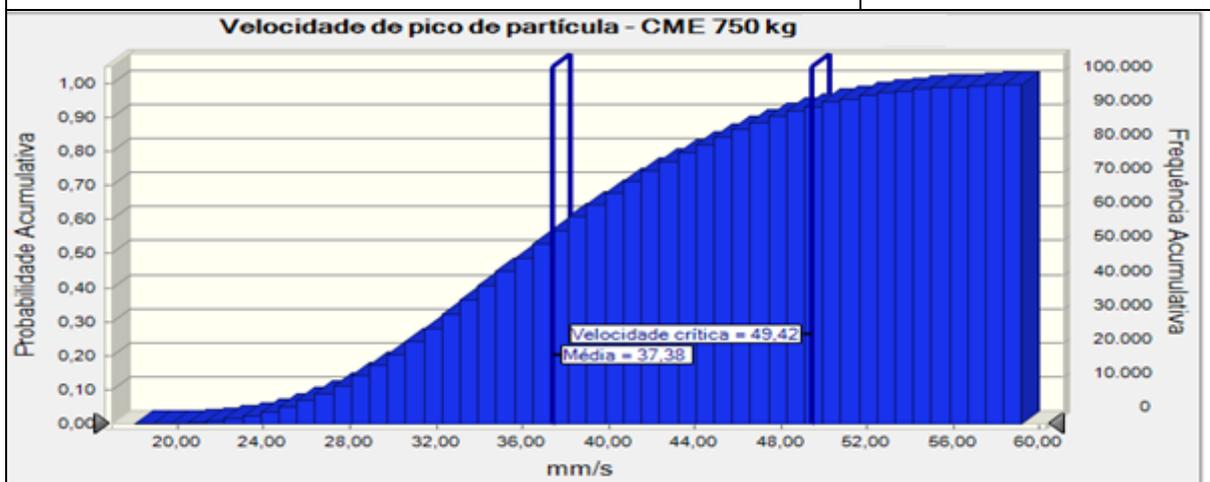
Ainda segundo a tabela 29 podemos observar que o raio de proteção estimado é de 120 m, o que representa um redução de 130 m frente ao imposto pela atual legislação ambiental brasileira, esse valor representa uma redução de aproximadamente 52 %.

Cabe salientar que a premissa adotada na simulação apresenta na tabela 29 está alinhada ao cenário B, ou seja um cenário mais conservador. O valor estimado para velocidade de pico de

partícula foi de 37,38 mm/s, o que representa aproximadamente 75 % do valor estimado para velocidade crítica de vibração da Cavidade Piloto.

Tabela 29 - Estimativa de raio mínimo de proteção Cavidade Piloto - CME 750 kg, Cenário B.

Cavidade analisada	Cavidade Piloto
Velocidade crítica de vibração estimada	49,42 mm/s
Carga máxima por espera simulada	750 kg
Velocidade de pico de partícula estimada	37,38 mm/s
Probabilidade de Velocidade de pico estimada > 49,42 mm/s	7 %
Raio mínimo de proteção estimado	120 m

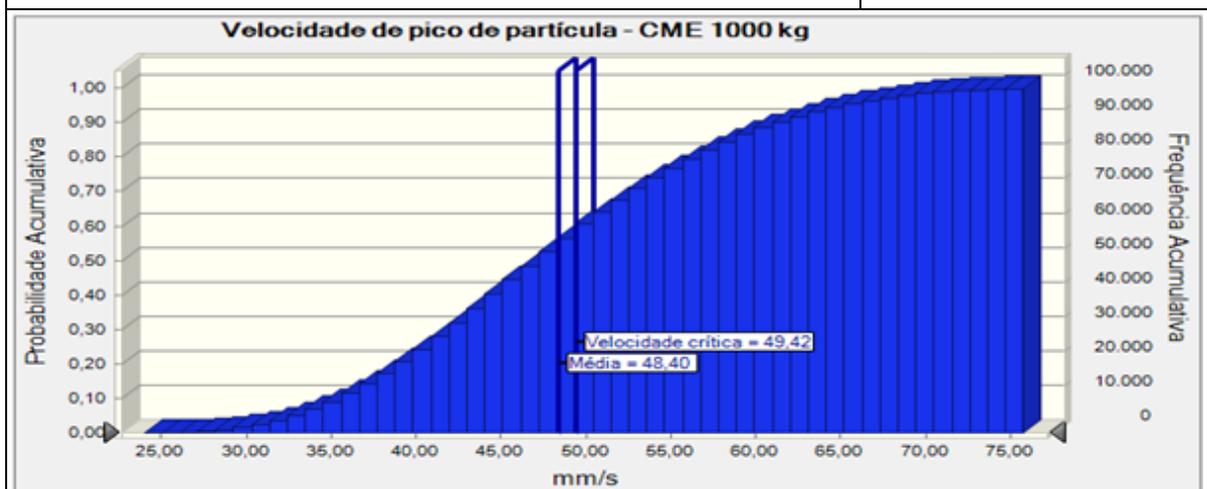


A tabela 30 apresenta os resultados do processo de estimativa do raio mínimo de proteção a Cavidade Piloto, com a utilização de 1000 kg como carga máxima por espera.

Na ocasião o modelo estocástico apontou através das 100.000 simulações o valor de 49,40 mm/s como sendo o mais provável para a configuração do plano de fogo utilizado, sendo possível destacar, que a probabilidade de ocorrência de valores de velocidade de pico de partícula superiores ao limite imposto pela velocidade crítica de vibração foi da ordem de 40 %, valor este considerado relativamente alto.

Tabela 30 - Estimativa de raio mínimo de proteção Cavidade Piloto - CME 1000 kg.

Cavidade analisada	Cavidade Piloto
Velocidade crítica de vibração estimada	49,42 mm/s
Carga máxima por espera simulada	1000 kg
Velocidade de pico de partícula estimada	48,40 mm/s
Probabilidade de Velocidade de pico estimada > 49,42 mm/s	40 %
Raio mínimo de proteção estimado	110 m



Por fim foi executada uma nova análise para a estimativa do raio mínimo de proteção à Cavidade Piloto, mantendo-se a utilização de 1000 kg como carga máxima por espera.

Adotando a premissa estipulada de que a probabilidade de ocorrência de valores de velocidade de pico de partícula superiores a velocidade crítica de vibração estimada, não ultrapasse os 10 %, foi possível determinar o raio mínimo de proteção à cavidade nas configurações descritas, no valor de 135 m, com o valor mais provável de velocidade de pico de partícula na faixa de 38,46 mm/s, com probabilidade de 9 % destes superarem a velocidade crítica estimada para a Cavidade Piloto.

Observa-se que o valor médio de velocidade de pico de partícula estimado é aproximadamente 22 % inferior ao valor de velocidade de vibração crítica estimada, este comportamento associado a baixa probabilidade de ocorrências de valores superiores confere baixa probabilidade de risco a estimativa, tabela 31.

Tabela 31 - Segunda estimativa de raio mínimo de proteção Caverna Piloto - CME 1000 kg.

Caverna analisada	Caverna Piloto
Velocidade crítica de vibração estimada	49,42 mm/s
Carga máxima por espera simulada	1000 kg
Velocidade de pico de partícula estimada	38,46 mm/s
Probabilidade de Velocidade de pico estimada > 49,42 mm/s	9 %
Raio mínimo de proteção estimado	135 m

A partir da organização dos resultados apresentados acima, foi possível elaborar a matriz analítica de estimativa do raio mínimo de proteção à Caverna Piloto, demonstrada na tabela 32, onde entende-se velocidade de pico de partícula (Vpp) e Velocidade crítica de vibração (Vcrítica).

A análise da mesma permite averiguar que os valores estimados para o raio mínimo de proteção à caverna em questão são em sua totalidade inferiores aos 250 m exigidos pela legislação vigente, o que comprova que esta imposição não é pautada em critérios técnicos.

O menor raio mínimo de proteção possível de ser praticado é de 55 m, quando utilizado 250 kg como carga máxima por espera, equivalendo a uma redução de 78 % frente ao valor exigido na legislação.

O maior valor praticado segundo a matriz analítica da tabela 32 é de 135 m, quando da utilização de 1000 kg de carga máxima por espera. Esta análise, mesmo contemplando um elevado valor de carga máxima por espera, foi capaz de estimar o raio mínimo de proteção à Caverna Piloto em 135 m, associado a apenas 9 % de probabilidade de ocorrência de velocidades de pico de

partícula superiores a velocidade crítica estimada, essa proposta apresentando um redução de 46 % do valor exigido por lei.

Ressalta-se que os valores apresentados são frutos de estimativas feitas a partir da aplicação da metodologia proposta, recomendando-se a continuidade dos trabalhos de monitoramento.

*Tabela 32 – Simulações dos cenários A e B para estimativa do raio mínimo de proteção a Caverna Piloto.*

<b>Simulações do cenário A</b>				
<b>Carga máxima por espera</b>	<b>250 kg</b>	<b>500 kg</b>	<b>750 kg</b>	<b>1000 kg</b>
<b>Velocidade de pico de partícula</b>	48,39 mm/s	46,93 mm/s	46,93 mm/s	48,40 mm/s
<b>Probabilidade de <math>V_{pp} &gt; V_{crítica}</math></b>	42 %	38 %	38 %	40 %
<b>Raio mínimo de proteção</b>	<b>55 m</b>	<b>80 m</b>	<b>80 m</b>	<b>110 m</b>
<b>Simulações do cenário B</b>				
<b>Carga máxima por espera</b>	<b>250 kg</b>	<b>500 kg</b>	<b>750 kg</b>	<b>1000 kg</b>
<b>Velocidade de pico de partícula</b>	36,91 mm/s	37,79 mm/s	37,38 mm/s	38,46 mm/s
<b>Probabilidade de <math>V_{pp} &gt; V_{crítica}</math></b>	8 %	9 %	7 %	9 %
<b>Raio mínimo de proteção</b>	<b>70 m</b>	<b>97 m</b>	<b>120 m</b>	<b>135 m</b>

Diante do exposto, a aplicação da metodologia proposta conduz a resultados satisfatórios no que tange a execução de operações de lavra no entorno de cavidades naturais subterrâneas, apresentando reduções significativas nos valores estabelecidos para o raio mínimo de proteção.

A metodologia apresentada encerra em si caráter experimental, que evidentemente necessita de uma continuidade de estudos para maiores aprofundamentos e detalhamentos, aumentando assim confiabilidade da mesma.

Os resultados experimentais apontam a possibilidade de se operar com segurança nas adjacências da Caverna Piloto, com o valor do raio mínimo de proteção variando entre 55 e 135 m, a depender da carga máxima por espera utilizada, e do nível de segurança adotado.

Ressalta-se que a aplicação da modelagem apresentada estima valores de velocidade crítica de vibração, e raios de proteção às cavidades naturais subterrâneas fundamentada na análise da velocidade de pico de partícula, no entanto fatores como a frequência de vibração e aspectos litoestruturais das cavidades, além das técnicas operacionais empregas nos planos de fogo, exercem significativa influência nos índices de resistência a esforços dinâmicos das cavidades.

Essa conclusão só foi possível graças a integração dos modelos estocásticos de estimativa de velocidade de pico de partícula, e estimativa de velocidade crítica de vibração para a Cavidade Piloto. A adoção de um critério técnico, que considere as especificidades de cada cavidade, e plano de fogo, pode conduzir a estimativa de um raio mínimo de proteção confiável e seguro.

## 6 CONCLUSÕES

A metodologia experimental de estimativa do raio mínimo de proteção às cavidades naturais subterrâneas apresentada nesse estudo conduziu a resultados satisfatórios. O modelo estocástico de estimativa de valores de velocidade pico de partícula se mostrou aderente aos resultados aferidos em campo, aumentando o grau de confiabilidade nas estimativas de vibração, convencionalmente realizadas através da aplicação de um modelo determinístico.

A determinação da velocidade crítica de vibração, ou máximo valor permitido de velocidade de pico de partícula a fim de se promover a manutenção da integridade física da cavidade, foi realizada através da proposição de ajustes a um modelo já consagrado. Foi atribuído ao mesmo um caráter estocástico, que assim como na estimativa de velocidade de pico de partícula confere as análises um maior grau de confiança nas estimativas, uma vez que varre um intervalo mais amplo de possibilidades. Ressalta-se no entanto que experimentos afim de se apurar com maior grau de exatidão os valores críticos de vibração das cavidades ainda estão sendo conduzidos pela mineradora Vale SA, sendo entendido que a aferição precisa dos mesmos será fruto do acúmulo de extensos trabalhos de ensaios destrutivos, e associação destes a parâmetros geotécnicos, litoestruturais e as técnicas de desmonte de rochas.

A análise integrada dos modelos estocásticos de estimativas de velocidade de pico de partícula e vibração crítica, conduziu de forma satisfatória à estimativa do raio de proteção para as cavidades analisadas, segundo a modelagem proposta. Pode-se comprovar que a adoção de uma metodologia de estimativa de raio mínimo de proteção, pautado nas especificidades de cada cavidade, bem como nos parâmetros utilizados no plano de fogo, traz a luz mais uma vez a contestação dos 250 m exigidos por lei, uma vez que as análises conduzidas nesse estudo estimaram reduções significativas do raio de proteção pautadas em critérios técnicos individualizados.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABGE, 1998. Geologia de Engenharia. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 1998.

ABNT – NBR-9.365 - Guia para avaliação dos efeitos provocados pelo uso de explosivos nas minerações em áreas urbanas – Procedimento, 10 p, 2005.

AQUINO, B. M. I. Retrospectiva da Legislação Espeleológica Brasileira, Trabalho de conclusão de curso. Ouro Preto, UFOP, DEMIN, p. 13-19, 2011.

AQUINO, B. M. I. Análise da viabilidade de um projeto de lavra em razão da presença de cavidades naturais subterrâneas. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Departamento de Engenharia de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), Ouro Preto, 2014.

AULER AS, PILÓ LB. Caves and Mining in Brazil: The Dilemma of Cave Preservation Within a Mining Context. In: Andreo B, Carrasco F, Durán JJ, Jiménez P, LaMoreaux JW, editors. Hydrogeological and Environmental Investigations in Karst Systems SE—55 [Internet]. Springer Berlin Heidelberg; 2014. p. 487–96. (Environmental Earth Sciences; vol. 1).

AULER, A. S.; PILÓ, L. B.; BESSI, R. 2009. Área Mínima de Entorno para Cavidades Naturais Subterrâneas em Minério de Ferro. Relatório Final – Subsídios Projeto Entorno (Vale).

AULER, A.S.; PILÓ, L.B. Introdução às cavernas em minério de ferro e canga. O carste v.17, n.3, 228p. Belo Horizonte, 2005.

AULER, A.; PILÓ, L.B.; PARKER, C.W.; SENKO, J.M.; SASOWSKY I.D. & BARTON, H.A. 2014. Hypogene cave patterns in iron ore caves: convergence of forms or processes? Karst Waters Institute. Special Publication, 18: 15-19.

BACCI, D. C; LANDIM, P.M.B; ESTON, S.M; IRAMINA, W.S. [2003] - Principais normas e recomendações existentes para o controle de vibrações provocadas pelo uso de explosivos em áreas urbanas - Parte I – Revista da Escola de Minas - Vol. 56 No.1 -Ouro Preto/MG, 13 p.

BACCI, D. C; LANDIM, P.M.B; ESTON, S.M; IRAMINA, W.S. [2003] - Principais normas e recomendações existentes para o controle de vibrações provocadas pelo uso de explosivos em áreas urbanas - Parte II – Revista da Escola de Minas - Vol. 56 No.2- Ouro Preto/MG, 11 p.

BANKS, J. Handbook of Simulation: Principles, Methodology, Advances, Applications and Practice, 1ª edição, Wiley-IEEE , 1998.

BANKS, J., CARSON, J.S, I., and NELSON, B. L. Discret Event System Simulation. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ. (1996).

BIENIAWSKI, Z. T. (1984)- Rock Mechanics in Mining and Tunelling – Rotterdam: Balkema.

BIENIAWSKI, Z.T. 1973. Engineering classification of jointed rock masses. Trans S. Afr. Inst. Civ. Eng. 15, 335-344. Bieniawski, Z.T. 1976. Rock mass classification in rock engineering. In Exploration for rock engineering, proc. of the symp., (ed. Z.T. Bieniawski) 1, 97-106. Cape Town: Balkema.

BOAVENTURA, R.S. 1974. Geomorfologia da Folha Tocantins. In: Brasil. Departamento Nacional de Produção Mineral. Projeto Radam, Folha SB.22 Araguaia e parte da folha SC.22 Tocantins: geologia, geomorfologia, solos, vegetação e uso potencial da terra. Rio de Janeiro.

BRADY, B. H. & E.T. BROWN -(2004)- Rock Mechanics for Underground Mining - 3rd ed., Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.

BROWN, E. T. Rock Characterization Testing & Monitoring – ISRM Suggested Methods. Pergamon Press, Oxford, 1981, 211p

CAETANO, D. N. Análise das Vibrações Resultantes do Desmonte de Rocha em Mineração de Calcário e Argilite Posicionada Junto à Área Urbana de Limeira (SP) e sua Aplicação para a Minimização de Impactos Ambientais. 2004. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2004.

CALUX, A. S. Gênese e desenvolvimento de cavidades naturais subterrâneas em formação ferrífera no Quadrilátero ferrífero, Minas Gerais. 2013. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Instituto de geociências, Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, 2013.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE - CONAMA, Resolução n° 347 de 10 de setembro de 2004.

DIAS, C. R. C.; ANTONINI, A.; MUNARO, P.; DUTRA, G.; TELES, C. A. S.; BRANDI, I. V.. Equações prognósticas da atenuação das vibrações causadas pelo uso de explosivos em minas de ferro na Serra dos Carajás. In: 46 Congresso Brasileiro de Geologia, Santos - SP, 2012.

DUTRA, G. 2013. Síntese dos processos de gênese de cavidades em litologias de ferro. In: Congresso Brasileiro de Espeleologia, 32. Barreiras. SBE. Anais... p. 415-426.

FERNANDES, C. A. B. A. Gerenciamento de Riscos em Projetos: Como usar o Microsoft Excel para realizar a Simulação Monte Carlo. 2005.

HOEK, E & BROWN, E.T. (1980) - Underground Excavations in Rock. IMM, London, UK, 527 p.

JIMENO, C. L., JIMENO, E. L., FRANCISCO J. A. C. 1995. Drilling and blasting of Rock. In: Balkema, A. A. (Ed.) Rotterdam: 1995. p. 30, 56-61, 179-183, 190. (Translated to English by De Ramiro, Y. V.)

JAEGER, J. C. and COOK, N. W (1979). Fundamentals of Rock Mechanics.3ª Ed. London, 593 p.

JEONG T. and SINGH R. (2001), Inclusion of Measured Frequency-and amplitude-Dependent Mount Properties in Vehicle or Machinery Models, Journal of Sound and Vibration, vol. 245, pp. 385-415.

KARMANN, I.; SANCHEZ, L. E.; FAIRCHILD, T. R. . . Caverna dos Ecos (Central Brazil): Genesis and geomorphologic context of a cave developed in shist, quartzite and marble. Journal of Cave and Karst Studies, Huntsville, v. 63, n. 1, p. 41-48, 2001.

KELTON, W.D.; SADOWSKI, R.P.; STURROCK, D.T. Simulation with Arena, 3ª edição, McGraw-Hill Professional, 2004.

KLEN, A. M. Aplicação da Técnica de Simulação para a Análise de Superposição de Ondas Sísmicas Geradas em Desmonte de Rochas pela Dispersão dos tempos de Retardo utilizando o

Método de Monte Carlo. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) - Departamento de Engenharia de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), Ouro Preto, 2010.

LANGFORS U., KIHLSSTRÖM, B. The modern technique of rock blasting (2.ed.). Stockolm: Almqvist & Wiksell, 1967

LIMA, C. A. G. Análise das Vibrações Geradas por Desmontes nos Taludes e Edificações das Minerações. 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Departamento de Engenharia de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), Ouro Preto, 2000.

MACAMBIRA J.B. 2003. O ambiente deposicional da Formação Carajás e uma proposta de modelo evolutivo para a Bacia Grão Pará. 217 f. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas.

MARRA, R. J. C. Critérios de relevância para a classificação de cavernas no Brasil. 2008. Tese (Doutorado em Desenvolvimento sustentável) – Centro de Desenvolvimento Sustentável, Universidade de Brasília (UnB), Brasília, 2008.

NONATO, Cláudia Aparecida. Utilização de classificações de maciços rochosos no estudo da estabilidade de taludes pertencentes ao Quadrilátero Ferrífero / MG. Belo Horizonte:109 UFMG, 1994. 162 p. Dissertação de Mestrado em tecnologia mineral (lavra de minas) –Escola de engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, 1994.

PALMSTROM, A.. Characterizing the degree of jointing and rock mass quality. Internal Report, Berdal, Oslo, 1975.

PERSSON, P. A., HOLMBERG, R., LEE, J. Rock blasting and explosives engineering. Boca Raton: CRC Press, 1994.

PILO, L. B.; AULER, A. Geospeleologia das cavernas em rochas ferríferas da região de Carajás, Pa. In: RASTEIRO, M. A.; SARMENTO, L. S.(orgs.) CONGRESSO BRASILEIRO DE ESPELEOLOGIA, 30, 2009. Montes Claros, MG. Anais... Campinas: SBE, 2009.

REZENDE, A. Dispersão nos Tempos de Acessórios Transmissores de Energia: Detonadores Convencionais e Eletrônicos. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) –

Departamento de Engenharia de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), Ouro Preto, 2002.

SANTOS, S. L. Uma aplicação de modelos de simulação em sistemas de apoio à decisão. 1992. 192 f. Dissertação (Mestrado em Administração) – Faculdade de Economia e Administração, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1992.

SILVA, J. C. R. M. As implicações do desmonte com explosivos na estabilidade da rocha remanescente em mina subterrânea. 2004. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Mineral) – Departamento de Engenharia de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), Ouro Preto, 2004.

SHEOREY P R. Empirical rock failure criteria. Rotterdam: A.A. Balkema, 1997.

TAHA, H. A. Pesquisa operacional: uma visão geral. 8 ed. São Paulo: Person Prentice Hall, 2008.

TAKEDA, M.N., Dias, M.S., Koskinas, M.F., 2004b. Monte Carlo simulation of activity measurements by means of  $4\pi\beta\text{-}\gamma$  coincidence system. Brazilian J. Phys.

TEJADA CERVANTES, L. M., Resistência de Maciços Rochosos Estruturalmente Complexos de Mineração Submetidos a Carregamentos Dinâmicos. 2011. Dissertação (Doutorado em Geotecnia) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília (UnB), Brasília, 2011.

VALENTIM, R. F.; OLIVITO, J. P. R. Unidade Espeleológica Carajás: delimitação dos enfoques regional e local, conforme metodologia da IN-02/2009 MMA, Epeleo-Tema, v.22, 2011.

ZACARIAS, C. M., Classificação de Maciços Rochosos da Mina do Córrego do Meio Aplicada às Operações de Perfuração. Dissertação (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal de Minas Gerais, UFMG. Belo Horizonte, 2003.

