

WILSON SIGUEMASA IRAMINA

**O MAPA DE ISO-VELOCIDADES COMO FERRAMENTA DE
CONTROLE AMBIENTAL**

**Tese apresentada à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo para a
obtenção do Título de Doutor em
Engenharia**

**São Paulo
2002**

WILSON SIGUEMASA IRAMINA

**O MAPA DE ISO-VELOCIDADES COMO FERRAMENTA DE
CONTROLE AMBIENTAL**

**Tese apresentada à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo para a
obtenção do Título de Doutor em
Engenharia**

**Área de Concentração:
Engenharia Mineral**

**Orientador:
Professor Titular
Sérgio Médici de Eston**

**São Paulo
2002**

OK

Aos meus pais e à Akiko, pelo eterno incentivo e por acreditarem que o esforço dedicado à obtenção de conhecimento traz recompensas.

AGRADECIMENTOS

Ao amigo e orientador Prof. Dr. Sérgio Médici de Eston, por compartilhar conhecimentos, pelas sugestões sempre pertinentes e pela eterna confiança.

À Akiko, pela ajuda e incentivo em concluir este trabalho.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, pelo auxílio financeiro concedido, através do processo de número 141759/1997-6.

Aos amigos Engenheiros Eduardo César Sansone e Ivo Torres de Almeida pelas inestimáveis ajudas nos trabalhos de campo e na confecção deste trabalho.

À colega Márcia Adriani J. Siqueira.

Ao Engenheiro Luiz Eduardo C. Soares, da Technoblast Ltda.

Ao Engenheiro José Antonio S. Tortorelli, da Iúdice Mineração, por ajudar nos trabalhos de coleta de dados.

A Maria Cristina M. Bonesio pelo auxílio na organização da bibliografia deste trabalho.

Aos demais companheiros do Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo que direta ou indiretamente colaboraram na execução deste trabalho.

RESUMO

As restrições ao desmonte por explosivos, com seus efeitos ambientalmente negativos, têm dificultado bastante a presença de minerações nos centros urbanos. Embora seja de reconhecida importância em função do seu impacto socio-econômico para a sociedade, por suprir produtos e garantir a sobrevivência de muitos, existe uma ambigüidade quanto à mineração, por se tratar de uma atividade com potencial de degradar o meio ambiente. Entre os diversos efeitos negativos está a propagação da vibração do terreno, que afeta tanto os seres vivos como as suas propriedades. A sociedade tem exigido soluções para este problema e por isso impõe restrições ambientais cada vez mais rígidas para tolerar a mineração. As minerações, em contrapartida, procuram utilizar novas tecnologias para minimizar os efeitos da vibração. O uso do Mapa de iso-velocidades como ferramenta de controle ambiental e de planejamento pode possibilitar uma convivência menos tensa entre a sociedade e a mineração, incluindo os fabricantes e usuários de explosivos e os profissionais que atuam neste segmento. Através do monitoramento efetuado na Pedreira Riuma, no município de São Paulo, foi proposto um método gráfico envolvendo os conceitos de curvas de iso-velocidade, equações carga-distância, frequências e um possível limite de 8 mm/s que envolva dano e desconforto.

ABSTRACT

Blasting restrictions, with their negative environmental effects, have imposed many difficulties to the presence of quarries in urban areas. Although mining has been recognized by its social and economical impact to society, as product supplier and for offering jobs, there is an ambiguity about it because of its potential to affect the environment. Ground vibration is one of this effects and affects human beings as well as their properties. Society has demanded solutions for this problem. On the other hand, mining companies are looking for new technologies to minimize vibration effects. The iso-seismic map as an environmental control and planning tool allows that society and mining can live with less conflicts, including explosive manufacturers and blasters. The survey carried out in the Riuma Quarry, in Sao Paulo city, generated a graphic method using iso-seismic velocities, scaled-distance and frequencies, with a suggested criterion with 8 mm/s standard for damage and discomfort, and 24 Hz limiting frequency.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	pg. 01
1.1. Introdução	pg. 01
1.2. Objetivos do trabalho	pg. 03
1.3. Justificativa	pg. 03
1.4. Estrutura da tese	pg. 04
2. METODOLOGIA	pg. 06
3. DESMONTE DE ROCHA	pg. 08
3.1. Tipos de desmonte por explosivos em mineração a céu aberto e pedreiras	pg. 08
3.1.1. Desmontes em bancadas	pg. 08
3.1.2. Desmontes controlados	pg. 09
3.1.3. Desmonte para lançamento	pg. 10
3.1.4. Desmonte para corte inicial	pg. 11
3.2. Elementos de um plano de fogo	pg. 11
3.2.1. Altura da bancada	pg. 12
3.2.2. Diâmetro do furo	pg. 12
3.2.3. Inclinação do furo	pg. 14
3.2.3.1. Inclinação	pg. 14
3.2.3.2. Direção do mergulho do furo	pg. 17
3.2.4. Subfuração e Subfuração efetiva	pg. 18
3.2.5. Malha de furos	pg. 19
3.2.5.1. Tipo de malha	pg. 19
3.2.5.2. Afastamento e espaçamento	pg. 20
3.2.5.3. Afastamento efetivo e espaçamento efetivo	pg. 21
3.2.6. Tamponamento	pg. 21
3.2.6.1. Tipo de tamponamento	pg. 21
3.2.6.2. Comprimento do tamponamento	pg. 22
3.2.7. Razão de carregamento	pg. 23
3.2.8. Tamanho e forma do desmonte	pg. 24
3.2.9. Seqüência de iniciação e distribuição dos retardos	pg. 25
3.2.9.1. Retardo entre furos	pg. 26
3.2.9.2. Retardo entre-linhas	pg. 26
3.2.9.3. Interação do tempo de retardo	pg. 28
3.3. O processo de quebra de uma detonação através da interação explosivo/rocha ..	pg. 29
3.3.1. Introdução e conceitos	pg. 29
3.3.2. Teorias de fragmentação da rocha	pg. 30
3.3.2.1. Mecanismos de fragmentação pela energia de choque	pg. 30
3.3.2.2. Mecanismos de fragmentação pela energia de deslocamento ou de gás	pg. 32
3.3.3. Transferência de energia à rocha	pg. 34
3.3.3.1. Fator de impedância	pg. 34

3.3.3.2. Fator de acoplamento	pg. 35
3.3.4. Mecanismos de deslocamentos das pilhas de fragmentos	pg. 36
3.3.5. Influência do plano de fogo na interação explosivo/rocha	pg. 36
3.4. Projeto de desmonte de rochas	pg. 37
4. VIBRAÇÃO	pg. 39
4.1. Conceito de vibração	pg. 39
4.1.1. Vibração	pg. 39
4.1.2. Vibração do terreno	pg. 40
4.2. Parâmetros que influenciam a vibração	pg. 42
4.2.1. Carga Máxima por Espera	pg. 43
4.2.2. Distância ao local da detonação	pg. 43
4.2.3. Razão de carregamento	pg. 43
4.2.4. Tipos de explosivos	pg. 44
4.2.5. Tempo de retardo	pg. 44
4.2.6. Parâmetros geométricos do plano de fogo	pg. 44
4.3. Características da vibração do terreno	pg. 45
4.3.1. Tipos de ondas sísmicas	pg. 45
4.3.1.1. Ondas de compressão ou ondas P	pg. 45
4.3.1.2. Ondas transversais ou ondas S	pg. 46
4.3.1.3. Ondas de Rayleigh ou ondas R	pg. 47
4.3.1.4. Ondas de Love ou ondas Q	pg. 47
4.3.2. Atenuação geométrica	pg. 48
4.3.3. Absorção não-elástica	pg. 48
4.3.4. Interação de ondas elásticas	pg. 49
4.4. A vibração como problema de segurança e meio ambiente	pg. 49
4.4.1. Distribuição da energia de uma detonação	pg. 49
4.4.2. Efeitos ambientais decorrentes de uma detonação	pg. 50
4.4.3. Detonações em áreas urbanas	pg. 50
4.4.3.1. Danos provocados por vibrações excessivas	pg. 53
4.4.3.2. Resposta humana às vibrações decorrentes de detonações	pg. 55
5. SÉRIES DE FOURIER	pg. 57
5.1. Representação matemática de uma onda	pg. 57
5.2. Séries de Fourier	pg. 57
5.2.1. Conceitos gerais	pg. 57
5.2.2. Definição de Séries de Fourier	pg. 58
5.2.3. Convergência da Série de Fourier	pg. 60
5.3. Série de Fourier de senos e de co-senos	pg. 60
5.3.1. Funções pares e funções ímpares	pg. 60
5.3.2. Série para senos e co-senos	pg. 61
5.4. Notação complexa para as Séries de Fourier	pg. 62
5.5. Exemplos de Séries de Fourier	pg. 64
5.5.1. Sistemas vibrantes	pg. 64
5.5.2. Onda quadrada	pg. 67

6. TRANSFORMADA DE FOURIER E TRANSFORMADA DISCRETA DE FOURIER....	pg. 71
6.1. Generalidades	pg. 71
6.1.1. Tipos de sinais	pg. 71
6.1.2. Sistema e transformação de sinal	pg. 74
6.2. Transformada de Fourier	pg. 74
6.2.1. Definição	pg. 74
6.2.2. Transformada inversa	pg. 75
6.2.3. Adequação das funções: funções pares e funções ímpares	pg. 76
6.2.4. Propriedades da Transformada de Fourier	pg. 76
6.3. Convolução	pg. 78
6.3.1. Conceituação	pg. 78
6.3.2. Integral de Convolução	pg. 79
6.3.3. Teoria da Convolução	pg. 79
6.4. Transformada Discreta de Fourier	pg. 80
6.4.1. Limitações da Transformada de Fourier	pg. 80
6.4.2. Representação matemática da Transformada de Discreta de Fourier	pg. 80
7. TRANSFORMADA RÁPIDA DE FOURIER (FFT)	pg. 83
7.1. Introdução	pg. 83
7.2. O algoritmo da FFT	pg. 84
7.2.1. O mecanismo da FFT	pg. 85
7.3. Comparações de velocidade e precisão	pg. 88
7.4. Aplicações da FFT	pg. 89
7.4.1. Pesquisa por sísmica de reflexão	pg. 90
7.4.2. Análise de frequência de sinais transientes	pg. 92
8. MONITORAMENTO SISMOGRÁFICO	pg. 94
8.1. Tipos de instrumentos utilizados para se medir a vibração	pg. 94
8.1.1. Acelerômetro	pg. 96
8.1.2. Sismógrafo Geofísico	pg. 97
8.1.3. Sismógrafo de Engenharia	pg. 98
8.1.3.1. Descrição	pg. 98
8.1.3.2. Evolução dos modelos	pg. 101
8.2. Seleção de instrumentação e monitoramento sismográfico	pg. 105
8.2.1. Especificações da ISEE para os sismógrafos utilizados	pg. 105
8.2.2. Importância do acoplamento adequado	pg. 107
8.2.3. Calibração do sismógrafo	pg. 109
8.2.4. Parâmetros do monitoramento	pg. 110
8.2.4.1. Instalação do sensor	pg. 110
8.2.4.2. Tempo de captação de evento	pg. 110
8.2.4.3. Limite inferior de sensibilidade e disparo	pg. 111
8.2.4.4. Opções de gráfico	pg. 111
8.2.4.5. Amplitude	pg. 111
8.2.4.6. Velocidade de vibração de partícula	pg. 112

8.2.4.6.1. Longitudinal	pg. 112
8.2.4.6.2. Vertical	pg. 112
8.2.4.6.3. Transversal	pg. 112
8.2.4.6.4. Resultante	pg. 112
8.2.4.7. Aceleração de partícula	pg. 112
8.2.4.8. Frequência predominante	pg. 112
8.2.4.9. Distância do ponto de monitoramento ao local de detonação	pg. 113
8.2.4.10. Localização do sensor	pg. 113
8.2.4.11. Data e hora do evento	pg. 113
8.2.5. Arranjo dos sismógrafos para a determinação da propagação	pg. 114
9. EQUAÇÃO CARGA-DISTÂNCIA E MAPA DE ISO-VELOCIDADES	pg. 115
9.1. Equação carga-distância	pg. 115
9.1.1. Teoria	pg. 115
9.1.2. Equação carga-distância	pg. 116
9.2. O método da Geosonics	pg. 121
9.2.1. Apresentação	pg. 121
9.2.2. O sistema Iso-seismic	pg. 123
9.2.2.1. Instrumentação	pg. 123
9.2.2.2. Operação	pg. 123
9.2.2.3. Eventos monitorados	pg. 124
9.2.2.4. Elementos que compõem os dados de entrada para a análise	pg. 124
9.2.2.5. Elementos que compõem os resultados	pg. 125
9.2.3. Exemplo de aplicação do método	pg. 127
10. NORMAS E CRITÉRIOS DE CONTROLE DA VIBRAÇÃO DE TERRENO	pg. 130
10.1. Critérios de prevenção de danos	pg. 130
10.2. Normas Internacionais	pg. 132
10.2.1. Estados Unidos	pg. 132
10.2.1.1. USBM RI 8507	pg. 132
10.2.1.2. OSM	pg. 133
10.2.2. Alemanha – Norma DIN 4150	pg. 135
10.2.3. Reino Unido	pg. 136
10.2.4. França	pg. 137
10.2.5. Austrália	pg. 138
10.2.6. Índia	pg. 139
10.3. Norma Brasileira	pg. 141
10.3.1. Norma ABNT NBR 9653	pg. 141
10.3.2. Norma CETESB D7.013	pg. 142
10.3.3. Proposta de revisão da Norma ABNT	pg. 142
11. PARTE EXPERIMENTAL	pg. 143
11.1. Local escolhido	pg. 143
11.1.1. Características gerais	pg. 143
11.1.1.1. Localização	pg. 143

11.1.1.2. Processo produtivo	pg. 146
11.1.2. Caracterização litológica	pg. 149
11.1.2.1. Geologia regional	pg. 149
11.1.2.2. Geologia local	pg. 151
11.2. Procedimentos aplicados	pg. 154
11.2.1. Mapa de iso-velocidades: adaptação do método da Geosonics	pg. 154
11.3. Instrumentação utilizada	pg. 156
11.3.1. Sismógrafos	pg. 156
11.3.2. Outros instrumentos	pg. 156
12. VALORES OBTIDOS DOS MONITORAMENTOS	pg. 157
12.1. Primeiros monitoramentos efetuados	pg. 157
12.1.1. Monitoramentos na Pedreira Lageado	pg. 157
12.1.1.1. Monitoramento das 6 primeiras detonações	pg. 160
12.1.1.2. Monitoramentos de 2 detonações adicionais para o refinamento da equação	pg. 161
12.1.2. Pedreira Intervalas	pg. 162
12.1.2.1. Valores medidos e dados de desmonte	pg. 163
12.1.2.2. Resultados	pg. 164
12.2. Monitoramento Completo - Índice Mineração (Pedreira Riúma)	pg. 165
12.2.1. Características dos desmontes monitorados	pg. 165
12.2.2. Valores obtidos para a Pedreira Riúma	pg. 167
13. EQUAÇÕES CARGA-DISTÂNCIA PARA A PEDREIRA RIÚMA	pg. 176
13.1. Distribuição dos pontos monitorados	pg. 176
13.2. Obtenção numérica das equações carga-distância	pg. 178
13.2.1. Direção Sul-Sudoeste	pg. 178
13.2.2. Direção Nordeste	pg. 179
13.2.3. Direção Leste	pg. 179
13.2.4. Direção Noroeste	pg. 180
13.2.5. Direção Norte	pg. 181
13.2.6. Direção Sudeste	pg. 181
13.2.7. Direção Oeste	pg. 182
13.2.3. Direção Leste-Nordeste	pg. 183
13.3. Distribuição e correção dos erros de alinhamento	pg. 184
14. MAPAS DE ISO-VELOCIDADES OBTIDOS PARA A PEDREIRA RIÚMA	pg. 185
14.1. Mapas de iso-velocidades a partir de valores reais	pg. 185
14.1.1. Mapas de iso-velocidades feitos com o programa 3Dfield	pg. 185
14.1.2. Mapas de iso-velocidades feitos com o programa Surfer	pg. 186
14.1.3. Plotagem tridimensional das linhas de iso-velocidades obtida com o programa Surfer	pg. 186
14.2. Mapas de iso-velocidades a partir de simulação	pg. 188
14.2.1. Mapas de iso-velocidades feitos com o programa Surfer	pg. 188

14.2.2. Plotagem tridimensional de linhas de iso-velocidades obtida com o programa Surfer	pg. 188
14.2.3. Comparação de isolinhas de velocidade corrigida pela Norma ABNT e da CETESB	pg. 189
15. APLICAÇÃO DO MAPA DE ISO-VELOCIDADES DENTRO DE UM SISTEMA DE GESTÃO INTEGRADA DE SEGURANÇA E MEIO AMBIENTE	pg. 191
15.1. A questão da vibração de terreno na mineração	pg. 191
15.2. Sistema de gestão integrada de segurança e meio ambiente	pg. 193
15.3. Exemplo de aplicação	pg. 199
15.3.1. O modelo do grupo Lafarge	pg. 200
15.3.1.1. Princípios de atuação	pg. 200
15.3.1.2. Política de meio ambiente	pg. 201
15.4. Aplicação do mapa de iso-velocidades dentro de um sistema de gestão integrada	pg. 202
16. CONCLUSÕES	pg. 205
16.1. Viabilidade de aplicação de um mapa de iso-freqüências	pg. 205
16.2. Conclusões finais	pg. 210
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	pg. 212
BIBLIOGRAFIA CONSULTADA	pg. 218
ANEXOS	
ANEXO 1 – Mapas de iso-velocidades levantados pela Geosonics nos Estados Unidos	
ANEXO 2 – Planos de fogo das detonações	
ANEXO 3 – Fotos dos monitoramentos	
ANEXO 4 – Relatórios de análise sismográfica	

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Desmonte de bancada da mina de ferro da Cia. Vale do Rio Doce	Pg. 08
Figura 2	Momento exato da detonação para o desmonte por bancada	Pg. 09
Figura 3	Face de pré-fissuramento	Pg. 10
Figura 4	Desmonte para lançamento	Pg. 10
Figura 5	Elementos geométricos contidos num plano de fogo.....	Pg. 12
Figura 6	Efeito do uso de furos de diâmetro grande e de diâmetro pequeno em rochas com juntas espaçadas	Pg. 13
Figura 7	Menos rocha do colar com furos de diâmetro menor	Pg. 14
Figura 8	Menos ultra-quebra superficial e volume de rocha do colar com furos inclinados	Pg. 15
Figura 9	Afastamento do pé excessivo para furo vertical adjacente a uma face alta ou de baixo mergulho	Pg. 16
Figura 10	Sopro de ar e ultra-lançamento causados pela carga inadequada ao longo da carga de topo e de base	Pg. 17
Figura 11	Erros nos espaçamentos e no afastamento do pé causados pelo erro na direção do mergulho de furos inclinados	Pg. 18
Figura 12	Exemplos de subfuração efetiva	Pg. 19
Figura 13	Afastamento efetivo e espaçamento efetivo para a malha dos furos	Pg. 21
Figura 14	Exemplo de uso de tampões	Pg. 23
Figura 15	Modelos de seqüências de iniciação	Pg. 27
Figura 16	Primeiros estágios da interação explosivo/rocha mostrando a onda de tensão expansiva	Pg. 31
Figura 17	Últimos estágios da interação explosivo/rocha mostrando a penetração do gás e o movimento da rocha entre o furo e a face livre	Pg. 32
Figura 18	Fotografia de uma face livre imediatamente após a detonação de uma carga explosiva cilíndrica longa	Pg. 33
Figura 19	Fotografia de uma face após a detonação de cargas explosivas	Pg. 33
Figura 20	Efeito da fragmentação no custo de perfuração, carregamento e transporte	Pg. 38
Figura 21	Diagrama esquemático de distribuição da energia de detonação	Pg. 40
Figura 22	Distribuição da energia transmitida à rocha pela sua detonação	Pg. 41
Figura 23	Representação de uma onda de compressão ou Onda P	Pg. 46
Figura 24	Representação de uma onda cisalhante ou Onda S	Pg. 46
Figura 25	Representação de uma onda de Rayleigh	Pg. 47
Figura 26	Representação de uma onda de Love	Pg. 48
Figura 27	Esquema da distribuição dos problemas associados à detonação	Pg. 49
Figura 28	Resposta humana subjetiva às vibrações decorrentes do desmonte por explosivos em gráfico log-log	Pg. 56
Figura 29	Corda vibrante	Pg. 64
Figura 30	Modos normais para uma corda vibrante	Pg. 67

CONTINUAÇÃO DA LISTA DE FIGURAS

Figura 31	Onda quadrada – forma anti-simétrica	Pg. 68
Figura 32	Onda quadrada – forma simétrica	Pg. 69
Figura 33	Classificação dos sinais	Pg. 72
Figura 34	Categorias de sinais e suas transformadas	Pg. 73
Figura 35	Primeira quebra de uma DFT para N pontos	Pg. 82
Figura 36	Decomposição do sinal para a FFT	Pg. 86
Figura 37	Butterfly da FFT	Pg. 87
Figura 38	Estrutura inteira de uma FFT	Pg. 88
Figura 39	Desenho esquemático do Método de Reflexão Sísmica	Pg. 91
Figura 40	Gráfico de uma análise de FFT	Pg. 93
Figura 41	Energia (velocidade de partícula) associada à uma frequência, gerada pela FFT	Pg. 93
Figura 42	Diagrama esquemático de registro e análise de vibração	Pg. 95
Figura 43	Desenho esquemático de um acelerômetro para a medição de vibração do terreno	Pg. 96
Figura 44	Espectro sísmico	Pg. 97
Figura 45	Estrutura de um sensor de velocidade	Pg. 98
Figura 46	Sistema para armazenamento e análise de vibrações	Pg. 100
Figura 47	Foto de sismógrafo 1	Pg. 103
Figura 48	Foto de sismógrafo 2	Pg. 103
Figura 49	Foto de sismógrafo 3	Pg. 103
Figura 50	Foto de sismógrafo 4	Pg. 103
Figura 51	Foto de sismógrafo 5	Pg. 104
Figura 52	Foto de sismógrafo 6	Pg. 104
Figura 53	Foto de sismógrafo 7	Pg. 104
Figura 54	Foto de um micro-sismógrafo	Pg. 104
Figura 55	Conjunto de sismógrafos adquirido pelo LACASEMIN	Pg. 105
Figura 56	Resposta de amplitude e fase de um sistema de grau de liberdade simples para a vibração harmônica de um suporte	Pg. 108
Figura 57	Conjunto para calibração e ajuste de sismógrafos do LACASEMIN	Pg. 110
Figura 58	Plotagem hipotética para velocidade de partícula medida x distância escalonada do desmonte	Pg. 118
Figura 59	Critérios de danos propostos por alguns autores e normas adotadas por alguns países	Pg. 131
Figura 60	Comparação dos resultados do evento com o critério do USBM	Pg. 133
Figura 61	Comparação de um evento com o critério do OSM	Pg. 134
Figura 62	Comparação de um evento monitorado com o critério estabelecido pela norma DIN 4150	Pg. 136

CONTINUAÇÃO DA LISTA DE FIGURAS

Figura 63	Limites de velocidades de vibração de partícula estabelecidos pela AFTES	Pg. 138
Figura 64	Localização da lúdice Mineração dentro da região da Grande São Paulo .	Pg. 144
Figura 65	Seqüência de fotos do entorno do empreendimento	Pg. 145
Figura 66	Diagrama esquemático do processo produtivo do empreendimento	Pg. 146
Figura 67	Parte das instalações de tratamento e armazenagem de brita	Pg. 147
Figura 68	Vista geral da área de lavra da pedreira	Pg. 147
Figura 69	Vista do local onde se concentram todos os desmontes monitorados	Pg. 148
Figura 70	Seqüência de detonação de uma bancada da Pedreira Riuma	Pg. 149
Figura 71	Geologia local do empreendimento	Pg. 153
Figura 72	Planta da Pedreira Intervales com os pontos de monitoramento	Pg. 165
Figura 73	Distribuição espacial dos pontos monitorados de acordo com as coordenadas UTM	Pg. 176
Figura 74	Distribuição dos pontos monitorados e localização das bancadas desmontadas	Pg. 177
Figura 75	Regressão de 8 pontos monitorados na direção sul-sudoeste	Pg. 178
Figura 76	Regressão de 8 pontos monitorados na direção nordeste	Pg. 179
Figura 77	Regressão de 7 pontos monitorados na direção leste	Pg. 180
Figura 78	Regressão dos 8 pontos (5 válidos) monitorados na direção noroeste	Pg. 180
Figura 79	Regressão dos 5 pontos monitorados na direção norte	Pg. 181
Figura 80	Regressão dos 7 pontos monitorados na direção sudeste	Pg. 182
Figura 81	Regressão dos 8 pontos monitorados na direção oeste	Pg. 182
Figura 82	Regressão dos 8 pontos monitorados na direção leste-nordeste	Pg. 183
Figura 83	Comparação entre a distribuição real e as retas médias ideais das direções	Pg. 184
Figura 84	Mapa de iso-velocidades com valores medidos obtido do programa 3DField	Pg. 185
Figura 85	Mapa de valores reais obtido com o programa Surfer	Pg. 186
Figura 86	Superfície obtida através da interpolação dos pontos reais obtidos no monitoramento para as oito direções	Pg. 187
Figura 87	Mapa de iso-velocidades simulando-se um modelo ideal de distribuição para as oito direções escolhidas	Pg. 188
Figura 88	Superfície obtida através da interpolação dos pontos obtidos no modelo simulado	Pg. 189
Figura 89	Limite da Norma ABNT NBR – 9653 para o modelo simulado	Pg. 190
Figura 90	Limite da Norma da CETESB para o modelo simulado	Pg. 190
Figura 91	Modelo de interação entre as partes envolvidas num sistema de gestão integrada	Pg. 196
Figura 92	Critério do autor desenvolvido para este trabalho	Pg. 206

Figura 93	Mapa de iso-frequências sobreposto ao mapa de iso-velocidades para a componente longitudinal da velocidade de partícula	Pg. 207
Figura 94	Mapa de iso-frequências sobreposto ao mapa de iso-velocidades para a componente transversal da velocidade de partícula	Pg. 208
Figura 95	Mapa de iso-frequências sobreposto ao mapa de iso-velocidades para a componente vertical da velocidade de partícula	Pg. 209

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Faixas normais de comprimento do tamponamento	Pg. 23
Tabela 2	Níveis de vibração e efeitos associados	Pg. 54
Tabela 3	Velocidades seguras de vibração de partícula (V_r) em função do tipo de estrutura	Pg. 54
Tabela 4	Critérios de danos segundo alguns autores	Pg. 54
Tabela 5	Propriedades de simetria da Transformada de Fourier	Pg. 76
Tabela 6	Resumo de algumas propriedades da Transformada de Fourier	Pg. 77
Tabela 7	Especificações que um instrumento de medição de vibração de terreno deve apresentar	Pg. 94
Tabela 8	Resultados da calibração dos sismógrafos	Pg. 109
Tabela 9	Limites de vibração do terreno regulamentados pelo OSM	Pg. 134
Tabela 10	Valores permitidos pela norma DIN 4150	Pg. 135
Tabela 11	Efeitos sobre as estruturas de acordo com a BS 7385 Parte 1	Pg. 137
Tabela 12	Critérios estabelecidos pelo SPCC	Pg. 138
Tabela 13	Critério estabelecido pela AS2187 Parte 2 de 1983	Pg. 139
Tabela 14	Limites de velocidade de vibração de partícula estabelecidos pelo CMRI ..	Pg. 140
Tabela 15	Valores limites estabelecidos pelo CMRI para a vibração do terreno na fundação e para diferentes faixas de frequência	Pg. 141
Tabela 16	Resumo das características dos desmontes monitorados	Pg. 159
Tabela 17	Resultados dos monitoramentos na Pedreira Lageado	Pg. 160
Tabela 18	Novos valores medidos na Pedreira Lageado	Pg. 161
Tabela 19	Comparação entre os valores medidos e os valores estimados pela equação	Pg. 162
Tabela 20	Características do plano de fogo adotado para o desmonte na Pedreira Intervalas	Pg. 163
Tabela 21	Valores de vibração obtidos no monitoramento	Pg. 164
Tabela 22	Valores de carga máxima por espera, carga total de explosivos, velocidade resultante, distância ao ponto de detonação e distância escalonada	Pg. 164
Tabela 23	Resumo das características dos desmontes monitorados	Pg. 166
Tabela 24	Valores de vibração e de frequência medidos na Pedreira Riuma I	Pg. 168
Tabela 25	Valores de vibração e de frequência medidos na Pedreira Riuma II	Pg. 169

CONTINUAÇÃO DA LISTA DE TABELAS

Tabela 26	Valores de vibração e de frequência medidos na Pedreira Riuma III	Pg. 170
Tabela 27	Valores de vibração e de frequência medidos na Pedreira Riuma IV	Pg. 171
Tabela 28	Valores de vibração e de frequência medidos na Pedreira Riuma V	Pg. 172
Tabela 29	Valores de vibração e de frequência medidos na Pedreira Riuma VI	Pg. 173
Tabela 30	Valores de vibração e de frequência medidos na Pedreira Riuma VII	Pg. 174
Tabela 31	Valores de vibração e de frequência medidos na Pedreira Riuma VIII	Pg. 175
Tabela 32	Modelo dos planos de ação a serem adotados para o problema da vibração do terreno	Pg. 204

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1	Impedância acústica do explosivo	Pg. 34
Equação 2	Impedância acústica da rocha	Pg. 34
Equação 3	Fator de impedância	Pg. 35
Equação 4	Fator de acoplamento	Pg. 35
Equação 5	Energia transmitida à rocha	Pg. 35
Equação 6	Vibração senoidal	Pg. 39
Equação 7	Lei de proporcionalidade da distância	Pg. 43
Equação 8	Condição 3 para uma série de Fourier	Pg. 57
Equação 9	Função periódica	Pg. 57
Equação 10	Função de um sinal	Pg. 58
Equação 11	Definição de série de Fourier	Pg. 58
Equação 12	Coefficiente a_n	Pg. 58
Equação 13	Coefficiente b_n	Pg. 59
Equação 14	Coefficiente a_n	Pg. 59
Equação 15	Coefficiente b_n	Pg. 59
Equação 16	Coefficiente $a_0/2$	Pg. 59
Equação 17	Convergência da série de Fourier	Pg. 60
Equação 18	Função ímpar	Pg. 61
Equação 19	Função par	Pg. 61
Equação 20	Coefficiente a_n para série de senos	Pg. 61
Equação 21	Coefficiente b_n para série de co-senos	Pg. 61
Equação 22	Identidade de Euler	Pg. 63
Equação 23	Formas complexas I	Pg. 63

CONTINUAÇÃO DA LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 24	Formas complexas II	Pg. 63
Equação 25	Notação complexa da série de Fourier	Pg. 63
Equação 26	Coeficiente c_n para notação complexa	Pg. 63
Equação 27	Equação das cordas vibrantes	Pg. 64
Equação 28	Frequência do modo normal de ordem m	Pg. 66
Equação 29	Transformada de Fourier I	Pg. 75
Equação 30	Transformada de Fourier II	Pg. 75
Equação 31	Transformada inversa de Fourier I	Pg. 75
Equação 32	Transformada inversa de Fourier II	Pg. 75
Equação 33	Transformada inversa de Fourier III	Pg. 75
Equação 34	Divisão de função: função par e função ímpar	Pg. 76
Equação 35	Representação complexa da Transformada de Fourier	Pg. 76
Equação 36	Propriedade "Shifting"	Pg. 77
Equação 37	Teorema de Parseval	Pg. 77
Equação 38	Espectro de potência do Teorema de Parseval	Pg. 77
Equação 39	Definição matemática de Convolução	Pg. 79
Equação 40	Expressão da Convolução	Pg. 79
Equação 41	Teoria da Convolução	Pg. 79
Equação 42	Transformada de Fourier na forma contínua	Pg. 80
Equação 43	Discretização da função contínua I	Pg. 80
Equação 44	Discretização da função contínua II	Pg. 81
Equação 45	Transformada Discreta de Fourier I	Pg. 81
Equação 46	Transformada Discreta de Fourier II	Pg. 81
Equação 47	Transformada Discreta de Fourier	Pg. 83
Equação 48	Equivalente da Transformada Discreta de Fourier	Pg. 83
Equação 49	Tempo de execução de uma operação em DFT.....	Pg. 88
Equação 50	Tempo de execução de uma operação em FFT.....	Pg. 89
Equação 51	Representação matemática de uma espectro de frequências de uma vibração	Pg. 100
Equação 52	Expressão da velocidade de vibração de partícula resultante	Pg. 112
Equação 53	Expressão geral relacionando velocidade, carga de explosivos e distância (equação carga-distância)	Pg. 116
Equação 54	Formato simplificado da equação carga-distância	Pg. 116
Equação 55	Outra forma de representação da equação carga-distância	Pg. 116
Equação 56	Expressão da distância escalonada	Pg. 117
Equação 57	Fórmula da regressão linear para a equação carga-distância	Pg. 117

CONTINUAÇÃO DA LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 58	Fórmula do USBM correlacionando velocidade com distância escalonada	Pg. 117
Equação 59	Critério para distância segura segundo o USBM	Pg. 119
Equação 60	Relação entre velocidade de vibração e tensões dinâmicas	Pg. 120
Equação 61	Fórmula da velocidade de vibração de partícula prevista para local não monitorado utilizada pela Geosonics	Pg. 125
Equação 62	Fórmula da velocidade de vibração de partícula prevista utilizada pela Geosonics	Pg. 126
Equação 63	Relação entre frequência natural e as dimensões de uma estrutura	Pg. 140
Equação 64	Equação carga-distância preliminar obtida para a Pedreira Lageado ...	Pg. 161
Equação 65	Equação carga-distância obtida para a Pedreira Lageado com a adição de novos pontos	Pg. 162
Equação 66	Equação carga-distância obtida para a Pedreira Intervals	Pg. 164
Equação 67	Equação carga-distância resultante da regressão dos pontos monitorados para o Fogo 1 da Pedreira Riuma	Pg. 178
Equação 68	Equação carga-distância resultante da regressão dos pontos monitorados para o Fogo 2 da Pedreira Riuma	Pg. 179
Equação 69	Equação carga-distância resultante da regressão dos pontos monitorados para o Fogo 3 da Pedreira Riuma	Pg. 180
Equação 70	Equação carga-distância resultante da regressão dos pontos monitorados para o Fogo 4 da Pedreira Riuma	Pg. 181
Equação 71	Equação carga-distância resultante da regressão dos pontos monitorados para o Fogo 5 da Pedreira Riuma	Pg. 181
Equação 72	Equação carga-distância resultante da regressão dos pontos monitorados para o Fogo 6 da Pedreira Riuma	Pg. 182
Equação 73	Equação carga-distância resultante da regressão dos pontos monitorados para o Fogo 7 da Pedreira Riuma	Pg. 183
Equação 74	Equação carga-distância resultante da regressão dos pontos monitorados para o Fogo 8 da Pedreira Riuma	Pg. 183

LISTA DE SÍMBOLOS, GRANDEZAS E UNIDADES

SÍMBOLO	GRANDEZA	UNIDADE	OBSERVAÇÃO
I_{ex}	Impedância acústica do explosivo	[kg/m ² s]	
I_r	Impedância acústica da rocha	[kg/m ² s]	

CONTINUAÇÃO DA LISTA DE SÍMBOLOS, GRANDEZAS E UNIDADES

ρ_{ex}	Massa específica do explosivo	[kg/m ³]	
ρ_r	Massa específica da rocha	[kg/m ³]	
η_1	Fator de impedância		Adimensional
η_2	Fator de acoplamento		Adimensional
R_{ac}	Razão de acoplamento		Adimensional
E_{tr}	Energia transmitida à rocha	[MJ/kg]	
E_{gex}	Energia gerada pelo explosivo	[MJ/kg]	
A	Afastamento entre linhas	[m]	
Ae	Afastamento efetivo entre linhas	[m]	
a	Aceleração	[m/s ²]	
c	Velocidade de propagação da onda elástica da rocha	[m/s]	
CME	Carga Máxima por Espera	[kg]	
D	Distância	[m]	
d	distância	[m]	
DE	Distância Escalonada	[m/kg ^{1/2}]	
E	Espaçamento entre furos	[m]	
Ee	Espaçamento efetivo entre furos	[m]	
f	Frequência	Hz	Hertz
g	Aceleração da gravidade	[m/s ²]	g = 9,8 m/s ²
H	Altura da bancada	[m]	
L	Componente longitudinal da Vp	[mm/s]	
P	Pressão	[atm]	atmosfera
PF	Powder Factor	[lb/ft ³]	
Q	Massa de explosivo detonada	[kg]	
RC	Razão de Carga	[kg/m ³]	
SD	Scaled Distance	[m/kg ^{1/2}]	
SPL ou Lp	Sobrepresão atmosférica	[dB]	Decibel
SPL ou Lp	Sobrepresão atmosférica	[dBL]	Decibel Linear
T	Componente transversal da Vp	[mm/s]	
t	Tempo de retardo	ms	milissegundos
V	Componente vertical da Vp	[mm/s]	

CONTINUAÇÃO DA LISTA DE SÍMBOLOS, GRANDEZAS E UNIDADES

V	Amplitude máxima da velocidade	[mm/s]
VOD	Velocidade de Detonação	[m/s]
Vp	Velocidade de vibração de partícula	[mm/s]
Vp máx	Velocidade de vibração de partícula máxima	[mm/s]
Vr	Velocidade de vibração de partícula resultante	[mm/s]

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
A/D	Analógico / Digital
AEC	Australian Environmental Council
AFTES	Association Française des Travaux en Souterrain
ANFO	Explosivo feito de nitrato de amônio misturado a óleo diesel
BS	British Standard
CDHU	Companhia de Desenvolvimento Habitacional Urbano
CETESB	Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental
CMRI	Central Mining Research Institute (India)
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CVRD	Companhia Vale do Rio Doce
DFT	Transformada Discreta de Fourier
DIN	Deutsche Industrie-Norm (Alemanha)
DSP	Processamento Digital de Sinais (Digital Signal Processing)
EMS	Environmental Management System
ENE	Direção Leste-Nordeste
EPUSP	Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
FFT	Transformada Rápida de Fourier
FINEP	Financiadora de Estudos e Projetos
GPS	Sistema de posicionamento global
ISEE	International Society of Explosives Engineers
ISO	International Standardization Organization

CONTINUAÇÃO DA LISTA DE SIGLAS

LACASEMIN	Laboratório de Controle Ambiental, Higiene e Segurança na Mineração Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
LCD	Tela de cristal líquido
LV	Podzólico Vermelho-Amarelo
NCSA	National Crushed Stone Association (EUA)
NE-SW	Direção Nordeste-Sudoeste
NNE	Direção Norte-Nordeste
OSM	Office of Surface Mines (EUA)
OSMRE	Office of Surface Mines Regulation (EUA)
PADCT	Programa de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico
PDCA	Plan – Do – Check – Act
PDCR	Plan – Do – Check – Review
PDMI	Plan – Do – Measure – Improve
PPV	Peak Particle Velocity
PV	Latossolo Vermelho-Amarelo
RMS	Média quadrática (Root Mean Square)
SGA	Sistema de Gestão Ambiental
SPCC	State Pollution Control Commission (Austrália)
USBM	United States Bureau of Mines (EUA)
UTM	Sistema de coordenadas (Universal Transversa Mercator)
TQM	Sistema de Qualidade Total

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

1.1. INTRODUÇÃO

A percepção humana e a resposta às vibrações do terreno decorrentes das detonações têm sido um problema constante para a indústria mineral, para as pessoas que vivem no entorno de uma mineração e também para os órgãos regulamentadores responsáveis pelos padrões de conforto e segurança. Embora uma parcela considerável de minerações, que atualmente pode ser considerada como sendo a maioria entre aquelas inseridas nos centros urbanos, apresente operações que resultam em níveis de velocidade de vibração de partícula abaixo dos limites preconizados pelos órgãos regulamentadores, estas, por uma série de razões, ainda terão que lidar com os conflitos decorrentes de reclamações geradas pelas vibrações. Os avanços técnicos dentro da indústria de explosivos e de acessórios têm sido direcionados também para as habilidades dos técnicos em compreender e controlar melhor as vibrações para se evitar possíveis conflitos. Um exemplo é o avanço no desenho dos sismógrafos de engenharia, cuja facilidade de uso, tamanho diminuto e preços mais acessíveis permitem que se façam uma série de arranjos de modo que os dados sejam mais confiáveis e possibilitem uma melhor compreensão da propagação da vibração do terreno pelo maciço rochoso. Antigamente, os sismógrafos eram pesados, de difícil operação e caros e, portanto, eram considerados como fatores limitantes de um monitoramento sismográfico detalhado. Isto fez com que os estudos, por serem pouco detalhados, resultassem em conclusões equivocadas ou mesmo em meras suposições, uma vez que todos, de uma maneira ou outra, afirmavam conhecer o assunto propagação da vibração.

Pode-se afirmar que os explosivos ainda têm grande influência na vida cotidiana das pessoas, pois os produtos que elas consomem possuem componentes que em alguma etapa de sua produção requereram o uso de minerais e, conseqüentemente, o desmonte de rochas. Como exemplo podemos citar a eletricidade que provém da queima do carvão, onde o carvão é extraído por meio de explosivos, ou então produtos à base de aço que, para serem fabricados, necessitam de minério de ferro desmontado nas bancadas. De acordo com o *United States Bureau of Mines* (MENDES, 2002), "a cada ano, cada americano necessita de 18,1 toneladas de novos minerais. Neste nível de consumo, em média, cada recém nascido necessitará, ao longo de sua vida, de um suprimento de 360,6 kg de chumbo (principalmente em baterias de automóveis, soldas e componentes eletrônicos); 343,4 kg de zinco (em ligas com cobre, formando o latão, como revestimento protetor para o aço e como componente químico em borrachas e tintas); 680,4 kg de cobre (principalmente em motores elétricos, geradores, equipamentos de comunicação e fiação); 1.630 kg de alumínio (em todo o tipo de produto como latas de bebidas, móveis e aviões) e 14.830 kg de ferro em lingotes (para utensílios de cozinha, automóveis, navios e grandes edifícios).

Em função da enorme importância da mineração na nossa vida, nos últimos anos têm havido avanços dramáticos na tecnologia de detonação no que se refere à qualidade e eficiência dos

explosivos e sistemas de iniciação. Pode-se dizer ainda que a detonação é uma ciência inexata em função da complexidade dos parâmetros envolvidos, que vão desde a litologia da rocha até os parâmetros estáticos como razão de carregamento e a geometria da malha de perfuração (ESTON, 1998).

No passado, as minerações em geral se localizavam longe das concentrações urbanas, e com o passar dos anos, houve a necessidade de se ocupar novos espaços, o que resultou na convivência mútua e diária entre o homem da cidade e a mineração. O crescimento ao redor das minerações fez com que novos problemas surgissem, como por exemplo, a propagação indesejada de vibrações do terreno, a sobrepressão atmosférica, os ultra-lançamentos, a contaminação de águas superficiais e subterrâneas e também a dispersão de material particulado, criando assim novos obstáculos para a mineração, particularmente o desmonte de rochas.

Como as operações de mineração a céu aberto e de pedreiras ainda necessitam de explosivos, em função do seu menor custo em relação às outras tecnologias, para preparação da rocha e pela necessidade de suprir as demandas das áreas urbanas que vão se expandindo, as minas e pedreiras tendem a se tornar cada vez maiores, e em contrapartida, aumentam-se as restrições ao desmonte por explosivos. Isto resulta em uma necessidade maior de pessoal bem treinado e com experiência para o desenho e implementação de planos de fogo adequados à esta nova realidade. As soluções envolvendo as detonações estão cada vez mais fundamentadas nos aspectos técnicos e ambientais, ao passo que as soluções de âmbito sócio-econômico e político, ainda que sejam significativas, tendem a se minimizar. Quando precauções apropriadas e procedimentos de segurança são implementados, os desmontes por explosivos podem ser seguros. Estes devem ser planejados e executados de modo a diminuir:

- o risco de danos a estruturas próximas e lesões às pessoas e aos animais; e
- o incômodo às pessoas que moram e/ou trabalham próximas à área de detonação.

O uso de uma ferramenta como o mapa de iso-velocidades permite que a medição em dezenas de pontos ao redor da mina ofereça uma grande vantagem em relação às medições com apenas um ou dois sismógrafos, como é feito esporadicamente na maioria das pedreiras e minerações em áreas urbanas no Brasil. Através deste mapa, pode-se detectar e mapear com confiança as tendências do comportamento da vibração oriunda do desmonte de rocha. Mapeando-se estas tendências, pode-se observar que a geologia entre as áreas de detonação e a de reclamação é muitas vezes determinante na vibração resultante. Mesmo que ocorram vibrações abaixo dos limites preconizados pelas normas vigentes, se estas apresentarem frequências baixas, haverá probabilidade de reclamações. As modificações nos tempos de duração da detonação e de retardamento, após uma análise baseada nas informações do mapa podem minimizar a resposta estrutural e conseqüentemente reduzir o número de reclamações.

1.2. OBJETIVOS DO TRABALHO

O objetivo deste trabalho é analisar uma nova ferramenta, o *Mapa de Iso-velocidades*, para o controle ambiental do desmonte de rocha em áreas urbanas e procurar diminuir os possíveis conflitos que esta atividade venha causar. Para que isto seja possível, este trabalho procura abordar:

- a. Metodologia adotada para os trabalhos de monitoramento sismográfico;
- b. Os conceitos envolvidos no processamento e na análise dos dados de um registro sismográfico (Séries de Fourier, Transformada de Fourier e Transformada Rápida de Fourier).
- c. A variação da vibração em função da distância ao local de desmonte para variadas direções;
- d. As curvas e equações correspondentes a estas variações;
- e. Confecção de um mapa de iso-velocidades a partir dos dados obtidos e das interpolações de curvas de carga-distância; e
- f. Aplicação deste mapa como parte de um sistema de gestão integrada de segurança e meio ambiente.

1.3. JUSTIFICATIVA

Este levantamento da curva de carga-distância e de iso-velocidades se torna importante à medida que as restrições ambientais têm se tornado cada vez mais rígidas. Por exemplo, os limites admissíveis de velocidade de vibração de partícula e de ruído têm imposto severas limitações aos planos de fogo de pedreiras e minas, exigindo inclusive o auxílio de monitoramento sismográfico para disputas judiciais entre empresas e população circunvizinha ao empreendimento. Neste contexto o engenheiro de minas deve não apenas melhorar o desempenho das detonações quanto a custos e produtividade, mas também mitigar os efeitos ambientais e diminuir os conflitos com a sociedade.

Uma análise mais apurada (da resposta estrutural) do registro sismográfico destas dezenas de pontos espalhados pelas áreas do entorno de uma pedreira permite um esclarecimento que é fundamental para explicar porque existem reclamações mesmo quando os valores estão em conformidade com os padrões e normas, uma vez que eles são baseados em dados estatísticos com a existência de uma determinada porcentagem de reclamações.

O registro do padrão de comportamento de uma detonação medida nestes pontos permite a avaliação do potencial de danos e permite também fazer os devidos ajustes no plano de fogo para minimizar estes efeitos. Assim, uma detonação pode ser planejada considerando-se a influência da resposta geológica do local pelos furos de produção que podem estar fora de fase por uma série de razões, como por exemplo, variações nos tempos de retardo, e desta forma procurar cancelá-los. O uso integrado de tecnologias para a mineração proporciona, portanto, uma solução tecnológica para a mitigação do problema ambiental relacionado com a vibração.

O acompanhamento de diversos trabalhos do LACASEMIN - Laboratório de Controle Ambiental, Higiene e Segurança na Mineração do Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo da EPUSP deu ao autor a oportunidade de visitar várias minerações e obras civis no Brasil para estudar a propagação de vibração pelo terreno e a sobrepressão atmosférica. A experiência adquirida, a disponibilidade de equipamentos e as facilidades oferecidas pelo LACASEMIN proporcionaram todo o embasamento técnico para que a aplicação de uma metodologia utilizada fora do país seja adaptada às condições da nossa realidade.

Dentro dos limites de sigilo impostos foram utilizados os dados das medições de campo efetuadas com sismógrafos de engenharia do Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo da EPUSP. Estas medições estão associadas aos dados obtidos nos locais estudados e seus respectivos relatórios dos monitoramentos executados e planos de fogo.

1.4. ESTRUTURA DA TESE

A fase inicial do trabalho teve como objetivo o levantamento bibliográfico com pesquisa de palavras-chave como desmonte de rocha, vibração, controle ambiental na mineração, Transformada de Fourier, equação carga-distância e mapa de iso-velocidades. Estes temas foram levantados e organizados obedecendo à estrutura do texto deste trabalho, que começa com a apresentação (no Capítulo 2) das hipóteses relativas à metodologia de trabalho adotada

O Capítulo 3 trata sobre os conceitos básicos envolvidos no desmonte de rocha. São discutidos os fundamentos teóricos, os elementos do plano de fogo, o processo de quebra de rocha e os mecanismos envolvidos. Descreve também a importância do projeto de desmonte de rocha para a viabilidade econômica e técnica da atividade de lavra.

A vibração de terreno em si é apresentada no Capítulo 4. Neste capítulo são discutidos os conceitos envolvidos na vibração de terreno, os parâmetros essenciais, os tipos de onda e os problemas decorrentes da vibração do terreno. É um tema que vem sendo discutido à décadas existindo inúmeras publicações a respeito. Uma grande parte dos trabalhos pesquisados é da década de 90 ou posterior, alguns poucos da década de 80 e outros, em menor número ainda, da década de 70 ou anterior, com considerações ainda importantes sobre os tópicos de interesse.

Os registros sismográficos apresentam valores de velocidade de vibração de partícula e de frequência, e outras informações. Para o cálculo destes parâmetros é necessário primeiro obter uma forma de se representar matematicamente uma onda, usando-se as Séries de Fourier, apresentadas no Capítulo 5. No entanto, para se obter a frequência da vibração, é necessário que se transforme o domínio de tempo em domínio de frequência, e isto é feito pela Transformada de Fourier, apresentada no Capítulo 6. O cálculo da frequência é realizado por um processo numérico computadorizado com uso de uma técnica que opere num domínio discreto, daí a importância da Transformada Discreta de Fourier, também apresentada no Capítulo 6. Em termos práticos, o uso da Transformada Discreta de Fourier é bastante limitado, uma vez que o tempo de processamento

para a análise de uma onda ainda é bastante longo. A tendência dos sismógrafos de engenharia é que sejam cada vez mais acessíveis e menores, e não necessariamente com processadores mais potentes. O Capítulo 7 apresenta os conceitos da Transformada Rápida de Fourier, técnica desenvolvida a partir da Transformada Discreta de Fourier e que possibilita uma tremenda redução no tempo de processamento da onda.

No Capítulo 8 são apresentados os conceitos, parâmetros e procedimentos envolvidos no monitoramento sismográfico, além da seleção e especificação da instrumentação para o monitoramento sismográfico.

No Capítulo 9 são apresentados conceitos como as teorias da equação carga-distância e a técnica do mapa de iso-velocidades da Geosonics Inc. Ainda no Capítulo 9, apresenta-se um exemplo bastante interessante de aplicação e de como este método pode ser proveitoso em termos ambientais e operacionais.

No Capítulo 10 são apresentados alguns critérios de controle da vibração de terreno e as normas mais importantes, adotadas por países como Estados Unidos e Reino Unido. A norma Brasileira da ABNT e a norma estadual da CETESB também são apresentadas neste capítulo.

A parte experimental do trabalho é apresentada no Capítulo 11, com a descrição das características físicas, topográficas, geológicas e litológicas da pedreira estudada, e também a instrumentação empregada. É apresentada a metodologia de coleta dos dados, importante para o entendimento do trabalho, uma vez que se trata de uma adaptação do mapa de iso-velocidades da Geosonics, onde se usa também os conceitos da curva carga-distância.

O Capítulo 12 apresenta os valores obtidos dos monitoramentos sismográficos, que são subdivididos em os monitoramentos preliminares (feitos em outros locais para verificar a viabilidade do método) e o monitoramento completo do local estudado.

As equações carga-distância da pedreira estudada representam numericamente o comportamento da vibração para uma determinada direção, sendo, apresentadas no Capítulo 13.

O Capítulo 14 apresenta os mapas de iso-velocidades obtidos a partir dos valores medidos. Trata-se efetivamente do resultado que demonstra uma aplicação prática como ferramenta de controle ambiental das vibrações de terreno.

No Capítulo 15 é apresentada uma sugestão para utilizar o mapa de iso-velocidades dentro de um sistema de gestão integrada de segurança e meio ambiente. Também são apresentados os conceitos de gestão ambiental, sistema integrado e um exemplo de sistema de gestão ambiental aplicado em uma empresa de mineração.

O capítulo 16 procurou abordar uma nova possibilidade no uso do conceito de mapa de linhas de iso-valores. Através da mesma técnica e aproveitando os dados obtidos dos monitoramentos, procurou-se classificar as áreas resultantes da interpolação entre as curvas de iso-velocidade e as curvas de iso-freqüência de acordo com um critério que utiliza a intensidade da velocidade de vibração partícula e as faixas de freqüência. Isto amplia o uso deste tipo de ferramenta para possíveis alterações da norma brasileira. Ainda neste capítulo são apresentadas as conclusões a respeito dos resultados obtidos e as considerações sobre estudos complementares.

CAPÍTULO 2 - METODOLOGIA

O mapa de iso-velocidades baseado no modelo da Geosonics Inc., uma fabricante de sismógrafos de engenharia nos Estados Unidos, emprega ao menos uma centena de sismógrafos para obter um bom modelo de comportamento real da vibração gerada por uma detonação. Para este trabalho não havia a possibilidade de empregar todo este número de sismógrafos nem verba para a contratação de um serviço deste tipo (da ordem de algumas dezenas de dólares segundo informação verbal prestada pelo vice-presidente Phillip Berger Jr. ao Professor Sérgio Médici de Eston). Somente empresas de grande porte, como por exemplo a Cia. Vale do Rio Doce, talvez pudessem contratar a Geosonics.

Partiu-se então da hipótese de que o uso de equações de carga-distância poderia proporcionar resultados gráficos similares aos obtidos pelo modelo do sistema Iso-Seismic.

Ao se obter valores de velocidades de vibração de partículas resultantes em um desmorte, pode-se correlacioná-las com as distâncias (entre o centro do plano de fogo e o local de captação) e com as cargas de explosivos detonados por espera. Com isto pode-se estabelecer leis de propagação específicas para cada tipo de rochas presente numa mineração, e ainda, estabelecê-las para cada direção relevante do espaço. Uma quantidade razoável de pontos monitorados permite a obtenção de pontos num gráfico que por ajuste de curva originam uma equação relacionando carga máxima por espera, distância ao ponto de detonação e velocidade de vibração de partícula.

Esta hipótese de trabalho se baseia no fato de que embora a amplitude da vibração do terreno em um local em particular varie de detonação para detonação, a taxa na qual ela varia é constante. Isto significa que se a geologia em uma localidade em particular tende a atenuar ou amplificar a vibração, ela o fará de modo consistente, não importando se a vibração for maior ou menor.

Portanto, se um monitoramento for realizado com alguns pontos alinhados, ao invés de espalhá-los ao redor do local de detonação, estes seriam suficientes para gerar de forma razoável uma equação do tipo carga-distância para uma dada direção. Neste caso, os oito sismógrafos de engenharia disponíveis com oito pontos em cada direção seriam suficientes para este trabalho (JIMENO et al, 1995).

Assim, para cada direção há uma equação correspondente ao comportamento da vibração gerada, e tendo-se uma série de direções, pode-se gerar um mapa de iso-velocidades com razoável confiabilidade.

Para este trabalho, o ideal seria que uma única bancada detonada pudesse ser monitorada em diversas direções (com oito pontos em cada uma delas). Como só havia a disponibilidade de 8 sismógrafos, seriam necessários bancadas com mesmo material idênticas, com planos de fogo idênticos e com a mesma localização para se obter os mesmos resultados. O caráter dinâmico do

processo de produção de uma pedreira, no entanto, torna esta tarefa impossível. Cada desmonte é único, tanto em termos de localização como em termos dos parâmetros geométricos e os associados ao plano de fogo. Para a hipótese adotada, no entanto, há uma condição de contorno possível com relação à localização das bancadas. Para os monitoramentos de um mapa de iso-velocidade, deve-se escolher bancadas uma na seqüência da outra, na mesma cota, com o mesmo material e o com mesmo plano de fogo de modo que os resultados apresentem erros menores em relação à escolha de bancadas separadas. Assim, as equações geradas para cada direção podem mostrar o real comportamento da vibração para uma dada direção devido ao padrão definido de amortecimento. Com os dados obtidos devidamente tratados num computador por um programa gráfico pode-se obter um mapa contendo linhas de valores de iso-velocidade para todas as direções.

As etapas que compõem este método são:

- Monitoramento inicial de quatro detonações em quatro direções com mesma origem e perpendiculares entre si;
- Plotagem em planta de todos os pontos monitorados e os valores de vibração;
- Obtenção da equação carga-distância para cada uma das direções;
- Interpolação em pontos intermediários das retas obtidas;
- Geração das isolinhas para as 4 direções, obtendo-se um mapa de tendências da vibração;
- Verificação do comportamento da vibração a partir destas 4 direções;
- Verificar se há erros de extrapolação devido ao pequeno número de pontos;
- Se a localização das bancadas for favorável, isto é, todas as bancadas apresentarem distâncias pequenas em relação a uma origem em comum, novas medições podem ser feitas e proceder a adição de quatro novas direções, intermediárias às quatro iniciais; e
- Mapa final. Com a adição destas novas direções o resultado deve ser um mapa mais equilibrado ao mostrar o comportamento da vibração para todas as direções.

CAPÍTULO 3 - DESMONTE DE ROCHA

Neste capítulo são apresentados os tipos de desmontes primários, seus principais elementos e o mecanismo de fragmentação de rocha pela ação de um explosivo. A escolha do desmonte primário se baseou no fato de que grande parte dos efeitos ambientais, inclusive a vibração, são produzidos nesta etapa da lavra.

3.1. TIPOS DE DESMONTE POR EXPLOSIVOS EM MINERAÇÃO A CÉU ABERTO E PEDREIRAS

A seguir é apresentada uma breve descrição de alguns dos tipos de desmontes normalmente utilizados em mineração a céu aberto e pedreiras.

3.1.1. Desmontes em bancadas (“Production Bench Blasts”)

Este é o tipo mais comum de desmonte por explosivos. O objetivo é fragmentar e liberar a rocha preparando-a para a sua escavação através de pás-carregadoras, escavadoras, “draglines” ou tratores. O montante de preparação ou condicionamento da rocha, a ser feito pelo desmonte por explosivos, depende tanto das características do maciço rochoso como do tipo, tamanho e modo de operação do equipamento de escavação. As Figuras 1 e 2 (MENDES, 2002) mostram exemplos de desmonte em bancadas.



FIGURA 1. Desmonte de bancada da mina Conceição da CVRD, Itabira-MG (MENDES, 2002).

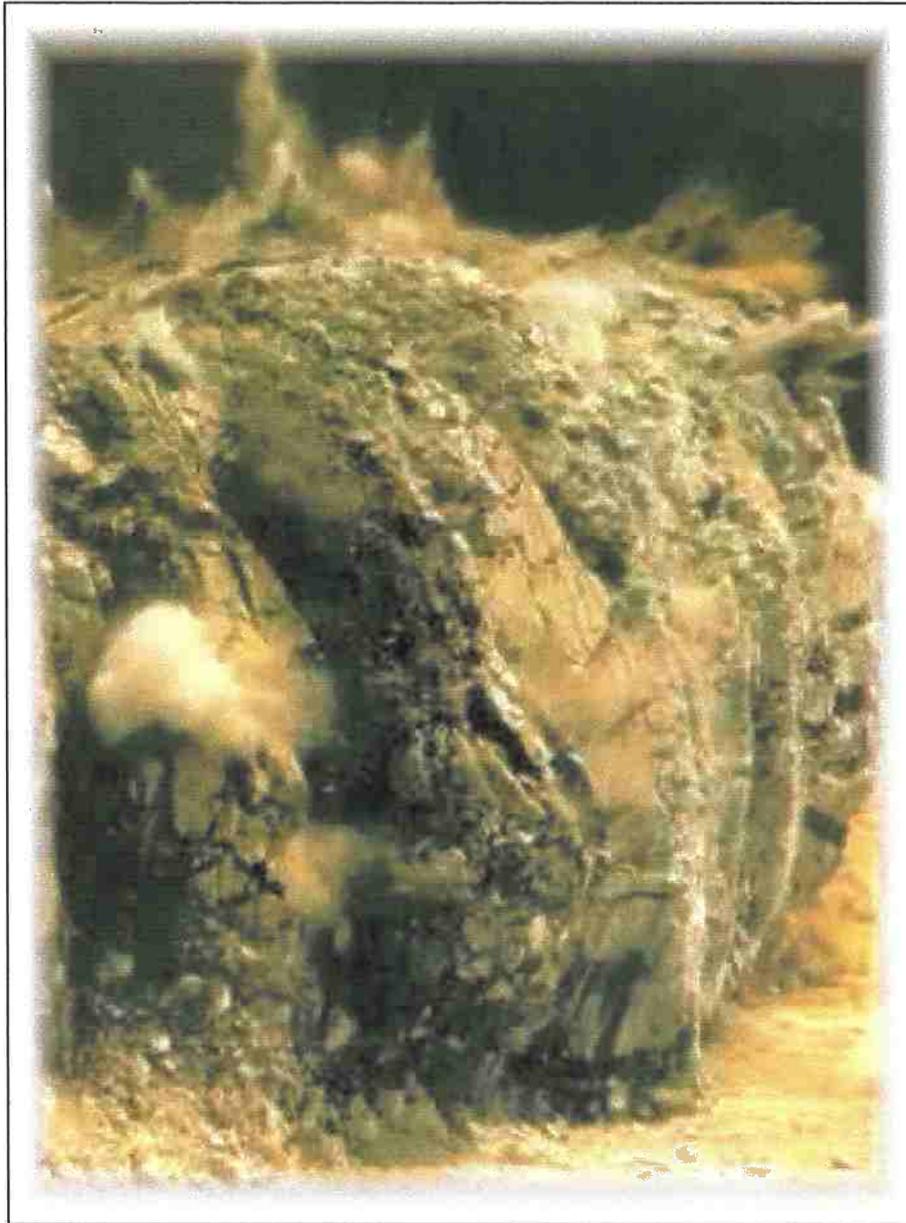


FIGURA 2. Desmonte por bancadas: momento da expansão da face já fragmentada (MENDES, 2002)

3.1.2. Desmontes controlados ("Wall Control Blasts")

Estes desmontes são planejados para fragmentar a rocha próxima ou junto ao "pit" final, ou no limite da pedreira, de modo a causar um dano mínimo à rocha fora deste limite. Existem diversas técnicas utilizadas para alcançar este objetivo, entre as quais podem ser citadas: perfuração linear ou de costura ("line drilling"), pré-fissuramento ou corte prévio ("presplitting"), desmonte escultural ou detonação controlada ("trim blasting"), detonação cuidadosa ("cushion blasting") ou detonação amortecida ("buffer blasting"). A Figura 3 (IRAMINA, 1997) mostra um exemplo de parede feita com o pré-fissuramento.

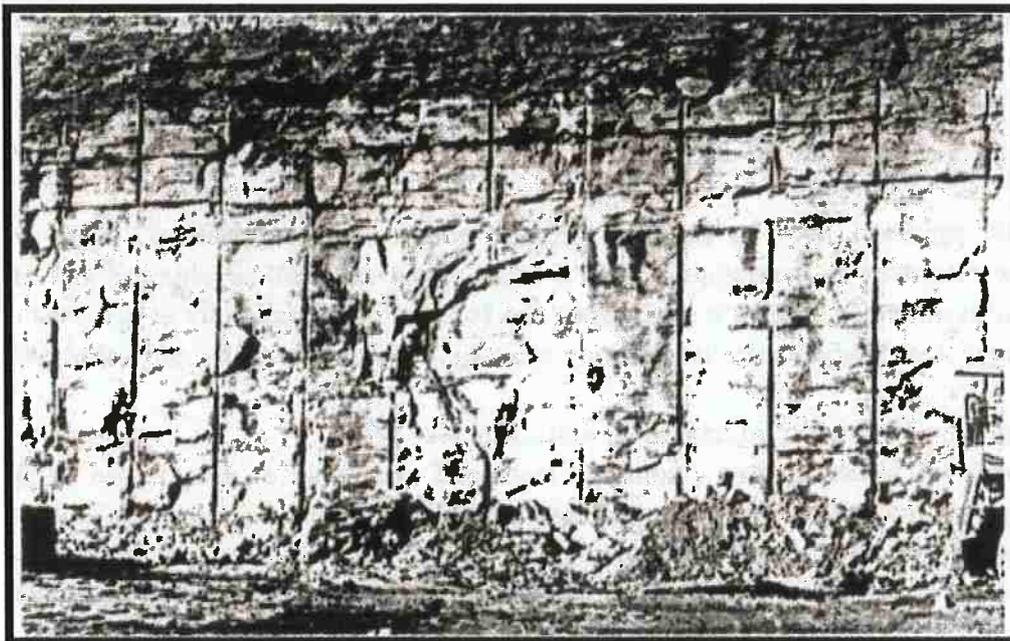


FIGURA 3. Face de pré-fissuramento para uma parede que não necessita de acabamento (IRAMINA, 1997).

3.1.3. Desmonte para lançamento (“Throw/Cast Blasts”)

Em muitas minerações a céu aberto de carvão existe um estímulo econômico para remover, através de detonações, uma porção significativa de material que, de um outro modo, sobrecarregaria os meios de transporte para a sua posição final. Estes tipos de desmonte são planejados de maneira a maximizar o movimento horizontal da rocha para a direção desejada. A Figura 4 mostra um exemplo de desmonte para lançamento (MENDES, 2002).



FIGURA 4. Exemplo de desmonte para lançamento que pode ser usado em mina de carvão.

3.1.4. Desmonte para corte inicial ("Sinking Cut Blasts")

Este tipo de desmonte é normalmente o primeiro a ser realizado em uma nova bancada onde uma face vertical livre não está disponível. Ele é planejado com o objetivo de quebrar e liberar a rocha utilizando a superfície horizontal como a única face livre. Uma rampa é escavada através do material desmontado ("muckpile"), proveniente da própria abertura, para dar acesso ao piso da nova bancada e, deste modo, uma nova face livre vertical vai se formando.

3.2. ELEMENTOS DE UM PLANO DE FOGO

O uso de explosivos para o desmonte de rocha é um tema bastante abrangente, com inúmeros textos de bibliografia que vão desde os fundamentos até temas bastante específicos, além dos diversos aspectos práticos apresentados pelos fabricantes.

Os conceitos apresentados a seguir são aqueles aplicáveis às minas a céu aberto, e embora existam diferenças sensíveis entre os tipos de rocha a serem fragmentados, os principais elementos de um plano de fogo estão sempre presentes e, portanto, estes conceitos, com algumas variações, podem ser considerados como aplicáveis em operações de pedreiras, minerações a céu aberto e obras civis em superfície.

Uma operação de desmonte de rocha tem a finalidade de fragmentar adequadamente uma quantidade pré-determinada de rocha, o que significa gerar descontinuidades na rocha *in situ*, criar blocos fragmentados isolados e com dimensões adequadas às operações subsequentes, deslocar estes blocos do maciço e dispô-los de modo que sejam carregados e transportados para as operações seguintes. A quantidade pré-determinada significa que a fragmentação deve ocorrer em um volume definido de rocha e que o material próximo a este volume não apresente danos ou perturbações, o que significaria um excesso de energia que certamente irá resultar em efeitos ambientais desfavoráveis, entre eles a vibração do terreno.

O planejamento do desmonte deve levar em consideração:

- a determinação da quantidade de energia necessária para se gerar descontinuidades, fragmentação da rocha em blocos e o deslocamento dos blocos.
- a determinação da distribuição do explosivo na rocha, para se aproveitar da melhor maneira a energia disponível, ou seja, fragmentar a rocha no volume especificado e proteger o maciço circundante (ESTON, 1998).

A Figura 5. apresenta os elementos geométricos básicos contidos num plano de fogo.

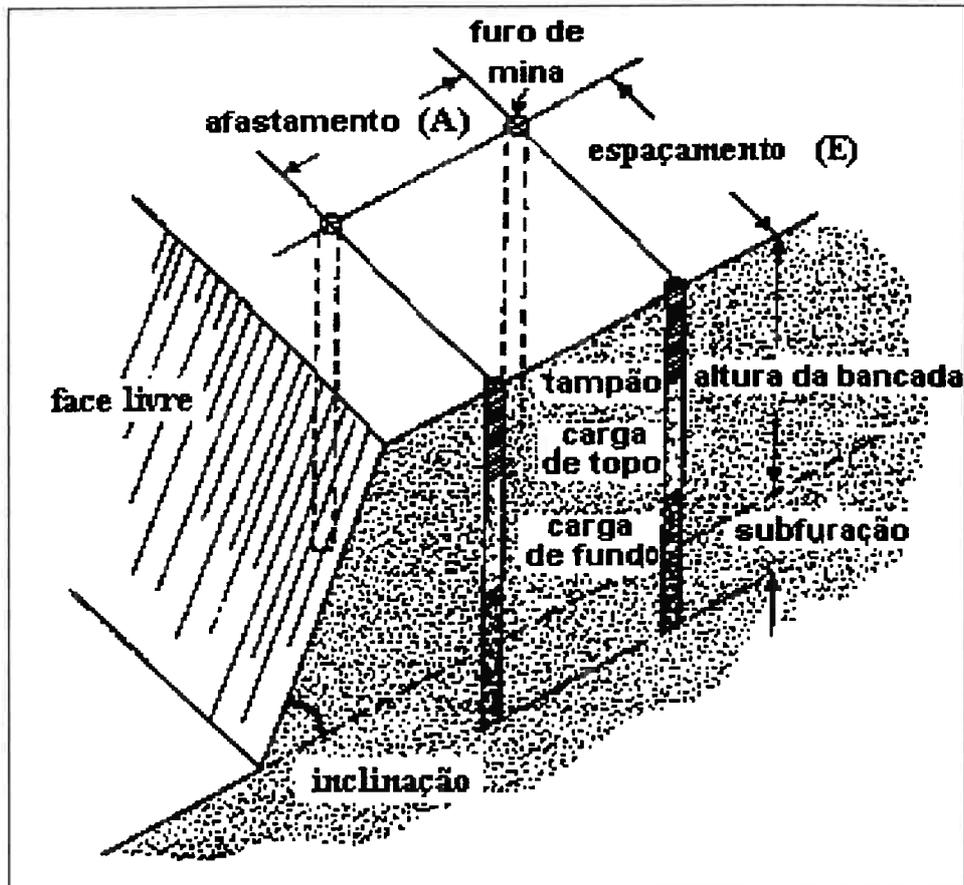


FIGURA 5. Elementos geométricos contidos num plano de fogo (GOLDER ASSOCIATES, sd).

3.2.1. Altura da bancada (H)

A altura da bancada normalmente varia entre 3 e 18 metros. A seleção da altura da bancada é influenciada por:

- regulamentações previstas por lei (bancadas excessivamente altas são inseguras e, portanto, não permitidas);
- propriedades do maciço rochoso;
- tipo e tamanho dos equipamentos de escavação;
- necessidade do controle de inclinação; e
- necessidade de maximizar a eficiência no custo total de perfuração e desmonte.

3.2.2. Diâmetro do furo

Nas operações em mineração a céu aberto e pedreiras, os diâmetros do furo geralmente variam de aproximadamente 76 mm (3"), para perfuratrizes hidráulicas ou pneumáticas, a furos tão grandes como 381 mm (15"), para grandes perfuratrizes rotativas. O diâmetro ótimo é maior para bancadas maiores e para equipamentos de escavação, transporte e britagem maiores. Furos de grande diâmetro são menos adequados:

- em rochas resistentes e esparsamente fissuradas, e
- onde é muito importante o controle de vibrações geradas pelo desmonte.

Perfurações com furos de diâmetro maiores resultam em custos com explosivos maiores. Razões de carregamento maiores são necessárias para conseguir o mesmo grau de fragmentação, especialmente em rochas resistentes e esparsamente fissuradas. Quando a rocha é difícil de quebrar, furos de diâmetro menor têm a vantagem de distribuir melhor a energia do explosivo por toda massa de rocha a ser detonada. Quando o diâmetro do furo é aumentado e o fator de energia de explosão permanece constante, furos maiores geralmente resultam em fragmentação mais grosseira.

Quando juntas ou partições de planos de acamamento dividem a rocha em blocos grandes (ver Figura 6), uma fragmentação satisfatória é freqüentemente obtida somente quando cada bloco é interceptado por um furo. Isto usualmente requer o uso de furos de diâmetro menor e malha mais apertada.

Em rochas com fissuras pouco espaçadas, a fragmentação tende a ser controlada estruturalmente. Por esta razão, o aumento no diâmetro do furo pode ser conveniente somente com uma pequena deterioração na fragmentação.

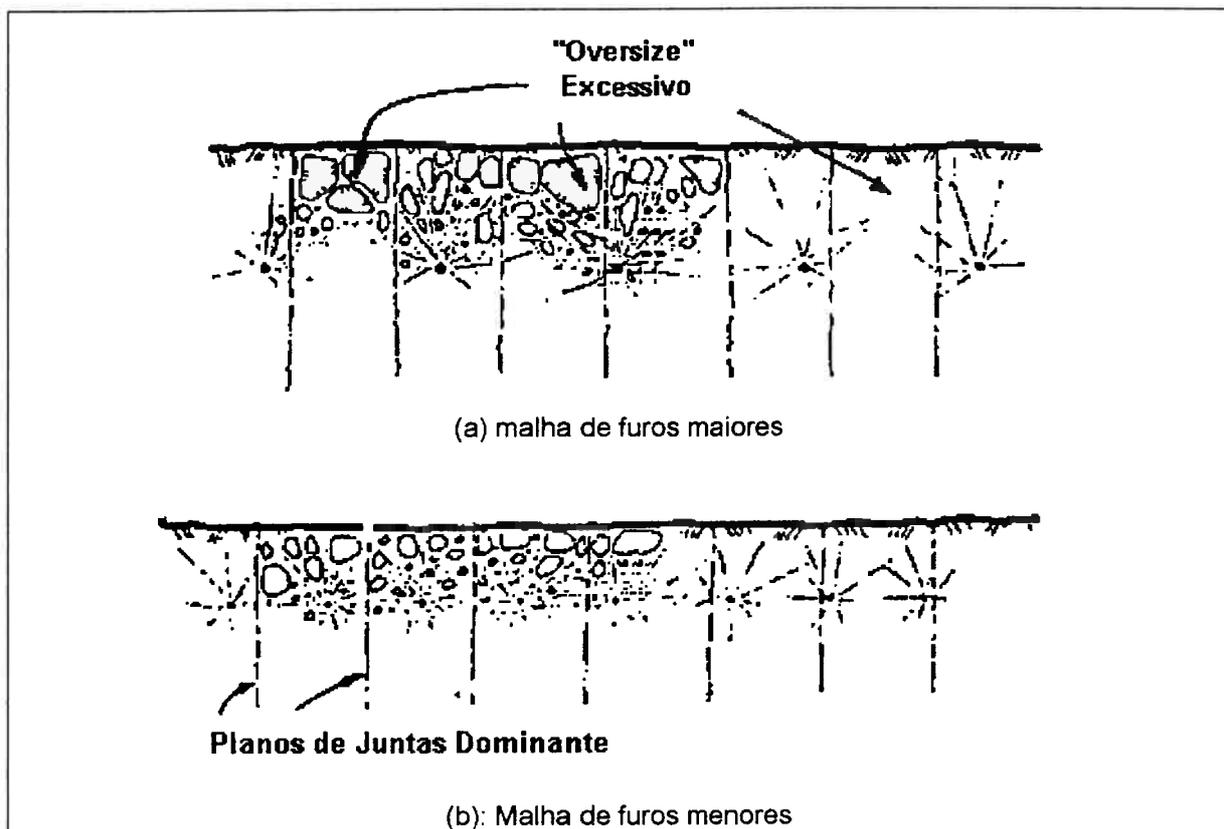


FIGURA 6. Efeito do uso de furos de diâmetro grande (a) de diâmetro pequeno (b) em rochas com juntas espaçadas (GOLDER ASSOCIATES, sd).

Furos com diâmetro menor também resultam em melhor quebra no topo, desde que as cargas possam estar mais altas no furo (Figura 7). Esta melhor distribuição da carga é uma apreciável

vantagem nas rochas maciças. Com furos de diâmetro de 229 a 381 mm, colunas de tamponamento de 4,5 a 7,5 m devem normalmente ser usadas em locais em que problemas de ruído e de ultra-lançamento tenham de ser evitados. Com diâmetro do furo de 89 a 127 mm, o comprimento do tamponamento pode ser reduzido para um valor entre 1,8m e 2,5m.

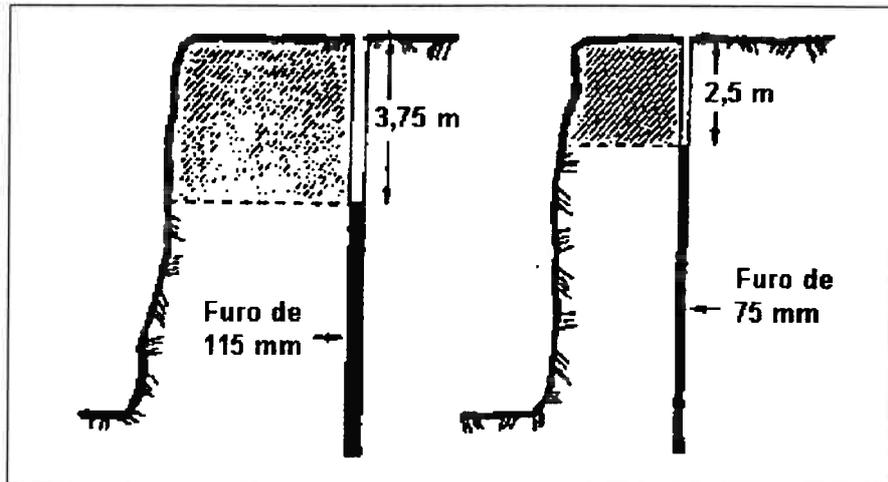


FIGURA 7. Menos rocha do colar com furos de menor diâmetro (GOLDER ASSOCIATES, sd).

Quando os furos verticais têm um diâmetro menor, há uma maior probabilidade de se evitar excesso de afastamento do pé na linha de frente. Estes afastamentos excessivos do pé na linha de frente são comuns onde furos de diâmetro pequenos são perfurados em bancadas altas com faces de baixa inclinação. Onde a rocha no nível do pé na linha de frente não for quebrada e deslocada suficientemente, o desmonte freqüentemente falha na linha de frente; talvez não se recupere, independente do número de linhas de furos.

3.2.3. Inclinação do furo

3.2.3.1. Inclinação

Em desmontes de produção em minas metálicas a céu aberto, os furos são usualmente verticais. Isto ocorre pelos seguintes motivos:

- a) furos inclinados são mais difíceis de serem perfurados,
- b) algumas perfuratrizes não têm capacidade de perfurar inclinada,
- c) a exatidão na perfuração é maior em furos verticais.

Contudo, os furos inclinados proporcionam melhor distribuição do explosivo no maciço rochoso e são muito eficientes na superação de problemas no pé da bancada e reduzem a ultra-quebra ("overbreak") superficial (Figura 8). Os furos inclinados também geram melhor deslocamento e liberação das pilhas. Com furos inclinados, a fragmentação é normalmente melhor em razão de sua maior eficiência no uso da energia do explosivo e por causa do menor volume de rocha na

frente da coluna de tamponamento (onde matacões freqüentemente são originados conforme observado na Figura 7).

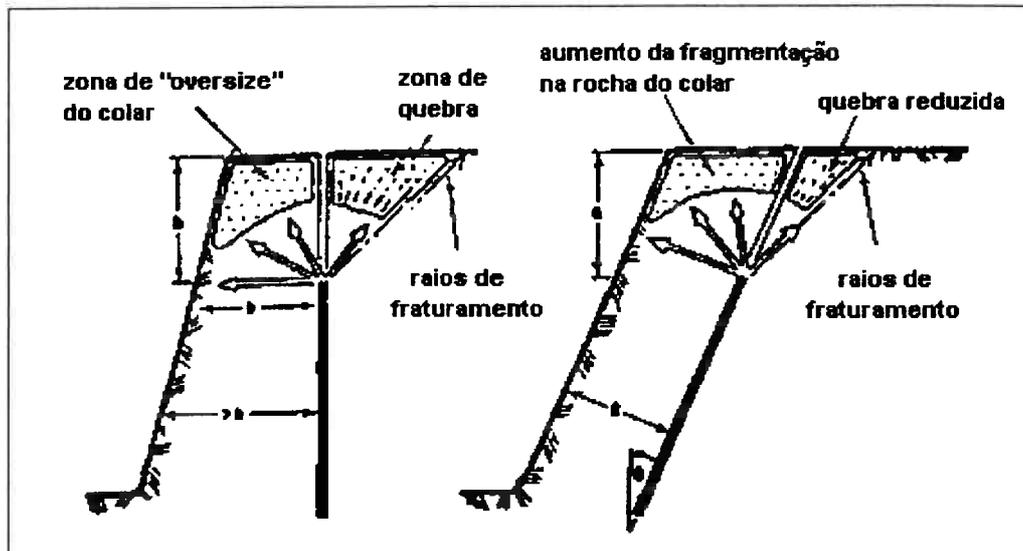


FIGURA 8. Menos ultra-quebra superficial e volume de rocha do colar com furos inclinados (GOLDER ASSOCIATES, sd).

O uso de furos verticais na linha de frente freqüentemente resulta em uma considerável variação no afastamento entre o topo e o fundo da carga (Figura 9). Esta variação é maior onde a face é alta ou de baixo mergulho. Os furos da linha de frente são freqüentemente carregados até próximo à boca e devem ter controle cuidadoso na carga de fundo. Mas por outro lado, os gases da explosão talvez escapem prematuramente pela face superior, causando ruído, sobrepressão e ultra-lançamento (Figura 10a). A razão pela qual tal escape reduz a pressão de furo próxima ao nível do piso da bancada pode ser suficientemente grande para não permitir a quebra adequada e o movimento do pé. Este efeito é mais pronunciado para cargas iniciadas pelo topo ou em vários pontos ao longo da coluna do que para cargas iniciadas pelo fundo.

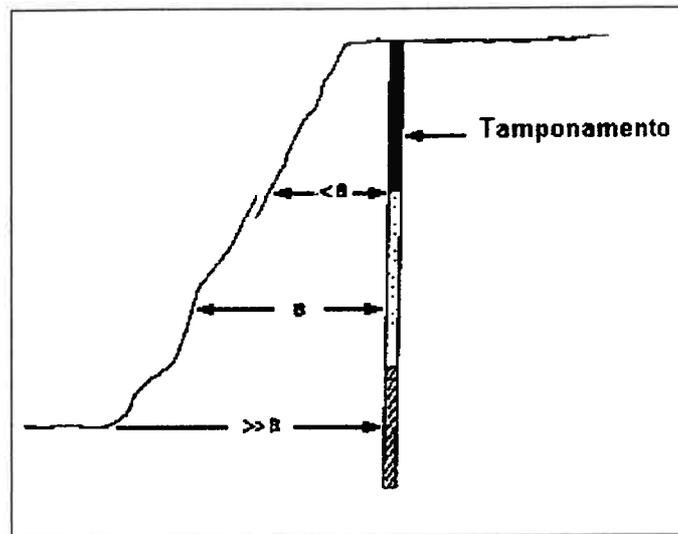


FIGURA 9. Excessivo afastamento do pé para furo vertical adjacente a uma face alta ou de baixo mergulho (GOLDER ASSOCIATES, sd).

Quando um furo vertical é perfurado na distância de afastamento planejada na crista, terá, por outro lado, um grande afastamento do pé, podendo resultar em um desmorte insatisfatório nesta região. Uma das maiores vantagens dos furos inclinados, portanto, é uma uniformidade maior no afastamento ao longo do comprimento do furo. Em termos ideais, o furo deve ser paralelo à face da bancada a ser detonada.

Em locais onde dificuldades de perfuração ou um aumento na cavidade das paredes do furo não impedem seu uso, talvez haja boas razões para a utilização de furos inclinados. Onde as faces são altas, ângulos de 20° a 30° (com relação à vertical) são recomendados (GOLDER ASSOCIATES, s. d). Ângulos maiores que 30° são raramente usados por causa do excessivo desgaste do "bit" da broca e de dificuldades na manutenção do alinhamento e no carregamento do furo.

As vantagens potenciais dos furos inclinados somente podem ser alcançadas onde a perfuração é executada com um alto grau de precisão. Se o ângulo (com a vertical) dos furos da linha de frente é muito grande, o afastamento do pé será muito pequeno, e ultra-lançamento, sobrepressão atmosférica (sopro de ar) e ruídos excessivos podem resultar daquela parte da face imediatamente acima do nível do piso da bancada (Figura 10b).

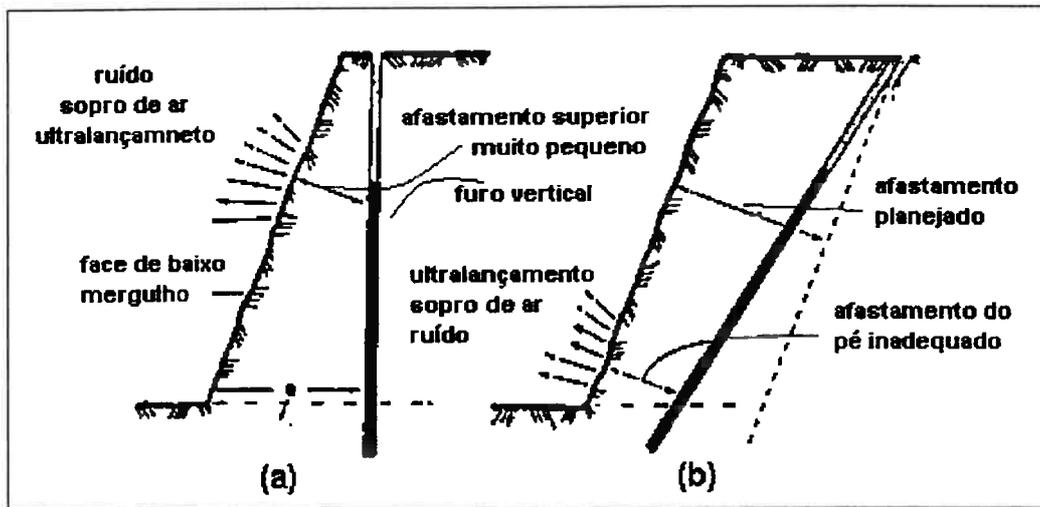


FIGURA 10. Sopro de ar e ultra-lançamento causados pela carga inadequada ao longo da carga de topo (a) e de base (b) (GOLDER ASSOCIATES, sd).

Quando os planos de fogo definem os furos como sendo verticais, pode haver a necessidade de substituição por furos inclinados na linha de frente para controlar o afastamento do pé.

A perfuração de furos verticais não elimina a necessidade de precisão na inclinação do furo. Em uma bancada de 15 metros de altura, erros na inclinação dos furos podem resultar em desvios de 0,5 m no afastamento ou no espaçamento do pé. Um erro absoluto desta magnitude pode representar um significativo erro percentual, e talvez cause resultados de perfuração sub-otimizados exatamente acima do nível do piso da bancada.

3.2.3.2. Direção do mergulho do furo

Um outro problema potencial de furos inclinados, que é menos óbvio, é a necessidade do correto alinhamento. Ainda que menos influente que os erros na inclinação do furo, os erros no alinhamento são comuns. Se acontecer o exemplo mostrado na Figura 11, onde os furos da linha de frente são perfurados no ângulo correto (com a vertical), mas com seu mergulho na direção errada, os seguintes erros aparecem:

- os afastamentos do pé dos três furos são muito grandes;
- o espaçamento do pé entre os dois furos, da esquerda para a direita, é muito pequeno e entre o 2º e o 3º furos muito grande.

Quando se deseja que os furos sejam inclinados deve haver um sistema seguro de precisão de alinhamento do furo para conseguir-se mergulhos dos furos na direção planejada.

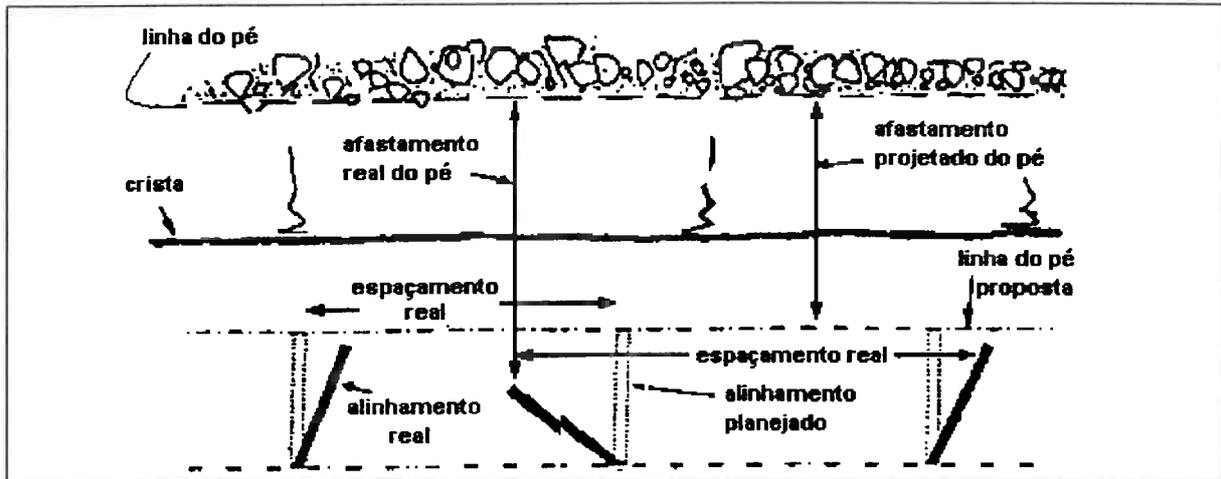


FIGURA 11. Erros nos espaçamentos e no afastamento do pé, causados pelo erro na direção do mergulho de furos inclinados (GOLDER ASSOCIATES, sd).

3.2.4. Subfuração e subfuração efetiva

Operações de escavação eficientes requerem que a fragmentação e os deslocamentos no nível do piso da bancada excedam certos valores críticos. As condições do pé são muito influenciadas pela quantidade de subfuração efetiva.

Subfuração efetiva é o comprimento daquela parte da carga explosiva que se encontra abaixo do nível do piso da bancada. Subfuração é um parâmetro importante no desmonte e é definida como o comprimento do furo que está abaixo do nível do piso. Por causa do inevitável acúmulo do resíduo de perfuração e de pequenos fragmentos de rocha no fundo do furo, a subfuração efetiva é sempre menor que a subfuração. É a subfuração efetiva, e não a subfuração, quem determina as condições do pé. Faz parte da boa prática de engenharia perfurar um certo comprimento extra (que é maior para bancadas mais altas e rochas mais frágeis) para permitir este acúmulo inevitável (Figura 12).

A subfuração efetiva ótima varia com:

- as propriedades do maciço rochoso;
- o tipo de carga de fundo (e, mais particularmente, a energia gerada por metro de furo);
- o diâmetro e a inclinação do furo;
- o comprimento efetivo da carga;
- a localização das escorvas na carga.

Uma subfuração efetiva insuficiente resultará em repé. O desmonte sob tais condições normalmente transforma-se em um círculo vicioso que resulta em mais ultra-quebra e requer ainda maiores concentrações de energia de explosão no fundo do furo.

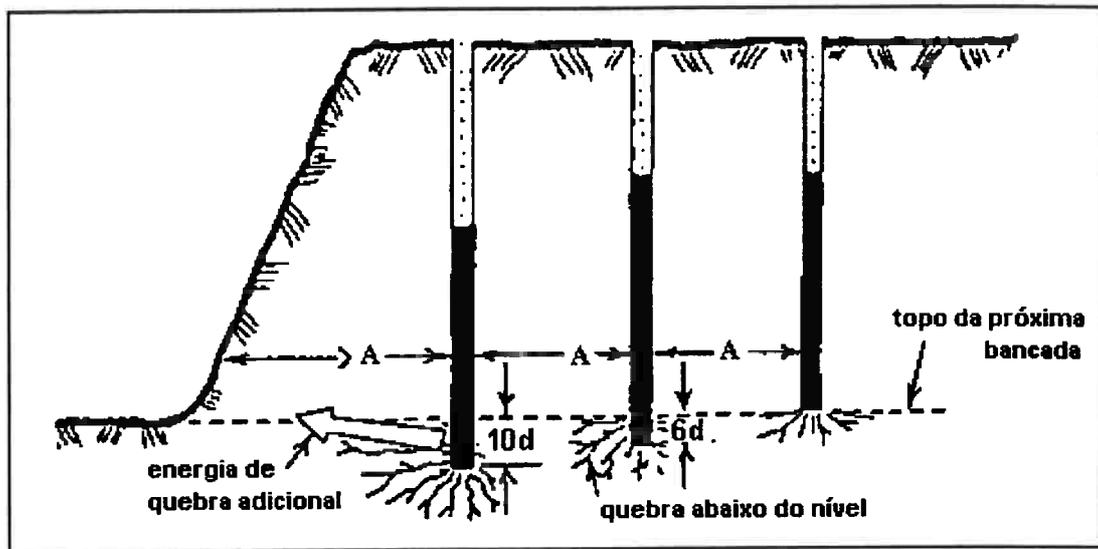


FIGURA 12. Exemplos de subfuração efetiva (GOLDER ASSOCIATES, sd).

A subfuração efetiva em excesso precisa ser evitada, pois ela resulta em:

- um desperdício de perfuração e de consumo de explosivos;
- um aumento na vibração do terreno;
- uma destruição indesejável do piso da bancada (que talvez crie problemas de perfuração na bancada inferior, resto de furos abandonados e, por isso, malhas fora do planejado na bancada de baixo), e
- maior movimento vertical no desmonte.

O último destes tende a causar aumentos de corte nas ligações entre-furos e de ultra-quebra.

3.2.5. Malha de furos

A malha dos furos (ou de furação) varia enormemente e depende do diâmetro do furo, das propriedades da rocha, das propriedades dos explosivos, do grau de fragmentação e deslocamento requeridos, e da altura da bancada.

3.2.5.1. Tipo de malha

De acordo com as observações de alguns autores (GOLDER ASSOCIATES, sd.), a fragmentação e a produtividade são geralmente maiores nas malhas escalonadas do que nas outras geometrias do tipo quadradas ou retangulares. A diferença entre estes dois tipos de malha aumenta com o espaçamento médio das fissuras e com a resistência da rocha.

Em rochas maciças resistentes, as melhores malhas escalonadas são aquelas que são baseadas em redes de triângulos equiláteros. As malhas em triângulos equiláteros proporcionam a distribuição ótima da energia de explosão na rocha a ser quebrada. Em geral, resultam em melhores performances, seguidas pelas malhas retangulares e então pelas quadradas.

Entretanto, a seqüência de iniciação pode alterar a performance dessas malhas consideravelmente.

Quando se utilizam malhas com triângulos equiláteros, o espaçamento entre os furos (E) é igual ao afastamento (A) multiplicado por 1,16 (isto é, $E = 1,16 A$) para a maioria das situações.

3.2.5.2. Afastamento e espaçamento

A carga explosiva é mais eficiente onde o afastamento é aproximadamente igual a 25 a 35 vezes o diâmetro do furo, dependendo do explosivo usado e das propriedades da rocha (GOLDER ASSOCIATES, sd). Onde a fragmentação ótima é requerida em rocha que tende a quebrar grosseiramente, valores consideravelmente pequenos de afastamento (A) e espaçamento (E) devem ser escolhidos. Onde uma boa fragmentação é menos importante, ou em desmonte de rochas friáveis que tendem a quebrar facilmente, resultados satisfatórios podem ser obtidos com perfuração de furos de diâmetro maior em uma malha mais aberta.

Espaçamentos entre os furos apreciavelmente menores que a distância de afastamento tendem a causar ruptura prematura entre furos e perda antecipada do tampão. Ambos efeitos provocam a liberação prematura dos gases da explosão para a atmosfera, e a ultra-quebra é normalmente considerável. Esta perda de energia de projeção diminui o fraturamento global, e grandes placas são freqüentemente encontradas na pilha de fragmentos.

De outro lado, onde a razão entre o espaçamento e o afastamento (E / A) é demasiadamente grande, a região da face a meio caminho entre os furos da linha de trás podem permanecer intactos, especialmente próximos ao nível do piso da bancada, onde um espaçamento inadequado resultaria na escavação mais difícil e na formação de repé.

Quando o afastamento aumenta além de seu valor ótimo:

- a fragmentação torna-se grosseira, a pilha de fragmentos mais coesa, e a escavação mais lenta e mais cara; e
- aumentam a ultra-quebra, as vibrações do terreno e a instabilidade potencial das paredes do "pit".

Mudanças no afastamento geralmente afetam a fragmentação, a formação das pilhas de fragmentos e a formação de repé mais acentuadamente do que mudanças no espaçamento. Se resultados de desmonte são adequados e é decidido tentar uma malha melhor, deve-se normalmente aumentar o espaçamento em vez do afastamento. Em qualquer fogo experimental, é preferível que a pilha de fragmentos seja completamente removida, e que os custo-benefícios da escavação, do transporte e da britagem sejam avaliados antes do próximo fogo ser preparado.

Normalmente, o afastamento e o espaçamento são relacionados com profundidade e, mais particularmente, com o comprimento da carga.

3.2.5.3. Afastamento efetivo e espaçamento efetivo

O afastamento efetivo (A_e) e o espaçamento efetivo (E_e) não dependem somente da geometria dos furos, mas também da seqüência de iniciação. Como ilustrado na Figura 13a, uma malha quadrada, que é detonada linha por linha a partir da face, resulta em um afastamento efetivo igual ao espaçamento entre linhas sucessivas paralelas à face. Por outro lado, uma malha idêntica pode ser detonada escalonada, resultando em afastamentos e espaçamentos completamente diferentes (Figura 13b). Estas figuras foram obtidas de Hoek & Bray (GOLDER ASSOCIATES, sd).

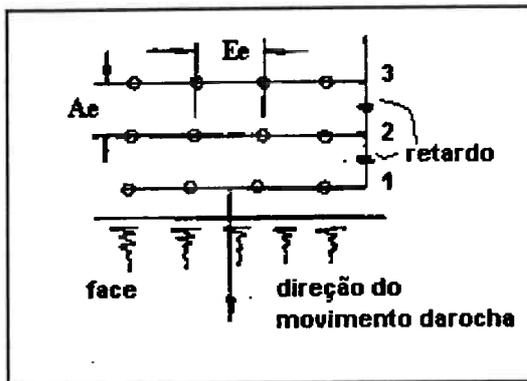


FIGURA 13-(a) Afastamento e espaçamento efetivos para uma malha quadrada

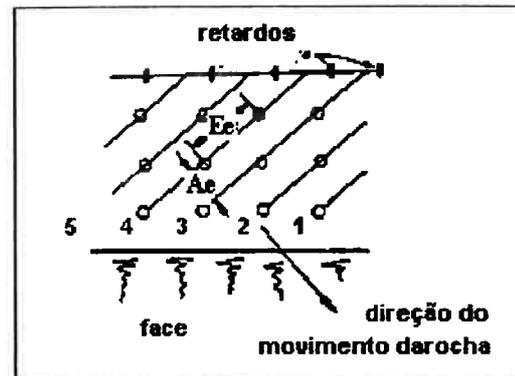


FIGURA 13-(b) Afastamento e espaçamento efetivos para uma malha de desmonte escalonado

3.2.6. Tamponamento

O uso de tamponamento para preencher o furo acima da coluna de explosivo é um procedimento geralmente aceito para direcionar o esforço do explosivo para o maciço rochoso. Os mesmos argumentos que foram usados na discussão do afastamento são aplicados neste caso. Tampões muito pequenos permitem que os gases da explosão escapem e gerem problemas de ultra-lançamento e de sobrepressão atmosférica ao mesmo tempo em que reduzem a eficiência da detonação. Já os tampões muito grandes resultam em uma fraca fragmentação da rocha acima do topo da carga explosiva.

3.2.6.1 Tipo de tamponamento

Os resíduos da perfuração (ou seja, o pó resultante da perfuração) são os mais convenientes e usuais meios de tamponamento. Entretanto, tem sido notado que rochas britadas angulares contêm uma distribuição bem graduada de tamanhos de partículas variando de fina a grossa e por isso é um material de tamponamento muito mais eficiente. Em situações onde controle de sopro de ar é crítico, o uso de tamponamento de material angular britado deve ser considerado.

Para diâmetros de furo na faixa de 76 a 381 mm, as rochas britadas nas faixas de tamanho aproximado de 5 a 10 mm e 10 a 20 mm formam um material de tamponamento muito efetivo.

Quando comprimida impulsivamente em sua extremidade mais baixa pela tremenda pressão dos gases da explosão, a rocha britada forma um arco, entra com força na parede do furo e proporciona uma melhor vedação e confinamento dos gases do que os resíduos de perfuração (relativamente finos). Este confinamento ajuda a manter as pressões de pico no furo por um período de tempo maior. Quanto mais tempo estes gases podem ficar contidos, mais eles serão capazes de fragmentar, deslocar e soltar a rocha. Quando existir água no furo acima da carga, os materiais grosseiros afundam mais facilmente para a posição planejada. Ao contrário do pó de fragmentação, eles não formam uma suspensão com consistência de polpa.

3.2.6.2. Comprimento do tamponamento

Para todo conjunto de condições, há um comprimento de tamponamento ótimo. Quando o comprimento do tamponamento decresce abaixo de seu valor ótimo, a quebra da rocha pela energia de choque ao redor do furo aumenta, mas:

- a quebra total e o deslocamento pela energia dos gases decresce (pois os gases da explosão extravasam mais facilmente e mais rapidamente para a atmosfera), e
- há uma maior probabilidade de ultra-lançamento, ultra-quebra superficial, ruído e sobrepressão atmosférica.

Quando o comprimento do tamponamento aumenta acima de seu valor ótimo, mais trabalho efetivo é realizado na rocha ao longo de cada carga explosiva, mas a fragmentação da rocha ao redor da carga torna-se mais grosseira. Há um determinado valor do comprimento do tamponamento acima do qual não se consegue obter aumento na eficiência da energia de deslocamento.

O comprimento ótimo do tamponamento é menor para:

- furos de diâmetros menores;
- rochas mais resistentes e maciças;
- material de tamponamento cuja resistência à expulsão é maior;
- explosivos com menor força em volume, e
- bancadas com alturas menores do que um determinado valor.

Como uma regra geral, o comprimento do tamponamento não deve ser menor que a distância de afastamento (A). O comprimento de tamponamento ótimo varia bastante em função das propriedades do maciço rochoso e pode variar de cerca de $0,7A$ a $2A$. Colunas menores que $0,7A$ geralmente causam ruído, sobrepressão atmosférica, ultra-lançamento e ultra-quebra (GOLDER ASSOCIATES, sd).

Para rochas maciças resistentes, a coluna de tamponamento deve ser a menor tecnicamente possível, ou seja, que previna o ultra-lançamento, a ultra-quebra ou o ruído excessivo e a sobrepressão atmosférica. Como recomendação, o comprimento do tamponamento pode ser encontrado nas faixas mostradas na Tabela 1, enquanto que a Figura 14 apresenta exemplos do uso de tamponamento.

TABELA 1. Faixas normais de comprimento do tamponamento.

Tipo de Tamponamento	Rocha maciça resistente		Rocha frágil muito fissurada	
	d = 89mm	d = 311mm	d = 89 mm	d = 311 mm
Resíduos da perfuração	25d a 30d	22d a 26d	32d a 38d	28d a 33d
Rocha angular britada	23d a 27d	19d a 23d	29d a 34d	24d a 28d

Fonte: GOLDER ASSOCIATES (sd)

Nota: d = diâmetro do furo. Para cada faixa, o menor valor é para um explosivo com baixa energia efetiva em volume.

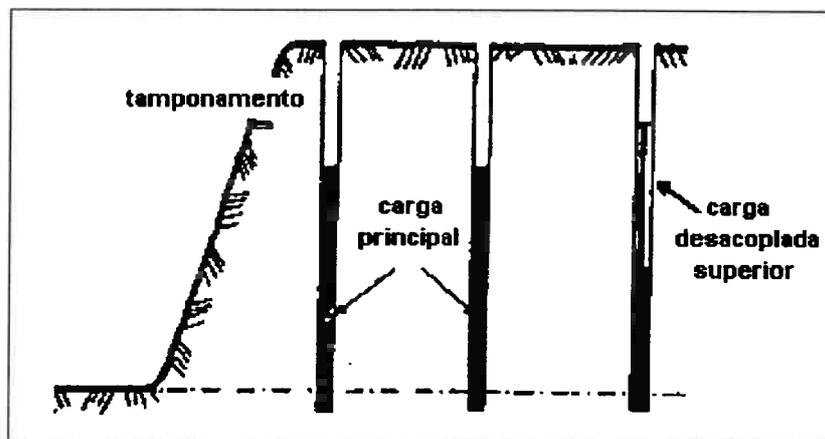


FIGURA 14. Exemplo de uso de tampões (GOLDER ASSOCIATES, sd).

3.2.7. Razão de carregamento ("powder factor")

A razão de carregamento RC (ou powder factor - PF) é o peso do explosivo (em kg) usado para quebrar cada metro cúbico de rocha sólida. Em minas de metal a céu aberto e várias pedreiras, as razões de carregamento para produzir desmonte de produção geralmente variam de aproximadamente 0,2 a 0,8 kg/m³. (Se a razão de carregamento for expressa em kg/tonelada, é importante qualificar o número com a informação da densidade do material).

Uma grande importância tem sido dada à razão de carregamento como um critério do plano de fogo. Como as razões de carregamento são definidas pelo peso em vez da força do explosivo, uma comparação entre dois produtos diferentes muitas vezes não é possível.

Da experiência adquirida durante um período de tempo, um cabo de fogo ("blaster") freqüentemente conhece o quanto de explosivo de um determinado tipo é necessário para desmontar satisfatoriamente um tipo particular de rocha. Nestes casos, a razão de carregamento pode ser usada como uma boa ferramenta na definição do plano de fogo. Uma vez que muitos

operadores têm percebido que os ganhos totais na eficiência operacional com o aumento da razão de carregamento relacionam-se a menores custos de escavação e de manutenção e/ou aumento da produtividade da britagem.

3.2.8. Tamanho e forma do desmonte

Desmontes maiores produzem geralmente fragmentação mais controlada e resultam em menor tempo gasto na retirada de trabalhadores e equipamentos da área do desmonte, na espera do desmonte ser executado, e na volta da liberação da área.

A fragmentação grosseira usualmente ocorre ao longo do perímetro de um desmonte (isto é, ao longo da face livre e ao longo dos lados e atrás do desmonte). Em um típico desmonte em bancadas, o material acima do tamanho desejado ("oversize") é freqüentemente produzido nas extremidades da detonação onde o movimento para a frente do material desmontado rompe matacões não detonados das faces laterais formadas. O tamanho excessivo também é originado no afastamento da linha de frente na qual blocos grandes, efetivamente desprendidos do maciço rochoso pelo desmonte anterior, são projetados sem terem sido fraturados ou atingidos pelas ondas de tensão geradas pela explosão ou pela propagação de fissuras.

Para desmontes de um dado volume, como conseqüência, há uma tendência para minimizar a área contígua aos seus lados. Esta área é mínima para blocos quadrados (vista em plano). Mas quando grandes desmontes em rochas maciças e resistentes têm uma forma quadrada, um grande número de linhas tende a resultar em pilhas de material desmontado adensado e, por isso, tem como conseqüência uma escavação cada vez mais difícil, lenta e custosa na direção oposta à face do desmonte. Este problema pode ser resolvido, mas não eliminado, pelo uso de:

- uma alta razão de carregamento, e
- um tempo de retardo relativamente longo entre furos dependentes.

Aumentos no tamanho médio do desmonte podem ser melhor obtidos (com risco pequeno de problemas na escavação) pelo aumento da extensão média dos desmontes. Se forem feitos esforços para aumentar a extensão média dos desmontes, o número de linhas de furos deve ser aumentado gradualmente. Vários desmontes com n linhas devem ser submetidos a estudos de custo-benefício antes da tentativa de um desmonte de $n + 1$ linhas. Vários desmontes com $n + 1$ linhas devem ser submetidos a estudos de custo-benefício antes da tentativa em se conduzir um desmonte com $n + 2$ linhas.

No desenvolvimento de planos de fogo com números maiores de linhas, os operadores devem ser alertados de que as pilhas de fragmentos na direção da parte traseira de um desmonte extenso se apresentam mais soltas para:

- afastamentos menores;
- furos inclinados (com a vertical);
- colunas de tamponamento que não permitam o escape do gás prematuramente para a atmosfera;

- valores elevados de subfuração efetiva, e
- tempos de retardo relativamente grandes entre os furos dependentes.

Com desmortes maiores, os distúrbios ambientais são menores e, quando as cargas são iniciadas com espoletas não elétricas, o tamanho do distúrbio pode ser até mesmo inferior àquele de um desmorte pequeno com uso de cordel detonante.

O tamanho do desmorte deve ser tal que as cargas de explosivos não “repousem” nos furos por um período de tempo excessivo. O tamanho de um bloco de desmorte também não deve ser aumentado pela união de sub-blocos simultâneos para formar um corpo excessivamente complexo. Desmortes com formas complexas provocam erros, especialmente no momento da colocação de retardos.

3.2.9. Seqüência de iniciação e distribuição dos retardos

O resultado de qualquer desmorte de produção com diversos furos depende muito das interações entre os furos. A seqüência na qual os furos são iniciados e os intervalos de tempo entre as detonações sucessivas têm uma maior influência na performance total do desmorte. Um plano de fogo insatisfatório (até o ponto do esquema de iniciação) não pode ser corrigido por meio de um bom esquema de iniciação. A performance dos desmortes somente pode ser otimizada quando as cargas são detonadas em uma seqüência controlada, em intervalos de tempo adequadamente discretizados, porém espaçados em intervalos de tempo próximos. O resultado de um desmorte com vários furos na seqüência correta jamais poderá ser igual ao de uma detonação, individual ou aleatória, do mesmo número de furos.

A distribuição ótima de retardos para um desmorte depende de muitos fatores, entre os quais:

- propriedades do maciço rochoso (resistência, módulo de Young, densidade, porosidade, estrutura etc);
- geometria do desmorte (afastamento, espaçamento, altura da bancada, disponibilidade de faces livres etc.);
- diâmetro, inclinação e comprimento do furo;
- tipo e comprimento do tamponamento;
- características do explosivo, grau de acoplamento, “decking” etc;
- sistema de iniciação (retardos superficiais ou no furo, tipo de linhas descendentes no furo etc.);
- tipo e localização da escorva (iniciação);
- restrições ambientais (nível e freqüência da vibração de terreno e da sobrepressão atmosférica), e
- resultados desejados (fragmentação, deslocamento da pilha de fragmentos e o seu perfil etc.).

Não é possível determinar a distribuição ótima de retardos em princípio, mas monitoramentos, análises e interpretações dos desmontes têm levado a um melhor entendimento dos mecanismos e importância da interação entre os furos.

3.2.9.1. Retardo entre furos ("Inter-Hole Delay")

O tempo de retardo entre furos adjacentes em uma linha perfurada é usualmente referido como retardo "entre-furos". Detonar uma única linha de furos com o retardo entre-furos otimizado resulta:

- num deslocamento para frente um pouco menor do que aquele para um desmonte instantâneo em uma única linha, embora o deslocamento e o perfil da pilha de fragmentos possam ser alterados por uma mudança neste retardo;
- na ultra-quebra ou *overbreak* é similar àquela produzida por um desmonte com um furo por vez, e um perfil da parede lisa pode ser obtido pela manipulação do retardo entre-furos;
- em níveis de vibração do terreno e de sobrepressão atmosférica podem ser mantidos próximo ou iguais ao do nível de desmonte com furo-único. Se necessário, a energia sísmica pode ser canalizada para uma banda de frequência mais apropriada.

Na prática, é provável que exista alguma interação entre fragmentação, deslocamento e níveis de vibração. O equilíbrio apropriado para cada situação somente pode ser alcançado pelo uso de retardo entre-furos otimizado, que somente será obtido após várias experimentações.

Para uma rocha frágil, elástica e homogênea, um pequeno retardo entre-furos é normalmente apropriado, enquanto que uma rocha porosa, plástica e muito fissurada requer mais tempo entre as detonações de furos adjacentes, tendendo a maximizar o deslocamento frontal às custas da fragmentação e de níveis de vibração. Retardos longos tendem a fazer com que cada furo trabalhe independentemente, reduzindo a interação positiva.

3.2.9.2. Retardo entre-linhas

O tempo de retardo entre a iniciação de furos dependentes ou de linhas efetivas sucessivas de furos é normalmente chamado de retardo entre-linhas. O tempo de retardo entre-linhas tem uma grande influência sobre os resultados de qualquer desmonte com múltiplas linhas. Em muitas situações, o retardo entre-linhas é tão importante quanto o retardo entre-furos no controle da performance global do desmonte.

Em um plano de fogo adequado de múltiplas linhas, as cargas adjacentes às faces livres têm um afastamento controlável de rocha para quebrá-la e deslocá-la. Entretanto, todos os furos nas linhas subsequentes dependem das cargas detonadas anteriormente para criar novas faces livres durante o desmonte. Cargas com um excessivo afastamento lateral tendem para crateras na direção do colar, suas únicas alternativas de faces livres. Furos que estão sujeitos a este tipo de confinamento lateral não têm performance eficiente, e o resultado global do desmonte ficará abaixo do ótimo. A Figura 15 apresenta vários esquemas com retardos entre linhas.

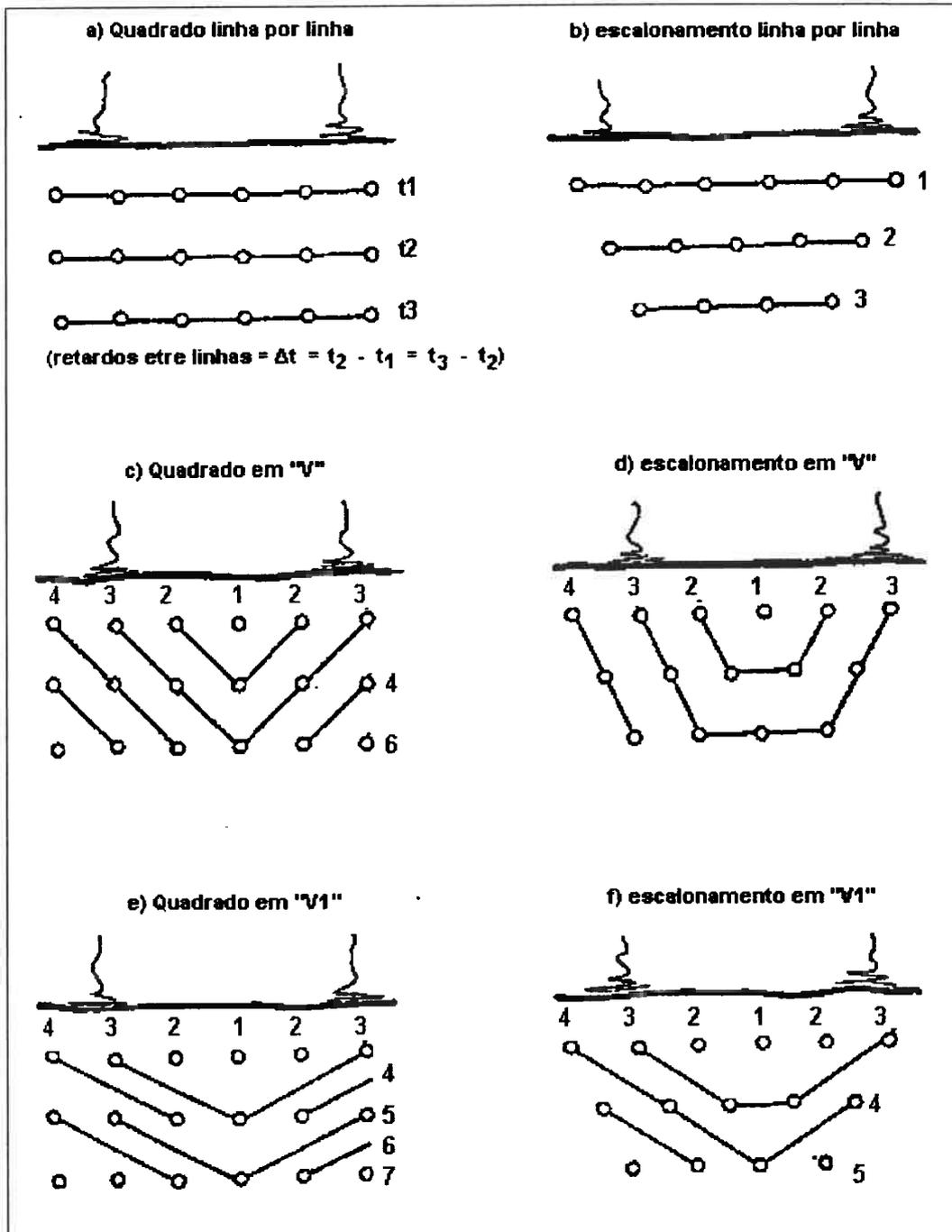


FIGURA 15. Modelos de seqüências de iniciação (GOLDER ASSOCIATES, sd).

O retardo entre-linhas ótimo influencia a performance das seguintes operações:

- a escavabilidade é melhorada, particularmente na região do pé dos furos, na direção oposta à face livre. O retardo entre-linhas ótimo assegura que cada furo tenha uma face livre para quebrar. Isto ocorre porque o furo detonado previamente quebra a rocha envolvente e o libera antes que o furo dependente detone. Este alívio progressivo da rocha envolvente influi na

- quantidade de rocha produzida acima do tamanho especificado, embora a fragmentação seja influenciada freqüentemente mais pelo retardo entre-furos do que pelo retardo entre-linhas;
- o movimento lateral e o perfil da pilha de material desmontado podem ser otimizados pela manipulação de retardos entre-linhas e entre-furos para controlar a extensão e a direção do deslocamento da rocha;
 - a ultra-quebra na parte de trás e nas laterais do desmonte é minimizado porque o movimento para a frente é criado contanto com um retardo adequado entre a detonação dos furos dependentes;
 - as vibrações de terreno e sobrepressão atmosférica são controlados e podem freqüentemente ser mantidos a níveis similares àqueles produzidos por uma detonação de um furo único. Isto é um resultado direto do alívio progressivo da rocha envolvente, que promove um movimento lateral e minimiza a elevação, formação de crateras e ejeção do tampão. Detonações subsequentes provavelmente são também menos barulhentas porque a ultra-quebra reduzida significa que a rocha envolvente nas linhas de frente contém os fraturamentos menores decorrentes da detonação anterior. Retardos entre-linhas e entre-furos adaptados corretamente podem também permitir que a energia sísmica possa ser canalizada para bandas de freqüência apropriadas.

O retardo entre-linhas ótimo para uma aplicação específica não pode ser calculado através de princípios básicos. Em qualquer situação, alguma experimentação é recomendada. No entanto, os resultados de uma ampla gama de condições indicam que o retardo entre-linhas ótimo para um desmonte convencional está normalmente na faixa de 10 a 20 ms/m de afastamento efetivo (medidas entre os furos dependentes ou linhas sucessivas). O retardo entre-linhas ótimo para cada situação é fortemente influenciado pelas propriedades da rocha, pela geometria do desmonte e pelo resultado desejado, mas uma sugestão de 15 ms/m é normalmente um bom ponto de partida.

Para uma rocha frágil, elástica e bastante fissurada, um retardo entre-linhas relativamente curto é normalmente apropriado. Uma rocha porosa, densa, plástica e homogênea exige mais tempo para a movimentação da rocha envolvente. Retardos longos facilitam o deslocamento para a frente e liberação do material fragmentado. Retardos curtos tendem a restringir o movimento lateral (com a possibilidade de furos "roubados"), a reduzir a escavabilidade e a causar vibrações de terreno mais elevadas.

3.2.9.3. Interação do tempo de retardo

A performance de um desmonte convencional pode ser bastante influenciada pela alteração no tempo de retardo para se alterar o grau de interação entre os furos adjacentes. Embora os valores absolutos dos retardos entre-linhas e entre-furos sejam importantes, a relação entre estes tempos tem também um grande impacto sobre o resultado final. Isto pode ser explicado pelos seguintes conceitos:

- o retardo entre-furos controla a interação entre os furos adjacentes e determina se o furo age independentemente ou em conjunto;
- o retardo entre-linhas controla as interações entre os furos dependentes, afetando a criação de novas faces livres efetivas para os furos a serem detonados;
- a relação entre o retardo entre-linhas e o retardo entre-furos controla a geometria e a orientação de novas faces criadas com o avanço da detonação. Para um furo detonado posteriormente, a localização, a forma e extensão de qualquer face livre efetiva dependem da relação de tempos de espera ou retardo. Isto influencia a direção e a extensão do deslocamento da rocha envolvente ou influenciada pelo furo e, por sua vez, a forma final e a posição da pilha de material desmontado. Isto é referido às vezes como sendo a *direção de movimento aparente* de um furo ou de todo o desmonte.

A manipulação dos tempos de retardo para controlar a performance da detonação é melhor ilustrada pela consideração de várias alternativas para a iniciação de uma mesma detonação. Quando os furos são iniciados linha-a-linha, o deslocamento para a frente é intensificado e a direção geral do movimento é perpendicular às linhas (Figura 15a e 15b). Se o mesmo desmonte é iniciado em um “*modelo VI*”, a direção do movimento será perpendicular às linhas efetivas ou em direção ao canto livre.

As seqüências mostradas na Figura 15 podem ser usadas para desmontes em uma grande gama de aplicações. Os melhores resultados ocorrem quando uma face livre e/ou extremidade livre está disponível. Os tempos de retardo podem ser alterados para se adequar a diferentes condições, combinados com retardos no furo, se necessários.

3.3. O PROCESSO DE QUEBRA DE UMA DETONAÇÃO ATRAVÉS DA INTERAÇÃO EXPLOSIVO/ROCHA

3.3.1. Introdução e conceitos

Em essência, uma detonação pode ser considerada como uma liberação de uma enorme quantidade de energia num intervalo de tempo muito curto. Esta liberação envolve ondas de choque e gases a altíssimas pressões.

A interação entre o explosivo e o maciço rochoso circundante durante e imediatamente após a detonação é função das propriedades de detonação do explosivo e das propriedades físicas e dinâmicas do maciço rochoso adjacente. As teorias de fragmentação da rocha e os mecanismos de formação da pilha de fragmentos (“muckpile”) estão baseadas na interação do explosivo com a rocha circundante. A compreensão do mecanismo de fragmentação da rocha por explosivos possibilita que o responsável pelo desmonte consiga uma fragmentação econômica do maciço rochoso, ao mesmo tempo em que também minimiza os efeitos adversos da detonação fora do perímetro da escavação.

Os mecanismos pelos quais a rocha é fraturada pelo explosivo são fundamentais para o projeto do plano de fogo. Eles também se relacionam com os danos que podem atingir a rocha e estruturas circundantes, e ainda com as reações das pessoas que vivem próximas à detonação. Portanto, para se determinar corretamente os tipos e quantidade de explosivos, deve-se ter um conhecimento bastante aprofundado sobre a dinâmica da detonação.

3.3.2. Teorias de fragmentação da rocha

Existem muitas teorias e modelos que procuram descrever o processo que ocorre durante e depois da detonação de uma carga explosiva em um maciço rochoso. Em termos gerais, este processo envolve a rápida liberação de energia pelo explosivo, a aplicação desta energia na rocha e a resposta subsequente da rocha pela aplicação da energia. Outros fatores como quantidade e velocidade de liberação de energia pelo explosivo, plano de fogo e propriedades do maciço rochoso tendem a complicar o processo.

Os mecanismos de fragmentação da rocha que foram identificados por diversos autores, entre eles JIMENO et. al. (1995) e por KONYA (1995) são:

- pulverização e quebra ("crushing")
- fraturamento radial
- fraturamento por liberação de pressão
- fraturamento por reflexão ou lasqueamento ("spalling")
- extensão das fissuras geradas pelo gás e/ou das fissuras pré-existentes
- ruptura por flexão
- fraturamento por cisalhamento ao longo das fissuras geradas pela onda de choque e das fissuras pré-existentes
- colisões em movimento rápido ("in-flight collisions")

Estes mecanismos causam quantidades variáveis de fraturas dependendo das características do explosivo, propriedades da rocha e geometria do maciço rochoso e da carga explosiva. Eles podem ser separados em duas categorias: aqueles causados pela componente de choque da energia do explosivo e aqueles resultantes da energia do gás (GOLDER ASSOCIATES, sd).

3.3.2.1. Mecanismos de fragmentação por energia de choque

Quando um explosivo é detonado, ele é convertido dentro de poucos milissegundos em um gás com alta temperatura. Quando confinado em um furo de mina, esta reação muito rápida provoca pressões muito elevadas sobre suas paredes, normalmente ultrapassando 18.000 atm. Esta energia é transmitida para o maciço rochoso vizinho na forma de uma onda de compressão, ou onda de choque, que se propaga a uma velocidade de 2.000 a 6.000 metros por segundo.

Os mecanismos de fragmentação da rocha que podem ser atribuídos ao componente de choque da energia liberada por um explosivo são: pulverização e quebra, movimento radial

relativo, liberação de pressão e lasqueamento. A pulverização e a quebra ocorrem ao redor da parede do furo quando a pressão exercida pela frente da onda de detonação excede a resistência à compressão dinâmica da rocha (GOLDER ASSOCIATES, 1995). O pulso de deformação de partida, gerado pela frente de detonação à alta pressão se dispersa e perde energia rapidamente. A pulverização cessa quando o nível de tensão no pulso cai abaixo do limite elástico da rocha. Isto ocorre normalmente muito próximo à parede do furo.

A rocha que forma a parede do furo além da zona de pulverização e de quebra está sujeita a uma compressão muito repentina devido ao pulso de tensão dispersante, como está ilustrado na Figura 16. Esta compressão (no caso, o movimento radial relativo) resulta em tensões tangenciais que podem causar fissuras que se desenvolvem radialmente a partir do furo (Figura 17). As fissuras radiais se desenvolvem inicialmente em todas as direções a partir da parede do furo de mina e não são influenciados pela face livre local.

O mecanismo de fraturamento causado pela liberação de pressão ocorre imediatamente após a passagem do pulso de tensão ou compressão, resultando em decréscimo local na densidade com esforços de tensão subseqüentes. Estes esforços de tensão produzem fraturas perpendiculares à direção trajeto da onda de tensão (GOLDER ASSOCIATES, sd).

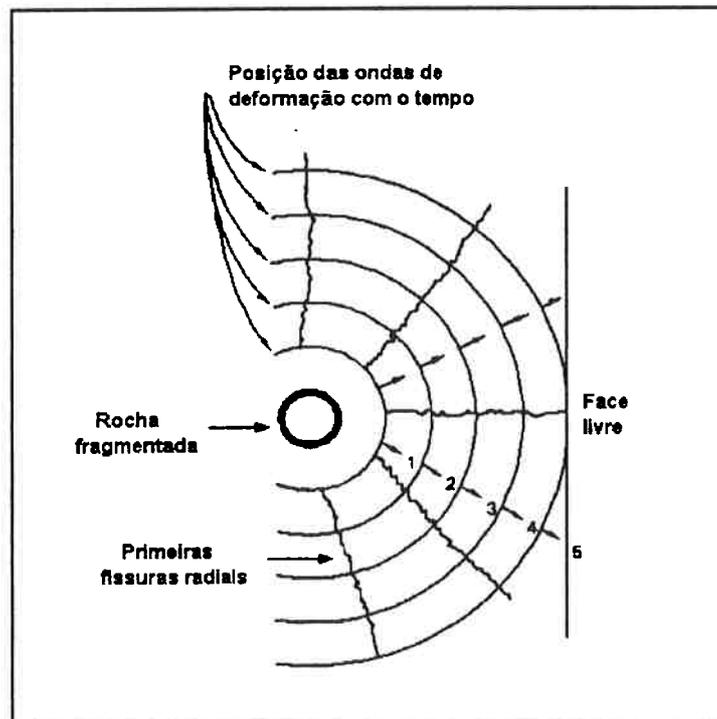


FIGURA 16. Primeiros estágios da interação explosivo/rocha mostrando a onda de tensão expansiva (GOLDER ASSOCIATES, sd).

O lasqueamento ocorre quando uma frente da onda de compressão ou de tração é refletida pela superfície livre. Neste ponto duas ondas são geradas: uma onda de tração e uma onda de cisalhamento. A onda de tração pode causar fissuramento e fazer a rocha lasquear na região da superfície livre. Ambas as ondas, a de tração e de cisalhamento, podem aumentar as fissuras pré-existentes e também as novas fissuras (isto é, formadas pelo pulso inicial de tração).

3.3.2.2. Mecanismos de fragmentação pela energia de deslocamento ou do gás

Os mecanismos de fraturamento descritos acima são causados pelo pulso inicial de tração ou de compressão decorrente da carga explosiva detonante. Uma zona de gases a uma pressão e temperatura muito altas ocupa o furo de mina atrás da frente de detonação. Estes gases penetram a zona fraturada ao redor do furo e fluem para as fissuras radiais e pré-existentes. A pressão do gás atua como uma cunha para abrir as fissuras, causando o seu "alargamento".

A pressão na parede do furo causada pelos gases gerados pelo explosivo e o campo de tensão devido às fissuras pressurizadas desloca o maciço rochoso entre o furo de mina e a face livre. Por causa da geometria da carga explosiva e do maciço rochoso (Figura 15), a rocha se dobra na face causando fraturamento por ruptura flexural ou por flexão (GOLDER ASSOCIATES, sd). Isto tem sido observado em filmes de alta velocidade e ainda em fotografias de desmontes experimentais e de produção. A Figura 18 mostra um exemplo de uma detonação filmada em alta velocidade, enquanto que a Figura 19 mostra uma frente no momento da detonação.

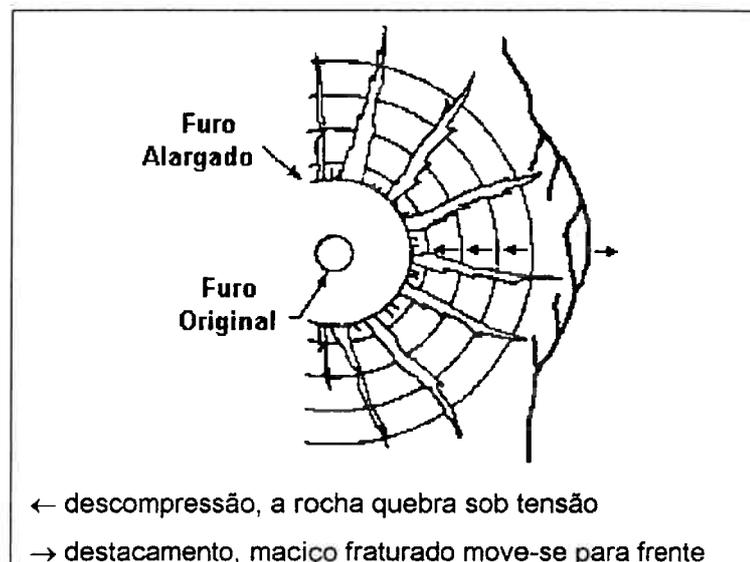


FIGURA 17. Últimos estágios da interação explosivo/rocha mostrando a penetração do gás e o movimento da rocha entre o furo e a face livre (GOLDER ASSOCIATES, sd).



FIGURA 18. Fotografia de uma face livre imediatamente após a detonação de uma carga explosiva cilíndrica longa (GOLDER ASSOCIATES, sd).

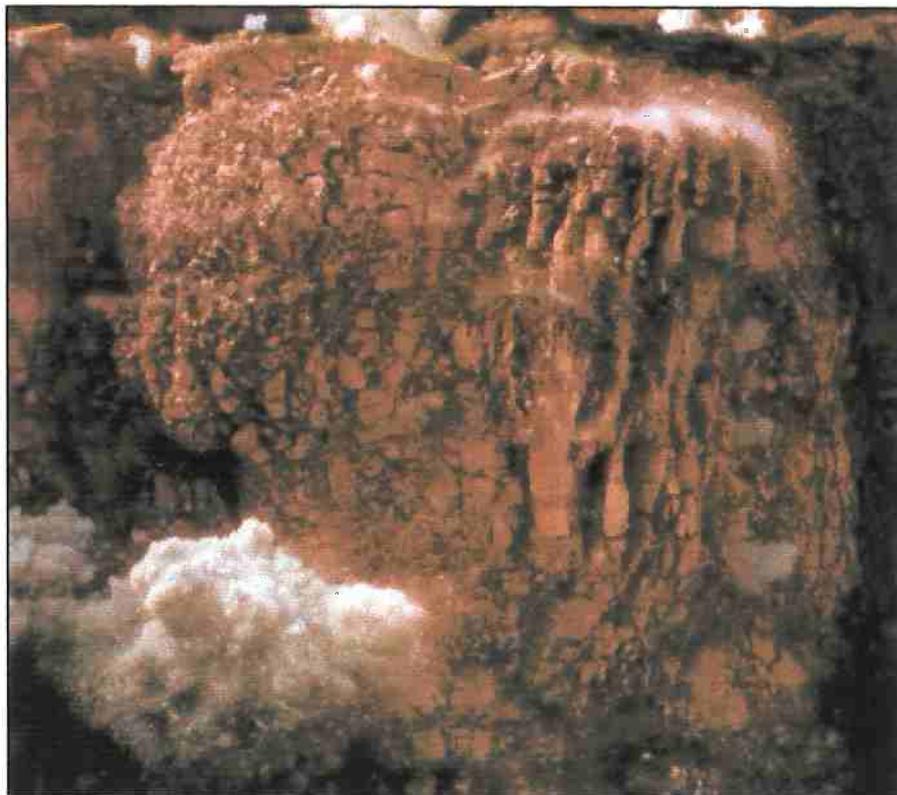


FIGURA 19. Fotografia de uma face após a detonação de cargas explosivas (MENDES, 2002).

O fraturamento por cisalhamento ocorre quando uma rocha adjacente é deslocada em tempos diferentes ou a velocidades diferentes. O deslocamento é causado pelos gases a alta pressão.

Alguns fraturamentos ocorrem quando partículas de rocha que estão em movimento se colidem. A quantidade de fraturamento resultante deste mecanismo depende da geometria das cargas explosivas, da ordem e do tempo relativo de iniciação que são somados às propriedades físicas da rocha.

Os quatro mecanismos prévios de fragmentação da rocha são o resultado de gases a altas temperaturas e pressões que agem sobre o maciço rochoso. Esta energia do gás também desempenha um papel importante no deslocamento da pilha de fragmentos.

3.3.3. Transferência de energia à rocha

Segundo ESTON (1998) a energia produzida pela detonação do explosivo gera uma gama variada de efeitos, e por isso é necessário estimar-se o quanto desta energia é transferido à rocha.

A energia produzida pelo explosivo é função das suas características termodinâmicas e depende da sua composição, dos produtos da reação e do calor de formação das substâncias envolvidas. Esta energia será expressa em unidades de MJ/kg.

A transferência de energia para a rocha pode ser analisada por meio de dois fatores: fator de impedância e fator de acoplamento.

3.3.3.1. Fator de impedância

A transferência da energia entre o explosivo e um dado meio é função das características do explosivo gerador e das características da rocha receptora. Esta dupla dependência pode ser quantificada por meio das respectivas impedâncias acústicas do explosivo e da rocha (Equações 1 e 2). A impedância acústica do explosivo é definida operacionalmente pelo produto:

$$I_{ex} = \rho_{ex} VOD \quad (1)$$

Onde,

I_{ex} = impedância acústica do explosivo, em $\text{kg/m}^2 \text{ s}$

ρ_{ex} = massa específica do explosivo, kg/m^3

VOD = velocidade de detonação, m/s

A impedância acústica da rocha é definida pelo produto

$$I_r = \rho_r C \quad (2)$$

Onde,

I_r = impedância acústica da rocha, em $\text{kg/m}^2 \text{ s}$

ρ_r = massa específica da rocha, kg/m^3

c = velocidade de propagação da onda elástica da rocha, m/s

O fator de impedância η_1 é definido como

$$\eta_1 = \frac{(I_{ex} - I_r)^2}{(I_{ex} + I_r)^2} \quad (3)$$

Observa-se que quanto mais próximos forem as impedâncias do explosivo e da rocha, mais próximo da unidade será o fator de impedância e melhor será a transferência de energia do explosivo para a rocha. Assim a transferência de energia é função das capacidades combinadas do explosivo e da rocha de transmitir e receber energia.

3.3.3.2. Fator de acoplamento

Outro fator importante na transferência de energia é o fator de acoplamento η_2 . Este fator reflete a diminuição da pressão dinâmica no furo em função da razão de acoplamento (R_{ac}). A diminuição da pressão no furo origina uma diminuição da taxa de transferência de energia, e que pode ser expressa pelo fator de acoplamento (η_2) definido a seguir (ESTON, 1998):

$$\eta_2 = \frac{1}{\left[e^{\frac{1}{R_{ac}}} - (e - 1) \right]} \quad (4)$$

Observa-se que quanto mais próxima a razão de acoplamento for de 1, mais próximo de 1 será o fator de transferência de energia por acoplamento. Quando os diâmetros da carga explosiva e furo forem iguais, a razão de acoplamento é unitária e o fator de acoplamento também será unitário.

A prática confirma estes modelos matemáticos, de modo que os melhores resultados de transferência de energia são obtidos quando o explosivo é compactado no furo, fazendo com que a razão de acoplamento seja praticamente unitária.

Portanto, a transferência de energia para a rocha pode ser expressa por:

$$E_{tr} = \eta_1 \eta_2 E_{gex} \quad (5)$$

Onde:

E_{tr} = energia transmitida à rocha, em J

E_{gex} = energia gerada pelo explosivo, em J

3.3.4. Mecanismos de deslocamento das pilhas de fragmentos

O movimento do material em um desmonte é primeiramente o resultado de gases a alta pressão produzidos pela detonação de cargas explosivas. Estes gases a alta pressão fluem para as fissuras que circundam o furo de mina formando uma região de cargas hidrostáticas. A forma desta região depende da geometria da carga explosiva e do furo de mina, visto que em muitas das aplicações em minerações a carga explosiva apresenta a forma de um longo cilindro criando uma região tensionada hidrostaticamente cilíndrica. Nesta região estes gases a alta pressão exercem uma força em todas as direções com o movimento do material ocorrendo na direção da menor resistência.

A quantidade de deslocamento do material em um desmonte é função das propriedades físicas do material, da orientação do furo de mina, da distância de afastamento, do espaçamento entre furos, da seqüência e tempo relativo de iniciação das cargas, da quantidade e distribuição do explosivo e das propriedades do gás gerado pela detonação do explosivo. Todos estes fatores influenciam o intervalo de tempo em que os gases a alta pressão permanecem dentro do maciço rochoso, o que por sua vez determina a quantidade de trabalho realizado por eles (GOLDER ASSOCIATES, 1995). Quando estes gases saem para a atmosfera, então o seu trabalho é completado.

3.3.5. Influência do plano de fogo na interação explosivo/rocha

A fragmentação atingida pelo processo é altamente dependente do grau de confinamento e da ligação das cargas dentro do furo de mina, da quantidade de material a ser desmontado e da seqüência de detonação. Se o confinamento das cargas através de um tampão for inadequado, parte da energia será perdida. Um confinamento inadequado da carga explosiva resulta em uma transmissão insatisfatória da onda de choque para o maciço rochoso. Excessivos afastamentos resultam em pouca movimentação da rocha, ao passo que um afastamento inadequado (pequeno) resulta em um desperdício de energia do explosivo e pode lançar fragmentos além da distância desejada (ultra-lançamento). O retardamento efetivo dos furos individuais (isto é, a seqüência correta de espera entre os furos) assegura um máximo desempenho e permite ao material a ser desmontado (e efetivamente reduzido) a utilização das superfícies livres, proporcionando liberdade para a rocha se mover em direção à face livre, e reduzindo a extensão dos danos à rocha circundante.

3.4. PROJETO DE DESMONTE DE ROCHAS

Um projeto de desmonte de rochas envolve a definição econômica de cargas explosivas, sua distribuição geométrica, o cronograma temporal de deflagração, a definição de acessórios e tipo de utilização de cada um. Um projeto tecnicamente correto é aquele que maximiza a utilização da energia de detonação, canalizando-a para a fragmentação adequada da rocha (incluída aqui a localização da pilha desmontada). Todavia sempre uma parcela da energia explosiva produz efeitos indesejáveis como vibrações de terreno, sobrepressão atmosférica (tanto na faixa audível como na não audível), ultra-lançamentos e emissão de material particulado e gases.

A céu aberto os maiores problemas ambientais estão associados à segurança estrutural de edificações vizinhas, que podem ser casas, indústrias, barragens, etc. No aspecto de incômodo à população os principais problemas estão associados aos ruídos, vibração e poeiras.

Planos de fogo ótimos são um pré-requisito para se minimizar os custos de uma mineração e eles ajudam na obtenção da fragmentação desejada, na liberação do material desmontado em pilhas, no perfil da pilha de fragmentos, nas condições do pé da bancada e no controle da inclinação. Estes planos devem ajudar:

- (a) a minimizar a probabilidade de ultra-lançamentos, e
- (b) a controlar a vibração do terreno e do ar (ruído e sobrepressão).

A economia básica da escavação de rocha com o uso de explosivos é ilustrada na Figura 20. A produção de uma boa fragmentação e uma pilha de material desmontado que não esteja espalhada ao redor da área de escavação facilita as operações de carregamento e transporte. Esta condição refere-se ao ponto mínimo do custo total apresentado no gráfico. Entretanto, para conclusão das faces finais, os custos de perfuração e de desmonte aumentarão pois serão necessários furos mais próximos e cuidadosamente carregados. Para conseguir resultados ótimos em ambas condições, é necessário um completo conhecimento dos seguintes parâmetros:

- altura da bancada
- natureza da face livre
- propriedades da rocha a ser desmontada
- tipo de explosivo
- diâmetro do furo
- inclinação do furo
- carga efetiva
- espaçamento efetivo
- subfuração efetiva
- afastamento efetivo
- tamponamento
- seqüência de iniciação das cargas explosivas
- retardo entre furos sucessivos /ou linhas de furos

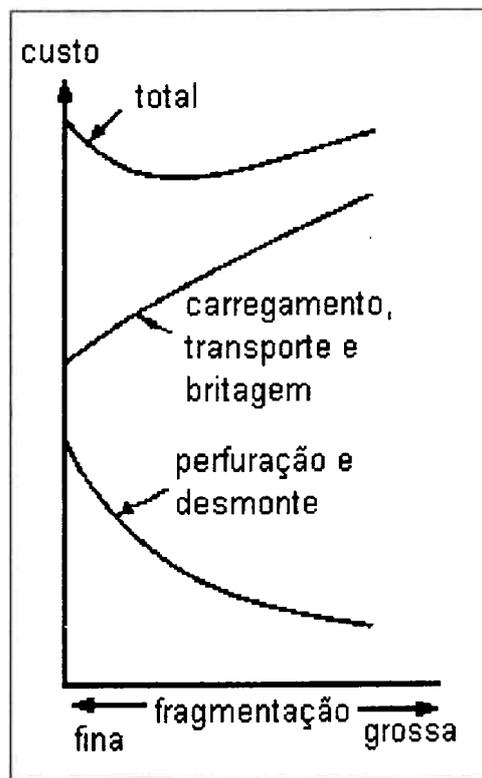


FIGURA 20. Efeito da fragmentação no custo de perfuração, carregamento e transporte (Hoek & Bray apud GOLDER ASSOCIATES, sd).

Cada um dos fatores mencionados deve ser considerado em relação à sua influência sobre a eficiência do desmonte e sobre a quantidade de danos impostos na rocha remanescente e também ao ambiente do local de detonação.

CAPÍTULO 4 - VIBRAÇÃO

4.1. CONCEITO DE VIBRAÇÃO

4.1.1. Vibração

A vibração pode ser descrita matematicamente como a maneira com que um corpo ou partícula se move com o tempo. O movimento em função do tempo pode ser representado por deslocamento de partícula, velocidade de partícula ou aceleração de partícula. Qual a melhor função a ser aplicada vai depender não apenas das necessidades do problema, mas também pelo tipo de equipamento para se medir a vibração. As conversões entre deslocamento, velocidade e aceleração podem ser feitas por integração ou diferenciação em função do tempo, embora diferenciar duas vezes um deslocamento impreciso seja muito difícil e arriscado.

A forma mais simples de vibração é o movimento harmônico simples, comumente chamado de vibração senoidal, que é do tipo:

$$X(t) = A \text{sen}(\omega t + \phi) \quad (6)$$

Onde A é a amplitude de deslocamento, ω é frequência angular, t é o tempo e ϕ é o ângulo de fase.

Para as várias aplicações práticas, onde a vibração pode ser aproximada por uma onda senoidal simples, o ângulo de fase tem pouco significado. A vibração pode então ser caracterizada por dois parâmetros: a amplitude e a frequência. Lidar com a interferência de onda, no entanto, faz com que os ângulos de fase sejam fundamentais, e para muitas outras aplicações é importante saber as velocidades de vibração para as três direções principais.

Há uma grande variedade de termos usados para descrever a intensidade da vibração e sua variação no tempo. São utilizados termos diferentes para tipos de vibração diferentes dependendo da sua natureza (por exemplo, vibrações contínuas ou transientes). Em muitos casos, uma descrição satisfatória de uma vibração em particular pode ser dada por diversos conjuntos de parâmetros. Uma parte importante no tratamento de muitos problemas de vibrações é achar qual o conjunto de parâmetros mais adequado para a solução deste problema. É basicamente uma questão de se achar a função senoidal que é equivalente à vibração real. O efeito de uma vibração senoidal sobre uma estrutura ou ser humano pode ser determinado por cálculo e por experimentos. A caracterização pode ser feita em domínio de tempo ou em domínio de frequência (espectro de frequências), sendo este último o mais comum e que será abordado nos Capítulos 4,5 e 6.

A passagem da onda através de um meio faz com que partículas se movimentem, e este movimento é o que chamamos de vibração. Conforme descrito acima, a simplificação para um estudo de vibração é considerá-lo como ondas harmônicas e, portanto, os parâmetros básicos necessários para uma análise são:

- *Amplitude (A)*. O máximo deslocamento de uma partícula em relação ao seu ponto de repouso;
- *Velocidade de partícula (v)*. A velocidade na qual a partícula se movimenta;
- *Aceleração (a)*. A velocidade por unidade de tempo;
- *Frequência (f)*. O número completo de oscilações ou ciclos por segundo.

4.1.2. Vibração do Terreno

Quando uma carga explosiva é detonada dentro de um furo, além da fragmentação da rocha, também se gera vibração do terreno e vibração do ar. A energia usada na vibração do terreno e do ar é uma energia desperdiçada. A quantidade desta energia desperdiçada é variável e depende de uma série de fatores, assim como varia a interpretação dos autores. ESTON (1998) apresenta um esquema com a distribuição da energia de detonação que pode ser observada na Figura 21.

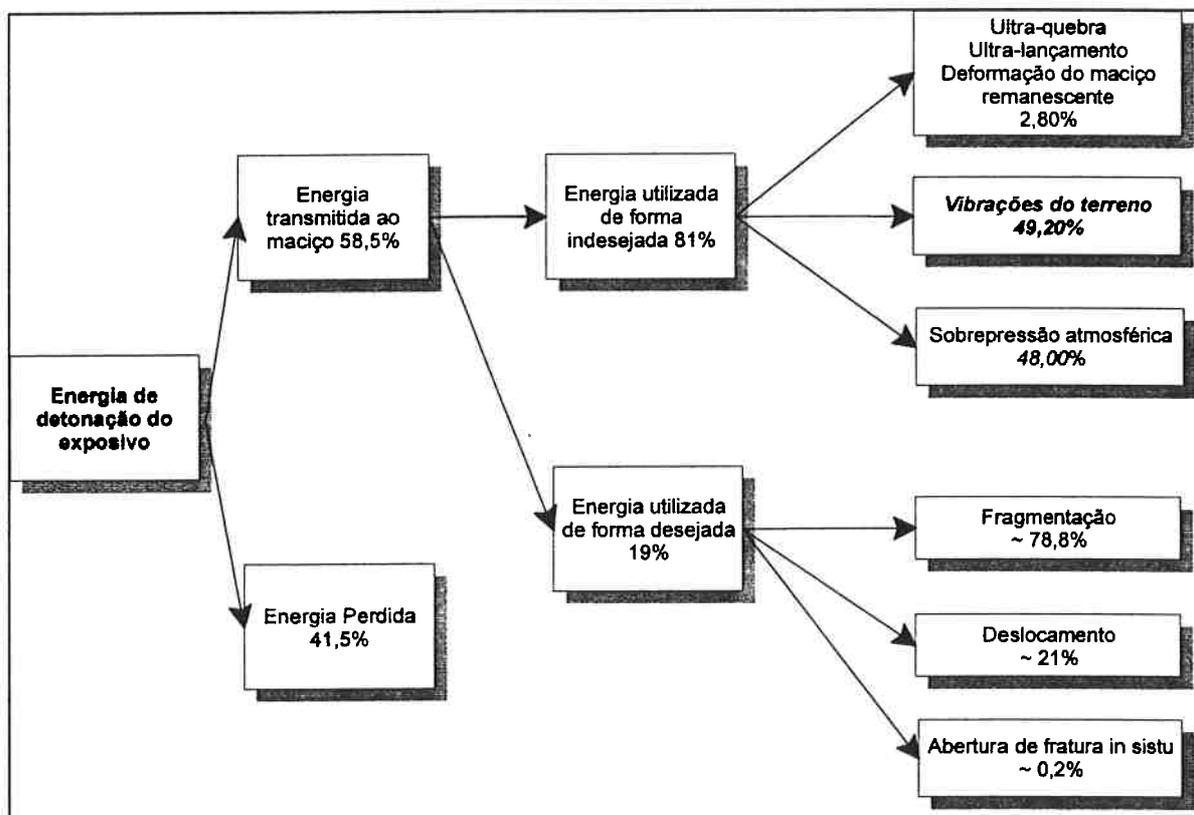


FIGURA 21. Diagrama esquemático de distribuição da energia de detonação (adaptado de ESTON, 1999).

Berta (BACCI, 2000), por sua vez, apresenta um outro modelo com a distribuição da energia transmitida à rocha para as várias etapas de uma detonação de rocha (Figura 22).

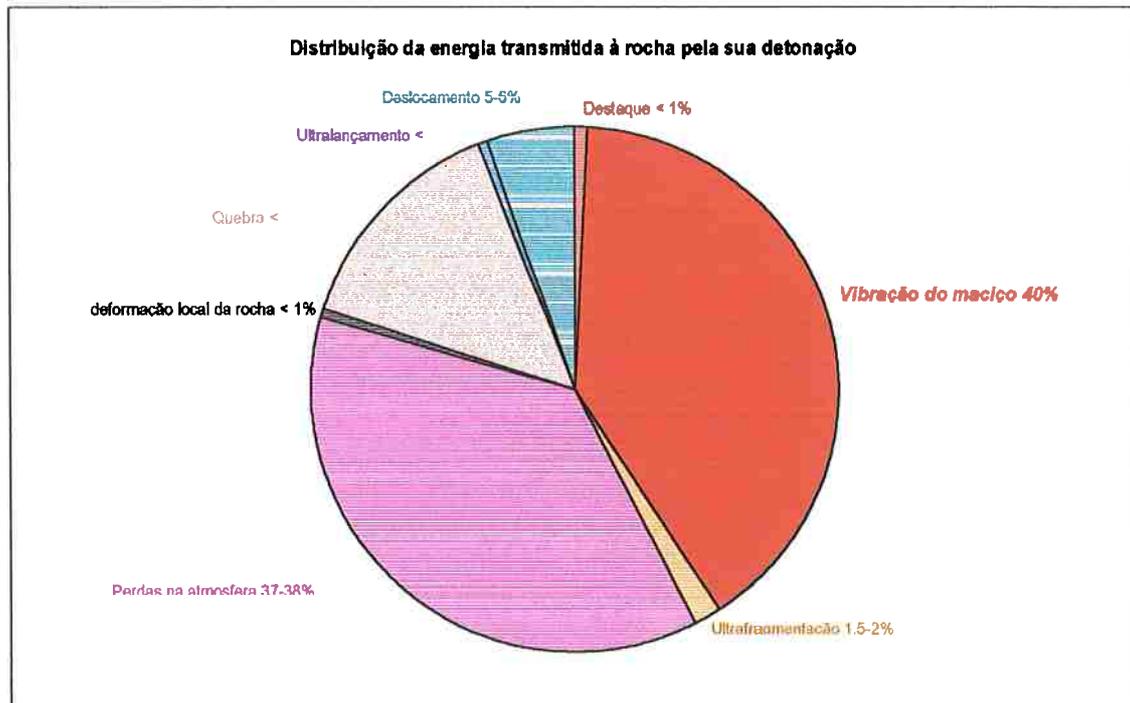


FIGURA 22. Distribuição da energia transmitida à rocha pela sua detonação (BACCI, 2000).

As vibrações do terreno são uma parte integral de um processo de desmonte de rochas. Para que uma rocha se quebre, uma energia suficiente deve ser acumulada para exceder a resistência à tração da rocha. Com o prosseguimento da quebra da rocha, a energia se dissipa e eventualmente atinge um nível menor do que a da resistência da rocha e, então, o fraturamento cessa. Entretanto, ainda há energia acumulada, que passa através da rocha e que a deforma, mas não a quebra, chamada de energia elástica, e é ela quem causa a vibração do terreno. Esta transmissão de energia é chamada de onda sísmica ou onda elástica, pois ela depende de uma propriedade da rocha chamada de elasticidade, que é a capacidade de um material em retornar à sua forma e tamanho originais após ter sofrido uma deformação.

O processo total ocorre em milissegundos e é completado muito rapidamente, com as ondas sísmicas viajando da área de detonação para a região circundante em frações de segundo. Ele pode ser descrito da seguinte forma: a aceleração repentina da rocha em função da pressão de detonação dos gases age sobre as paredes do furo e produz esforços dinâmicos no maciço ao redor. Assim a energia explosiva é convertida pela elasticidade da rocha em energia potencial na rocha deformada, e esta, por sua vez, é convertida pela elasticidade da rocha em energia cinética na forma de vibração do terreno e sobrepressão atmosférica. Com isto, produz-se uma onda no terreno, muito parecida com o movimento de uma gelatina numa tigela quando movimentada por uma colher. As ondas de movimento se espalham concêntricamente do local da detonação, particularmente ao longo da superfície do terreno para depois ir se atenuando, uma vez que a energia é espalhada sobre grandes massas de materiais rochosos à medida que se afasta de sua origem.

Embora ela se atenua com a distância, a movimentação causada por uma detonação de grande porte pode ser sentida de muito longe, onde pessoas e animais podem reagir com reflexos de alerta e medo.

Em regiões próximas à área de detonação, a vibração do terreno pode causar danos às edificações e outros tipos de estruturas em função dos esforços dinâmicos superarem a resistência dos materiais. Um edifício, sendo muito menos rígido do que um maciço rochoso, pode sofrer danos mesmo a uma longa distância.

Os efeitos da vibração do terreno decorrentes de um desmonte de rocha sobre as estruturas e seres humanos devem ser previstos, monitorados e controlados pelo engenheiro de minas e encarados como parte fundamental do trabalho de planejamento e otimização da lavra, pois qualquer problema decorrente de vibrações pode acarretar danos econômicos que podem inviabilizar o empreendimento mineiro. Porém, deve existir um ponto de equilíbrio entre ser extremamente conservador com relação à vibração, onde os custos de desmonte podem se tornar tão caros que resultaria no cancelamento da atividade, e ser muito liberal, o que pode resultar em danos às estruturas próximas e ser objeto de reclamações e litígios.

4.2. PARÂMETROS QUE INFLUENCIAM A VIBRAÇÃO

Os efeitos da propagação e da geologia mudam as características de amplitude e frequência das vibrações do terreno à medida que elas passam da área de desmonte para o local de medição. A influência mais importante é a dissipação ou “esparramamento geométrico”, onde uma quantidade finita de energia da vibração preenche uma quantidade cada vez maior do volume do maciço à medida que ela se desloca em direção aos pontos cada vez mais distantes da detonação. Como consequência, há um decaimento exponencial geral na amplitude da vibração com o aumento da distância da fonte (bastante semelhante à lei do inverso ao quadrado da distância).

Outros efeitos da propagação são as perdas de energia por meio de absorção e dispersão (onde diferentes componentes das frequências viajam em velocidade diferentes de propagação), e a formação de ondas de superfície. Em geral, os parâmetros com maior influência sobre as amplitudes de vibrações são a distância e a carga por espera. As frequências de vibração do terreno são também influenciadas pela distância e pela geologia.

Os parâmetros que afetam as características das vibrações são praticamente os mesmos que influem nos resultados de uma detonação. Eles podem ser classificados em dois grupos: controláveis e não controláveis (quanto ao uso de explosivos).

A geologia local circundante e as características geomecânicas têm grande influência sobre as vibrações. Em rochas maciças e homogêneas a vibração se propaga em todas as direções, mas em estruturas de geologia complexas, a onda de propagação pode variar com a direção e, conseqüentemente, resultar em uma atenuação diferente com diferentes equações de propagação.

Quando o substrato da rocha é recoberto por uma camada de solo, isto normalmente afeta a intensidade e a frequência das vibrações. Os solos normalmente têm módulos de elasticidade menores do que as rochas e por isso a velocidade de propagação da onda tende a ser menor neste tipo de material. A frequência da vibração também diminui, mas o deslocamento aumenta significativamente à medida que a camada de solo se torna mais espessa (JIMENO et al, 1995).

A magnitude das vibrações decresce rapidamente com o aumento da distância se o capeamento está presente, pois uma grande parte da energia será usada para superar a fricção entre as partículas e também para deslocá-las.

Em locais próximos à detonação, as características das vibrações são afetadas por fatores relacionados ao plano de fogo e sua geometria. Já em distâncias maiores, estes fatores não são tão determinantes, neste caso, o meio de transmissão e o capeamento são os fatores dominantes para a característica da onda. Os materiais da superfície modificam o comportamento da onda fazendo com que esta se prolongue e tenha frequências mais baixas, o que aumenta a resposta das estruturas e a possibilidade de danos.

4.2.1. Carga máxima por espera

A magnitude da vibração do terreno e sobrepressão atmosférica em um determinado ponto varia com a carga de explosivo que está sendo detonada e com a distância em relação ao local de detonação. Em detonações nas quais se usam vários retardos para provocar pequenas detonações, a carga máxima por retardo (ou espera) detonada tem muito mais importância na intensidade da vibração do que a carga total, desde que os intervalos entre estas detonações sejam suficientes a ponto de evitar interferências construtivas (sobreposições) entre as ondas geradas.

4.2.2. Distância ao local da detonação

A distância ao local da detonação, assim com a carga máxima por espera, tem grande influência na magnitude das vibrações, pois ela obedece à uma lei do tipo

$$V \propto 1/D^b \quad (7)$$

onde V é velocidade de vibração de partícula, D a distância e o valor de b , de acordo com JIMENO et al (1995), citando o USBM, é de aproximadamente 1,6.

Um outro efeito da distância é a atenuação das componentes de alta frequência, uma vez que a terra age como um filtro onde somente as frequências mais baixas conseguem passar. Além disso, em longas distâncias as vibrações do terreno terão mais energia nas faixas de baixas frequências.

4.2.3. Razão de carregamento

Outro aspecto interessante e às vezes confuso se refere à razão de carregamento, uma vez que alguns engenheiros, quando confrontados com problemas de vibração propõem a redução na razão de carregamento. JIMENO et al. (1995) citam um exemplo onde se reduziu a razão de

carregamento em 20 % com relação àquela considerada ótima e a vibração resultante acabou sendo de 2 a 3 vezes maior, como conseqüência do maior confinamento dos furos e uma distribuição espacial mais pobre dos explosivos, o que resultou na falta de deslocamento e expansão da energia.

4.2.4. Tipos de explosivos

Há uma correspondência entre as velocidades de partícula e as deformações induzidas nas rochas. Esta constante de proporcionalidade é chamada de impedância do meio rochoso. Portanto, a conseqüência imediata disto é a de que os explosivos que geram pressões menores nos furos detonados irão produzir menores níveis de vibração. Estes são os explosivos com baixa densidade e baixa velocidade de detonação como é o caso do ANFO comum. Quando comparado com alguns tipos de lamas comuns ou com emulsões sensibilizados com alumínio, as intensidades das vibrações para o ANFO comum são da ordem de 2 a 2,4 vezes menores respectivamente (JIMENO et al, 1995).

4.2.5. Tempo de retardo

Os intervalos de retardo entre as detonações que compõem um desmonte podem ser tempos de retardo nominal ou efetivo. O primeiro é a diferença entre os tempos nominais de iniciação, enquanto que o tempo de retardo efetivo é a diferença entre os tempos de chegada dos pulsos gerados pela detonação de furos em períodos consecutivos. Com relação ao tempo mínimo de retardo que elimina as interferências construtivas ou os efeitos de interação, os primeiros estudos feitos por Duvall (apud JIMENO et al, 1995) sugeriram intervalos de 8 a 9 ms, em testes feitos com calcário. Por sua vez, LANGEFORS (1963) indicou que para intervalos superiores a 3 vezes o período da vibração pode-se assumir que não há interação entre os furos adjacentes detonados em seqüência, uma vez que os sinais são absorvidos. Wiss e Linehan (apud JIMENO et al, 1995) sugeriram sucessivos intervalos de retardo de 17 ms, para eliminar a somatória dos efeitos das vibrações. Em outro estudo feito pela empresa Nobel (JIMENO et al, 1995) usando-se tempos de retardo entre os furos que variavam de 6 a 25 ms observou-se que este último valor era o que produzia a menor vibração. Não por acaso, as atuais espoletas de retardo e os tubos de choque comerciais são fabricados com tempos de retardo de 9, 17 e 25 ms entre outros.

4.2.6. Parâmetros geométricos do plano de fogo

A maioria dos parâmetros geométricos de desenho tem influência considerável sobre as vibrações geradas, sendo os mais importantes:

- *diâmetro do furo*. O aumento no diâmetro do furo é prejudicial à vibração, pois a quantidade de explosivos é proporcional ao quadrado do diâmetro, o que resultará em uma carga por furo/espera maior;
- *altura da bancada*. A relação H/A (altura da bancada / afastamento) > 2 deve ser mantida sempre que possível, de modo a se obter uma boa fragmentação e eliminar o problema de repés uma vez que os níveis de vibração serão menores devido ao menor confinamento das cargas explosivas;

- *afastamento e espaçamento*. Se o afastamento e o espaçamento forem excessivos, os gases da explosão encontrarão resistência na fragmentação e deslocamento da rocha, e parte da energia se transformará em energia, o que aumentará a intensidade da vibração. Se o afastamento for menor, os gases de escape se expandirão em direção à face livre a uma velocidade muito alta, dando um grande impulso aos fragmentos e projetando-os de forma incontrolada. O espaçamento, por sua vez possui influência similar ao afastamento;
- *subfuração*. Quando comprimentos acima dos necessários são usados, cada seção adicional colabora cada qual com uma quantidade de energia para cisalhar e mover a base da rocha, o que significa que uma grande porcentagem da energia explosiva é convertida em vibração;
- *tamponamento*. Se o tampão for muito comprido, além da influência na fragmentação, haverá um confinamento acentuado resultando em níveis de vibração provavelmente mais altos;
- *inclinação do furo*. Furos inclinados permitem melhor uso da energia no nível do piso reduzindo, desta forma, as vibrações;
- *cargas descompartimentadas*. Separando-se a coluna de explosivos melhora-se a fragmentação e se obtém uma distribuição mais uniforme.
- *tamanho da detonação*. As dimensões das detonações são limitadas pela carga máxima por espera calculada em estudos prévios, pelos tipos de estruturas que se deseja proteger e pelos parâmetros característicos do distúrbio provocado pela vibração.

4.3. CARACTERÍSTICAS DA VIBRAÇÃO DO TERRENO

4.3.1. Tipos de ondas sísmicas

As vibrações geradas por uma detonação são transmitidas através do terreno como ondas sísmicas. A frente de onda se desloca radialmente partindo do local da detonação. O exemplo mais conhecido de onda é aquela formada quando se joga uma pedra na água e as ondas se propagam simetricamente para fora do local de impacto.

Os tipos diferentes de ondas sísmicas são classificados em dois grupos: ondas de volume e ondas de superfície. As ondas de volume, por sua vez se dividem em onda P e onda S, enquanto que as ondas de superfície se dividem em onda de Rayleigh e onda de Love.

4.3.1.1. Ondas de compressão ou ondas P

As ondas de compressão ou ondas P (primárias) consistem de uma série de movimentos compressionais e de tração na quais o movimento oscilatório das partículas ocorre na mesma direção que a propagação da onda. O movimento da onda P é o mais simples de se visualizar e medir. A Figura 23 ilustra uma representação de uma onda P com os seus movimentos.

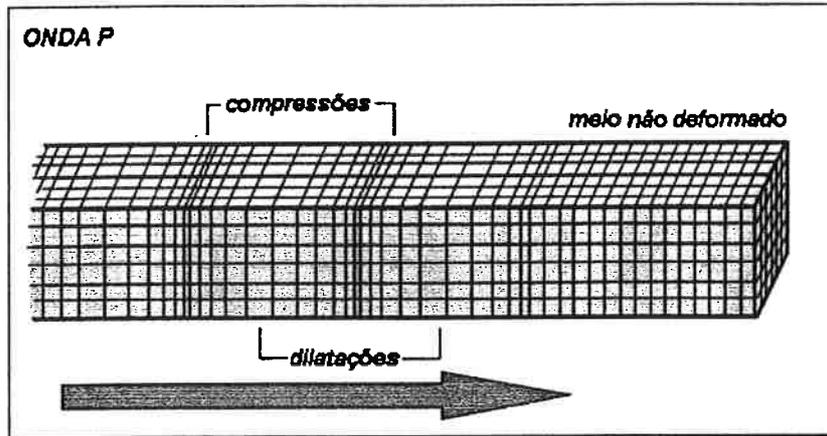


FIGURA 23. Representação de uma onda de compressão P.

4.3.1.2. Ondas transversais ou ondas S

As ondas transversais ou ondas cisalhantes S (Secundárias) consistem de oscilações nas quais o movimento da partícula é transversal à direção da propagação da onda. O terreno se move lateralmente e à medida que a onda se propaga para a frente. A Figura 24 ilustra uma representação de uma onda S com os seus movimentos.

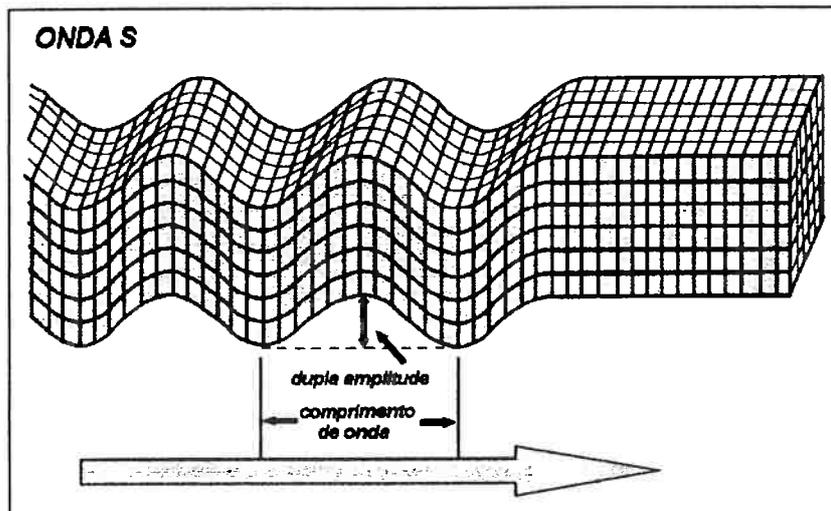


FIGURA 24. Representação de uma onda cisalhante ou Onda S.

As ondas P e S são conhecidas como ondas de volume ("bodywaves") e atuam dentro do maciço rochoso e propagam-se esféricamente a partir da carga de explosivo. O pulso inicial de tensão de uma explosão é principalmente um pulso radial de compressão acompanhado de uma onda distorcional (cisalhante). Conversões de energia ocorrem entre as ondas P e S nas bordas estruturais devido à mecanismos de reflexão e refração. As ondas de volume se atenuam através de dois mecanismos:

- Espalhamento geométrico em três dimensões. Na qual a mesma energia é gradualmente espalhada sobre a superfície de uma esfera crescente centrada na fonte de vibração, e

- Amortecimento da própria oscilação através da fricção interna do material rochoso e atenuação da energia através das imperfeições no material rochoso como os representados por juntas e fissuras

O grau de amortecimento depende da qualidade do maciço rochoso que varia para diferentes frequências de oscilação. Em geral, frequências mais altas são atenuadas mais rapidamente do que as mais baixas. Sendo que estas últimas podem se prolongar a distâncias consideráveis.

Quando as ondas de volume atingem a superfície, esta começa a se movimentar vertical e horizontalmente. As ondas produzidas neste instante são chamadas coletivamente de ondas elásticas de superfície. Embora estas tenham sido geradas após as ondas de volume, elas (particularmente as ondas de Rayleigh) são as que apresentam maior risco de dano potencial, uma vez que as investigações de autores como Miller e Pursey e Vorob'ev (apud JIMENO et al, 1995) indicam que a onda de Rayleigh carrega entre 70 e 80% da energia total.

4.3.1.3. Ondas de Rayleigh ou ondas R

As ondas de Rayleigh são caracterizadas por partículas de órbitas elípticas, sendo normalmente um movimento de translação contrário à direção de propagação da onda. A Figura 25 ilustra uma representação de uma onda de Rayleigh com os seus movimentos.

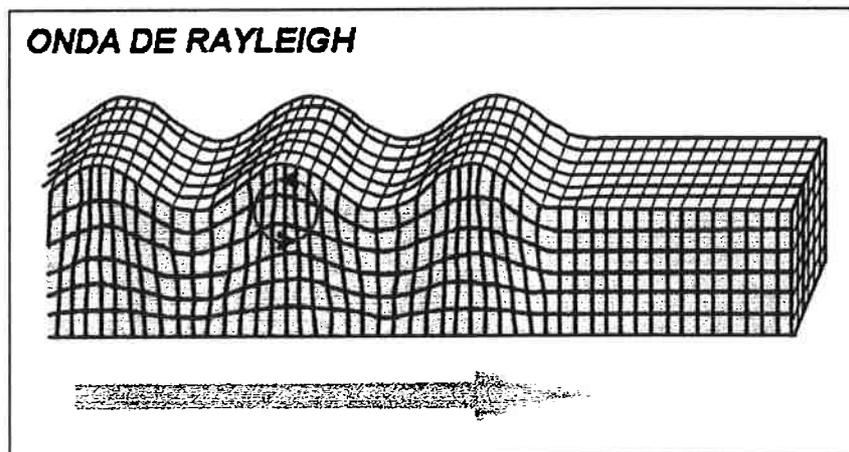


FIGURA 25. Representação de uma onda de Rayleigh

4.3.1.4. Ondas de Love ou ondas Q

As ondas de Love, por sua vez são mais rápidas do que as ondas R e dão às partículas um movimento que é transversal à direção de propagação da onda. A Figura 26 ilustra uma onda de Love com os seus movimentos.

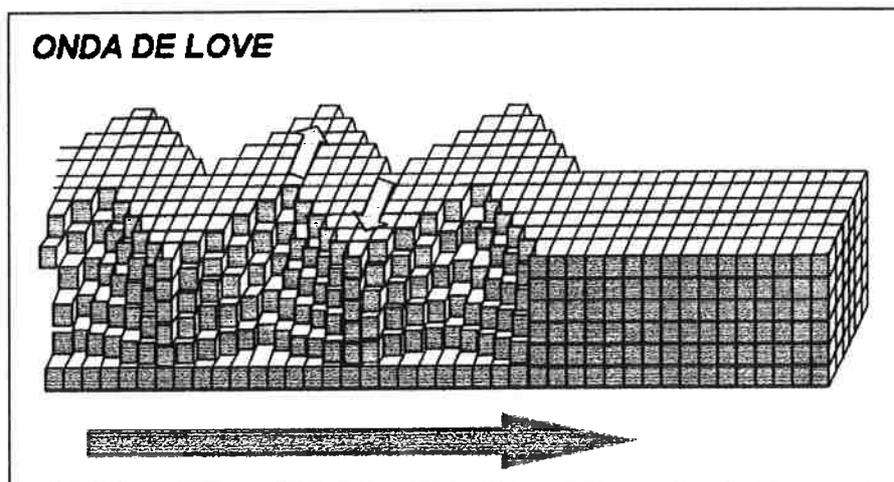


FIGURA 26. Representação de uma onda de Love.

4.3.2. Atenuação geométrica

A densidade da energia de propagação das ondas geradas pela detonação de uma carga explosiva diminui à medida que a onda atinge grandes volumes de rocha. Considerando que as vibrações de terreno induzidas por uma detonação compreendem uma série complexa de combinações de ondas, parece ser lógico que se deva levar em consideração certos fatores geométricos de atenuação para cada tipo de onda. Em um meio homogêneo, elástico e isotrópico, a amplitude cai devido à absorção geométrica, e esta queda, para os diferentes tipos de ondas dominantes é proporcional a:

- $1 / D$ para ondas de volume em um meio (semi) infinito;
- $1 / D^{0,5}$ para ondas de Rayleigh;
- $1 / D^2$ para ondas de volume que viajam através de uma superfície livre

onde D é distância em relação à fonte sísmica (JIMENO et al., 1995).

4.3.3. Absorção não-elástica

Na natureza, os maciços rochosos não constituem um meio perfeitamente elástico, isotrópico e homogêneo para a propagação da vibração. Pelo contrário, numerosos efeitos não-elásticos ou não-dispersivos aparecem e provocam a perda de energia durante a propagação da onda e que são atribuídos aos efeitos causados pela atenuação geométrica. Há numerosas razões para as atenuações não-elásticas e cada uma delas tem diferentes graus de influência:

- dissipação de uma matriz não-elástica relacionada ao movimento nas superfícies inter cristalinas e planos de descontinuidade;
- atenuação de rochas saturadas relativas ao movimento dos fluidos com respeito à matriz;
- fluxo dentro das fraturas;
- dispersão de tensões induzidas por substâncias voláteis absorvidas;
- reflexão em rochas porosas ou em cavidades grandes, e
- absorção de energia em sistemas que têm mudanças de fases, etc.

4.3.4. Interação de ondas elásticas

A interação de ondas sísmicas no tempo e no espaço pode trazer uma certa concentração que proporciona valores de coeficiente de atenuação que são maiores ou menores do que os previstos ou calculados teoricamente.

A topografia e geometria das formações geológicas podem produzir reflexão e concentração de frentes de onda em certos locais.

Foi observado que as vibrações decorrentes do desmonte por explosivos são modificadas pela presença de capeamento (“overburden”) no local de medição. Em geral, as vibrações medidas neste local têm uma frequência menor e uma amplitude maior do que aquelas medidas sobre a rocha a uma mesma distância do local de desmonte. A consequência disto é que se a velocidade de partícula for aproximadamente a mesma nos dois locais, as frequências mais baixas das vibrações no capeamento farão com que as vibrações sejam sentidas mais imediatamente pelas pessoas (GOLDER ASSOCIATES, sd).

4.4. A VIBRAÇÃO COMO PROBLEMA DE SEGURANÇA E MEIO AMBIENTE

4.4.1. Distribuição da energia de uma detonação

A Figura 27 mostra um esquema de distribuição da energia de uma detonação e as suas consequências sobre o meio ambiente.

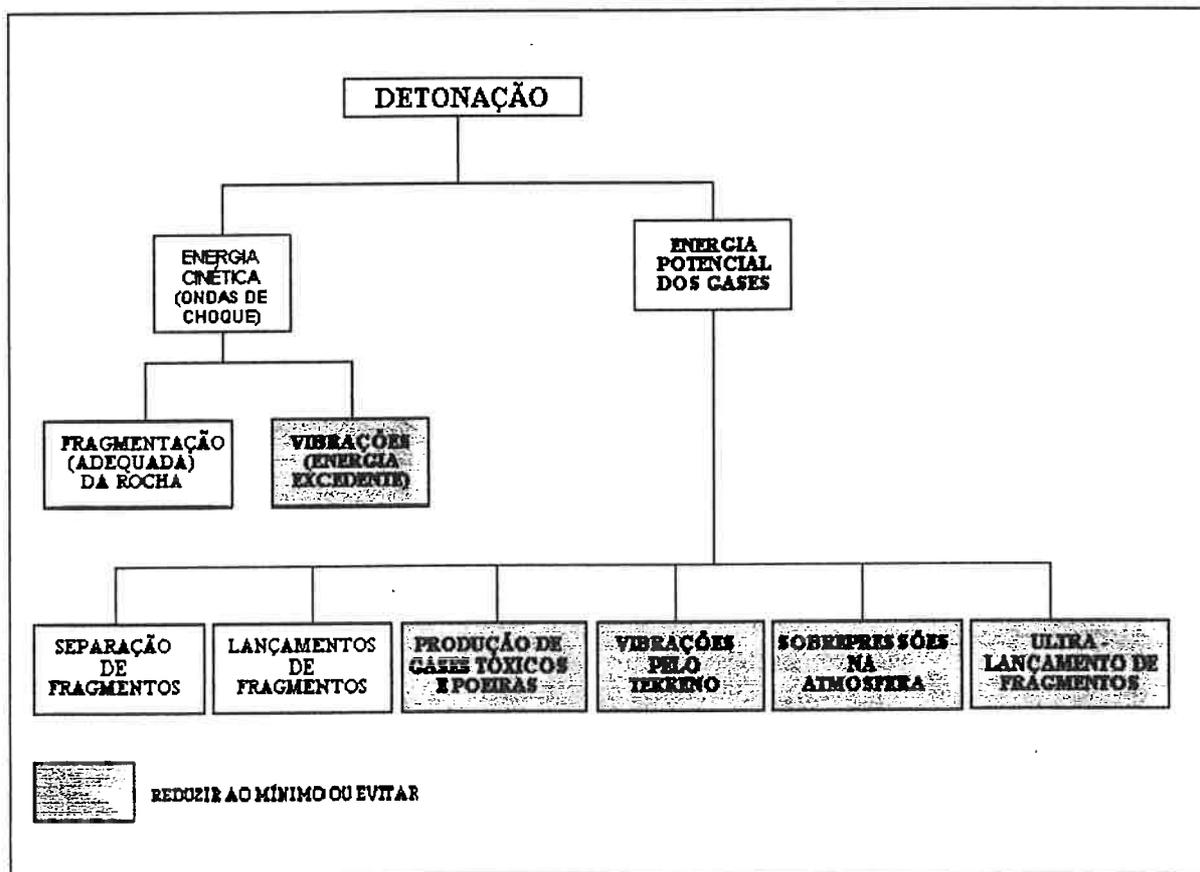


FIGURA 27. Esquema da distribuição dos problemas associados à detonação (ALMEIDA, 1992).

4.4.2. Efeitos ambientais decorrentes de uma detonação

Os principais problemas ambientais decorrentes da detonação são:

- emissão de gases tóxicos (monóxido de carbono e gases nitrosos, entre outros) e partículas sólidas na atmosfera, podendo comprometer a qualidade do ar;
- emissão e propagação de ondas sísmicas transientes (de pequena duração, com frequência e amplitude variadas) através dos maciços de solo e rocha, ocasionando vibrações de suas partículas. As vibrações podem ocasionar danos materiais, como trincas e fraturas em edificações, e incômodos ao ser humano;
- emissão e propagação de energia pela atmosfera, provocando deslocamento do ar (sobrepessão) ocasionando ruídos e mesmo vibrações em faixas de frequência não-audíveis, com a possibilidade de provocar danos materiais e incômodos ao ser humano;
- ultra-lançamento de fragmentos rochosos de dimensões, em geral, centimétricas (lançamento excepcional além dos limites da área prevista pelas normas de segurança), que podem provocar danos materiais no caso de atingirem construções ou máquinas, e mesmo acidentes com vítimas;
- indução de escorregamento para o interior das cavas e taludes, podendo ocasionar acidentes com trabalhadores e/ou prejudicar o andamento da atividade.

4.4.3. Detonações em áreas urbanas

Dentre as particularidades de uma mineração com respeito ao meio ambiente destacamos a sua "rigidez locacional", o que significa que as jazidas ou minas devem ser exploradas no local onde são encontrados, não havendo, portanto, possibilidade de transplantá-las para outro local.

Outro fator que influi bastante nas reclamações dos moradores ao redor de uma mineração é a conjuntura econômica local e regional do momento. Uma economia aquecida necessita de uma infra-estrutura que deve ser suprida, entre outras, pelas indústrias de construção. Para tornar isto possível, as minerações e pedreiras devem se adequar à demanda de material, o que implica um aumento na frequência de detonações e também grande oposição por parte da população vizinha.

Existem muitas considerações equivocadas a respeito dos efeitos do fenômeno de detonação de explosivos e também de outros fenômenos transientes que geram ruído e vibração. A tecnologia, por sua vez, deve desempenhar o seu papel, uma vez que quanto mais dados e conclusões são compartilhados, cada vez mais somos direcionados para informações, práticas, políticas e critérios mais e mais apurados tecnicamente. Ao mesmo tempo, é importante servir de forma justa aos interesses legítimos do público, dos fabricantes e usuários de explosivos e dos profissionais que atuam neste segmento. Este é, sem dúvida alguma, um dos principais papéis da universidade, o de contribuir com suas pesquisas e resultados para uma convivência harmoniosa entre as pessoas e o meio ambiente.

Muitas vezes, as pessoas que se consideram especialistas se baseiam apenas na sua intuição, de modo que estes levam em conta somente respostas fisiológica e sensitiva próprias. Esta resposta é pouco precisa e pode levar à mesma conclusão que o público em geral, que possui pouco conhecimento quando se julga causa e efeito da vibração.

Durante muitas décadas se coletaram alguns dados técnicos como o espectro da resposta de estruturas típicas. Estas informações tinham o seu valor para a compreensão do comportamento de uma casa, porém, na atualidade não têm muita valia para os problemas diários relacionados com detonações em áreas urbanas, uma vez que a maioria das operações de desmonte se apresenta dentro das normas para dano e estão muito distantes de causarem danos potenciais a estas estruturas.

Práticas de segurança e estar de acordo com todas as regulamentações, normas e diretrizes não são suficientes para evitar que os usuários de explosivos recebam reclamações, algumas vezes não procedentes, de danos atribuídos às detonações. O monitoramento sismográfico das operações de detonação para demonstrar às autoridades de que as operações estão em conformidade, além de boas práticas de engenharia, são passos importantes neste relacionamento, mas por si só não garantem a isenção de reclamações, servindo em alguns casos, somente como elemento paliativo para prolongar disputas judiciais ou então como mero elemento de um programa de relações públicas. O uso adequado de uma ferramenta como a equação carga-distância, aliado a monitoramentos sistemáticos, planejamento correto das detonações e vistorias prévias e posteriores nas residências pode ajudar bastante na solução de disputas judiciais. Não faz parte deste trabalho o estudo dos tipos de danos e correlacioná-los com os diversos tipos de esforços que podem atuar sobre as estruturas. Ainda assim, o levantamento de curva carga-distância para pedreiras e operações de detonação em áreas urbanas, por si só, poderá ser de grande utilidade.

A causa real do porquê as pessoas reclamam das detonações está na resposta estrutural dos edifícios ocupados pelas pessoas. Todas as reclamações de detonações ocorrem em função do quanto as casas vizinhas às áreas de detonações balançam, e não do quanto vibra o terreno.

São três os fatores que determinam o quanto a casa vibra:

- 1) amplitude da velocidade de vibração de partícula do terreno;
- 2) tempo de duração do fenômeno da vibração;
- 3) frequência da vibração.

A resposta estrutural de um edifício é diretamente e linearmente proporcional à amplitude da vibração do terreno. Assim, sabe-se que se a *velocidade de vibração de partícula* for reduzida pela metade, então a resposta estrutural também será reduzida à metade. Outro fato comprovado é que quanto maior a duração da vibração no balanço do edifício maior será a amplitude da resposta estrutural.

Dos três fatores citados, a frequência é o mais importante. Se uma casa estiver exposta à vibração do terreno, e está próxima à sua frequência natural, então haverá a ampliação da vibração da casa. Vibrações do terreno abaixo da frequência natural (ou fundamental) do edifício podem causar vibrações nas estruturas, e estas podem vibrar, pelo menos, tanto quanto as vibrações do terreno. Por outro lado, se a frequência da vibração do terreno for 40 % maior do que a frequência fundamental do edifício, então este vibrará menos do que o terreno. (SISKIND, 2000).

Em 1976, Ken Medearis (SISKIND, 2000) publicou um trabalho para a National Crushed Stone Association (NCSA) onde propôs o desenvolvimento de um critério de dano mais racional. Ele determinou a frequência fundamental e taxa de amortecimento de 63 estruturas residenciais

(típicas dos Estados Unidos – madeira e drywall) através de testes de micro-vibração. Descobriu-se que a altura da estrutura é quem determinava a frequência fundamental e elas variaram de 4 a 18 Hz, com uma frequência natural média de 9,6 Hz.

Ainda nos anos 70, o USBM também estudou a frequência fundamental das estruturas (no caso foram 23 estruturas residenciais que tiveram as suas propriedades dinâmicas estudadas) através de detonações normais (neste caso representavam situações mais realistas do que as de Medearis). Os valores obtidos para as frequências fundamentais foram ligeiramente superiores aos encontrados por Medearis. Outro fato interessante foi o de que, considerando que as casas vibram como uma estrutura com 1 grau de liberdade, as suas frequências variavam entre 4 e 14 Hz. Por outro lado, as frequências na metade da altura da parede situavam-se entre 12 e 20 Hz. Assim, uma forma eficiente de se controlar a resposta de uma estrutura que tem mais do que uma frequência fundamental é o controle das duas frequências fundamentais mais baixas. Para estruturas residenciais isto significa minimizar as vibrações com frequências entre 4 e 20 Hz.

A resposta estrutural desempenha um papel crítico na percepção da vizinhança de uma área de detonação. Outro fator crítico é a tolerância e a reação das pessoas à vibração. Conhecer as implicações destes dois aspectos é a chave para se entender porque as pessoas reclamam de vibrações do terreno.

Quando uma onda de vibração atravessa uma estrutura, esta é afetada de três modos:

- ação sobre as suas fundações;
- movimentos para cima e para baixo, para a frente e para trás e para os lados causados pela onda;
- ao mesmo tempo o edifício tende, como um todo, a se manter em descanso, em sua posição original, obedecendo à lei da inércia.

Estas ações criam rapidamente tensões e deformações no edifício. Uma vez que as placas de gesso e outros materiais similares são os mais fracos, estas tendem a sofrer primeiro os esforços, que irão resultar de modo geral em fissuras nas paredes e tetos. As fissuras nas paredes têm a tendência de formar um ângulo aproximado de 45° com a superfície do piso. As vibrações excessivas irão causar primeiro o alargamento de fissuras pré-existentes e depois o surgimento de novas fissuras.

Atualmente é quase certo que uma mineração tenha que explicar ou defender as suas práticas de desmonte. Entre os preparativos estão a manutenção de todos os registros, seguir os procedimentos tecnicamente corretos e valer-se de instrumentação apropriada para monitorar suas detonações. Mesmo a melhor preparação poderá ter sido em vão se não houver também uma grande habilidade em se comunicar com um público, grande parte dele com uma certa predisposição em não acreditar no seu trabalho.

Os encontros públicos podem tomar rumos completamente inesperados, uma vez que as pessoas que moram próximas às áreas de detonação precisam entender que existem normas e regulamentações que regem estas detonações, juntamente com programas de segurança e meio ambiente implantados pelas empresas. Porém, com bastante frequência, uma mineração ou operação de desmonte pode responder a uma acusação de dano provocado por detonações. Uma

investigação completa necessita do entendimento do porquê as estruturas das residências desenvolvem trincas e que elas não necessariamente são provocadas pelas detonações.

No trabalho de REIL (2000), o autor afirma que já em 1982 havia nos EUA aproximadamente 600.000 advogados, sendo que os tribunais consideravam a atividade de detonação como extremamente perigosa, e já naquela época, no decorrer das suas carreiras, os profissionais já se deparavam com processos, onde nem sempre a justiça prevalecia nos julgamentos. A necessidade de uma preparação adequada com registros e dados técnicos era fundamental para convencer júri e juiz.

Atualmente são fatos inerentes ao processo de detonação:

- a resposta humana à vibração;
- ignorância de grande parte do público a respeito da detonação;
- existência de grupos bastante atuantes;
- legisladores de litígio bastante agressivos.

Por sua vez uma preparação eficaz compreende uma grande habilidade em se comunicar e apresentar um programa de monitoramento sismográfico sistemático (atrelado a um sistema de gestão integrada de segurança e meio ambiente). Tudo isto deve estar sob responsabilidade de uma equipe de comprovada competência técnica. Para tanto, ela deve apresentar uma resposta bastante satisfatória à preocupação pública quanto à probabilidade de danos à propriedade, detonações não controladas e a credibilidade da empresa. Assim, ela deve estabelecer um bom relacionamento com a comunidade, ganhando a sua confiança demonstrando as suas boas práticas de detonação, realizar monitoramentos sismográficos sistemáticos e procurar atender imediatamente às reclamações.

Ao mesmo tempo, ela deve procurar se precaver ao máximo através do desenvolvimento de uma defesa sólida que envolve um programa de monitoramento sistemático aliado a um programa de calibração de seus instrumentos e manter todos os registros da forma mais completa possível.

4.4.3.1. Danos provocados por vibrações excessivas

A reclamação mais comum da população a respeito de uma detonação é a probabilidade de dano a um edifício. Com o aumento da severidade da vibração decorrente da detonação, existe uma seqüência na qual geralmente o dano ocorre, que é a seguinte (DOWN, STOCKS, 1978):

- 1 - pó saindo das rachaduras;
- 2 - aumento na extensão das rachaduras;
- 3 - a formação de novas rachaduras;
- 4 - deslocamento e formação de esfoliações;
- 5 - grandes áreas de deslocamentos;
- 6 - fissuras em estruturas de alvenaria e pequenos deslocamentos;
- 7 - danos maiores e mais severos, e, por último, o colapso do edifício.

Existe uma preponderância maior de relatos de reclamações concernentes às categorias 1 a 4.

As Tabelas 2 a 4 apresentam alguns valores de velocidade de partícula e os efeitos sobre as estruturas observados por alguns autores.

TABELA 2. Níveis de vibração e efeitos associados (Franklin e Dussald apud IRAMINA, 1997)

Vp (mm/s)	Efeitos observáveis
600	geração de novas descontinuidades na própria rocha
300	quedas de blocos de rocha em galerias e túneis sem revestimento
190	queda de reboco e formação de trincas em prédios
140	criação de pequenas novas trincas e abertura de antigas trincas
100	limite "seguro" para túneis revestidos e para concreto reforçado
50	limite "seguro" para prédios residenciais de bom estado (construção e manutenção)
30	severa percepção humana
10	incômodo para grande parte da população
5	incômodo para parte da população, algumas reclamações
1	vibrações apenas perceptíveis
<1	praticamente imperceptível na maioria dos casos

TABELA 3. Velocidades seguras de vibração de partícula (Vr) em função do tipo de estrutura (CHAE, apud IRAMINA, 1997).

Vp (mm/s)	Tipo de estrutura
100	Classe A: grandes estruturas com reforço
50	Classe B: edificações novas, bem construídas e em bom estado
25	Classe C: edificações não novas e com conservação sofrível
13	Classe D: edificações antigas e em péssimo estado de conservação

TABELA 4. Critérios de danos segundo alguns autores (IRAMINA, 1997).

Autor	Vp (mm/s)	Efeitos
Langefors et al. (1957)	71	dano não perceptível
	109	pequenas trincas e queda leve de reboco
	160	fraturas em reboco e em paredes de alvenaria
	231	sério fraturamento
Edwards et al. (1959)	Vr < 51	seguro, sem dano
	51 < Vr < 102	cuidado, precaução
	Vr < 102	dano
Nicholls et al. (1971)	< 51	nenhum dano
	51 < Vr < 102	pequenas trincas em reboco, argamassa ou estuque
	102 < Vr < 178	pequenos danos
	> 178	grandes danos a estruturas

4.4.3.2. Resposta humana às vibrações decorrentes de detonações

Através das últimas décadas pode-se dizer que não houve nenhuma mudança fisiológica na percepção humana. Embora tenha havido grandes avanços na tecnologia de detonação de explosivos, os elementos relacionados com a percepção e resposta humana tenderam a permanecer constantes. Muitas das mudanças colaboraram de forma definitiva para a segurança na fabricação e manuseio de explosivos e na flexibilidade de uso para diferentes aplicações. Com o passar do tempo, as indústrias passaram a oferecer cada vez mais oportunidades para o treinamento, educação ambiental e assistência, que por sua vez são acompanhados de novas regulamentações e restrições. Estes usuários são instruídos e restringidos para proteger as pessoas e suas propriedades, de modo que a segurança seja, ao lado do controle ambiental, a principal meta de qualquer atividade.

Esta pouca mudança na fisiologia humana ao longo da história se deve ao fato do homem primitivo usar a sua sensibilidade a sons e pequenas vibrações para ajudar na sua sobrevivência. Esta sensibilidade tornou-se de certa forma um estorvo para o homem moderno que vive em áreas urbanas. No entanto, devido aos avanços tecnológicos, muitas pessoas intuem que nossas atitudes estéticas, sociais e filosóficas devem ter mudado com o passar das eras. É o que podemos chamar de respostas culturais e não culturais, quando não aceitas. Ao que parece, a natureza humana tem mudado muito pouco em termos de percepção. Como exemplo, pode-se traçar um paralelo entre as nossas relações atuais e antigas através de registros que relatavam os problemas sociais e urbanos vividos pelos cidadãos de Pompéia, onde o ruído e o tráfego de charretes e cavalos nas ruas incomodavam as pessoas da mesma forma que os caminhões a diesel o fazem atualmente numa cidade, como por exemplo, a Roma moderna.

As mudanças mais atuais com relação à vibração e ruído não estão relacionadas com a fisiologia e percepção humana, mas com litígios e compensações, especialmente nos Estados Unidos. Esta é uma tendência que certamente se espalhará a outros países, inclusive o Brasil.

A resposta humana é a principal responsável por um ramo inteiro da indústria de explosivos, que é aquela que lida com os vários aspectos de danos potenciais a residências através da sobrepressão atmosférica e da vibração de partícula. Os elementos essenciais ao estudo das vibrações começaram a ser documentados a partir da década de 1920. Apesar de relatos comuns de danos, inclusive baseados somente no testemunho de pessoas, os pesquisadores daquela época não podiam saber se realmente todo e qualquer dano poderia ser atribuído às detonações. Hoje em dia, a mesma coisa ainda ocorre, mesmo que em menor escala, pois muitas pessoas sequer acompanharam ou viram uma detonação e baseiam as suas conclusões apenas na intuição.

A Figura 28 mostra os resultados de um trabalho citado pela GOLDER ASSOCIATES (sd), baseado em um trabalho experimental do USBM, no qual foram conduzidos testes usando-se vibrações mecânicas senoidais de frequências diferentes e velocidades de vibração de partícula em testes humanos. Uma vez que a frequência das detonações utilizadas nos desmontes situa-se numa faixa média de 10 a 30 Hz, estes dados podem ser utilizados para se determinar o efeito da distância escalonada em função da velocidade de vibração de partícula decorrente de uma detonação sobre as limitações de certas reações humanas. Nesta Figura pode-se observar que as

vibrações de um desmorte tornam-se intoleráveis para os humanos em níveis consideravelmente abaixo dos níveis relacionados a danos estruturais. O resultado mostra que as reclamações ocorrem freqüentemente devido à resposta humana e não devido às situações que possam oferecer perigo, sendo que nestes casos a redução do limite de velocidade de vibração de partícula para se controlar a situação é uma boa filosofia, particularmente se tal mudança não produzir dificuldades operacionais. Limites de velocidade de vibração de partícula (V_p) menores ou iguais a 12,7 mm/s (0,5 pol/s) reduzem as reclamações por um fator de três, comparado com um limite de 50,8 mm/s. Segundo o USBM, a porcentagem de pessoas que reclamam sobre vibrações decorrentes de detonações em um local de construção era superior a 30% para velocidades de vibração de 50,8 mm/s, de 10% para 12,7 mm/s e 1% para 2 mm/s, que está no limiar da faixa de percepção humana. Em alguns momentos a resposta humana pode se tornar o elemento principal a se considerado em um plano de fogo. (DU PONT DO CANADÁ, 1979).

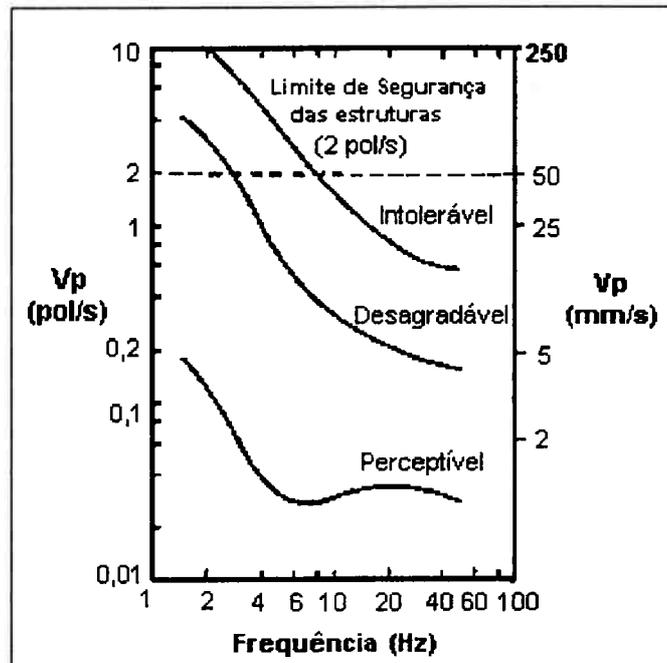


FIGURA 28. Resposta humana subjetiva às vibrações decorrentes do desmorte por explosivos em gráfico log-log (GOLDER ASSOCIATES, s.d., adaptado do USBM).

CAPÍTULO 5 - SÉRIES DE FOURIER

5.1. REPRESENTAÇÃO MATEMÁTICA DE UMA ONDA

Para se resolver diversos problemas de engenharia, é preciso conhecer a resposta de um sistema para um determinado sinal de entrada. Se o sinal de entrada puder ser subdividido em sinais menores e mais simples e se soubermos como o sistema responde a estes sinais de entrada, então pode-se prever como o sistema se comportará com o sinal completo de entrada. Portanto, qualquer ferramenta ou metodologia que possa subdividir um sinal em partes menores, é de grande utilidade para a resolução de diversos problemas.

A grande dificuldade em se representar matematicamente uma onda vibratória é achar uma função que represente de forma satisfatória o seu comportamento, uma vez que se trata de uma combinação de vários tipos de ondas. Entre as diversas ferramentas que a matemática oferece, uma em particular é aplicada em grande escala para a análise de ondas vibratórias. Trata-se da Transformada Rápida de Fourier. Para uma melhor compreensão desta ferramenta é necessário fazer uma revisão dos conceitos envolvidos, começando pelas Séries de Fourier, passando para a Transformada de Fourier, depois a Transformada Discreta de Fourier, e por fim a Transformada Rápida de Fourier.

5.2. SÉRIES DE FOURIER

5.2.1. Conceitos gerais

Com a exceção de algumas funções particulares, qualquer sinal com período T pode ser expandido como uma série trigonométrica de funções de senos e co-senos, desde que estas obedeçam às seguintes condições (COBBY, 2001):

1. $f(t)$ tem um número finito de máximos e mínimos dentro de T
2. $f(t)$ tem um número finito de descontinuidades dentro de T , e
3. é necessário que

$$\int_0^T |f(t)| dt < \infty \quad (8)$$

Além, é claro, da definição de função periódica $f(t)$. Para todo t ,

$$f(t + T) = f(t), \quad T < 2\pi \text{ constante positiva} \quad (9)$$

Estas condições significam que é possível calcular a área sob uma função. Se a condição 1 não for verdadeira, então trata-se de um sinal cuja potência tende ao infinito, o que a torna absolutamente não integrável. Se a condição 2 não for verdadeira, então mais uma vez a função é absolutamente não integrável, e a condição 3 é simplesmente uma reafirmação das condições 1 e 2.

Se estas condições forem verdadeiras, então a função pode ser representada como:

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos \frac{2\pi n t}{T} + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin \frac{2\pi n t}{T} \quad (10)$$

A característica fundamental desta ferramenta envolve a determinação dos coeficientes $a_k, k \leq n$. Pode-se determinar estes coeficientes através do uso de cálculo ou exponenciais complexas, ou então através de cálculo numérico para construir uma função que substitua as funções senos e co-senos.

Uma grande vantagem das Séries de Fourier com relação às funções periódicas é a de que os primeiros termos, em um número pequeno, fornecem, freqüentemente, uma boa aproximação da função como um todo e não apenas na região próxima a um determinado ponto.

5.2.2. Definição de Séries de Fourier

Seja $f(t)$ definida no intervalo $(-T/2, T/2)$ e determinada fora desse intervalo por $f(t+T)=f(t)$, isto é, supondo $f(t)$ periódica de período T . Define-se a série de Fourier, ou desenvolvimento de Fourier, de $f(t)$, como (ROMÃO et al, 1994):

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos \frac{2\pi n t}{T} + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin \frac{2\pi n t}{T} \quad (11)$$

onde os coeficientes de Fourier a_n e b_n podem ser calculadas pelas expressões:

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \cos \frac{2\pi n t}{T} dt \quad (12)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \operatorname{sen} \frac{2n\pi t}{T} dt \quad (13)$$

Onde $n = 0, 1, 2, \dots$ e $n = 1, 2, 3, \dots$, respectivamente para as equações (12) e (13).

Se $f(t)$ tem período T , os coeficientes a_n e b_n podem ser determinados equivalentemente a partir de:

$$a_n = \frac{2}{T} \int_c^{c+T} f(t) \cos \frac{2n\pi t}{T} dt \quad (14)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_c^{c+T} f(t) \operatorname{sen} \frac{2n\pi t}{T} dt \quad (15)$$

Para estas duas últimas expressões $n = 0, 1, 2, \dots$

O parâmetro c é um número real qualquer. No caso especial onde:

$$c = -\frac{T}{2}$$

As expressões (14) e (15) se reduzem respectivamente às expressões (12) e (13). Note-se que o termo constante em (11) é igual a:

$$\frac{a_0}{2} = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) dt \quad (16)$$

Que é a média de $f(t)$ sobre o período.

Se

$$\frac{T}{2} = \pi,$$

A série (11) e os coeficientes (12) ou (13) são particularmente simples. A função neste caso tem período 2π .

Deve-se salientar que a série (11) é apenas a série que corresponde a $f(t)$. Não se sabe, por enquanto, se tal série converge, ou se, em caso afirmativo, converge para $f(t)$. Este problema de

convergência das séries de Fourier será mostrado na seqüência através das condições de Dirichlet .

5.2.3. Convergência da Série de Fourier

Condições de Dirichlet

Teorema 1: supondo que

- (i) $f(t)$ seja definida, exceto possivelmente em um número finito de pontos de $(-T/2, T/2)$;
- (ii) $f(t)$ seja periódica dentro do período T ;
- (iii) $f(t)$ e $f'(t)$ sejam seccionalmente contínuas em $(-T/2, T/2)$. Então a série (11) com coeficientes dados por (12) ou (13) converge para
 - (a) $f(t)$ se t é ponto de continuidade
 - (b) $[f(t+0) + f(t-0)]/2$ se t é ponto de descontinuidade.

De acordo com os resultados acima, pode-se escrever:

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left(a_n \cos \frac{2\pi n t}{T} + b_n \operatorname{sen} \frac{2\pi n t}{T} \right) \quad (17)$$

Em qualquer ponto t de continuidade. Todavia, se t é ponto de descontinuidade, o membro esquerdo deve ser substituído por

$$\frac{1}{2} [f(t+0) + f(t-0)]$$

De modo que a série converge para a média dos valores $f(t+0)$ e $f(t-0)$ (STUART, 1961).

As condições (i), (ii) e (iii) impostas a $f(t)$ são suficientes, mas não são necessárias, isto é, se elas são satisfeitas, a convergência está garantida. Todavia, não sendo elas satisfeitas, a série poderá convergir ou não. Estas condições, em geral, são satisfeitas na maioria dos problemas que surgem na ciência ou na engenharia.

Segundo STUART (1961) não se conhecem ainda condições necessárias e suficientes para a convergência das séries de Fourier. É conveniente notar que a continuidade de $f(t)$, por si só, não garante a convergência de uma série de Fourier.

5.3. SÉRIES DE FOURIER DE SENOS E DE CO-SENOS

5.3.1. Funções pares e funções ímpares

Uma função $f(t)$ é ímpar se

$$f(-t) = -f(t) \quad (18)$$

De acordo com esta definição, pode-se afirmar que

$$t^3, \quad t^5 - 3t^3 = 2t, \quad \text{sen } t, \tan 3t$$

são funções ímpares.

Por outro lado, uma função $f(t)$ é par se

$$f(-t) = f(t) \quad (19)$$

E de acordo com esta definição, também pode-se afirmar que

$$t^4, \quad 2t^6 - 4t^2 + 5, \quad \text{cost}, e^t + e^{-t}$$

são funções pares.

Numa série de Fourier correspondente a uma função ímpar, só aparecem os termos em senos. Numa série de Fourier correspondente a uma função par, só podem aparecer os termos em co-senos (e possivelmente uma constante, que será considerada como um termo em co-seno).

5.3.2. Série para senos e co-senos

Uma série de Fourier de senos ou de co-senos (chamada também de semi-série) é uma série que contém somente termos em senos ou em co-senos, respectivamente. Quando se deseja obter uma semi-série correspondente à uma determinada função, esta é geralmente definida no intervalo $(0, T/2)$, ou seja, a metade do intervalo $(-T/2, T/2)$. A função é então especificada como sendo ímpar ou par, de modo que fique claramente definido o seu comportamento na outra metade do intervalo $(-T/2, 0)$. Neste caso, têm-se as seguintes expressões:

$$a_n = 0, \quad b_n = \frac{2}{T/2} \int_0^{T/2} f(t) \text{sen} \frac{2\pi n t}{T} dt, \quad \text{semi-série de senos} \quad (20)$$

$$b_n = 0, \quad a_n = \frac{2}{T/2} \int_0^{T/2} f(t) \text{cos} \frac{2\pi n t}{T} dt, \quad \text{semi-série de co-senos} \quad (21)$$

Como foi observado, há três versões distintas de séries de Fourier de uso comum, as séries de Fourier "cheias", as séries de seno e as séries de co-seno. Elas são baseadas em escolhas

ligeiramente diferentes de uma base ortogonal escolhida especialmente para uma destas séries. Estas três abordagens realizam um trabalho igualmente bom na aproximação de funções em termos de RMS (média quadrática), mas as suas relações com a simetria são diferentes. Por esta razão, diferentes arranjos de funções de Fourier podem ser exigidos, dependendo do tipo de “condições de contorno” fisicamente aplicáveis a um determinado problema (STUART, 1961).

As séries cheias são indicadas para representar ou aproximar funções periódicas do tipo

$$f(t + T) = f(t),$$

sendo exemplos desta aplicação a construção de sons em uma frequência básica com sobretons e qualquer função física que depende de uma variável angular como, por exemplo, a longitude num sistema de coordenadas.

As séries de Fourier de seno, por outro lado, são boas para funções que possuem valor zero em

$$t = 0 \quad e \quad t = T,$$

uma vez que todas as funções

$$\text{sen}\left(\frac{n\pi t}{T}\right)$$

possuem esta propriedade. Outra característica, não tão óbvia, é o uso da série de senos para aproximar funções ímpares, ao passo que para funções pares, a melhor aproximação se dá por séries de co-senos.

5.4. NOTAÇÃO COMPLEXA PARA AS SÉRIES DE FOURIER

Obter os coeficientes de uma Série de Fourier significa fazer uma análise espectral de uma função. Conforme observado no item 4.2.2., os coeficientes da série são dados por:

$$\frac{a_n}{2} = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} f(t) \cos\left(\frac{2\pi n t}{T}\right) dt$$

$$\frac{b_n}{2} = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} f(t) \text{sen}\left(\frac{2\pi n t}{T}\right) dt$$

$$\frac{a_0}{2} = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} f(t) dt$$

A teoria dá a entender que o método é complicado, porém isto não ocorre na prática. Para algumas aplicações necessita-se somente de um número finito de harmônicas para construir uma função $f(t)$ com um erro aceitável.

Por outro lado, as séries de Fourier também podem ser representadas em uma forma complexa, que é mais compacta e mais conveniente quando se lida com sinais complexos.

Sabendo-se que através da identidade trigonométrica de Euler,

$$e^{it} = \cos(t) + i\text{sen}(t) \quad (22)$$

e, que

$$e^{i\theta} = \cos\theta + i\text{sen}\theta, \text{ e} \quad (23)$$

$$e^{-i\theta} = \cos\theta - i\text{sen}\theta \quad (24)$$

onde i é a unidade imaginária tal que $i^2 = -1$, pode-se escrever a série de Fourier para $f(t)$ em notação complexa usando-se a seguinte expressão:

$$f(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n e^{\frac{2i\pi n}{T}t} \quad (25)$$

onde

$$c_n = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) e^{\frac{-2i\pi n}{T}t} dt \quad (26)$$

Ao se escrever a expressão (25), admite-se que estejam satisfeitas as condições de Dirichlet e também que $f(t)$ seja contínua em t . Se $f(t)$ é descontínua em t , o membro esquerdo da expressão (25) deve ser substituído por

$$\frac{f(t+0) + f(t-0)}{2}.$$

Com isto, pode-se expandir qualquer sinal usando-se as Séries de Fourier. Este conhecimento será então levado para o estudo da Transformada de Fourier, apresentada no próximo capítulo.

5.5. EXEMPLOS DE SÉRIES DE FOURIER

5.5.1. Sistemas vibrantes

Uma corda de comprimento L é esticada entre os pontos $(0,0)$ e $(L,0)$ do sistema de coordenadas x,y (Figura 29). No instante $t=0$, ela tem a forma dada por

$$f(x), 0 < x < L$$

e é libertada de sua posição de repouso. O problema consiste em determinar o deslocamento da corda em um instante posterior arbitrário (STUART, 1961).

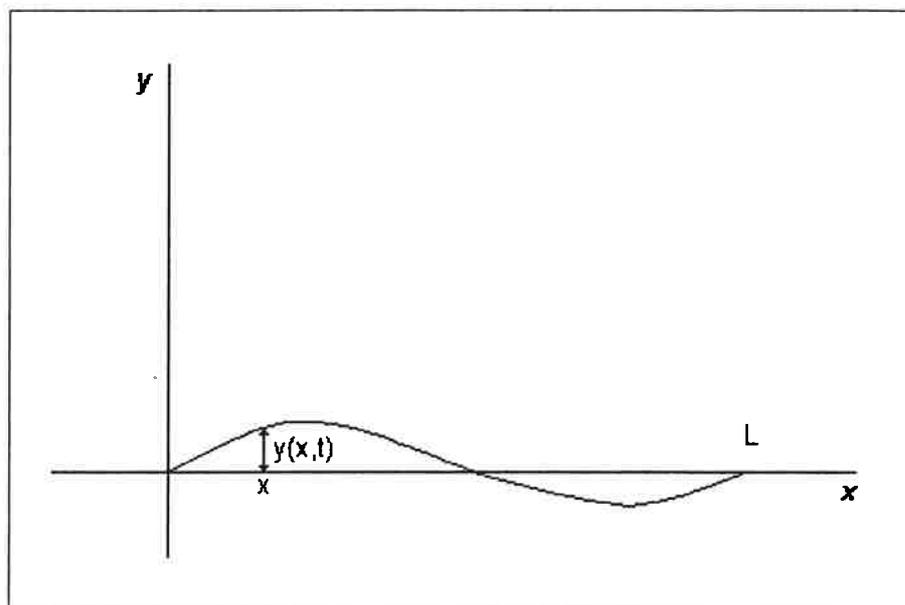


FIGURA 29. Corda vibrante

A equação das cordas vibrantes é dada por

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = a^2 \frac{\partial^2 y}{\partial x^2}, \quad 0 < x < L, \quad t > 0 \quad (27)$$

onde $y(x,t)$ é o deslocamento a partir do eixo x no instante t (Figura 27)

Como as extremidades da corda são fixas em $x = 0$ e $x = L$, temos

$$y(0,t) = y(L,t) = 0, \quad t > 0$$

A forma inicial da corda é dada por $f(x)$, e portanto

$$y(x,0) = f(x), \quad 0 < x < L$$

A velocidade inicial da corda é zero, o que significa que

$$y_t(x,0) = 0, \quad 0 < x < L$$

Para resolver este problema de contorno, deve-se fazer

$$y = XT$$

Então $XT'' = a^2 X''T$ ou $\frac{T''}{a^2 T} = \frac{X''}{X}$

Chamando de $-\lambda^2$, a constante de separação, temos

$$T'' + \lambda^2 a^2 T = 0 \quad e \quad X'' + \lambda^2 X = 0$$

e

$$T = A_1 \text{sen } \lambda at + B_1 \text{cos } \lambda at \quad X = A_2 \text{sen } \lambda x + B_2 \text{cos } \lambda x$$

Uma solução pode ser dada por

$$y(x,t) = XT = (A_2 \text{sen } \lambda x + B_2 \text{cos } \lambda x)(A_1 \text{sen } \lambda at + B_1 \text{cos } \lambda at)$$

De

$$y(0,t) = 0, \quad B_2 = 0$$

Então

$$y(x,t) = A_2 \text{sen } \lambda x (A_1 \text{sen } \lambda at + B_1 \text{cos } \lambda at) = \text{sen } \lambda x (A \text{sen } \lambda at + B \text{cos } \lambda at)$$

De

$$y(L,t) = 0, \text{ temos } \text{sen } \lambda L (A \text{sen } \lambda at + B \text{cos } \lambda at)$$

de modo que

$$\text{sen } \lambda L = 0, \quad \lambda L = m\pi \quad \text{ou} \quad \lambda = \frac{m\pi}{L},$$

pois o segundo fator não deve se anular. Então

$$y_t(x,t) = \text{sen } \lambda x (A \lambda a \text{cos } \lambda at - B \lambda a \text{sen } \lambda at)$$

e

$$y_t(x,0) = (\text{sen } \lambda x)(A \lambda a) = 0,$$

de onde

$$A = 0$$

Assim

$$y(x, t) = B \operatorname{sen} \frac{m\pi x}{L} \cos \frac{m\pi at}{L}$$

Para satisfazer a condição

$$y(x, 0) = f(x),$$

será necessário superpor soluções. Isto nos dá

$$y(x, t) = \sum_{m=1}^{\infty} B_m \operatorname{sen} \left(\frac{m\pi x}{L} \right) \cos \frac{m\pi at}{L}$$

então,

$$y(x, 0) = f(x) = \sum_{m=1}^{\infty} B_m \operatorname{sen} \left(\frac{m\pi x}{L} \right)$$

e da teoria das séries de Fourier temos,

$$B_m = \frac{2}{L} \int_0^L f(x) \operatorname{sen} \frac{m\pi x}{L} dx$$

O resultado final é

$$y(x, t) = \sum_{m=1}^{\infty} \left(\frac{2}{L} \int_0^L f(x) \operatorname{sen} \frac{m\pi x}{L} dx \right) \operatorname{sen} \frac{m\pi x}{L} \cos \frac{m\pi at}{L}$$

que é a solução.

Os termos desta série representam os modos naturais ou normais de vibração. A frequência f_m do modo normal de ordem m é obtida a partir do termo contendo

$$\cos \left(\frac{m\pi at}{L} \right)$$

e é dada por

$$2\pi f_m = \frac{m\pi a}{L} \text{ ou } f_m = \frac{ma}{2L} = \sqrt{\frac{\tau}{\mu}} \quad (28)$$

Como todas as frequências são múltiplos inteiros da menor frequência f_1 , as vibrações da corda produzirão um tom musical, tal como no caso de uma corda de violino ou de piano. A Figura 30 ilustra os três primeiros modos normais. Com o decorrer do tempo, as formas destes modos variam das curvas em traço cheio da figura, para as curvas tracejadas, e vice-versa; o tempo de um ciclo completo é o período e o seu inverso é a frequência. O modo (a) é o modo fundamental ou primeiro harmônico, e os modos (b) e (c) são respectivamente o segundo e o terceiro harmônico.

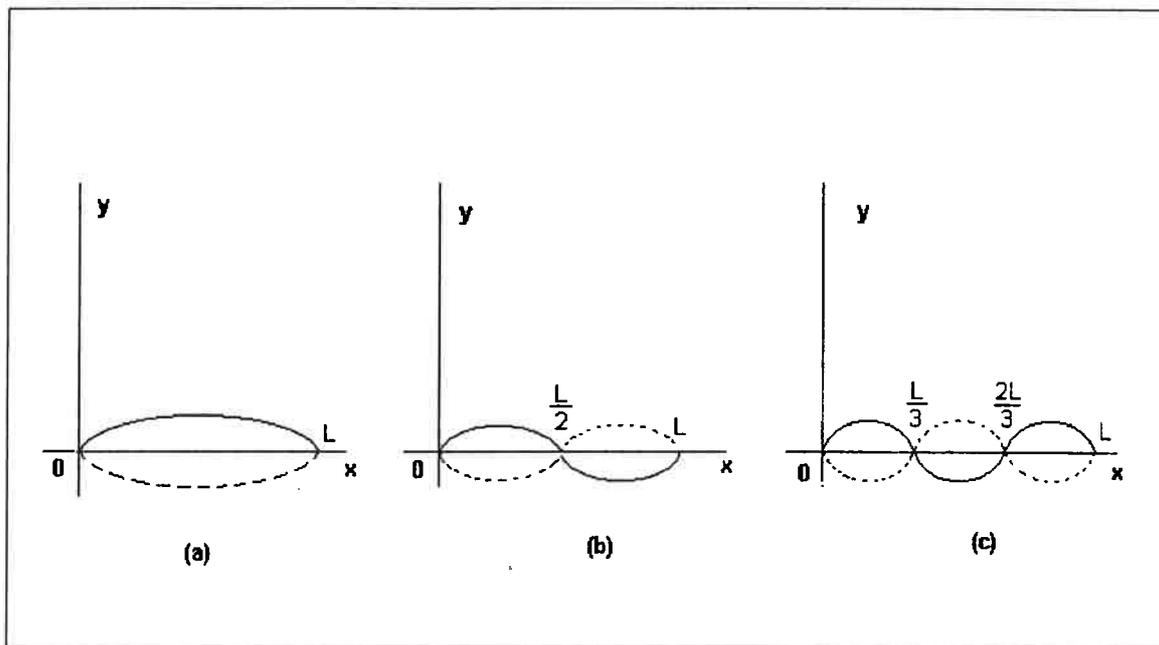


FIGURA 30. Modos normais para uma corda vibrante

5.5.2. Onda quadrada

Outro exemplo de aplicação das séries de Fourier é uma onda quadrada. Neste caso, assume-se que a amplitude da onda é igual a uma unidade, que ela possui um período T , como pode ser observado na Figura 31, e também a escolha da origem, para que a função seja anti-simétrica ou ímpar (STUART, 1961).

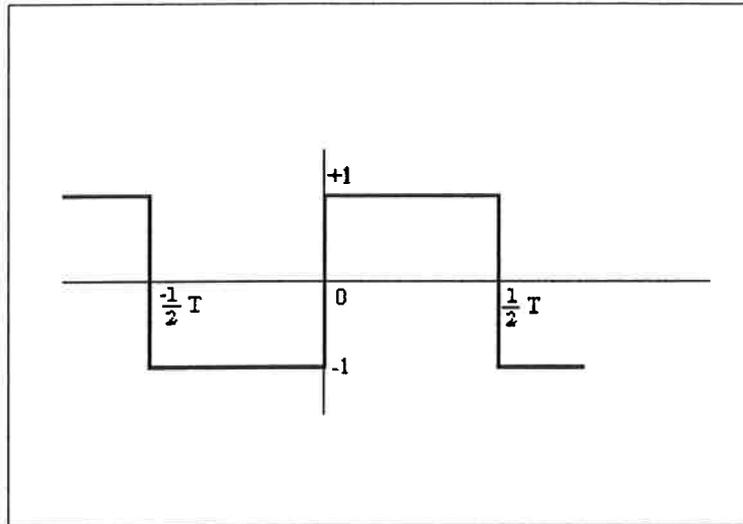


Figura 31. Onda quadrada – forma anti-simétrica

Deste modo, a expansão de Fourier será uma série de senos e temos que

$$a_n = 0, \text{ para todo } n \text{ (inclusive } n = 0)$$

Usando-se a expressão apresentada nos itens anteriores obtém-se

$$b_n = \frac{2}{L} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \text{sen} \frac{2\pi n t}{T} dt$$

Além disso, $f(t)$ é definida pelas seguintes expressões:

$$\begin{aligned} f(t) &= -1, & -\frac{1}{2}T < t < 0 \\ f(t) &= 1, & 0 < t < \frac{1}{2}T, \text{ e} \\ f(t+T) &= f(t) \end{aligned}$$

Portanto, temos que

$$b_n = \frac{2}{T} \left\{ \int_{-\frac{T}{2}}^0 (-1) \operatorname{sen} \frac{2\pi n t}{T} dt + \int_0^{\frac{T}{2}} (+1) \operatorname{sen} \frac{2\pi n t}{T} dt \right\}$$

$$b_n = \frac{2}{T} \left[\frac{T}{2\pi n} \cos \frac{2\pi n T}{T} \right]_{-\frac{T}{2}}^0 - \left[\frac{T}{2\pi n} \cos \frac{2\pi n T}{T} \right]_{0}^{\frac{T}{2}}$$

$$b_n = \frac{1}{n\pi} \{ [1 - \cos(-n\pi)] + [1 - \cos(n\pi)] \}$$

$$b_n = \frac{2}{n\pi} (1 - \cos n\pi)$$

e então

$$\therefore b_n = 0, \text{ para } n \text{ par}$$

$$b_n = \frac{4}{n\pi}, \text{ para } n \text{ ímpar}$$

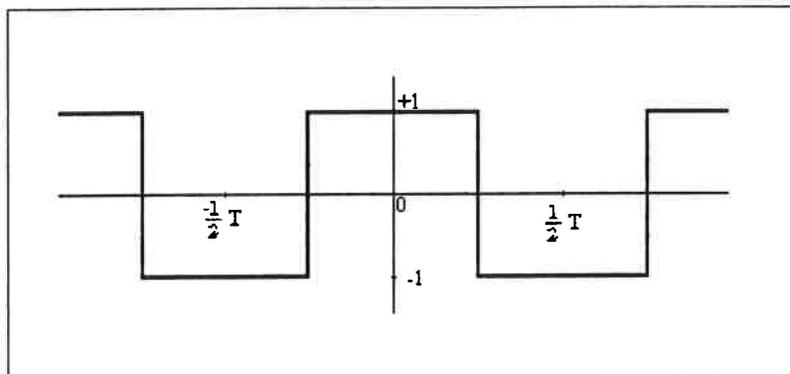


Figura 32. Onda quadrada – forma simétrica

Pode-se igualmente escolher a origem como a mostrada na Figura 32. Neste caso a função $f(t)$ seria definida pelas seguintes expressões:

$$f(t) = -1, \quad -\frac{1}{2}T < t < -\frac{1}{4}T$$

$$f(t) = 1, \quad -\frac{1}{4}T < t < \frac{1}{4}T$$

$$f(t) = -1, \quad \frac{1}{4}T < t < \frac{1}{2}T, \quad e$$

$$f(t+T) = f(t)$$

A função agora é par e, portanto,

$$\begin{aligned}
 b_n &= 0 \quad e \\
 a_0 &= \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) dt \\
 a_0 &= \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{-\frac{T}{4}} (-1) dt + \int_{-\frac{T}{4}}^{\frac{T}{4}} (+1) dt + \int_{\frac{T}{4}}^{\frac{T}{2}} (-1) dt \\
 &= 0
 \end{aligned}$$

Pode-se observar esta condição, uma vez que $a_0/2$ representa o valor médio de $f(t)$ sobre um ciclo completo (o termo DC na terminologia elétrica) que é claramente zero. Os restos dos coeficientes são dados por:

$$\begin{aligned}
 a_n &= \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) \cos \frac{2\pi n t}{T} dt \\
 &= \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{-\frac{T}{4}} (-1) \cos \frac{2\pi n t}{T} dt + \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{4}}^{\frac{T}{4}} (+1) \cos \frac{2\pi n t}{T} dt + \frac{2}{T} \int_{\frac{T}{4}}^{\frac{T}{2}} (-1) \cos \frac{2\pi n t}{T} dt \\
 &= \frac{1}{n\pi} \left\{ - \left[\text{sen} \frac{2\pi n t}{T} \right]_{-\frac{T}{2}}^{-\frac{T}{4}} + \left[\text{sen} \frac{2\pi n t}{T} \right]_{-\frac{T}{4}}^{\frac{T}{4}} + \left[\text{sen} \frac{2\pi n t}{T} \right]_{\frac{T}{4}}^{\frac{T}{2}} \right\} \\
 &= \frac{1}{n\pi} \left\{ - \text{sen} \left(-\frac{\pi n}{2} \right) + \text{sen} \frac{\pi n}{2} - \text{sen} \left(-\frac{\pi n}{2} \right) + \text{sen} \frac{\pi n}{2} \right\} \\
 &= \frac{2}{n\pi} \text{sen} \frac{\pi n}{2}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \therefore a_n &= 0, \quad \text{para } n \text{ par} \\
 a_n &= +\frac{4}{n\pi}, \quad \text{para } n = 1, 5, 9, \dots \quad \text{ou } n = 4k - 3 \\
 a_n &= -\frac{4}{n\pi}, \quad \text{para } n = 3, 7, 11, \dots \quad \text{ou } n = 4k - 1
 \end{aligned}$$

Onde $k = 1, 2, 3, \dots$

CAPÍTULO 6 - TRANSFORMADA DE FOURIER E TRANSFORMADA DISCRETA DE FOURIER

6.1. GENERALIDADES

Um sinal pode ser analisado de duas formas diferentes:

1. Em domínio de tempo.
2. Em domínio de frequência

O *domínio de tempo* é a forma com a qual as pessoas estão mais familiarizadas. Ele é como um traço num osciloscópio onde a coordenada vertical representa a amplitude do sinal, e a coordenada horizontal representa a variável de tempo.

A segunda representação é o *domínio de frequência*. Ele é como um traço em um analisador de espectros, onde a coordenada horizontal representa a variável de frequência e a coordenada vertical representa a amplitude do sinal naquela frequência.

Qualquer sinal pode ser descrito completamente em ambos os domínios. Dependendo do que se objetiva fazer com o sinal, um domínio tende a ser mais simples e conveniente do que outro. Então, ao invés de se ater em operações complicadas no sinal de domínio de tempo pode-se passar para o domínio de frequência onde os cálculos matemáticos são muito mais simples.

Pode-se ir de um domínio ao outro através do uso de uma ferramenta chamada *Transformada de Fourier*, sendo ela a base matemática da análise de frequência, onde se apresenta sob diversas formas, dependendo do tipo de sinal analisado. Todas estas formas têm em comum o fato de se assumir que o sinal seja composto de um número (em certos casos, infinito) de componentes (co-) senoidais em várias frequências, cada uma delas com uma dada amplitude e fase inicial.

Como já foi visto, a análise de Fourier é uma família de técnicas matemáticas, todas baseadas na decomposição de sinais em senóides. A Transformada Discreta de Fourier (ou DFT – Digital Fourier Transform) é um membro da família em empregado em sinais digitalizados. O estudo da DFT se dará com o que se chama de DFT real, que é uma versão da transformada de Fourier que utiliza números reais para representar os sinais de entrada e saída. A outra variação da DFT é a DFT - complexa, que como o próprio nome diz utiliza números complexos, sendo uma técnica bastante sofisticada. Os algoritmos da decomposição de Fourier são o coração da DFT, sendo que a DFT complexa é a base para a aplicação da Transformada Rápida de Fourier (FFT).

6.1.1. Tipos de sinais

Um sinal é a descrição de como um parâmetro varia com outro parâmetro. Exemplos de sinais são os circuitos eletrônicos, onde a voltagem muda com o tempo; e as imagens, onde o brilho varia com a distância.

Antes de se discutir os conceitos da Transformada de Fourier e da Transformada Discreta de Fourier (DFT), deve-se levar em conta os vários tipos de sinais que são encontrados na prática. O tipo de sinal a ser analisado tem influência no tipo de análise a ser feita e também na escolha dos parâmetros de análise. Uma breve explicação sobre os sinais será dada neste item. O fluxograma da Figura 33 ilustra uma das divisões básicas dos tipos de sinais adotadas por alguns especialistas (RANDALL, 1977).

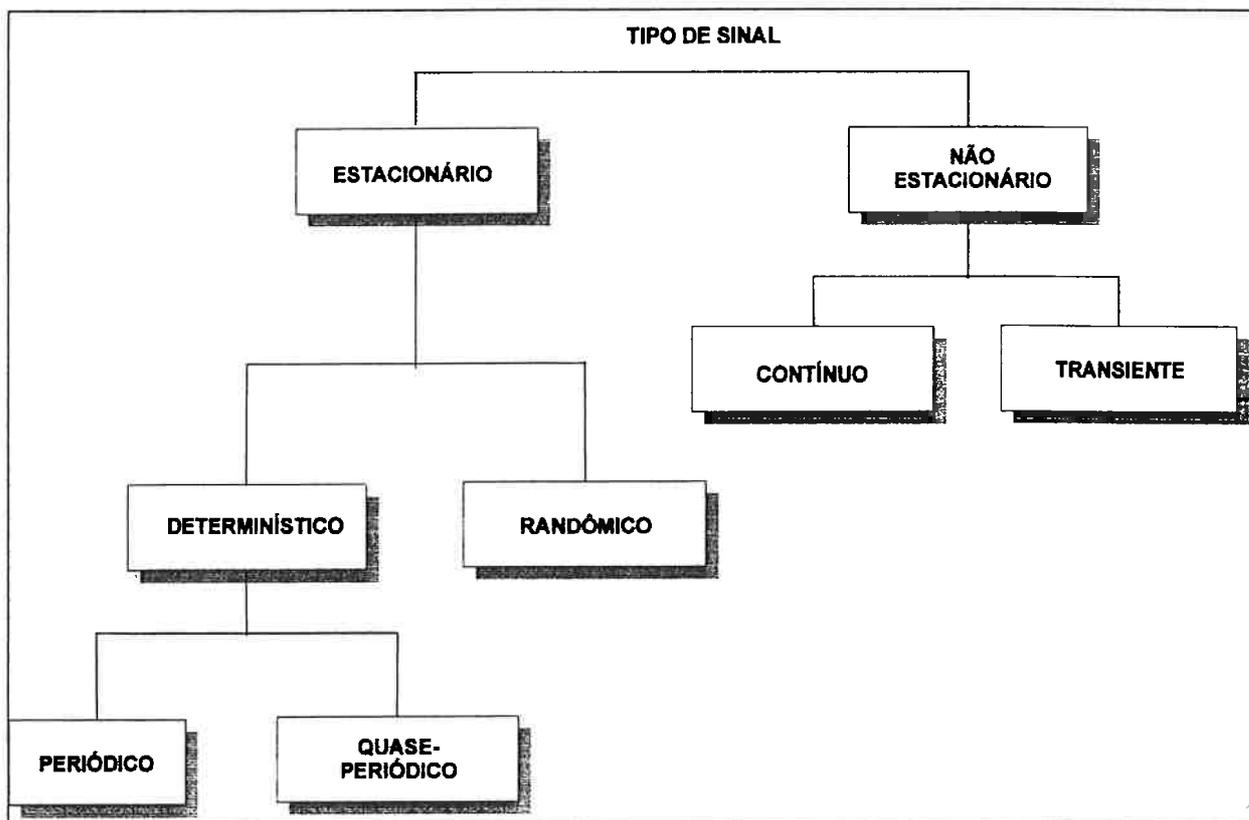


FIGURA 33. Classificação dos sinais

A divisão mais fundamental é a divisão em sinais estacionários e não-estacionários. Na prática, apesar de não obedecer ao rigor da definição de sinal estacionário randômico, é suficiente interpretar as funções estacionárias como sendo aquelas cujas propriedades médias não variam com o tempo e que são independentes de uma amostra em particular utilizada para determiná-las. Isto se aplica tanto a sinais determinísticos como randômicos, mas deve-se salientar que no último caso, os resultados obtidos em diferentes medições não são necessariamente idênticos, apenas igualmente válidos. Os valores instantâneos dos sinais determinísticos são previsíveis em todos os instantes no tempo, ao passo que com os sinais randômicos são apenas as propriedades estatísticas como valores médios, variâncias, etc., que podem ser conhecidas.

Os sinais não-estacionários podem ser grosseiramente divididos em sinais não-estacionários contínuos (sendo um bom exemplo a fala humana) e sinais transientes, que podem ser definidos como aqueles que começam e terminam em zero. Embora esteja claro que na prática mesmo

sinais como a fala devem começar e terminar em algum instante, e que o sinal transiente deve ser tratado como um todo, enquanto que um sinal contínuo não-estacionário, como a fala, será normalmente analisado em pequenas seções, cada uma das quais com uma frequência em particular e que será quase-estacionária. O objetivo aqui é a melhor compreensão dos sinais transientes, uma vez que as vibrações de terreno podem ser classificadas como tais.

Outra forma de classificação de um sinal é aquela na qual este pode ser contínuo ou discreto e periódico ou aperiódico. A combinação destas duas características gera quatro categorias, mostradas na Figura 34 e apresentadas na seqüência (SMITH,1999).

Tipo de Transformada	Exemplo de Sinal
<p>Transformada de Fourier sinais que são contínuos e aperiódicos</p>	
<p>Séries de Fourier sinais que são contínuos e periódicos</p>	
<p>DFT no tempo sinais que são discretos e aperiódicos</p>	
<p>DFT sinais que são discretos e periódicos</p>	

FIGURA 34. Categorias de sinais e suas transformadas.

Aperiódico-Contínuo – Nesta categoria incluem-se os decaimentos exponenciais e a curva Gaussiana. Estes sinais se estendem tanto para o infinito positivo como para negativo sem se repetir em um padrão periódico. A Transformada de Fourier para este tipo de sinal é chamada simplesmente de Transformada de Fourier.

Periódico-Contínuo – São as ondas senoidais, ondas quadradas, e qualquer tipo de onda que se repete em um padrão regular desde o infinito negativo até o infinito positivo. A versão desta transformada de Fourier é chamada de Série de Fourier.

Aperiódico-Discreto – Estes sinais são apenas definidos em pontos discretos entre o infinito negativo e o positivo, e não se repetem em um modelo periódico. Este tipo de transformada de Fourier é chamada de Transformada Discreta de Fourier de Tempo.

Periódico-Discreto – Estes são sinais discretos que se repetem num modelo periódico do infinito negativo ao positivo. Esta classe de transformada de Fourier é chamada às vezes de Séries Discretas de Fourier, mas na maioria das vezes é chamada de Transformada Discreta de Fourier – DFT.

6.1.2. Sistema e transformação de sinal

Um sistema é qualquer processo que produz um sinal de saída em resposta a um sinal de entrada e pode ser analisado no domínio de tempo através do uso da convolução. A *Convolução* é uma operação matemática e será explicada no decorrer deste capítulo. Uma análise similar ao do domínio de tempo pode ser feita no domínio de frequência. Usando a Transformada de Fourier, cada sinal de entrada pode ser representado como um grupo de ondas co-senoidais, cada um com uma amplitude e deslocamento de fase específicas. De forma análoga a Transformada Discreta de Fourier (DFT) pode ser usada para representar cada sinal de saída. Isto significa que cada sistema linear pode ter a descrição completa de como este muda a amplitude e fases das ondas co-senoidais que passam por ele. Esta informação é chamada de *resposta de frequência*, e, uma vez que ambas as respostas de impulso e de frequência contém informações completas sobre o sistema, deve haver uma correspondência entre ambas onde se pode calcular uma resposta a partir da outra. A relação entre a resposta de impulso e a resposta de frequência é uma das bases do processamento de sinais, onde o *sistema de resposta de frequência é a Transformada de Fourier da resposta de impulso*.

6.2. TRANSFORMADA DE FOURIER

O termo Transformada é largamente utilizado no Processamento Digital de Sinais e em termos gerais significa um procedimento fixo que transforma um conjunto de dados em outro conjunto de dados. A Transformada de Fourier, por sua vez, é um tipo de procedimento que possui regras e propriedades próprias que permitem uma transformação de dados.

6.2.1. Definição

A Transformada de Fourier é usada em análise de sistemas lineares, ótica, processos de modelagem randômica e estudos de sísmica. Em essência, ela decompõe ou separa uma onda ou função em senóides de diferentes frequências cuja soma se equivale à onda original. Ela identifica e distingue as senóides de diferentes frequências e suas respectivas amplitudes. Assim, analisando-se uma função que descreve a amplitude em termos de frequência pode-se obter a intensidade do sinal em uma faixa particular de frequências (HOFFMAN, 2001).

Deste modo, a Transformada de Fourier de $f(t)$ é definida como:

$$F(s) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-i2\pi st} dt \quad (29)$$

Aplicando a mesma transformada a $F(s)$ obtém-se:

$$f(w) = \int_{-\infty}^{\infty} F(s) e^{-2iws} ds \quad (30)$$

Se $f(t)$ é uma função par de t , então $f(w) = f(t)$

Se $f(x)$ é uma função ímpar de t , então $f(w) = -f(t)$. Quando $f(t)$ não é nem par nem ímpar, na maioria das vezes, esta pode ser dividida em partes pares ou ímpares.

6.2.2. Transformada inversa

Para evitar confusões, é comum se escrever a Transformada de Fourier e o seu inverso de modo que possam exibir a sua reversibilidade. Assim, a transformada inversa é definida por:

$$F(s) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-i2\pi st} dt \quad (31)$$

$$f(t) = \int_{-\infty}^{\infty} F(s) e^{i2\pi st} ds \quad (32)$$

de modo que:

$$f(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \left[\int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-i2\pi st} dt \right] e^{i2\pi st} ds \quad (33)$$

Esta última expressão só é válida à medida que a integral existe e quaisquer descontinuidades, normalmente representadas por integrais múltiplas da forma:

$$\frac{1}{2} [f(t+) + f(t-)],$$

são finitas. A quantidade da transformada $F(s)$ é muitas vezes representada como $\mathcal{F}(s)$ enquanto que a transformada de Fourier é representada por \mathcal{F} (HOFFMAN, 2001).

6.2.3. Adequação das funções: funções pares e funções ímpares

Há funções para as quais a Transformada de Fourier não existe. No entanto, a maioria das funções físicas possui uma Transformada de Fourier, especialmente se a transformada representa uma quantidade física. Outras funções, para casos limitados, também podem ser tratadas com a teoria de Fourier. De fato, muitas das funções teóricas comuns são na verdade casos limitados da teoria de Fourier.

Conseqüentemente, na maioria das vezes, as funções ou ondas podem ser divididas em partes pares e ímpares, como pode ser observado nas seguintes expressões:

$$f(t) = P(t) + I(t) \tag{34}$$

onde:

$$P(t) = \frac{1}{2}[f(t) + f(-t)], \text{ função par} \tag{34.1}$$

$$I(t) = \frac{1}{2}[f(t) - f(-t)], \text{ função ímpar} \tag{34.2}$$

além disso, $P(t)$ e $I(t)$ são, em geral, complexos. Nesta representação, a transformada de Fourier de $f(t)$ se reduz a:

$$2 \int_0^{\infty} P(t) \cos(2\pi ts) dt - 2i \int_0^{\infty} I(t) \text{sen}(2\pi ts) dt \tag{35}$$

6.2.4. Propriedades da Transformada de Fourier

Segue-se então que uma função par tem uma transformada par e que uma função ímpar tem uma transformada ímpar. A Tabela 5 (HOFFMAN, 2001) apresenta as propriedades de simetria para a Transformada de Fourier enquanto que a Tabela 6 apresenta algumas das suas propriedades gerais.

TABELA 5. Propriedades de simetria da Transformada de Fourier

<i>Função</i>	<i>Transformada</i>
Real e par	Real e par
Real e ímpar	Imaginária e ímpar
Imaginária e par	Imaginária d par
Complexa e par	Complexa e par
Complexa e ímpar	Complexa e ímpar
Real e assimétrica	Complexa e assimétrica
Imaginária e assimétrica	Complexa e assimétrica
Real par mais imaginária ímpar	Real
Real ímpar mais imaginária par	Imaginária
Par	Par
Ímpar	ímpar

TABELA 6. Resumo de algumas propriedades da Transformada de Fourier (ROMÃO et al., 1994)

Propriedades	Domínio do tempo	Domínio da Frequência
Linearidade	$x(t) + y(t)$	$X(t) + Y(t)$
Simetria	$H(t)$	$h(-f)$
Escalamento no Tempo	$h(kt)$	$\frac{1}{k} H \frac{f}{k}$
Escalamento na Frequência	$\frac{1}{k} H \frac{t}{k}$	$H(kf)$
Modulação no Tempo	$h(t) e^{j2\pi f_0 t}$	$H(f-f_0)$
	$h(t)$ "par"	$H(f) = R(f)$ "real"
	$h(t)$ "ímpar"	$H(f) = jI(f)$ "imaginário"
	$h(t)$ "real"	$H(f) = R(f) + jI(f)$ "par/ímpar"
	$h(t)$ "imaginário"	$H(f) = R(f) + jI(f)$ "ímpar/par"

Além destas propriedades destacam-se ainda outras características como:

- "Shifting"

A relação entre o espectro de uma onda que sofre uma mudança no tempo e o espectro da onda original é dada por esta propriedade. Sendo $\mathcal{F}\{f(t)\} = F(s)$ e t_0 uma constante real, então o espectro da onda num dado tempo $t-t_0$ é dado por:

$$\mathcal{F}\{f(t - t_0)\} = F(s) e^{j2\pi_0 s} \tag{36}$$

- Teorema de Parseval

A potência de um sinal representada por uma função $h(t)$ é a mesma se computada no espaço de sinal ou no espaço da frequência (transformada), o que significa que:

$$\int_{-\infty}^{\infty} h^2(t) dt = \int_{-\infty}^{\infty} |H(f)|^2 df \tag{37}$$

E o espectro de potência, $P(f)$, é dado por:

$$P(f) = |H(f)|^2, \quad -\infty \leq f \leq +\infty \tag{38}$$

- Teorema da amostragem.

Um sinal $f(t)$ limitado por bandas é um sinal que não possui componentes espectrais acima de uma frequência B Hz; ou seja, $F(s) = 0$ para $|s| > 2\pi B$. A Teoria da amostragem afirma que um sinal real, $f(t)$, que é limitado em B Hz pode ser reconstruído sem erros a partir de amostras

coletadas uniformemente a uma taxa $R > 2B$ de amostras por segundo. Esta frequência mínima $F_s = 2B$, é chamada de *Frequência de Nyquist* ou *Taxa de Nyquist*. O intervalo de amostragem correspondente $T=1/2B$ (onde $t=nT$), é chamado de *Intervalo de Nyquist*. Um sinal limitado por bandas a B Hz que é amostrado em frequências abaixo da frequência de Nyquist $2B$, isto é que foi amostrado num intervalo $T > 1/2B$, é chamado de sinal sub-amostrado.

- *Aliasing ou sobreposição*

Várias dificuldades práticas são encontradas na reconstrução de um sinal através de suas amostras. O teorema da amostragem assume que um sinal é limitado por bandas. Na prática, no entanto, os sinais são limitados pelo tempo e não por bandas. Isto resulta no fato de que obter uma frequência adequada de amostragem, que não perca as informações desejadas, pode ser bastante difícil. Quando um sinal é sub-amostrado, seu espectro tem caudas sobrepostas, o que significa que não há informações completas a respeito do espectro e não é possível recuperar a função $f(t)$ do sinal amostrado. Neste caso, o espectro tem caudas que se invertem e causam a sobreposição (aliasing);

- *Teorema da convolução*

A Convolução é, de longe, a operação matemática mais importante do Processamento Digital de Sinais e por isso ela será melhor detalhada no item 6.3.

6.3. CONVOLUÇÃO

6.3.1. Conceituação

A Convolução é o processo matemático de combinar dois sinais para formar um terceiro. Ela é a mais simples e importante técnica no Processamento Digital de Sinais (DSP). Usando a estratégia de decomposição de impulso, os sistemas são descritos por um sinal chamado resposta de impulso. A convolução é importante porque relaciona os três sinais de interesse: o sinal de entrada, o sinal de saída e a resposta de impulso, e também porque fornece as ferramentas para se trabalhar no DSP.

Pode-se resumir da seguinte forma o entendimento de como um sistema muda um sinal de entrada para um sinal de saída:

1. o sinal de entrada pode ser decomposto em um conjunto de impulsos, cada um dos quais pode ser visto como uma função delta escalonada e deslocada;
2. a saída resultante de cada impulso é uma versão escalonada e deslocada da resposta de impulso;
3. o sinal de saída completo pode ser obtido pela adição destas respostas de impulso escalonadas e deslocadas.

Em outras palavras, se a resposta de impulso de um sistema for conhecida, então pode-se calcular qual será a saída para qualquer sinal de entrada, ou seja, tudo sobre o sistema necessário ao seu entendimento será conhecido. A resposta de impulso recebe nomes diferentes em função da sua aplicação: quando o sistema é um filtro, a resposta de impulso é chamada de semente ou núcleo filtrante("filter kernel") ou simplesmente "kernel"; no caso de processamento de imagem, ela é chamada de função espalhada de ponto. Embora estes termos sejam utilizados de forma ligeiramente diferente, o significado é o mesmo: o sinal produzido por um sistema quando a entrada é uma função delta.

A convolução é uma operação matemática formal assim como a multiplicação, a adição e a integração. A adição combina dois números e produz um terceiro, enquanto que a convolução combina dois sinais e produz um terceiro sinal.

6.3.2. Integral de Convolução

Outra integral importante para o entendimento da Transformada Discreta de Fourier é a integral de convolução.

Para a convolução de duas funções no tempo $f(t)$ e $h(t)$, ela é definida matematicamente como:

$$g(t) = \int_{-\infty}^{\infty} f(\tau)h(t - \tau)dt \quad (39)$$

Por conveniência, esta expressão é freqüentemente representada simbolicamente como:

$$g(t) = f(t) * h(t) \quad (40)$$

onde o asterisco (*) significa "convolvido com" .

6.3.3. Teoria da Convolução

A Teoria da Convolução afirma que uma Transformada de Fourier (direta ou inversa, discutida anteriormente) transforma uma convolução em multiplicação e vice-versa. No caso representado pelas equações (39) e (40) ocorre o seguinte:

Se

$$G(f) = F \{g(t)\}, \text{ ou seja, a Transformada de Fourier direta de } g(t), \quad (41)$$

$$F(f) = F \{f(t)\} \quad (41.1)$$

$$\text{e } H(f) = F \{h(t)\} \quad (41.2)$$

e se

$$g(t) = f(t) * h(t) \quad (41.3)$$

então

$$G(f) = F(f) H(f) \quad (41.4)$$

6.4. TRANSFORMADA DISCRETA DE FOURIER

6.4.1. Limitações da Transformada de Fourier

A Transformada de Fourier somente pode ser empregada para a análise espectral de um sinal com domínio de tempo contínuo. Infelizmente, os computadores não podem lidar com sinais contínuos, pois eles necessitam de amostras discretas para a análise espectral, e desta forma, necessitam de uma ferramenta que utilize amostras discretas. Esta ferramenta se chama *Transformada Discreta de Fourier (DFT)*.

O processamento digital de sinais trabalha intrinsecamente num domínio de tempo discreto, ou seja, as grandezas físicas (sinais) são invariavelmente amostradas e discretizadas a fim de que possam ser processadas convenientemente. Segue-se o exemplo de uma função $f(t)$, cuja transformada é $F(\omega)$, e a amostragem corresponde à multiplicação de $f(t)$ por um trem de impulsos equidistantes de um tempo T (chamado de período de amostragem). De acordo com o teorema da convolução no item 6.2. sabe-se que esta multiplicação no tempo corresponderá a uma convolução na frequência. As funções obtidas a partir deste ponto apresentam duas inconveniências:

- a) a distorção na transformada do sinal amostrado em função da superposição dos espectros decorrente da convolução. Isto pode ser minimizado diminuindo-se o período de amostragem, porém com o inconveniente de ter que se aumentar o número de amostras a serem consideradas (o que às vezes é inviável);
- b) a transformada obtida é uma função contínua, o que também não é conveniente para a manipulação digital.

Para que não ocorram problemas no processamento do sinal, deve-se considerar somente um certo número de amostras do sinal amostrado, ou seja, deve-se considerar uma amostragem do sinal no domínio de frequência (convolução do sinal amostrado no tempo) e chega-se a uma forma bastante conveniente onde ambas as funções (no tempo e na frequência) são representadas por valores discretos. A Transformada Discreta de Fourier, portanto, requer que ambas as funções (de tempo e frequência) sejam modificadas de forma a se tornarem periódicas (ROMÃO et. al., 1994).

6.4.2. Representação matemática da Transformada Discreta de Fourier

A forma contínua da Transformada de Fourier é dada pela seguinte expressão (COBBY, 2001):

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j\omega t} dt \quad (42)$$

e ao se discretizar a função contínua $x(t)$ obtém-se:

$$x(t) \rightarrow x(n\Delta t) \equiv x(n) \quad (43)$$

que por sua vez resulta em :

$$\omega(t) \rightarrow 2\pi k \Delta f n \Delta t, \quad (44)$$

mas $\Delta f = 1/(N\Delta t)$, e portanto $\omega t \rightarrow 2\pi nk / N$

O que se obteve até agora foi o equivalente ao sinal de tempo discreto $x(n)$. Substituindo-o na forma contínua da Transformada de Fourier obtém-se a seguinte expressão:

$$X(k \Delta \omega) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j\left(\frac{2\pi nk}{N}\right)} \quad (45)$$

Comparando-se esta última equação com a equação 42 nota-se que a integral foi substituída por uma somatória. À medida que N (número de amostras) aumenta, o resultado tende ao infinito, e portanto, para que isto não aconteça deve-se multiplicar por $1/N$, o que resulta na expressão

$$X(K) \equiv X(K\Delta\omega) \equiv \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j\left(\frac{2\pi nk}{N}\right)} \quad (46)$$

A somatória é agora o equivalente discreto de uma integração contínua. Esta é a **Transformada Discreta de Fourier (DFT)**, utilizada para se produzir uma análise de freqüência de sinais não-periódicos discretos.

A equação acima mostra como um sinal de entrada no domínio de tempo de N pontos pode ser transformado para uma resposta de freqüência no domínio de freqüência. Este processo, chamado de decimação, tem início ao se quebrar este sinal em duas partes iguais, fazendo com que se tenha amostras pares e ímpares. Este processo de decimação do sinal é de fácil visualização e um exemplo disto é a primeira quebra por DFT de $N/2$ pontos mostrada a seguir, na Figura 35.

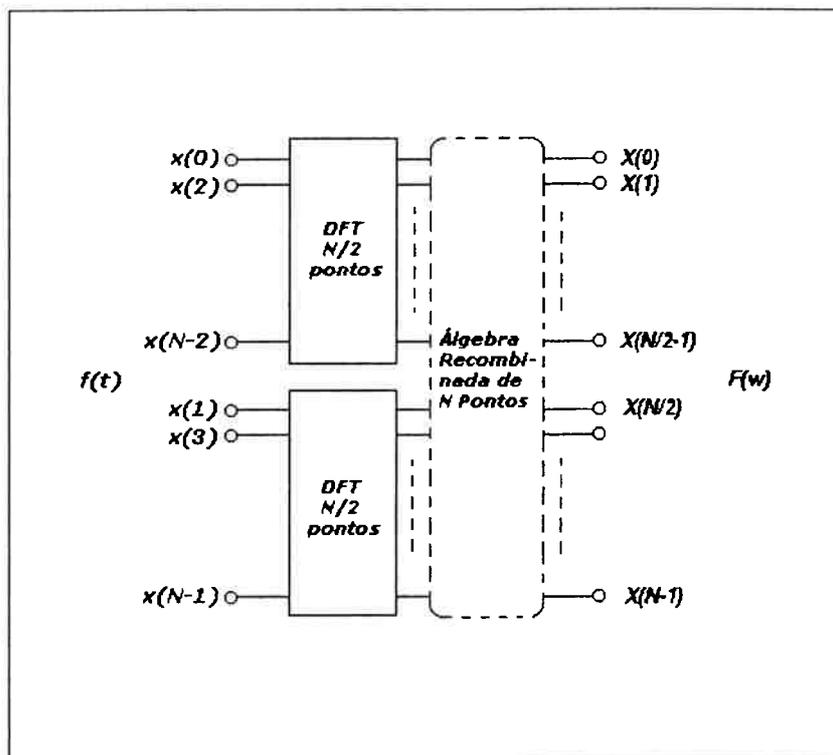


FIGURA 35. Primeira quebra de uma DFT para N pontos.

Ao se observar a equação da DFT, nota-se que é bastante complicado trabalhar com várias adições e multiplicações que envolvem números complexos. Mesmo um simples sinal de oito amostras requer (para a DFT) 49 multiplicações de complexos e 56 adições de complexos. Neste nível ainda é possível trabalhar com este número de operações. No entanto, um sinal verdadeiro pode ter 1024 amostras que requerem mais de 20.000.000 de multiplicações e adições complexas, o que torna quase impraticável este tipo de operação (COBBY, 2001). Para que este cálculo seja viável (mais rápido) é necessário usar uma ferramenta chamada de *Transformada Rápida de Fourier (FFT)*, que será apresentada no próximo capítulo.

CAPÍTULO 7 - TRANSFORMADA RÁPIDA DE FOURIER (FFT)

7.1. INTRODUÇÃO

A *Transformada Rápida de Fourier (FFT)* ganhou notoriedade a partir de 1965 (através de Cooley e Tukey) por ser um método engenhoso e muito mais rápido do que a DFT para valores de N (número de amostras na seqüência) altos.

A ferramenta proposta por Cooley e Tukey (LEPPLE, 2001) é baseada no fato de que a DFT tem redundâncias inerentes. Na DFT, sabe-se que existe um arranjo de amostras discretas como por exemplo, o sinal com 1024 pontos do capítulo anterior, onde o ponto n é denotado por $f(n)$. Então, escolhe-se uma freqüência para ser analisada na amostra (embora haja algumas restrições para a aplicação de algumas freqüências) e gera-se uma onda senoidal e outra co-senoidal (o seno + um ângulo de fase de 90 graus). Chamando-os de $s(n)$ e $c(n)$ respectivamente, deve-se calcular então a seguinte expressão:

$$X(m) = \frac{1}{n} \sum_{k=0}^{N-1} x(k) e^{\left[-j\left(\frac{2\pi mk}{n}\right)\right]} \quad (47)$$

No entanto, elevar o número e a uma potência dada por um número complexo é bastante trabalhoso. LEPPLE (1996), em seu artigo afirma que há uma demonstração segundo a qual a expressão acima é quase equivalente a:

$$\frac{1}{n} \sqrt{\left[\left(\sum_{i=1}^n f(n) s(n) \right)^2 + \left(\sum_{i=1}^n f(n) c(n) \right)^2 \right]} \quad (48)$$

Esta multiplicação corresponde à modulação de sinais, e um exemplo desta aplicação é o seu uso na transmissão e recepção de ondas de rádio AM.

Esta última equação significa que pode-se calcular a soma de todos os produtos da função no ponto n e a senóide no ponto n . Então, calcula-se a soma da função no ponto n e a co-senóide no ponto n . Eleva-se ao quadrado ambas as somas, adiciona-se os números resultantes e então extrai-se a raiz quadrada para se obter a intensidade relativa à freqüência para f . Ao final deste processo, em muitos casos, o que interessa é a magnitude do número complexo (denotado de $X(f)$ acima) que a transformada fornece. A intensidade relativa da freqüência f é o que $X(f)$ fornece e o

ângulo que $X(f)$ forma no plano complexo é o ângulo de fase que a senóide apresentaria na amostra original da onda.

O problema é que esta é uma operação de “ordem N^2 ”, o que significa que há duas variáveis envolvidas (número de freqüências para analisar e número de amostras) e o tempo de cálculo é proporcional ao produto destas duas variáveis.

Uma das maiores vantagens da FFT sobre os outros tipos de análise de freqüência como a compressão do tempo, é que a informação de retenção de fase permite que a transformação da função seja direcionada e feita de modo relativamente simples. Ela também permite a avaliação de uma grande número de funções aplicáveis às medições em múltiplos canais, como por exemplo correlação, coerência, funções de transferência, etc. (RANDALL, 1977).

7.2. O ALGORITMO DA FFT

Cooley e Tukey perceberam que para um determinado número de freqüências, obtém-se várias redundâncias nos pontos de cálculo. Em primeiro lugar, as ondas senoidais e co-senoidais nada mais eram do que as mesmas ondas em posições diferentes. Pode-se ir adiante apenas com o cálculo da senóide, pois com ela obtém-se depois a co-senóide simplesmente com a mudança de fase. Pode-se também usar a simetria das ondas para reduzir ainda mais o tempo de cálculo. Além disso, as ondas, à medida que as freqüências estudadas aumentam, vão se sobrepondo cada vez mais. Eles vislumbraram assim um método que envolve uma quantidade reduzida de cálculos matemáticos e que pode ser processado a uma velocidade aproximada de centenas de vezes maior do que de uma DFT com uma mesma amostra de onda. Esta é uma operação de “ordem $N \log_2 N$ ”, o que significa que para a análise de grandes números de amostras ou freqüências, o tempo de cálculo cresce aproximadamente de forma linear contra o crescimento quadrático do tempo na DFT.

Assim, com uma entrada de n pontos, a FFT apresenta n componentes de freqüências, dos quais os $n/2$ primeiros valores são válidos. (Os outros componentes são imagens de espelho dos primeiros n componentes e são considerados inválidos desde que as freqüências que eles representam não satisfaçam o Teorema de Nyquist (LEPPLE, 1996)).

A idéia por trás da FFT é a aproximação por divisão e conquista, onde se subdivide a amostra original de N pontos em duas seqüências de $N/2$, pois é muito mais fácil resolver uma série de problemas menores do que uma série maior. A DFT necessita de $(N-1)^2$ multiplicações complexas e $N(N-1)$ adições complexas.

A transformada de Fourier converte uma informação de domínio do tempo para o domínio da freqüência. A FFT, apesar do nome, não consiste em uma outra transformada, mas sim em um nome dado a uma classe genérica de algoritmos computacionalmente eficientes que implementam a DFT e são amplamente utilizados na área de processamento digital de sinais.

Na FFT, “ N ” é um número fatorável que permite que uma DFT de N pontos seja decomposta em transformadas menores. O tamanho da menor transformada é conhecido como raiz (“Radix”) do algoritmo FFT. Portanto, para uma radix-2 FFT (N é potência de dois), a menor transformada (“butterfly”, descrita a seguir) usada é uma FFT de N pontos.

7.2.1. O mecanismo da FFT

A eficiência dos algoritmos de FFT consiste no ajuste do tamanho das amostras a um número N conveniente, de tal maneira a se aproveitar a simetria e a periodicidade das exponenciais. Deste modo, existe uma série de algoritmos para a base N na base 2, 4, 8 e até 16.

No capítulo anterior foi apresentada a Transformada Discreta de Fourier (DFT), utilizada para produzir uma análise de frequência de sinais não-periódicos discretos e que notou-se que é bastante complicado trabalhar com várias adições e multiplicações que envolvem números complexos. Como a maioria dos sinais apresenta um grande número de amostras, o tempo de processamento mostra-se praticamente inviável.

Há diversas maneiras de se calcular a DFT, como por exemplo resolver equações lineares simultâneas ou através de um método de correlação. A Transformada Rápida de Fourier (FFT) é um algoritmo consideravelmente mais eficiente, que reduz em até centenas de vezes o tempo computacional de processamento. SMITH (1999) compara este avanço na velocidade de cálculo com a velocidade de aviões a jato com relação ao andar das pessoas. Sem a FFT, muitas das técnicas de processamento de sinais seriam impraticáveis. Entretanto, embora a FFT necessite de apenas algumas dezenas de linhas de códigos programação, ela possui um dos algoritmos mais complicados na DSP.

A FFT é baseada na DFT complexa, uma forma mais sofisticada do que a DFT real. Estas transformadas são chamadas de complexas ou reais pelo modo como representam os dados, ou seja, usando números complexos ou reais.

Uma vez que a FFT é um algoritmo para o cálculo da DFT complexa, é importante entender como transferir os dados da DFT real para a entrada e saída do formato DFT complexa. A DFT real transforma um sinal de domínio de tempo de N pontos em dois sinais de domínio de tempo de $N+1$ pontos. Os dois sinais no domínio de frequência são chamados de parte real e imaginária, mantendo respectivamente as amplitudes das ondas co-senoidais e senoidais.

Em comparação, a DFT complexa transforma dois sinais de domínio de tempo de N pontos em dois sinais de domínio de frequência de N pontos. Estes dois sinais de domínio de tempo são chamados de parte real e imaginária, assim como é feito com os sinais de domínio de frequência.

Já foi mencionado que a FFT é um algoritmo complicado, e os seus detalhes devem ficar aos cuidados de especialistas. A intenção deste trabalho é descrever a operação da FFT em linhas gerais, e ter o domínio dos números complexos ajuda bastante na sua compreensão.

Em notação complexa, cada um dos domínios, de tempo e freqüência, contém um sinal composto de N pontos complexos e cada um destes pontos complexos é composto por dois números, a parte real e a imaginária.

A FFT opera por meio da decomposição de um sinal de N pontos num domínio de tempo em N sinais de domínio de tempo composto cada um por um ponto simples. O segundo passo é calcular os N espectros de freqüência correspondentes a estes N sinais de domínio de tempo. Finalmente, os N espectros são sintetizados em um espectro de freqüência simples.

Por exemplo, um sinal de 16 pontos é decomposto em 4 estágios separados. O primeiro estágio subdivide o sinal de 16 pontos em dois sinais de 8 pontos cada. O segundo estágio decompõe os dados em quatro sinais de 4 pontos. Este padrão se repete até que restem N sinais compostos de pontos únicos. Uma decomposição entrelaçada é usada cada vez que um sinal é subdividido em dois, ou seja, o sinal é separado em amostras pares e ímpares. São necessários $\text{Log}_2 N$ estágios para esta decomposição, ou seja, para um sinal de 16 pontos (2^4) necessita-se de 4 estágios, um sinal de 512 (2^7) pontos necessita de 7 estágios, um sinal de 4096 (2^{12}) pontos necessita de 12 estágios, etc..

Após esta breve explicação, torna-se mais fácil entender a estrutura da decomposição, que nada mais é do que a reorganização das amostras no sinal, conforme se observa na Figura 36.

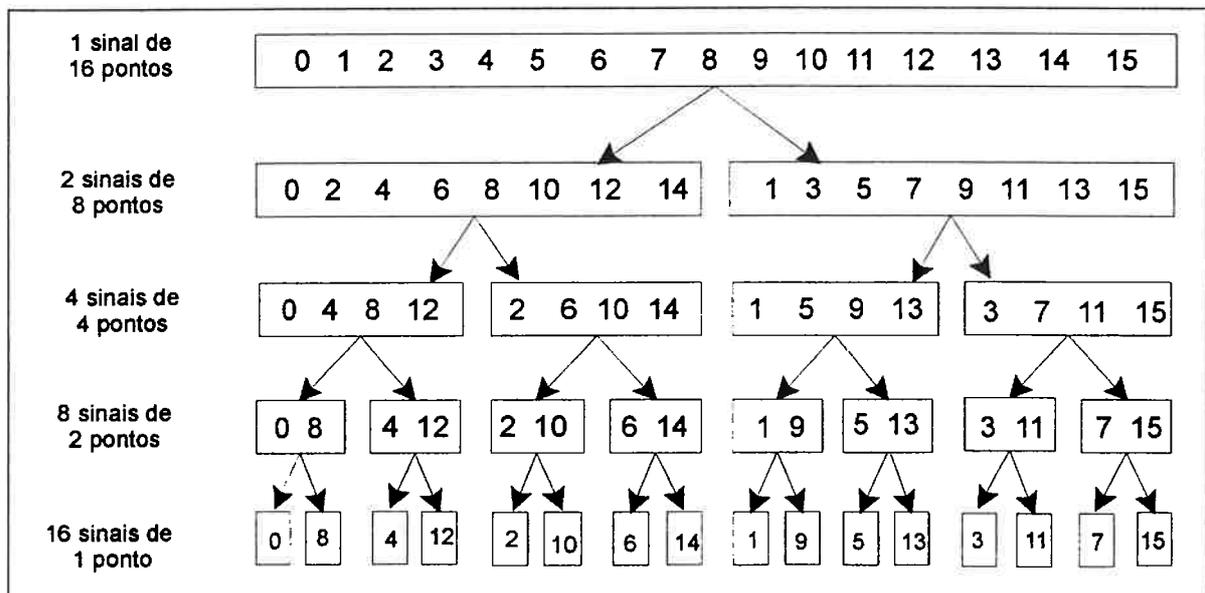


Figura 36. Decomposição do sinal numa FFT

A decomposição do domínio de tempo da FFT é normalmente feita por um algoritmo de ordenamento reverso de "bits" ("bit reversal sorting"). Isto envolve o rearranjo da ordem das N amostras de domínio de tempo por meio de contagem em binários com os bits se movendo da esquerda para a direita.

O próximo passo no algoritmo da FFT é encontrar os espectros de frequência dos sinais de um ponto do domínio de tempo. Isto é bastante facilitado pelo fato do espectro de frequência de um sinal de um ponto ser ele mesmo, e isto significa que cada um dos sinais é um espectro de frequência e não mais um sinal de domínio de tempo.

O último passo na FFT é combinar os espectros de N frequências na exata ordem reversa na qual a decomposição do domínio de tempo foi feita. Neste ponto as coisas se complicam um pouco. Infelizmente, o atalho dos bits reversos não pode ser aplicado, o que significa que se deve voltar um estágio de cada vez. No primeiro estágio, 16 espectros de frequência (de 1 ponto cada) são sintetizados em 8 espectros de frequência (de 2 pontos cada). No segundo estágio, estes 8 estágios são sintetizados em 4 espectros de frequência (de 4 pontos cada) e assim por diante. O último estágio resulta na saída da FFT, que é um espectro de frequência de 16 pontos.

Este diagrama simples de fluxo se chama “butterfly” (borboleta, Figura 37) em função da sua aparência de asa. O butterfly é o elemento básico de cálculo da FFT, onde se escolhe dois pontos complexos e os converte em outros dois pontos complexos.

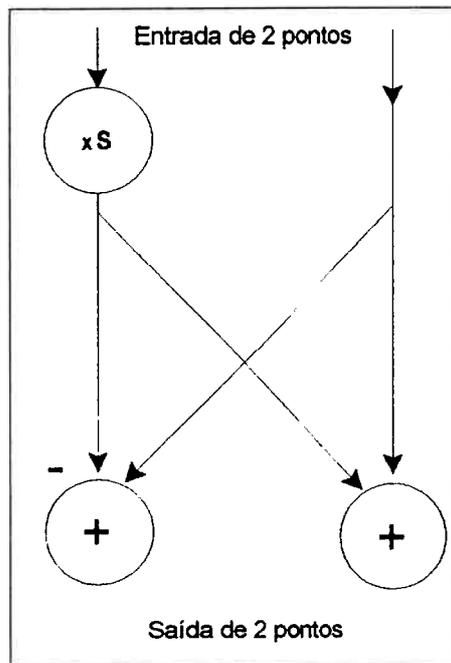


FIGURA 37. Butterfly da FFT

A Figura 38 abaixo mostra a estrutura de uma FFT inteira. A decomposição do domínio de tempo é feita por um algoritmo de ordenamento reverso de bits. A transformação dos dados decompostos para o domínio de frequência não envolve esforço algum e por isso não aparece no fluxograma.

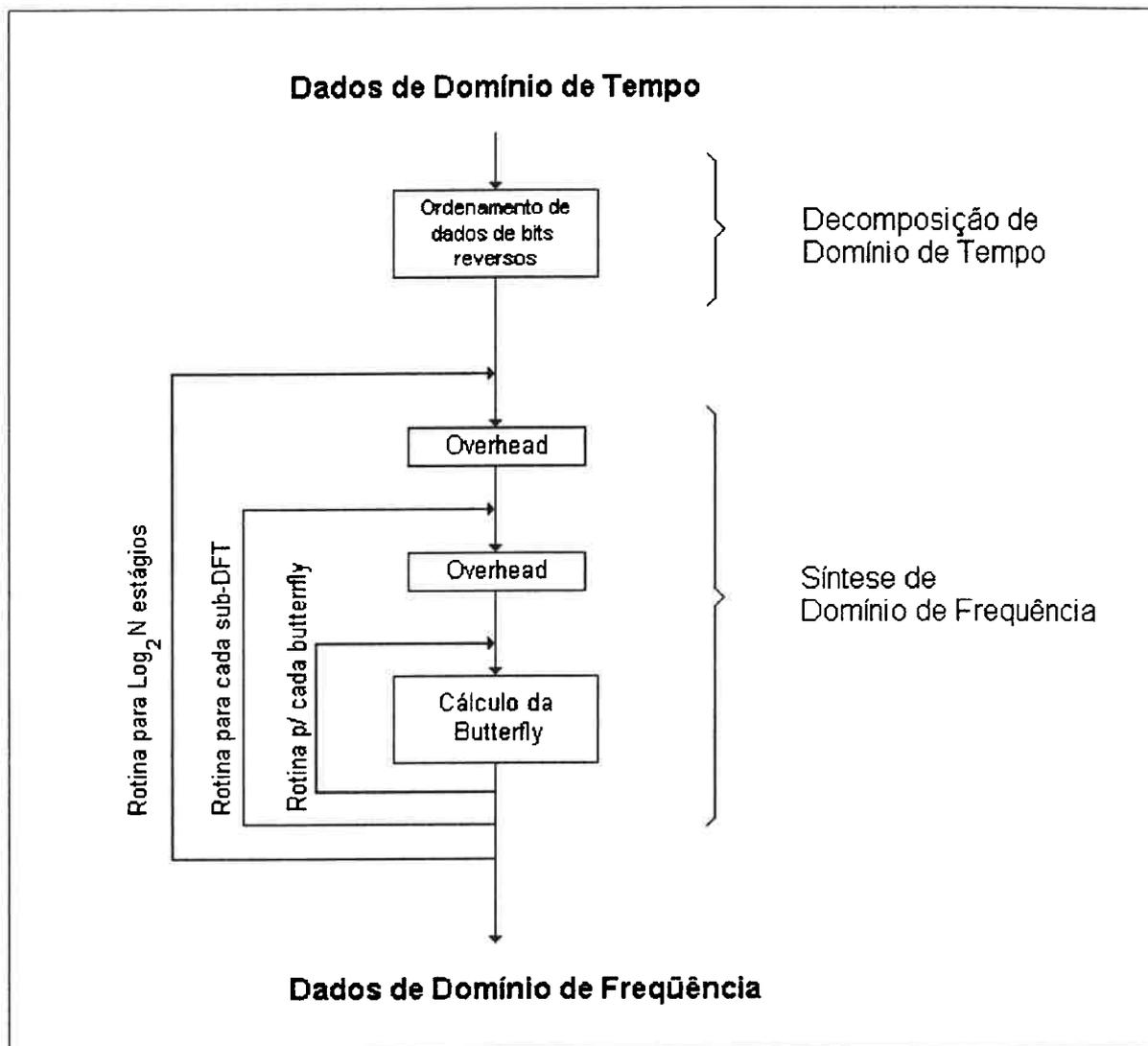


FIGURA 38. Estrutura inteira de uma FFT (SMITH, 1999)

A síntese de domínio de frequência necessita de três rotinas ou loops. O “loop” mais externo roda através dos $N \log_2 N$ estágios; o “loop” do meio se move através de cada espectro individual de frequências que está sendo trabalhado e o loop mais interno usa a butterfly para calcular os pontos em cada espectro de frequência. As caixas de “overhead” determinam a indexação inicial e final para as rotinas, assim como o cálculo das senóides necessárias às “butterflies”.

7.3. COMPARAÇÕES DE VELOCIDADE E PRECISÃO

Quando uma DFT é calculada por correlação, o programa usa duas rotinas, cada uma delas rodando com N pontos. Isto significa que o número total de operações é proporcional a N vezes N. O tempo para completar o programa é então dado por:

$$\text{Tempo de execução} = k_{DFT} N^2 \tag{49}$$

onde N é o número de pontos na DFT e k_{DFT} é a constante de proporcionalidade. Se os valores de seno e co-seno são calculados dentro destas rotinas, o k_{DFT} é igual a aproximadamente 25 microssegundos num processador Pentium 100 MHz. Se estes valores de seno e co-seno forem pré-calculados e depois armazenados nas rotinas o k_{DFT} cai para aproximadamente 7 microssegundos. Por exemplo, uma DFT de 1024 pontos (ou amostras) irá necessitar de aproximadamente 25 segundos, ou seja, quase 25 milissegundos por ponto. Isto em termos de processamento é bastante lento (SMITH, 1999).

Usando a mesma estratégia pode-se derivar o tempo de execução para a FFT. O tempo exigido para a reversão de bits é desprezível. Em cada um dos $\log_2 N$ estágios há $N/2$ computações de butterfly. Isto significa que o tempo de execução para o programa é de aproximadamente:

$$\text{Tempo de execução} = k_{FFT} N \log_2 N \quad (50)$$

O valor de k_{FFT} é de aproximadamente 10 microssegundos em um processador Pentium 100MHz. Uma FFT de 1024 pontos necessita de aproximadamente 70 milissegundos para ser executada, ou seja quase 70 microssegundos por ponto. Neste caso a FFT é mais de 300 vezes mais rápida do que a DFT calculada por correlação.

Não é apenas o fato de $N \log_2 N$ ser menor do que N^2 que pesa a favor da FFT. Esta expressão logarítmica cresce muito mais lenta à medida que N vai aumentando. Por exemplo, uma FFT de 32 pontos é aproximadamente 10 vezes mais rápida do que o método de correlação. Entretanto, uma FFT de 4096 pontos é mil vezes mais rápida. Para pequenos valores de N (entre 32 e 128), a FFT é importante, ao passo que para valores de N mais altos (acima de 1024) a FFT é absolutamente imprescindível.

A FFT possui uma outra vantagem além da velocidade de processamento: ela realiza os cálculos de forma mais precisa porque números menores de cálculos implicam menores erros.

7.4. APLICAÇÕES DA FFT

Após a definir do algoritmo de FFT a ser aplicado, seja ele do tipo radix-2, 4, 8, com decimação no tempo ou na frequência, deve-se estudar o problema de avaliação dos resultados obtidos. Esta avaliação deverá levar em conta a necessidade e a aplicação desta técnica e de como os resultados serão afetados nesta aplicação.

O algoritmo da FFT tende a se adaptar melhor às gravações de áudio digitais do que para a filtragem ou sintetização de sons. Um exemplo comum é quando se deseja fazer um programa equivalente ao que conhecemos como analisador de espectros, que os engenheiros elétricos

usam para mostrar o gráfico da frequência contida em um sinal elétrico. Pode-se usar a FFT para determinar a frequência de uma nota tocada em uma música gravada ou para tentar diferenciar e reconhecer diferentes tipos de insetos, pássaros, etc. Outra utilidade da FFT é para campos que não possuem correlação com o som, como por exemplo, o processamento de imagens e outras aplicações de caráter científico/estatístico como detectar as flutuações periódicas nos mercados de ações, nas populações de animais, a análise de sequenciamento de DNA e, o mais importante para este trabalho, a análise de frequências de eventos sísmográficos provenientes de vibrações do terreno.

As pesquisas sísmicas sempre foram um campo aberto ao uso da DFT (e conseqüentemente a FFT). De fato, ao se verificar a história da FFT, observa-se que o seu uso original se deu na tentativa de se distinguir eventos sísmicos naturais daqueles provocados por teste de explosões nucleares (COBBY, 2001). A FFT é capaz de fazer a distinção entre estes eventos porque os eventos sísmicos naturais possuem uma resposta de frequência diferente (espectro) daqueles causados por explosões.

7.4.1. Pesquisa por sísmica de reflexão

A grande ferramenta de exploração utilizada atualmente pela indústria de petróleo e gás para localizar reservas de hidrocarbonetos se chama Método de Reflexão Sísmica. Esta técnica permite que se mapeie camadas de rocha sedimentares subsuperficiais através de medições de amplitudes e tempos de reflexão de eventos obtidos através da reflexão de ondas sísmicas (som) nas camadas.

As características básicas desta técnica são:

1. Uma fonte de energia sísmica que é ativada na superfície da terrestre;
2. A propagação de ondas sísmicas em direção às camadas subseqüentes à superfície;
3. A reflexão de ondas sísmicas provenientes de interfaces separando meios geológicos que possuem propriedades acústicas não semelhantes;
4. A propagação das ondas sísmicas refletidas em direção à superfície;
5. Detecção destas ondas sísmicas refletidas na superfície usado receptores instalados a distâncias variadas em relação à fonte;
6. Registro dos sinais de cada receptor.

A Figura 39 mostra um desenho esquemático do Método de Reflexão Sísmica.

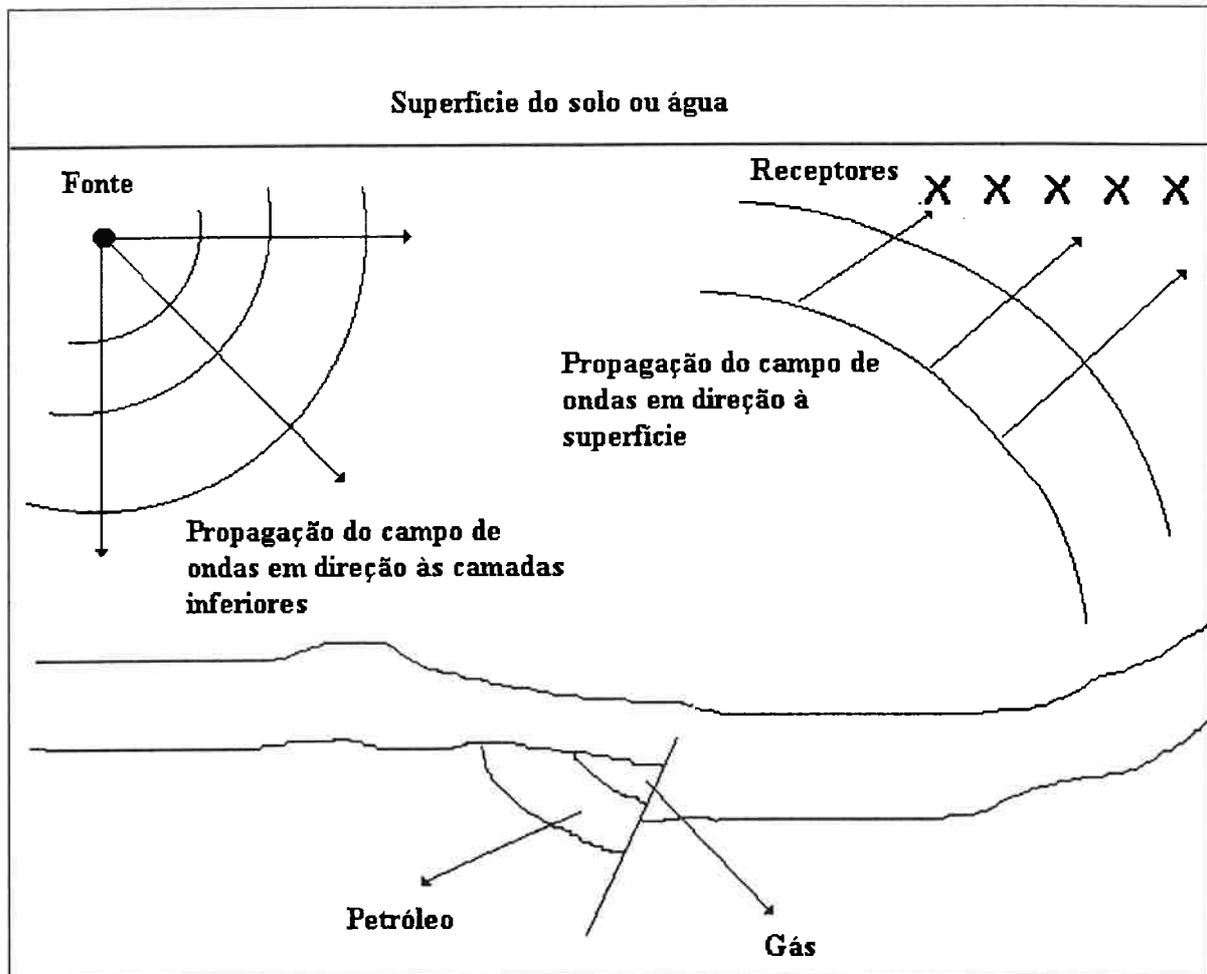


FIGURA 39. Desenho esquemático do Método de Reflexão Sísmica

Os dados registrados nos receptores são submetidos a um processamento digital de sinais extensivo para produzir uma seção sísmica que é uma representação fiel de uma seção da Terra. A partir daí são feitas as devidas interpretações com relação ao objeto de procura da pesquisa.

Um dos muitos problemas em se extrair informações dos dados é o fato de que os receptores (ou transdutores) que registram as ondas sísmicas refletidas também recolhem a assinatura da fonte (que é a onda emitida na sua ativação). Esta assinatura pode ser removida dos dados sísmicos através da deconvolução na medida em que se tenha também o registro da assinatura, assim como as informações sobre as reflexões fantasmas, absorções e resposta dos instrumentos. Estas podem ser registradas no momento da pesquisa ou então ser deduzidas mais tarde a partir dos dados. A FFT é usada então para converter o sinal para o domínio da frequência, onde a convolução entre dois sinais produz um terceiro para que se façam as interpretações necessárias.

7.4.2. Análise de frequência de sinais transientes.

Em casos onde se deseja uma análise de frequência, com larguras de filtro mais estreitas, ou quando se deseja realizar a análise de frequência sobre um sinal transiente (choques e vibrações), torna-se necessária a utilização de um sistema capaz de executar a Transformada de Fourier do sinal, capaz de transformar um sinal randômico, periódico ou transitório, numa série de Fourier equivalente, denominado de ESPECTRO DE FREQUÊNCIA. Este instrumento baseia-se na propriedade de que qualquer sinal pode ser decomposto numa série infinita de componentes de frequência que representa o mesmo sinal no domínio da frequência. Cada componente de frequência dessa série pode ser relacionada com o sinal.

Os sinais de vibração são captados através de sensores denominados transdutores. Os principais transdutores utilizados são os Transdutores Sísmicos de velocidade para vibrações do terreno e Acelerômetros Piezoelétricos para choques mecânicos e programas de manutenção de máquinas.

Os acelerômetros piezoelétricos têm-se tornado, recentemente os mais utilizados para a medida de vibração em máquinas por apresentarem uma curva de resposta em frequência muito superior aos "pick-ups" de velocidade combinadas com dimensões razoavelmente reduzidas. Além disso, esses transdutores são robustos e apresentam uma maior durabilidade (não possuem partes móveis), que os torna indicado para o rigor do trabalho diário de coleta de dados. Como em muitas situações de monitoramento, são necessárias medições de frequências bem acima de 1000 Hz, combinadas com amplitudes de vibração extremamente elevadas, e por isso, o acelerômetro piezoelétrico é a única opção.

No caso da vibração do terreno, os sismógrafos de engenharia têm-se mostrado de grande utilidade por apresentarem facilidade de operação, poder de processamento e mobilidade (seu funcionamento será explicado no capítulo seguinte). As Figuras 40 e 41 mostram a saída gráfica de um sismógrafo da Geosonics, processado por um programa específico, e que contém a análise por FFT do evento sísmico em um dos pontos dos monitoramentos sismográficos executados para a obtenção de dados de campo deste trabalho. A importância da FFT ocorre pelo fato dela obter valores de concentração de energia em cada ponto, representada neste caso pela velocidade de vibração de partícula, e associá-los com a frequência predominante da onda vibratória. Isto é particularmente importante quando se tem concentrações de energia significativas, associados às baixas frequências, que podem resultar em danos estruturais de edificações e também profundo desconforto às pessoas. Portanto, a FFT é uma ferramenta que faz parte do controle ambiental e estrutural no desmonte por explosivos.

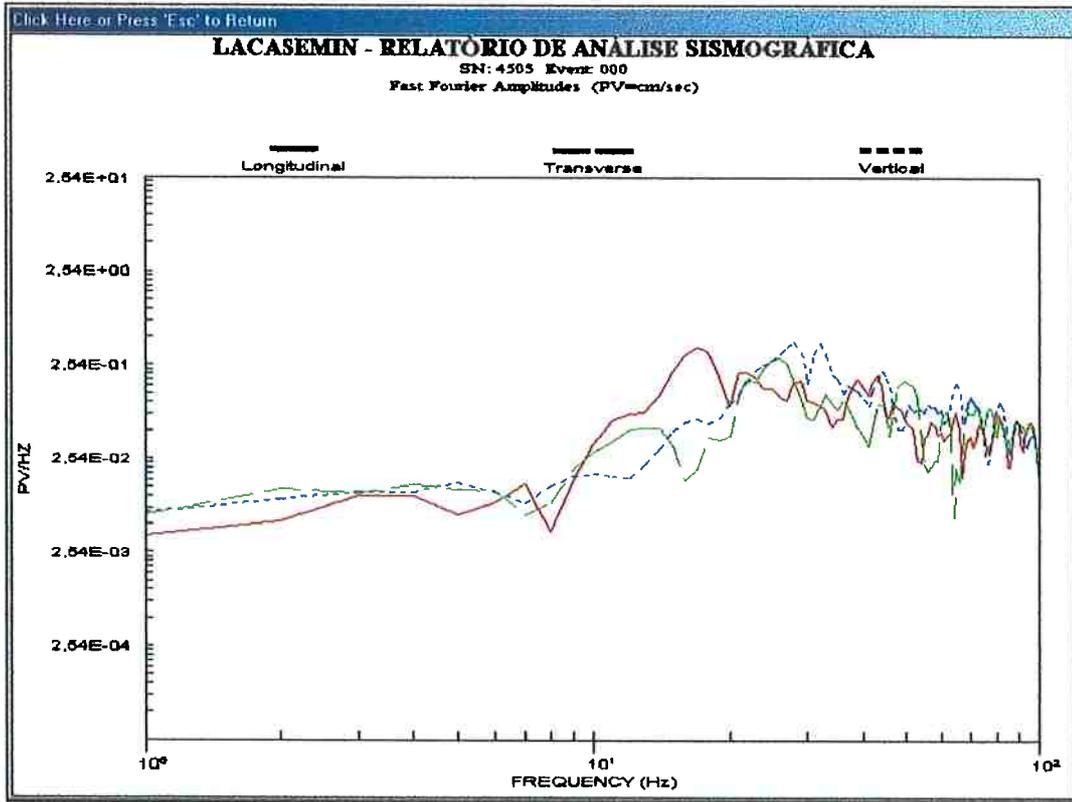


FIGURA 40. Gráfico de uma análise de FFT de uma medição na lúdice Mineração .

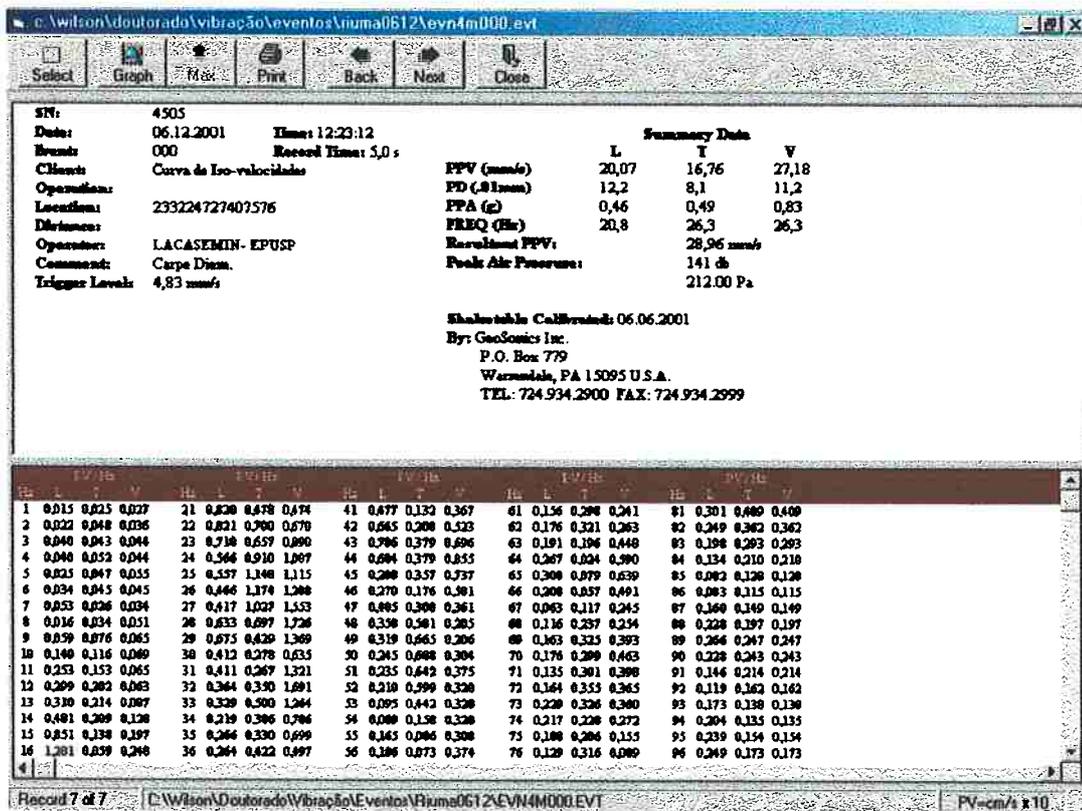


FIGURA 41. Energia (velocidade de partícula) associada à uma frequência, gerada por FFT , para a mesma medição (na lúdice Mineração) da Figura anterior.

CAPÍTULO 8 - MONITORAMENTO SISMOGRÁFICO

8.1. TIPOS DE INSTRUMENTOS UTILIZADOS PARA SE MEDIR A VIBRAÇÃO

Para se conduzir o estudo das vibrações, os seguintes requisitos são necessários:

- um sistema sismográfico que detecte e registre o movimento do terreno;
- um sistema computadorizado que analise o sinal registrado.

Os parâmetros que caracterizam as vibrações do terreno variam de acordo com o instrumento.

A Tabela 7 apresenta um resumo com as características que um sismógrafo deve apresentar.

Tabela 7. Especificações que um instrumento de medição de vibração de terreno deve apresentar. (JIMENO et al, 1995 e SCOTT , et al,1996).

PARÂMETRO	FAIXA DE SENSIBILIDADE	
	JIMENO	SCOTT
Deslocamento	10^{-4} a 10 mm	10^{-3} a 2
Velocidade de partícula	10^{-4} a 10^3 mm/s	10^{-1} a 1000 mm/s
Aceleração de partícula	10 a 10^5 mm/s ²	*
Tempo (comprimento) do pulso	0,5 a 2,0 s	0,5 a 5,0 s
Comprimento da onda	30 a 1500 m	*
Freqüência	0,5 a 100 Hz	5 a 200 Hz

* não especificado

O sistema de armazenamento consiste de vários componentes que devem apresentar as seguintes funções:

- sensores para detecção
- transmissão de sinais elétricos emitidos pelos sensores através de cabos condutores, e
- armazenamento dos sinais juntamente com o sismograma para seu posterior estudo e análise.

A Figura 42 apresenta um diagrama esquemático das operações e instrumentações utilizadas no estudo das vibrações.

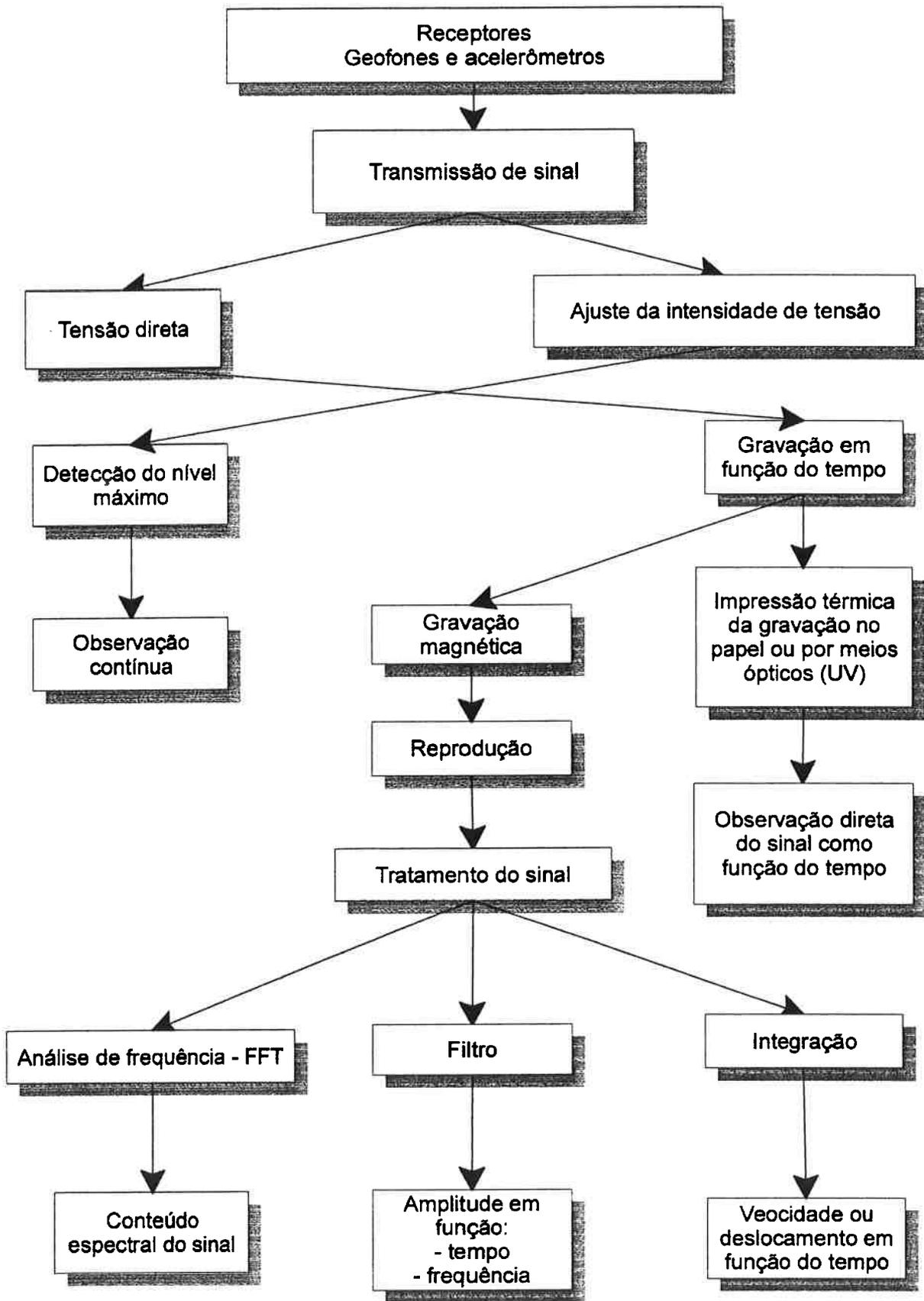


FIGURA 42. Diagrama esquemático de registro e análise de vibração.

Como sensores de vibração de terreno, os mais utilizados são os sismógrafos de engenharia (ou de vibração) e os sismógrafos de aceleração ou simplesmente acelerômetros. Existe ainda um terceiro instrumento, chamado de sismógrafo do tipo geofísico, com aplicações restritas como o estudo de sismica por reflexão e terremotos e também para a medição da velocidade de propagação das ondas sísmicas. Estes instrumentos estão apresentados nos itens seguintes.

Os sismógrafos de engenharia são os mais populares, uma vez que a velocidade de partícula se tornou o parâmetro mais aceito para correlacionar as vibrações com os danos produzidos pelas detonações (SISKIND, 2000; JIMENO et al, 1995; NICHOLLS, 1971).

8.1.1. Acelerômetro

Os acelerômetros são baseados na diferença de potencial gerada por um cristal piezoelétrico submetido a uma força. Esta força é proporcional à massa do cristal pela aceleração do movimento vibratório (JIMENO et. al., 1995). Quando isto ocorre, há um desequilíbrio com relação às partículas carregadas que se manifesta sob a forma de um fluxo de carga elétrica até que o equilíbrio entre as partículas seja restaurado. Este fluxo de carga é diretamente proporcional à força atuante sobre o elemento piezoelétrico.

Com uma instrumentação baseada no uso de acelerômetros, o usuário fica livre para escolher entre aceleração, velocidade ou deslocamento, com parâmetro de medida, bastando para isso que o medidor de vibração possua circuitos integradores, que transformam sinais proporcionais à aceleração do movimento vibratório em sinais proporcionais à velocidade e ao deslocamento. Com essa liberdade de aplicação, pode-se ter diferentes preferências na escolha do parâmetro mais adequado para o monitoramento da vibração. A Figura 43 mostra o desenho esquemático de um acelerômetro.

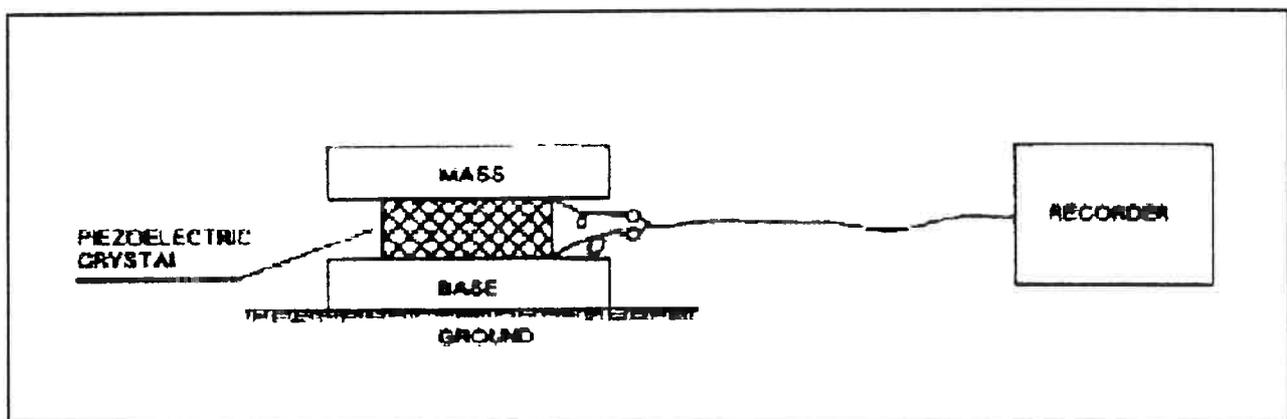


FIGURA 43. Desenho esquemático de um acelerômetro para a medição de vibração do terreno.

Em alguns sistemas de medição baseados em acelerômetros, o medidor de vibração ou pré-amplificador associado, normalmente, já inclui circuitos de integração, de modo que os parâmetros

de medida, tanto a aceleração, como a velocidade ou o deslocamento, possam ser escolhidos simplesmente através do acionamento de uma simples chave.

8.1.2. Sismógrafo Geofísico

Uma das aplicações de um sismógrafo geofísico, que o diferencia dos demais instrumentos é o monitoramento de terremotos. As vibrações induzidas por terremotos são causadas por ondas sísmicas que apresentam diferenças quanto a:

- fontes sísmicas;
- quantidade de energia disponibilizada; e
- distâncias percorridas

Um sinal gerado por uma explosão é muito menos complicado do que o sinal gerado por um terremoto e a distribuição dos vários tipos de ondas sísmicas é diferente (SCOTT et. al., 1996). Uma explosão próxima à superfície gera, de forma eficaz, ondas de superfícies, que por sua natureza, apresentam frequências muito maiores do que as frequência de um terremoto. Devido à esta diferença, os sismógrafos geofísicos devem possuir uma grande sensibilidade para as frequências muito baixas.

A Figura 44 mostra um desenho esquemático dos espectros de frequência e nela pode-se observar o posicionamento das vibrações geradas pelas detonações.

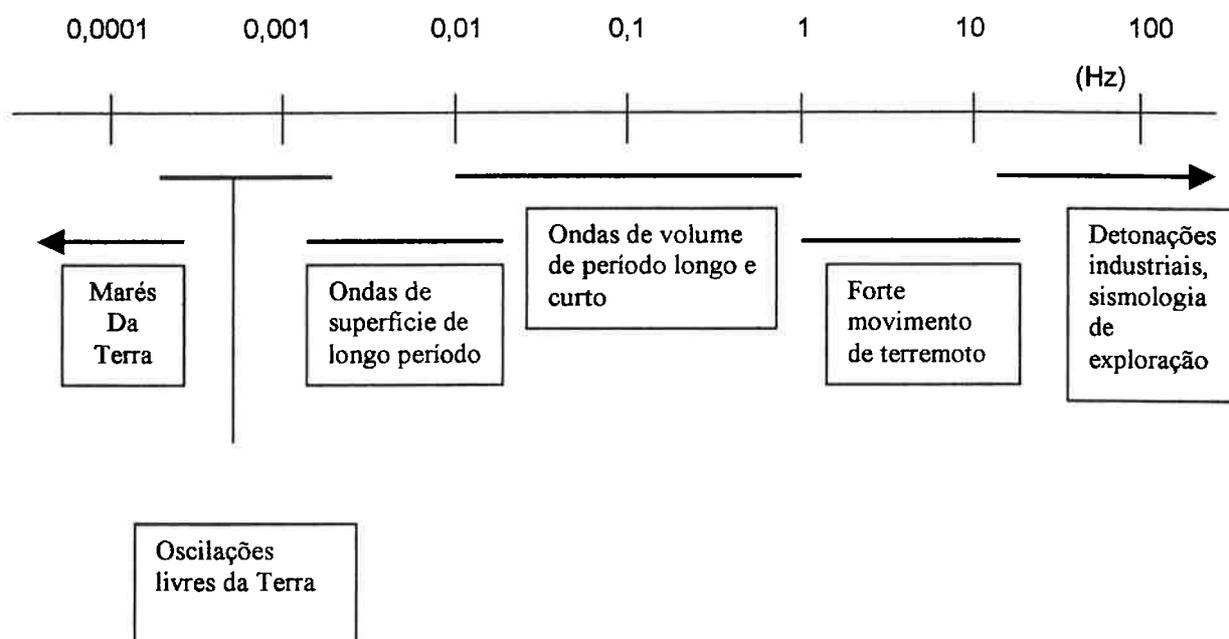


FIGURA 44. Espectro sísmico (SCOTT et al , 1996).

8.1.3. Sismógrafo de Engenharia

8.1.3.1. Descrição

O sismógrafo de engenharia é o equipamento utilizado para se monitorar as vibrações decorrentes de um desmonte de rocha por explosivos. A estrutura característica de um sismógrafo de engenharia é muito semelhante à estrutura da Figura 42.

Os sensores, chamados de geofones, são transdutores do tipo eletromagnético que emitem uma tensão elétrica que é proporcional à velocidade de vibração de partícula. O sinal elétrico é gerado por uma mola dentro de um campo magnético estacionário (Figura 45).

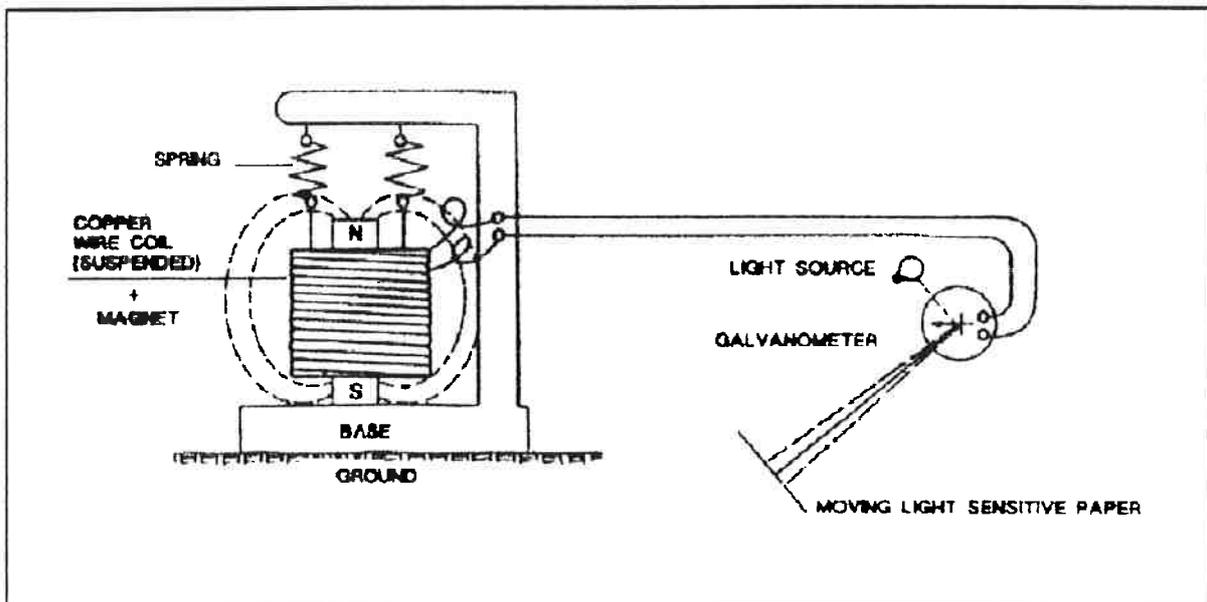


FIGURA 45. Estrutura de um sensor de velocidade.

Se um geofone for um transdutor perfeito, as relações entre voltagem e vibração devem ser lineares de 0 Hz até o infinito. No entanto, devido ao fato do ímã estar suspenso por uma mola, o instrumento estará sujeito à ressonância se a vibração possuir uma frequência próxima à frequência fundamental da mola.

A sensibilidade de aplicação está limitada pela frequência real do sismógrafo, que varia normalmente de 5 a 15 Hz até o máximo de 200 a 300 Hz. Por isto, os sismógrafos de engenharia não são recomendados para estudos de vibrações de baixa frequência como, por exemplo, as frequências produzidas por terremotos de menor intensidade.

O armazenamento é feito por instrumentos que permitem a visualização e a amplificação dos sinais que chegam dos sensores, e estes podem ser de vários tipos: aqueles que apenas armazenam os valores de pico no papel, aqueles que são contínuos em papel fotográfico, impressos por galvanômetros de luz ultravioleta, com agulha e papel térmico, com fita cassete magnética ou disco e aqueles com armazenamento analógico dos sinais registrados pelos

sensores. Estes últimos possuem a vantagem de permitir que o sinal seja reproduzido sempre que for necessário, introduzir filtros, integradores, etc., entre o sinal propriamente dito e a armazenagem.

O armazenamento analógico em fitas magnéticas é feito por meio de diversas técnicas que são adaptados às necessidades: gravação de frequência modulada – para baixas frequências, gravação direta para altas frequências, e gravação múltipla quando um grande número de sinais é analisado.

O sistema do sismógrafo é normalmente composto de instrumentos analógicos ou digitais para reproduzir e visualizar os sinais.

Quando os sinais são gravados em alguma mídia magnética ou até mesmo óptica, estes podem ser reproduzidos para uma análise completa, o que inclui cálculos de Transformada Rápida de Fourier (FFT) para se obter a densidade da frequência de impulso recebida ou a distribuição do movimento sísmico como função da frequência. Além disso, com os gráficos obtidos como função do tempo, pode-se obter o nível máximo de vibração e seu período correspondente assim como o comprimento do distúrbio.

Quando necessário, os sinais podem ser filtrados, integrados ou derivados para que se eliminem certos componentes ou se calcule outros parâmetros da gravação original (como integrar a aceleração uma ou duas vezes para se obter respectivamente velocidade de partícula ou deslocamento). A Figura 46 mostra um exemplo de um sistema sismográfico para armazenamento e análise de vibrações.

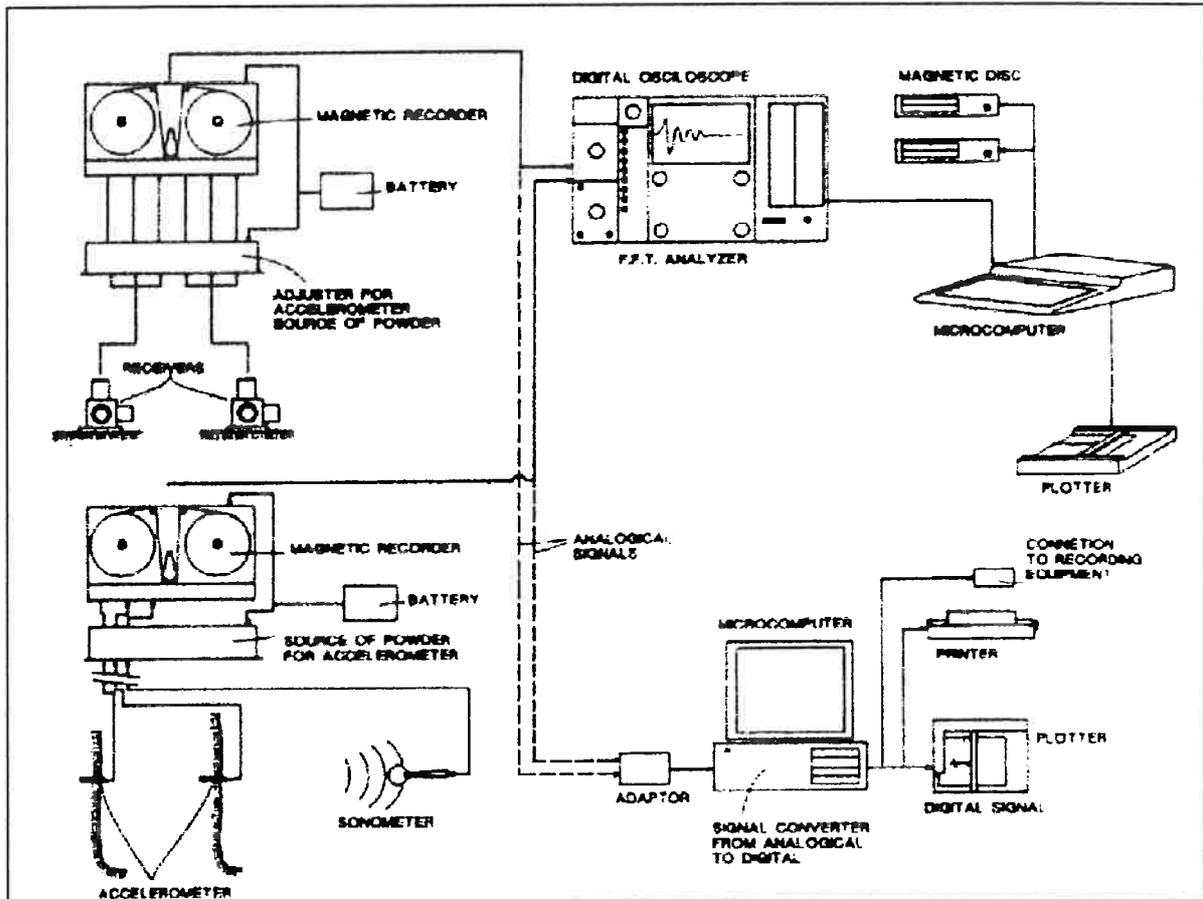


FIGURA 46. Sistema para armazenamento e análise de vibrações.

O registro das vibrações de terreno de uma fonte remota representa o resultado da interação entre diversos mecanismos de geração e propagação. Assumindo-se que estes fatores estão relacionados linearmente, suas relações podem ser expressas através de uma equação de convolução.

Os elementos da equação de convolução são: a função da fonte da vibração, seqüência de iniciação (para uma detonação de múltiplos furos), a resposta de impulso do meio de transmissão, a resposta de impulso do transdutor de vibração conectado ao solo e a resposta de impulso do elemento sísmico ativo no transdutor. Segundo SCOTT (1996), a resposta de impulso do instrumento eletrônico usado para o registro e armazenamento do sinal de vibração também faz parte da cadeia de convolução.

Esta relação de domínio de tempo possui uma contrapartida no domínio de freqüência. A representação do sinal vibratório no domínio de freqüência ao final da cadeia de medição pode ser representada como um produto de funções de resposta de freqüência de valores complexos que descrevem os elementos que geram ou modulam a vibração gerada pela detonação, conforme observada na equação abaixo:

$$V(\omega) = S(\omega)BD(\omega)G(\omega)T(\omega)SE(\omega)R(\omega) \quad (51)$$

onde: $V(\omega)$ = espectro de Fourier da vibração registrada;

$S(\omega)$ = espectro de Fourier da detonação de furo simples;

$BD(\omega)$ = função de resposta de frequência da seqüência de iniciação ou do plano de fogo;

$G(\omega)$ = função de resposta de frequência do meio geológico pelo qual a vibração induzida pela detonação se propaga;

$T(\omega)$ = função de resposta de frequência da sonda de vibração acoplada ao solo ou à estrutura;

$SE(\omega)$, $R(\omega)$ = função de resposta de frequência do elemento sísmico ativo dentro da sonda de vibração e instrumento de registro;

ω = frequência angular.

Outro aspecto muito importante é a checagem dos sensores que devem ser verificados periodicamente quanto à variação nas medições. Este assunto é discutido no item referente à calibração.

8.1.3.2. Evolução dos modelos

Até a década de 80 os sismógrafos de engenharia eram de porte avantajado, de portabilidade difícil, com apenas um geofone acoplado ao processador central. Eram caros, de difícil operação, forneciam apenas um ponto de captação por detonação e a interpretação era também demorada e complexa.

Em síntese, pode-se afirmar que ocorreram quatro grandes evoluções que marcaram o desenvolvimento dos sismógrafos.

- a) No início, o instrumento possuía apenas uma saída gráfica, mostrando os gráficos das três componentes no tempo. Para se calcular a velocidade de partícula máxima (V_p máx) e a resultante, era necessária a leitura de cada componente num instante t e compará-los com outros valores obtidos nos instantes t_n ($n = 0,1,2,3\dots$), obtendo-se entre todos os valores aqueles correspondentes aos máximos.
- b) Outra evolução ocorreu quando os sismógrafos foram dotados de pequenos processadores que passaram calcular automaticamente a velocidade de pico de partícula máxima. Porém a unidade de processamento ainda ficava junto ao geofone, dificultando a mobilidade em função do peso do conjunto.
- c) Quando os geofones passaram a se conectar à unidade central através de cabos longos (30 m), houve uma grande melhoria na flexibilidade de escolha de pontos. No início da década de 90 ocorreu um grande avanço nos sismógrafos de engenharia, com a pioneira aquisição no Brasil do modelo SINCO S6, da Slope Indicator. Este modelo adquirido pelo LACASEMIN com verba PADCT/FINEP apresentava algumas características inovadoras e as mais evidentes eram:

- era bem menor e menos pesado, com razoável portabilidade;
- sua estrutura era mais robusta e prática, com imediata impressão dos resultados de velocidades componentes, resultante máxima e frequências;
- vinha com dois geofones e um microfone acoplados a cada unidade central de processamento, ou seja, era possível se captar a velocidade de partícula em 2 pontos para a mesma detonação.
- os cabos de acoplamento adquiridos tinham 30 metros cada um, de modo que os pontos de captação podiam ficar afastados em até 60 metros.

Foram efetuados inúmeros monitoramentos inovadores com este instrumento, como por exemplo a captação de vibrações no piso e no topo de edifícios. Deste modo pôde-se verificar a amplificação de componentes em função da estrutura e sua oscilação. As Figuras 51 e 52 mostram fotos deste modelo.

d) No início de 1993 foi anunciado um novo modelo de sismógrafo de engenharia que era produto da revolução da informática, sendo fabricado pela Geosonics. Em julho de 1993 o LACASEMIN conseguiu uma demonstração pelo fabricante no USBM em Denver, Colorado (EUA). Com verba também do PADCT/FINEP conseguiu-se adquirir dois conjuntos cujas características inovadoras eram:

- a unidade central poderia se comunicar com até 32 geofones em vez de apenas 2;
- cada geofone trazia junto o microfone;
- cada conjunto geofone-microfone continha seu próprio "chip" de memória e não necessitava mais de cabos de acoplamento com a unidade central durante a captação;
- cada geofone podia ser programado no campo sem a unidade central, usando um pequeno instrumento do tamanho de uma calculadora. Apenas depois da captação e no laboratório era feita a conexão com a unidade central para extração e análise dos dados;
- a unidade central já vinha com uma série de programas de análise embutidos, inclusive quanto a limites legais de velocidade de partícula e sobrepressão atmosférica;
- o custo das unidades portáteis, que eram verdadeiros micro-sismógrafos, era bem mais barato que seus antecessores.

Mais recentemente os sensores portáteis incorporaram características como a não necessidade de serem acoplados à unidade central para terem seus dados extraídos. Podem ser diretamente acoplados ao computador do tipo PC ou a um computador portátil no campo ("laptop"). As Figuras 47 a 52, ilustram alguns dos modelos que fazem parte do museu do LACASEMIN, enquanto que as Figuras 53, 54 e 55 representam fotos dos atuais sismógrafos utilizados pelo LACASEMIN.

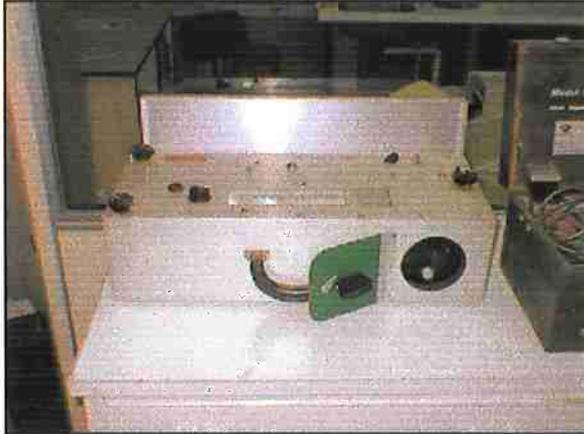


FIGURA 47. Modelo VS 4000, da W. F. Sprengnether Instrument, de Saint Louis, Missouri. Criado no final da década de 50 registrava deslocamento de partícula e foi usado até o início da década de 60. Fornecia sismogramas da onda em filme que era posteriormente revelado via úmida. Massa: 18 kg. Acervo LACASEMIN.



FIGURA 48. Modelo SSU I. O Safeguard Seismic Unit I era produzido pela Sprengnether para Philip Berger & Associates. Era uma versão modificada do VS 1100 e registrava a velocidade de partícula com uma única amplificação de 0,4 pol/pol-s. Foi introduzido em 1972 e usado na década de 70. Apresentava um geofone e um microfone. Massa: 12 kg. Acervo LACASEMIN.



FIGURA 49. Modelo SSU II. Construído pela W.F. Sprengnether para a Philip Berger & Associates em 1976. Registrava 3 velocidades de partícula e sobre-pressão num filme que era revelado por luz fluorescente. Usado na década de 80. Massa: 12 kg.

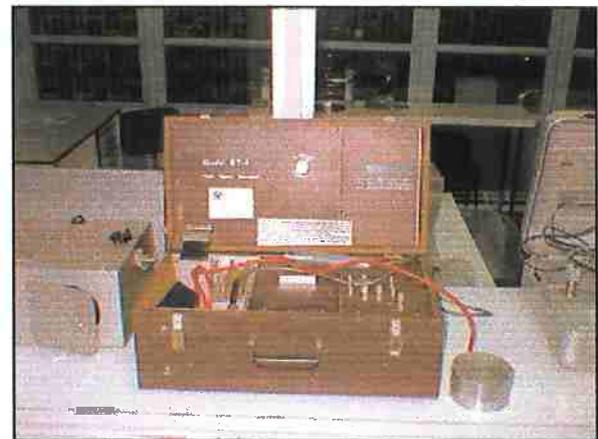


FIGURA 50. Desenvolvido pela Dallas Instruments em 77 e aperfeiçoado para a Geosonics em 79, com nome SSU IV. O primeiro com auto disparo que registrava os dados em fita cassete, que eram depois reproduzidas em filmes sensíveis à luz. Massa: 13 kg.



FIGURA 51. Sismógrafo modelo Sinco S6 da Slope Indicator, com 2 geofones e cabos de 60 m. As bases dos geofones, para permitir fácil nivelamento, foram desenvolvidas no LACASEMIN. Adquirido em 1991.



FIGURA 52. Detalhe do painel do Sinco S6, totalmente selado e com botões sensíveis ao toque. Todos os resultados podiam ser visualizados imediatamente e em seguida impressos em papel especial no próprio local de monitoramento.

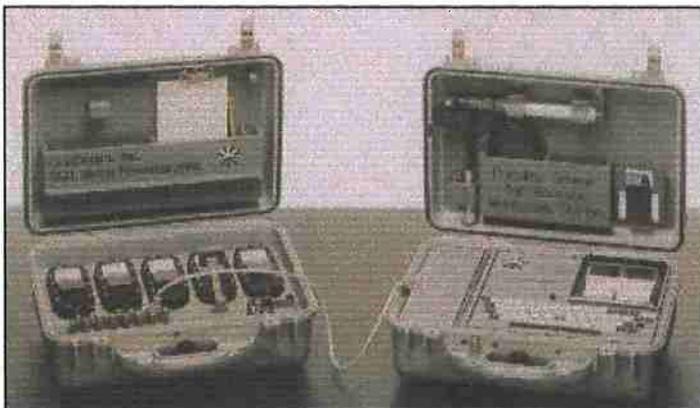


FIGURA 53. Conjunto de seis sismógrafos da Geosonics, sendo 5 micro-sismógrafos (na maleta à esquerda) e uma unidade central com geofone e microfone (à direita)



FIGURA 54. Detalhe de operação de um micro-sismógrafo

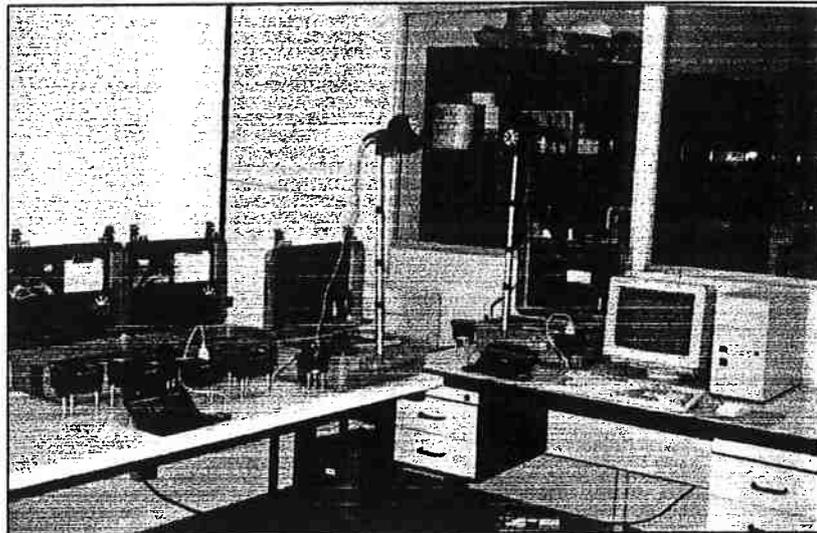


FIGURA 55. Conjunto de sismógrafos de engenharia da Geosonics adquirido pelo LACASEMIN.

8.2. SELEÇÃO DE INSTRUMENTAÇÃO E MONITORAMENTO SISMOGRÁFICO

8.2.1. Especificações da ISEE (International Society of Explosives Engineers) para os sismógrafos utilizados

As indústrias e as agências regulamentadoras possuem numerosos exemplos de diferenças nas medições de vibrações com sismógrafos colocados lado a lado ou próximo uns aos outros. Os sismógrafos de engenharia são utilizados para estabelecer conformidade com as regulamentações e para se avaliar a performance dos explosivos enquanto que as leis e regulamentações são estabelecidas para prevenir danos à propriedade e ferimentos às pessoas. A disposição das regras é fortemente dependente da confiabilidade e precisão dos dados de vibração do terreno. Um dos objetivos da Seção de vibrações decorrentes de detonações e sismografia da ISEE - International Society of Explosives Engineers é garantir a confiabilidade e consistência dos registros sismográficos para todos os sismógrafos. Foram propostas normas que faziam parte de um "draft" se chamava "Proposed draft of the ISEE seismograph performance specifications and general guidelines". Neste draft havia uma norma que se chamava "Especificações de performance de sismógrafos" e que se apresentavam da seguinte forma:

Especificações Gerais para medição da vibração de terreno:

Faixa de frequência :	2 a 250 Hz definidos entre -3 dB
Distorção de fase :	A ser determinado
Precisão:	+/- 5% ou +/- 0,5 mm/s (0,02 pol/s), o que for maior
Densidade de vibração do sensor :	< 2,40 g/cm ³ (150 lb/pés ³)

Exigências gerais:

Amostragem digital :	Pelo menos 1000 amostras/segundo por canal
Temperatura de operação :	-12 a 49 graus Celsius

As especificações mostradas acima podem ser consideradas como mínimas para o uso em sismografia. Exigências especiais podem ser pedidos pelo cliente como, por exemplo, boa performance para condições adversas (clima ártico) ou estender as faixas de frequência para o caso de monitoramentos em pontos muito próximos aos da detonação. Outras capacidades de performance associados às necessidades específicas podem ser (BROCHU, 2000):

- Faixa dinâmica (medições das faixas mais baixas às mais altas, como por exemplo de 0 a 229 mm/s (9 pol/s);
- Resolução maior (por exemplo 0,13 mm ou 0,005 pol para vibração e 1 dB para a sobrepressão atmosférica);
- Níveis de disparo (trigger) e opções de fonte (sensor somente para vibração, somente para a sobrepressão atmosférica ou para ambos);
- Duração do registro (por evento);
- Memória ou capacidade de registro (número de eventos);
- Tipo de relatório ou de armazenamento e registro (em disco, impresso, LCD, transferência para PC, etc.);
- Opções de montagem (orientação, acessórios, etc.)

O mercado de sismógrafos de engenharia é altamente competitivo e há diversas opções em todo o mundo. Muitos dos fabricantes, com o intuito de ganhar do concorrente incrementam os seus instrumentos muito além do mínimo exigido. Cabe ao usuário decidir quais características são as mais importantes no momento da escolha de um sistema sismográfico.

Existem sismógrafos muito simples e que somente proporcionam leituras instantâneas da velocidade de pico de partícula. Estes eram usados tipicamente para monitoramento ambiental. Para a avaliação do desempenho do explosivo ou do plano de fogo é importante que se tenha a onda de vibração completa capturada e disponível para a análise posterior. Existem ainda outros critérios para a seleção de um sismógrafo de engenharia como por exemplo o adotado por SCOTT et. al.(1996), que leva em consideração :

- Número de canais
- Taxa de amostragem (pontos/s)
- Comprimento da janela de amostragem
- Faixas de entrada (amplificação) disponíveis
- Pré ou pós triggering
- Possibilidade de configurar diferentes canais sob diferentes formas
- Operação remota e possibilidade de registrar múltiplos eventos

8.2.2. Importância do acoplamento adequado

Na prática do monitoramento de vibração de uma detonação é comum se medir vibrações de terreno com um arranjo triaxial de transdutores. Estes transdutores são geofones que são instalados permanentemente dentro de uma sonda de medição. Normalmente estas sondas são do tipo cilíndrico, retangular ou de disco. A sonda, por sua vez, é composta de um material mais leve para reduzir a sua massa e, ao mesmo tempo, para preservar a sua rigidez. Estes desenhos e formatos aumentam a frequência fundamental (ou natural) destas sondas. Sabe-se que a frequência natural de uma sonda (ou de qualquer outra estrutura) é inversamente proporcional à raiz quadrada de sua massa e diretamente proporcional à raiz quadrada da sua rigidez (SCOTT et. al., 1996).

As rochas friáveis e solos não são materiais rígidos e o acoplamento de um transdutor de vibração em um material deformável como o solo pode levar a medidas erradas de vibração, amplitude e frequência. Não há jeito de se obter o acoplamento perfeito em um solo deformável, mas é possível assegurar a qualidade do acoplamento e, dentro de alguns limites, corrigir os sinais medidos para a flexibilidade do sistema montado.

Ambas as montagens, a embutida e a de superfície são utilizadas no monitoramento. A primeira é similar à montagem de transdutores na superfície de uma estrutura. Neste caso, o maior esforço deve ser direcionado para garantir que o transdutor esteja firmemente conectado ao terreno para seguir exatamente o seu movimento. Um equipamento colocado na superfície ou parcialmente embutido no terreno pode sofrer escorregamento e/ou tombamento, o que leva a uma distorção nos sinais de vibração obtidos (SCOTT et. al., 1996).

O segundo aspecto do acoplamento é determinado pelas propriedades mecânicas do meio na qual está conectado o equipamento. No caso de edifícios, estas estruturas são feitas normalmente de materiais com propriedades mecânicas semelhantes às propriedades dos materiais das quais os sensores são feitos. Por isso, sob o ponto de vista da vibração, o transdutor se comporta como uma parte integral da estrutura.

Já no caso de vibração de terreno, as propriedades mecânicas do terreno em volta e abaixo do sensor podem ser muito diferentes daquelas que compõem o instrumento, o que é particularmente comum para a medição em solo. Portanto, a performance dinâmica geral do sismógrafo, ainda que firmemente acoplado ao terreno, será afetada pelas propriedades dinâmicas do terreno.

A alta deformabilidade da superfície do terreno causa a vibração do sismógrafo instalado na superfície ou abaixo dela de modo que este terá um sistema dinâmico composto com o solo local. Este sistema dinâmico tem uma frequência fundamental de ressonância e taxa de amortecimento diferentes daqueles do sismógrafo ou dos elementos que o compõem.

Por isso, mesmo no caso de um contato perfeitamente íntimo entre o sismógrafo e o terreno, as características dinâmicas do sismógrafo in situ serão diferentes daquelas do sismógrafo sozinho. Isto também é verdade para um transdutor montado sobre uma estrutura. A frequência de ressonância de um transdutor montado é diferente para o mesmo isolado. No entanto, a

freqüência de ressonância montada é muito alta, comparada com a freqüência típica de uma vibração decorrente de detonação, que normalmente é da ordem de 50 Hz.

Da Teoria dos Sistemas Dinâmicos de Grau de Liberdade Simples sabe-se que tais sistemas, expostos à ação de uma força dinâmica, podem amplificar a vibração externa. O grau de amplificação é determinado pela taxa da freqüência da força direcional e freqüência de ressonância do sistema dinâmico, e pelo amortecimento do sistema dinâmico (SCCOTT et. al., 1996).

A maior amplificação ocorre quando a freqüência da vibração do terreno é idêntica à freqüência de ressonância da vibração do sismógrafo acoplado ao terreno (Figura 56). Para freqüências mais baixas e mais altas do que a freqüência de ressonância, a amplificação da vibração externa irá decrescer gradualmente, a uma taxa inversamente proporcional à taxa de amortecimento. (SCCOTT et. al., 1996).

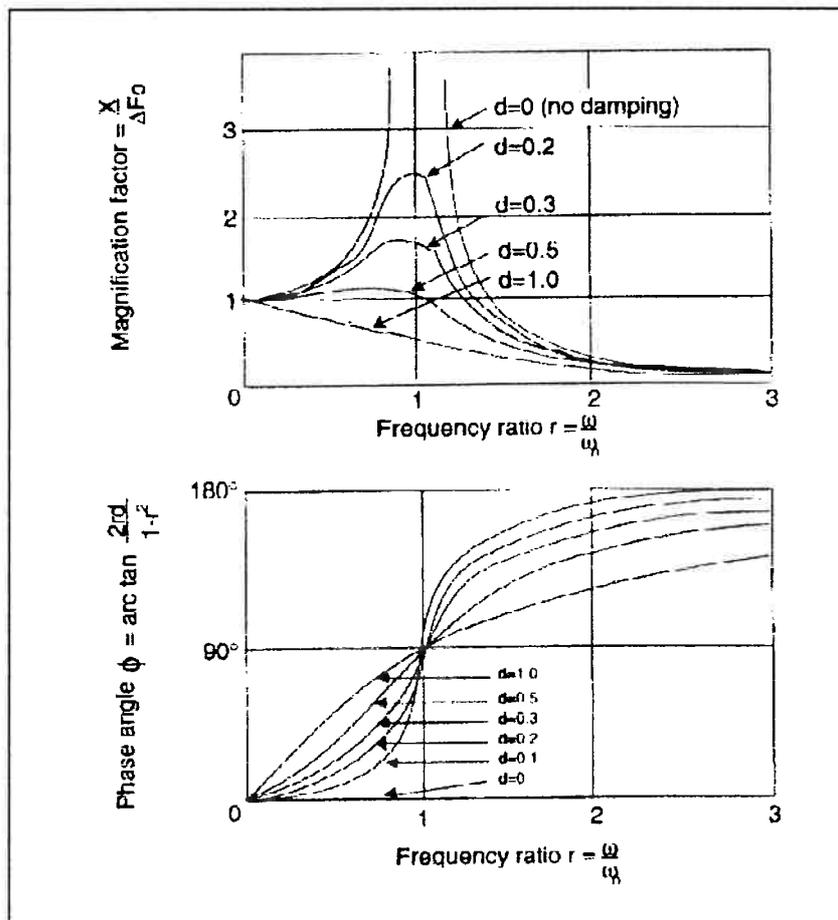


FIGURA 56. Resposta de amplitude e fase de um sistema de grau de liberdade simples para a vibração harmônica de um suporte.

Quando as frequências de vibração são muito mais altas do que a frequência de ressonância do sistema sismógrafo-terreno, estas vibrações não serão transmitidas eficientemente do terreno para o transdutor. As magnitudes das vibrações obtidas serão então menores do que as reais.

O acoplamento ineficiente terá um efeito negativo na resposta de fase do sismógrafo. Esta influência pode causar distorção na forma de um sinal de frequência de vibração externa.

8.2.3. Calibração do sismógrafo

Este é assunto muito importante, pois um dos maiores problemas na confiabilidade das medidas efetuadas se refere à calibração e o posterior ajuste dos sismógrafos. De acordo com a Geosonics, empresa que forneceu e treinou o LACASEMIN para a operação de uma mesa vibratória para calibração, todo sismógrafo deve ser calibrado num período máximo de 18 meses, sendo que o recomendável é que se faça uma calibração a cada 12 meses. Ainda de acordo com as especificações da Geosonics, os sismógrafos, após a calibração, devem apresentar um erro máximo de 5 % para os três canais de vibração e um erro máximo de 2 dB para o canal de som. Os sismógrafos utilizados para este trabalho foram devidamente calibrados e ajustados pelo conjunto de calibração do LACASEMIN, próprio para os sismógrafos da marca Geosonics. A Tabela 8 mostra os números de série dos sismógrafos utilizados nos monitoramentos, as datas de calibração e os seus respectivos erros. A Figura 57 mostra o sistema de calibração utilizado pelo LACASEMIN.

Tabela 8. Resultados da calibração dos sismógrafos

Sismógrafo (No. Série)	Data da Calibração	% erro Canal Longitudinal	% erro Canal Transversal	% erro Canal Vertical	erro (dB) Canal de Som (linear)
SN 4495	10/02/01	3	2	4	1
SN 4496	10/02/01	0	0	1	1
SN 4497	10/02/01	2	1	1	1
SN 4505	06/06/01	1	2	0	0
SN 4506	06/06/01	1	3	2	1
SN 4507	08/06/01	0	1	3	1
SN 4508	08/06/01	0	1	2	1
SN 4509	06/06/01	0	1	0	0
SN 2411	07/06/01	2	0	2	1

Obs. Sinal de entrada: 1 pol/s a 20 Hz para a vibração e 129 dBL a 40 Hz para o som

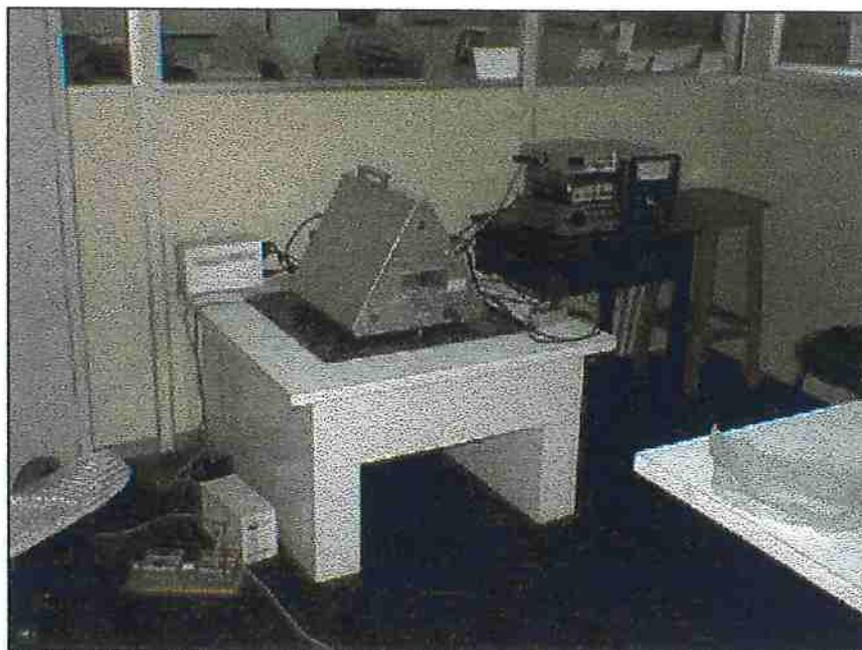


FIGURA 57. Conjunto para calibração e ajuste de sismógrafos do LACASEMIN.

8.2.4. Parâmetros de monitoramento

8.2.4.1. Instalação do sensor

Normalmente se instala o sensor junto à estrutura mais próxima (ou a mais sensível) das operações de desmonte. Se houver apenas um local de detonação, este ponto se torna o local preferencial. No caso de vários locais de detonação dentro de um empreendimento deve-se instalar o sensor na estrutura mais próxima correspondente ao local de detonação. Obviamente se houver mais de um sensor pode-se fazer tantos arranjos quanto se julgar necessário ou conveniente.

Em alguns casos a estrutura mais próxima pode não estar acessível ou estar fora dos limites da propriedade. A solução é instalar o sensor num ponto da reta que liga o local de detonação a esta estrutura, podendo este ponto estar no limite da propriedade ou mesmo dentro, de modo que se possa fazer um monitoramento sistemático.

Outro ponto a se observar é a orientação correta do sensor. Deve-se instalar o sensor com a sua direção longitudinal apontada para o local de detonação. Isto garante que se obtenha os valores reais de cada componente da velocidade de vibração de partícula.

8.2.4.2. Tempo de captação de evento

A duração de eventos num desmonte de rocha varia de acordo com a quantidade de furos a ser detonada, o número e os tipos de retardos utilizados e a distância de monitoramento. Elas podem ir de algumas centenas de milissegundos até vários segundos. Programando-se o sismógrafo para captar eventos entre 3 e 5 segundos permite maior segurança para a captação

completa da grande maioria das detonações. Desmontes especiais como aberturas de valas, túneis e implosões, por utilizarem sistemas de retardo diferentes para contornar situações críticas, podem requerer tempos de captação superiores, como, por exemplo, 10 ou 15 segundos. Outra forma de procedimento é fazer com que o tempo de registro seja 2 segundos maior do que a duração da detonação e somando-se também 1 segundo a cada 335 m que for se afastando do local da detonação (BROCHU, 2000).

8.2.4.3. Limite inferior de sensibilidade e disparo ("trigger level")

Os instrumentos são preparados para estar "armados e prontos" para capturar os sinais transientes de interesse. Eles começam a registrar a partir do momento que um determinado nível de vibração é recebido. Isto é chamado de "triggering" (disparo), onde o nível de disparo deve ser programado para ser baixo o suficiente para que o sensor capte a vibração e alto o suficiente para minimizar a ocorrência de falsos eventos. Este nível deve ser ligeiramente superior ao nível de fundo da vibração estimado para o local.

A utilização conjugada do limite inferior de sensibilidade ("threshold") e o "trigger" (gatilho) ativo permite que se opere o sismógrafo em modo de espera ("stand by") ativo. Ou seja, toda vez que ocorrer um evento que ultrapasse um determinado limite de sensibilidade (pré-programado), o gatilho ativado permite que o sismógrafo registre este evento até que a memória ou a bateria se esgote. Isto é particularmente importante quando se deseja captar vários eventos em seqüência sem estar presente no local de monitoramento. Outra vantagem na utilização do limite inferior de sensibilidade consiste em distinguir eventos indesejáveis, como por exemplo a passagem de veículos que em determinados níveis de vibração poderiam ativar o sismógrafo. Neste caso, para que isto não ocorra, basta elevar o limite inferior de sensibilidade até que a passagem de caminhões não ative o sismógrafo. Há, no entanto, uma desvantagem: aumentando este limite corre-se o risco de não registrar o evento desejado. Portanto o seu uso exige um julgamento adequado das condições de trabalho que o local oferece.

8.2.4.4. Opções de gráfico

A maioria dos sismógrafos de engenharia oferece opções de gráfico que permitem a visualização da onda de vibração no tempo. Outra opção é a visualização do resultado em termos de conformidade com as normas vigentes. Dentre estas, as mais comuns são a conformidade com a norma USBM e OSM, dos Estados Unidos e a norma DIN, da Alemanha.

8.2.4.5. Amplitude

A amplitude ou o deslocamento da partícula refere-se ao máximo deslocamento de uma partícula a partir de sua posição de descanso, sendo dada em mm.

8.2.4.6. Velocidade de vibração de partícula

8.2.4.6.1. Longitudinal

Também chamada de velocidade radial. É a componente do movimento da partícula para frente e para trás na mesma direção na qual a onda de vibração está se propagando.

8.2.4.6.2. Vertical

É a componente do movimento perpendicular, para cima e para baixo, à direção de propagação da onda de vibração.

8.2.4.6.3. Transversal

É a componente do movimento perpendicular, para a esquerda e para a direita, à direção de propagação da onda de vibração.

8.2.4.6.4. Resultante (V_r)

Ela representa o real movimento que a partícula faz no espaço tridimensional, sendo a soma vetorial das componentes Longitudinal (L), Vertical (V) e Transversal (T). Ela é calculada pela seguinte expressão:

$$V_r = \sqrt{(L^2 + V^2 + T^2)} \quad (52)$$

8.2.4.7. Aceleração de partícula

A taxa na qual a velocidade de partícula muda, medida em mm/s² ou em termos fração da aceleração da gravidade (g).

8.2.4.8. Frequência predominante

A onda vibratória é um sinal transiente e existem amplitudes diferentes de zero relativas às determinadas frequências, inexistentes sob o ponto de vista da resposta estrutural, mas que devem estar presentes para produzir corretamente a onda verdadeira. A Análise de Fourier (através da FFT), vista com detalhe nos Capítulos 5 a 7, é usada para se determinar um espectro apropriado de frequências. No entanto, deve-se lembrar que se trata de um espectro, e por isso não há uma frequência única que pode descrever a vibração na sua totalidade. Pode haver duas frequências, ambas com forte contribuição na onda resultante. Se uma delas for escolhida como a frequência dominante, em detrimento da outra, uma avaliação equivocada do potencial de dano ou incômodo pode ser levada adiante. Para evitar este tipo de problema e simplificar os cálculos, um método simples e engenhoso conhecido como "Zero-crossing Frequency" é usado normalmente na análise de vibrações produzidas por detonações. Neste método cada vez que a onda cruza o eixo do tempo num ponto zero conta-se o tempo até esta cruzar novamente o zero e considera-se este tempo como um meio-período, convertendo-o então para uma dada frequência. A amplitude

desta onda neste período é então usada como um critério para a escolha da “frequência dominante”. Esta frequência (o inverso do meio-período) associada com a amplitude mais alta transforma-se então na frequência dominante. Obviamente este método produz apenas uma frequência e não leva em conta a duração assim como não lida com a sobreposição das frequências (CRENWELGE, 1988). Outro problema é que em função do método de cálculo, há uma maior ênfase para ondas de altas frequências uma vez que estas cruzam o eixo do tempo mais rapidamente do que as ondas de baixa frequência.

Os eventos associados ao desmonte de rocha por explosivos apresentam uma vibração formada por diversas ondas, tendo, portanto, diversas frequências associadas às diversas componentes. No entanto, estas frequências são normalmente elevadas e de curta duração, o que faz com que os atuais sismógrafos de engenharia, em geral, possam ser utilizados para o monitoramento da média dos eventos.

A frequência predominante pode ser então considerada na avaliação de possíveis danos estruturais. Para cada componente, indica, juntamente com a velocidade de partícula, se a estrutura corre algum risco de sofrer danos associado a um evento desta magnitude.

8.2.4.9. Distância do ponto de monitoramento ao local de detonação

Quanto maior a distância em relação ao ponto de detonação menores vão ficando as frequências da vibração, ou seja, mais próximas das frequências naturais das estruturas e materiais. Frequências mais baixas e intensidades de vibração significativas podem amplificar os efeitos da vibração e resultar em danos materiais ou intensificar o desconforto das pessoas. Informações à respeito da distância contidos no registro do sismograma ou nas planilhas de campo e associados à sua localização possibilitam estudos mais confiáveis como por exemplo o levantamento da equação carga-distância.

8.2.4.10. Localização do sensor

Todos os registros sismográficos ou as planilhas de devem ter a localização do local de monitoramento. Atualmente, a melhor forma de se fazer isto é programar o instrumento antes, registrando os detalhes da localização fornecidos por topografia ou por GPS além de usar um ponto permanente de referência.

8.2.4.11. Data e hora do evento

Além da localização correta, o registro deve conter a data e hora precisa do evento captado para que coincidam com os dados fornecidos pelo plano de fogo da detonação. Isto é bastante útil, por exemplo, em áreas onde coexistem duas ou mais minerações ou então locais de detonações próximas umas as outras, para que se possa identificar as interferências. Deste modo, eventos que acidentalmente podem acionar os sismógrafos podem ser identificados através de registros precisos de datas e horários.

8.2.5. Arranjo dos sismógrafos para a determinação da propagação

Em termos ideais, segundo SISKIND (2000), as medidas de propagação devem ser feitas com um arranjo de sismógrafos espaçados logaritmicamente e posicionados em uma reta sobre uma determinada direção da detonação (bancada desmontada). Esta aproximação é a melhor para a caracterização mais precisa do local, sendo um procedimento necessário quando se estuda o efeito do desmonte de rocha no controle de vibrações do terreno. Em locais onde um arranjo linear não pode ser feito, pode-se fazer um monitoramento em locais fixos ao longo de um determinado período de tempo (que compreenda uma série de detonações) desde que haja uma variação considerável nas medidas de distância escalonada, uma vez que uma pequena variação irá formar um agrupamento (concentração) que será útil somente para a previsão da vibração dentro de uma faixa bastante limitada. Neste caso, a equação de propagação não poderá ser computada em função da confiabilidade estatística da inclinação/coeficiente, que será pobre. Para um levantamento deste tipo, JIMENO et. al. (1995) recomendam que se monitorem de 8 a 10 detonações (com um sensor) e em diferentes distâncias (distâncias escalonadas variáveis).

Em situações críticas como uma conformidade marginal para um limite legal, a medição direta da vibração no local em questão é mais recomendável do que se fazer previsões baseadas em pontos plotados. Na prática, pontos plotados de propagação são bastante úteis para comparações entre locais e técnicas de desmonte, à medida que estes não sejam extrapolados exageradamente.

CAPÍTULO 9 - EQUAÇÃO CARGA-DISTÂNCIA E MAPA DE ISO-VELOCIDADES

9.1. EQUAÇÃO CARGA-DISTÂNCIA

9.1.1. Teoria

A magnitude das vibrações decorrentes do desmonte em um determinado local depende da distância em relação ao desmonte e da carga máxima por espera (dada em massa). Há também os fatores de plano de fogo, discutidos no Capítulo 4, sendo o fator mais importante o uso de retardos e a seqüência correta de detonação para assegurar que cada furo, ou a linha de furos, faça o lançamento na direção de pelo menos uma face livre.

Para controlar os níveis de vibração a uma determinada distância, é necessário limitar a carga de explosivos detonada por retardo, (carga máxima por espera - CME) de acordo com a relação dada pela equação 46.

O cálculo da carga máxima por espera permitida, por meio de ensaios de desmonte ou através de gráficos, vai determinar quantos furos serão detonados em uma mesma espera. Se a carga em um furo for maior do que a permitida, então, ou deve-se fazer furos menos profundos ou então deve-se usar uma carga dividida. Em uma carga dividida, o explosivo carregado é separado em duas ou mais partes por um material inerte (espaçador) e cada carga é detonada em tempos diferentes. O intervalo mínimo de retardo entre as cargas ou os furos de modo a assegurar que não exista qualquer interferência da vibração produzida por uma carga sobre outra é de aproximadamente 15 a 20 ms (GOLDER ASSOCIATES, sd), embora intervalos entre 8 ms (Duvall) e 15 ms também apareçam na literatura (JIMENO, et. al., 1995 e SCOTT, et. al., 1996).

A correta manutenção dos parâmetros do plano de fogo de um desmonte de rocha tem entre outros objetivos fazer com que as vibrações resultantes não excedam os limites pré-estabelecidos tanto para a segurança de estruturas como para o conforto da população em seu entorno. Para tanto é necessário o controle de um parâmetro que represente de forma confiável a intensidade da vibração decorrente da detonação.

Das propriedades mensuráveis, a velocidade de partícula é a que melhor se correlaciona com os danos estruturais.

A onda de tensão possui três componentes - vertical, longitudinal (radial) e transversal, sendo necessária à medição das três componentes para então se obter a maior delas. Esta é denominada de Velocidade de Partícula de Pico ou PPV (Peak Particle Velocity), e é usada para avaliar o potencial de dano. A velocidade de partícula é a medida da velocidade de partícula do terreno durante a passagem da onda de vibração, e não a velocidade da onda em si.

Na prática, a velocidade de partícula depende fundamentalmente de duas grandezas principais: a massa da carga explosiva detonada e a distância entre os pontos de detonação e o

ponto de estudo, podendo ser estabelecida matematicamente a partir de dados dos sismógrafos de engenharia. Na sua forma mais geral, é dada por uma relação do tipo:

$$V = aQ^b D^c \quad (53)$$

Onde V é a amplitude máxima da velocidade de partícula, Q é a massa do explosivo detonado por espera e D é a distância entre o ponto de detonação e o ponto de monitoramento. Os coeficientes a , b e c são constantes dependentes do local, do tipo de esquema de fogo e da forma das ondas propagadas. Há diversas opções usadas na prática, e um exemplo citado por DINIS da GAMA (2002) é a simplificação desta equação para o seguinte formato:

$$V = a \left(\frac{Q}{D^2} \right)^b \quad (54)$$

Pode-se assim comparar esta relação empírica com a lei de propagação teórica, proveniente da teoria da similitude (DINIS DA GAMA, 2001), que se expressa por:

$$V = a \left(\frac{Q}{D^3} \right)^b \quad (55)$$

9.1.2. Equação carga-distância

Segundo DINIS DA GAMA (2002) vários especialistas indicam a equação anterior (55) como sendo válida para a vizinhança imediata, aceitando-se que a mudança do expoente de D (de 3 para 2) resulta da modificação de características de atenuação da onda, ao passar de uma forma instável para uma forma elástica estável, relacionada a distâncias maiores com relação à origem da detonação. O autor afirma também que a lei empírica de propagação é essencialmente baseada em detonações de cargas cilíndricas, e a consideração de uma simetria cilíndrica na propagação da amplitude implica uma lei quadrática de atenuação. Estas considerações se encaixam perfeitamente na finalidade deste trabalho, já que serão estudadas detonações com cargas cilíndricas.

Os dados publicados pelo USBM (Duvall, Fogelson e outros), na Inglaterra (Attewell e Farmer), na Suécia (Langefors, Person, etc) e no Canadá (Bauer), revelam que a lei quadrática é seguida na grande maioria dos casos, sendo freqüente representar graficamente os pontos correspondentes aos registros de sismógrafos, sobre diagramas que relacionam a velocidade de

vibração de partícula com a distância escalonada. A distância escalonada é um parâmetro que é normalmente utilizada para comparar vibrações devidas às diferentes massas de explosivos detonadas em distâncias variadas com relação ao ponto de monitoramento, e é dada pela seguinte relação:

$$DE = \left(\frac{D}{\sqrt{Q}} \right) \quad (56)$$

onde Q [kg] é massa do explosivo detonado por espera
 D [m] é a distância entre o ponto de detonação e o ponto de monitoramento

A regressão linear efetuada sobre tais pontos reproduz a lei empírica acima mencionada, visto que:

$$V = a \left(\frac{Q}{D^2} \right)^b = a \left(\frac{D}{\sqrt{Q}} \right)^{-2b} \quad (57)$$

O USBM estabelece que a velocidade de partícula máxima V_p é relacionada com a distância escalonada pela seguinte expressão:

$$V_p = k \left(\frac{D}{\sqrt{Q}} \right)^{-b} \quad (58)$$

onde V_p = velocidade de partícula de pico
 D = distância da detonação ao ponto de medição
 Q = carga máxima por espera (peso)
 k = fator do local
 b = fator do local

e k e b são constantes que devem ser determinadas por medições feitas em cada local de desmonte em particular.

A equação acima plota uma reta em papel log-log, e o valor de k é dado pela interceptação do eixo vertical, na distância escalonada igual à unidade, enquanto que a constante b é dada pela inclinação da reta. Um exemplo hipotético de plotagem é dado pela Figura 58.

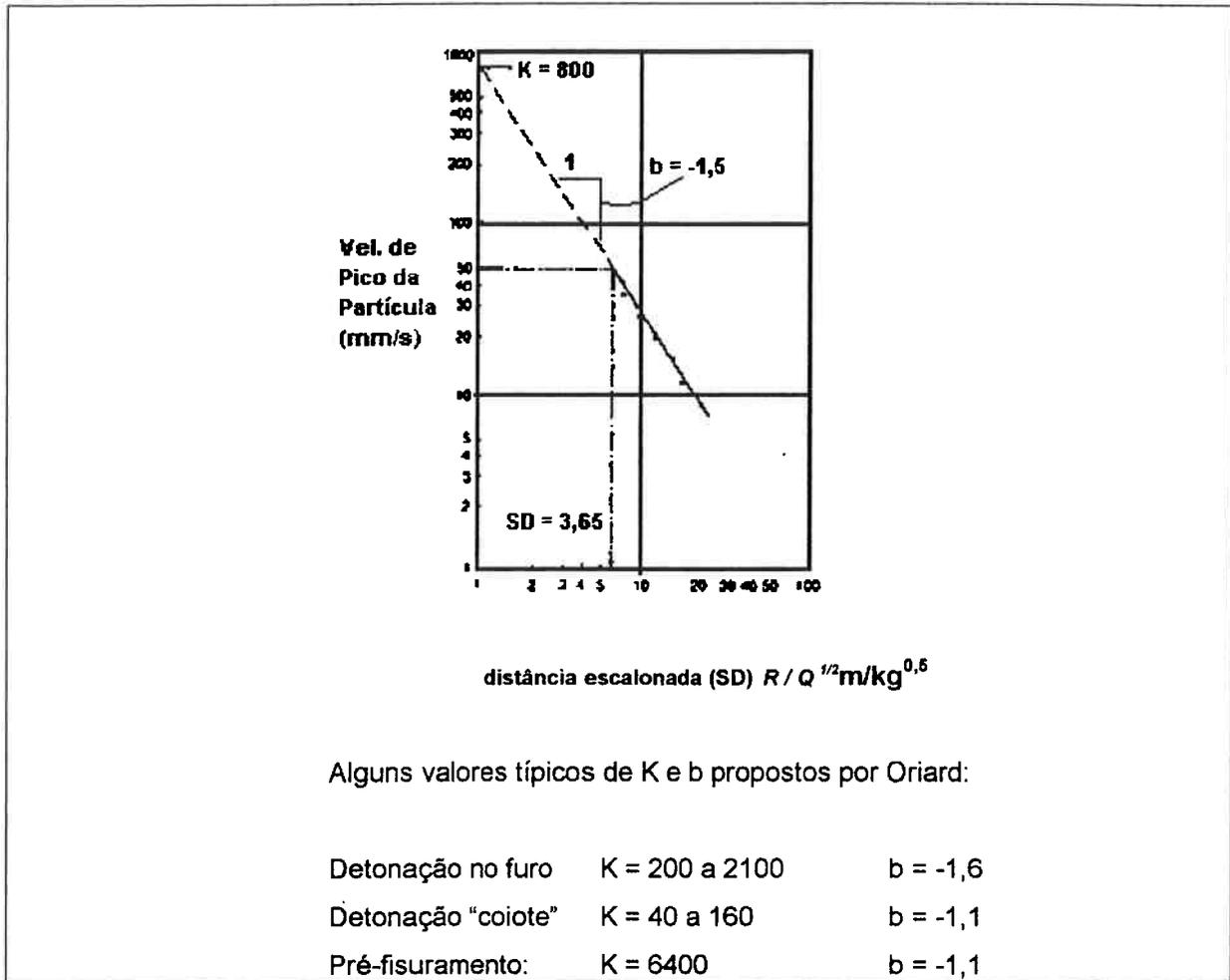


FIGURA 58. Plotagem hipotética para velocidade de partícula medida x distância escalonada do desmonte (GOLDER ASSOCIATES, s.d.)

Os referidos diagramas podem ser obtidos para cada um dos componentes do vetor velocidade (vertical, longitudinal e transversal), sendo representados em função da distância escalonada e para as cargas explosivas aplicadas. Isto se dá através ou da carga total de explosivos detonado (dado em kg), ou então da carga máxima por espera (kg). Isto depende das distâncias entre o local da detonação e as estruturas a se proteger. Com efeito, à medida que a distância aumenta, uma atenuação seletiva de frequências (simultânea à dispersão de velocidades) passa a atuar originando uma sobreposição dos trens de ondas provenientes dos vários retardos, a qual não permite a distinção entre ondas individuais (DINIS DA GAMA, 2002). Segundo este mesmo autor, geralmente para distâncias superiores a 1000 m é formulada a lei de propagação das ondas resultantes da carga total de explosivos, enquanto que para distâncias inferiores a 1000 m, utiliza-se a equação das ondas provenientes das cargas máximas por espera.

Em qualquer um dos casos, a amplitude da velocidade de partícula é expressa em função da massa do explosivo considerado e da distância, servindo essa relação para o cálculo da amplitude em outras condições de trabalho, mantendo-se constante o tipo de formação geológica.

Conhecida a amplitude da velocidade de partícula, pode-se prever as circunstâncias de perigo para a estabilidade das estruturas vizinhas, utilizando-se as relações empíricas entre intensidade de vibrações e os danos físicos a elas atribuídas. Usando-se assim estas relações no sentido inverso, pode-se obter as cargas máximas por espera ou total a serem detonadas de modo que as vibrações excessivamente altas não atinjam as construções vizinhas.

Conforme já observado em outros itens deste trabalho, a correlação entre amplitudes de vibração e danos causados em edifícios e instalações vizinhas é normalmente feita através de dados experimentais de inúmeros casos estudados.

Após a análise dos fatores que provocaram os danos, atribui-se a eles um dado grau de severidade ou importância (desprezível, precaução, perigo e colapso) e quantifica-se estas vibrações por meio de um parâmetro apropriado (aceleração, deslocamento, etc.). A partir daí são então estabelecidos os critérios de dano estrutural.

Segundo DINIS DA GAMA (2002), a tendência moderna consiste em desenvolver critérios de dano mais científicos, levando-se em consideração as verdadeiras propriedades das edificações e, por outro lado, quantificando as vibrações em termos de tensões dinâmicas, que são, na opinião do autor, conceitos mais fáceis de tratar do que acelerações, velocidades ou deslocamentos.

Estas novas abordagens do problema da estabilidade dinâmica das estruturas parecem ser aplicáveis à determinação das massas das cargas explosivas que podem ser detonadas em distâncias diferentes, atribuindo a cada uma delas um fator de segurança que pode ser utilizado para o estabelecimento de decisões sobre a forma como devem ser executados os desmontes.

Enquanto estas novas metodologias não tiverem uma aplicação mais consolidada, pode-se fazer uso dos critérios empíricos convencionais baseados em numerosos experimentos. Entre eles está o critério do USBM para danos em estruturas próximas às locais de desmonte por explosivos, quando não existe instrumentação de registro das vibrações. Este critério é bastante simplificado, mas serve para proteger as construções dos impactos de uma detonação, e estabelece o seguinte: para uma dada carga de explosivos detonada por espera, a distância de segurança D deve ser:

$$D \leq 22,5x\sqrt{Q} \quad (59)$$

onde

D [m]

Q [kg]

Então, obtendo-se os valores das velocidades resultantes de partícula obtidas em cada desmonte, pode-se correlacioná-las com as distâncias (entre o centro do plano de fogo e o local de captação) e com as cargas de explosivos detonados por espera. Em virtude da dispersão

observável de valores que resultaria da consideração dessas três variáveis, sem atender às litologias de propagação das vibrações, podem-se estabelecer leis de propagação específicas para cada tipo de rochas presentes em determinado empreendimento, e ainda, estabelecê-las para cada direção relevante do espaço.

Portanto, para a correlação matemática das três variáveis referidas, deve-se procurar equações do tipo:

$$V = aQ^b D^c$$

as quais, em rigor, são válidas para cada tipo rochoso e para cada direção do espaço onde se situa a rocha a ser desmontada.

Embora não seja fácil estabelecer a correlação entre um desses parâmetros e as circunstâncias reais dos desmontes, considera-se por razões de simplicidade (dada pela Teoria dos Sistemas com Grau de Liberdade Simples), que apenas o coeficiente a varia com o tipo de rocha. De acordo com esta hipótese de trabalho, são aplicadas técnicas de regressão estatística no tratamento dos dados de campo, os quais fornecem, após a aplicação dos métodos dos mínimos quadrados, os valores característicos da situação real analisada. Após a obtenção dessas expressões, obtém-se algumas conclusões de interesse, tais como:

- a) para as mesmas cargas, detonadas às mesmas distâncias, as formações geológicas mais atenuadoras das amplitudes das ondas, dão origem a maiores velocidades vibratórias do que as formações menos dissipadoras de energia vibratória;
- b) esta aparente contradição resulta do fato das relações entre as velocidades vibratórias v e tensões dinâmicas α serem do tipo:

$$\alpha = \rho c v \quad (60)$$

onde ρ representa a massa específica e c a velocidade de propagação das ondas sísmicas, os quais são parâmetros característicos de cada tipo de rocha.

- c) por este motivo, os tipos litológicos mais atenuadores possuem simultaneamente menores valores do produto ρc (a chamada impedância característica da rocha), fato que explica como neles as tensões dinâmicas se atenuam mais rapidamente, embora o mesmo não ocorra para as velocidades vibratórias.

Sendo assim, parte deste trabalho será o estudo denominado de "levantamento de equação carga-distância", onde foram monitorados até 8 pontos para uma mesma detonação, com todos os locais de captação alinhados. Esta quantidade de pontos monitorados permite a obtenção de pontos num gráfico que por ajuste de curva originam uma equação relacionando carga máxima por espera, distância ao ponto de detonação e velocidade de vibração de partícula.

Com esta expressão pode-se definir as cargas usadas por uma mineração ou operação de desmonte de rocha que deverão causar um dado nível de vibração a uma dada distância, ou estimar o nível de vibração resultante conhecendo-se as cargas e a distância.

9.2. O MÉTODO DA GEOSONICS

9.2.1. Apresentação

Uma determinação precisa do campo de vibrações ou o padrão ao redor de um local em particular possibilita uma melhor identificação das condições geológicas de subsuperfície, tais como presença de falhas e variações na cobertura de solo que contribuem para a existência de níveis anômalos de vibração e também para a avaliação dos parâmetros do plano de fogo adotado como tempo de retardo, afastamento e seqüência de iniciação que contribuem para a dispersão da energia sísmica.

A medição de amplitudes de vibração de terreno e as frequências associadas em um grande número de pontos ao redor de uma dada localidade não seria possível com o uso de sismógrafos de engenharia convencionais. Os custos necessários para a aquisição de equipamentos e o tempo exigido para a sua programação, instalação e descarregamento de dados seriam proibitivos.

Diversos estudos têm fornecido detalhes sobre o papel desempenhado pelos parâmetros relacionados ao plano de fogo na geração e propagação de vibrações de terreno. Estes estudos eram tipicamente baseados em medições sismográficas feitas com um sensor ou quando muito algumas unidades de um arranjo simples monitorando diversas detonações para que fornecessem dados suficientes para uma análise. Através da utilização de um grande número de sensores que abrangem uma grande área ao redor de um local de detonação, os efeitos de um plano de fogo em particular ou mesmo a mudança em um de seus parâmetros poderiam ser imediatamente avaliados por meio de um padrão de vibração. O padrão de vibração é estabelecido a partir de medições de amplitudes de vibração completas ao redor da detonação. Pode-se observar um aumento bem definido da amplitude de vibração à medida que se caminha em direção ao ponto de detonação.

Com o objetivo de mensurar o efeito da ressonância geológica, a Geosonics Inc. desenvolveu o Sistema de Iso-velocidades (conhecido também como iso-seismic). Este sistema permite a fácil distribuição e instalação de mais de uma centena de sensores triaxiais ao redor de um local de detonação. Esta distribuição espacial privilegiada permite medições de modo a cobrir de forma eficiente empreendimentos como minas, pedreiras ou obras de desmonte de rocha desde os pontos mais próximos da detonação (algumas dezenas de metros) até locais que se situam no limiar da percepção da vibração (centenas ou mesmo milhares de metros dependendo da magnitude da detonação).

Criada por D.T. Froedge (RUDENKO, 1998 ; FROEDGE, 1990 e 1994) a técnica permite que o efeito de uma carga explosiva seja rastreado à medida que a onda de vibração se afasta do local de detonação. Pode-se desenhar assim um mapa de contorno das vibrações da detonação medidas pelos sismógrafos, onde as linhas de contorno conectam as áreas nas quais as amplitudes de vibração são iguais. Mapas obtidos de diversas detonações dentro de uma mina ou pedreira mostram que enquanto a amplitude da vibração do terreno em um local em particular irá variar de detonação para detonação, a taxa na qual a amplitude da vibração do terreno varia é constante. Isto significa que se a geologia em uma localidade em particular tende a atenuar a vibração rapidamente, ela o fará de modo consistente, não importando se a vibração for maior ou menor. De modo similar, se a geologia tende a ressonar, amplificar ou perpetuar as vibrações do terreno, ela o fará tanto para os níveis de vibração altos como para os baixos (RUDENKO, 1998). As taxas de atenuação de vibração fazem com que a velocidade de partícula de pico em uma localidade em particular aumente ou decresça relativamente à sua vizinhança de modo previsível. Por causa desta taxa na qual as vibrações são atenuadas de modo constante para uma localidade em particular, a forma dos contornos de iso-velocidade pode ser usada para identificar as tendências na vibração que o terreno apresenta.

A intensidade da vibração do terreno decresce tipicamente à medida que a vibração se propaga para longe da sua fonte. Às vezes, no entanto, a amplitude da vibração poderá aumentar em certas áreas ainda que a distância em relação à fonte continue aumentando. A localização destes níveis anômalos de vibração define uma espécie de padrão do comportamento da vibração em uma área. Áreas que demonstram um aumento pronunciado na amplitude de vibração (chamados de "hot spots" da vibração) irão identificar-se a si mesmas como círculos concêntricos de velocidade de partícula crescente. Estas áreas são um indicativo de uma resposta geológica da superfície próxima e irão reaparecer com freqüência em diversos mapas, a despeito da localização da bancada desmontada. Estas áreas devem ser o foco das técnicas de controle da vibração.

A resposta da vibração geológica pode aumentar a magnitude do movimento do terreno, mudar a freqüência da vibração e aumentar a duração da vibração do terreno. Sabe-se ainda que a resposta estrutural é diretamente proporcional à magnitude da vibração do terreno, à duração da vibração, e também o quão próximo a freqüência da vibração está da freqüência fundamental da estrutura. Através da comparação de contornos de iso-velocidades produzidos por uma detonação de bancada com a detonação de uma carga simples, a técnica da iso-sísmica identifica claramente áreas onde a resposta estrutural pode ser maior e conseqüentemente a maior probabilidade de que surjam reclamações.

O uso do sistema de iso-velocidades no controle da vibração permite à empresa lidar com reclamações a respeito de vibrações por meio da redução da resposta estrutural, e para que isto seja possível deve-se alterar a freqüência, diminuir a duração, e/ou diminuir a amplitude da vibração do terreno. Uma vez que a freqüência fundamental do terreno não pode ser mudada, deve-se mudar a freqüência com que o local irá responder, o que fará com que a duração e a

amplitude do movimento do terreno sejam reduzidas e também a energia disponível da frequência (ou próxima a elas) das estruturas residenciais, onde a transmissividade da energia da vibração é maior.

Para se alterar frequência da vibração existe um método, também da Geosonics, chamado de “Vibra-map”, que entretanto, não será discutido neste trabalho. Uma descrição resumida deste método seria: a detonação de uma carga de coluna simples mostra o quanto o local responde à energia sísmica. Ela é a componente básica de uma detonação de múltiplos furos. Reil et. al. apud RUDENKO (1998) mostraram que duas detonações de um furo isolado poderiam produzir históricos de tempos e espectros de frequência para uma localização específica de um sismógrafo. Este fato é fundamental na previsão do caráter (frequência e duração) de uma detonação de múltiplos furos. Os efeitos de uma detonação realizada em uma bancada com múltiplos furos podem ser previstos pela soma das ondas de cada um dos furos, dispersas em intervalos correspondentes aos tempos de retardo entre elas. A manipulação de tempos de retardo para se produzir um efeito mínimo adverso de vibração tem-se mostrado possível por meio do emprego desta técnica.

9.2.2. O Sistema Iso-Seismic

9.2.2.1. Instrumentação

Este sistema consiste de unidades Micro-seis, um computador central e um programa de análise. As unidades Micro-seis são sismógrafos compostos por três geofones montados triortogonalmente, um computador com um conversor A/D e baterias que podem durar até 24 horas. Estas unidades detectam níveis de vibração em uma faixa de frequência que vai de 3.5 Hz a 1000 Hz e possuem taxa de amostragem de 4000 amostras/segundo por canal (este valor varia de 1000 a 5000 de acordo com o tipo de sismógrafo) e registram e armazenam velocidades de pico de partícula e frequências de até 20 eventos (FROEDGE, 1994).

Além destas unidades Micro-seis, pode-se utilizar outros tipos de sismógrafos como as unidades Micro-seismograph, as unidades SSU DK2000 e as unidades SSU 3000LCD, que são capazes de medir uma onda de forma completa.

Em média, o número total de sismógrafos utilizado para confeccionar um mapa de iso-velocidades varia entre 90 e 160.

9.2.2.2. Operação

Antes de registrar os eventos, o computador central programa os sismógrafos com parâmetros relacionados ao período de espera, ao modo de monitoramento e ao nível de disparo (trigger).

Durante este período de espera, os sismógrafos são instalados nos diversos locais que circundam o local de detonação. Após o término do período de espera, eles entram em modo de monitoramento. Quando ocorre a detonação, os níveis de vibração excedem o nível de disparo e o

evento é então registrado e armazenado pelos sismógrafos. Após a finalização dos procedimentos relacionados à operação de desmonte, as unidades são coletadas e seus dados são transferidos ao computador. Através de programas de análise próprios, os dados de vibração são processados e depois incorporados ao Sistema Iso-Seismic. As ondas de velocidade e o espectro de energia são úteis para se fazer a análise do comportamento das ondas de vibração. Por meio do programa de análise instalado nele, o computador faz então a correlação, análise e impressão dos dados. Ao final desta etapa ele produz uma imagem precisa e compreensível dos gráficos de contorno.

9.2.2.3. Eventos monitorados

Para se conduzir um estudo de levantamento de um mapa de iso-velocidades, normalmente se monitora uma ou duas detonações normais de produção. Uma outra detonação, de um furo isolado, também pode ser monitorada para uso no sistema Iso-Seismic, mas o caráter primário do monitoramento deste furo é o de servir de dados para o sistema Vibra-map, que irá determinar os tempos de retardos a serem usados nas detonações normais de produção para otimizar a quebra e evitar sobreposições. Este trabalho pode ser executado quando na aplicação conjunta destes dois métodos num mesmo local.

9.2.2.4. Elementos que compõem os dados de entrada para a análise

- a) *Mapa e localização do fogo* – este mapa digitalizado para uso no computador deve conter a localização da bancada desmontada e dos arredores do empreendimento. Trata-se normalmente de um mapa topográfico com um tipo de coordenadas planas (por exemplo, UTM);
- b) *Plano de fogo detalhado da detonação* - deve conter o máximo de informações a seu respeito como carga máxima por espera, carga total, litologia da rocha desmontada, tipo de explosivo, identificação da bancada, parâmetros geométricos, etc.;
- c) *Distribuição das unidades Micro-seis* – trata-se de um mapa com a área de estudo, onde são mostrados e identificados a localização de cada uma das unidades Micro-seis;
- d) *Distribuição dos demais sismógrafos* – é um outro mapa, desta vez com a área de estudo onde são mostrados e identificados a localização de cada um dos demais sismógrafos, que por possuírem a capacidade de processar de modo completo a onda vibratória devem ser colocados estrategicamente de modo a cobrir de forma eficaz a área de estudo;
- e) *Registros de velocidade de pico de partícula (PPV) do Sistema Iso-Seismic* – um mapa contendo os registros de velocidades de pico de partícula de cada unidade de Micro-seis para cada uma das detonações;
- f) *Registros de frequência do Sistema Iso-Seismic* – um mapa contendo os registros de frequência predominante (de pico) de cada unidade de Micro-seis para cada uma das detonações;

- g) *Registros sismográficos do Sistema Iso-Seismic para os demais sismógrafos* – um mapa contendo os registros de velocidades de pico de partícula e de frequência predominante de cada um dos demais sismógrafos para cada uma das detonações;
- h) *Lista dos dados obtidos pelas unidades Micro-seis e pelos demais sismógrafos* – para os micro-seis são dados contendo coordenadas, distância, velocidade de partícula, frequência e número de série do sismógrafo; para os demais, além destes dados o gráfico da onda e todos os demais parâmetros sismográficos da análise cheia.

9.2.2.5. Elementos que compõem os resultados

- a) *Mapas de iso-velocidades dos níveis de velocidade de pico de partícula* – estes mapas contendo os níveis de velocidade de pico de partícula ou os contornos fornecem as medições de velocidade de pico de partícula em cada ponto dentro da comunidade que cerca o empreendimento. Estes mapas de velocidade de pico de partícula normalmente apresentam contornos em intervalos de 0,50 mm/s ou 0,02 pol/s.

Estes mapas de iso-velocidades também proporcionam um método para o cálculo da velocidade de pico de partícula em qualquer ponto que não tenha sido monitorado. Isto é feito pela comparação do registro real de uma detonação com os contornos do mapa de iso-velocidades. Um cálculo é processado para se determinar a velocidade de pico de partícula prevista em qualquer ponto dentro deste mapa. Este cálculo é baseado no registro da atual detonação e segue o procedimento descrito a seguir.

A equação abaixo pode ser usada para se calcular a velocidade de pico de partícula:

$$PPV_u = \left(\frac{C_u}{C_r} \right) x PPV_r \quad (61)$$

onde

PPV_u = velocidade de pico de partícula prevista para o local não monitorado

PPV_r = velocidade de pico de partícula real registrada

C_u = contorno de PPV do mapa de iso-velocidades mais próximo do local não monitorado

C_r = contorno de PPV do mapa de iso-velocidades do registro verdadeiro do local

O método de previsão é particularmente útil em locais onde os monitoramentos não podem ser executados em função da não disponibilidade de instrumentos ou então devido à dificuldade de acesso. Se os desmontes monitorados situam-se em na mesma área (no geral) em que foi levantada o mapa de iso-velocidades, pode-se esperar que a precisão destes cálculos em geral seja maior do que as técnicas de regressão padrão (FROEDGE, 1994).

- b) *Mapa de iso-velocidades cumulativo escalonado* – Este mapa contém dados combinados e acumulados de ambas as detonações monitoradas (de furo simples e desmonte de

produção). O mapa é gerado pela divisão dos dados das velocidades de pico de partícula de cada detonação pela raiz quadrada de sua carga máxima por espera. Os valores máximos da velocidade de pico de partícula escalonada são utilizados para se gerar contornos de velocidade de pico de partícula escalonadas. Isto resulta na velocidade de pico de partícula escalonada que representa o pior caso para todas as direções.

O propósito deste mapa é o de prever velocidades de pico de partícula baseados na carga máxima por espera de um dado plano de fogo. As velocidades de pico de partícula previstas podem ser calculadas através da seguinte equação:

$$PPV_p = PPV_e \sqrt{Q} \quad (62)$$

onde

PPV_p = Velocidade de pico de partícula prevista

PPV_e = Valor de velocidade de pico de partícula escalonada do contorno

Q = Carga máxima por espera

- c) *Iso-plotagem em três dimensões* – estas plotagens representam a superfície de vibração gerada por cada detonação, sendo uma figura bastante esclarecedora para a melhor visualização de uma propagação da vibração;
- d) *Mapas de seção transversal* – linhas de seção transversal em diversas direções a partir da origem da propagação e cujas direções são baseadas em áreas habitadas e características de máxima propagação;
- e) *Curvas de seções transversais de propagação* – representam os perfis de velocidade de pico de partícula ao longo das linhas de seção transversal de cada detonação.

Estes perfis são plotados num gráfico log-log (velocidade de pico de partícula x distância escalonada - D/\sqrt{Q}), exatamente da mesma forma com que se faz na equação carga-distância. Isto resulta numa expressão do tipo $PPV = A.DE^x$, onde A é uma constante. Assim como na equação carga-distância, pode-se utilizar esta equação para se calcular velocidades de partícula de pontos localizados próximos a um perfil em particular.

- f) *Curvas de dados de propagação das detonações* – representação de todos os dados registrados por todos os sismógrafos. São plotados da mesma maneira que os registros do item 9.2.2.4.d. Podem ser utilizados de maneira similar para se prever velocidade de pico de partícula em pontos não cobertos pelas seções transversais, porém sem a mesma acurácia do mapa de iso-velocidades.
- g) *Gráficos USBM/OSMRE* – apresenta os dados registrados pelos sismógrafos e verifica se estão em conformidade com algum critério, no caso específico, o dos EUA.

9.2.3. Exemplo de aplicação do método

Em 1989, a Geosonics Inc. foi a pioneira na introdução do conceito de monitoramento sismográfico feito com um número muito grande de sismógrafos instalados ao redor do local da detonação. Isto serviu para demonstrar claramente os efeitos da topografia e da geologia de superfície sobre a vibração de terreno produzida por uma detonação. Esta idéia foi gerada a partir dos avanços na miniaturização e maior acessibilidade dos sismógrafos, chamados de microsismógrafos e também em função do reconhecimento de que a estrutura geológica é a responsável primária pelas características da vibração.

O serviço de sistema de iso-sísmica tem sido então empregado em vários projetos de controle de vibração usando-se até 150 sensores espalhados aleatoriamente ao redor do local de detonação. A instalação de cada sismógrafo é registrada por GPS e documentada de modo que todos eles podem ser observados em mapa ou mesmo em fotografia aérea. Após o término do monitoramento, todos os registros dos sensores são transferidos para um programa gráfico. Isto também se aplica a todos os pontos de interesse como a localização de casas, ruas, perímetro de operação e outros pontos de referência, que são digitalizados e colocados no mesmo mapa.

Os resultados deste estudo servem para diversas finalidades, podendo-se citar:

- Identificação de áreas com possíveis reclamações;
- Prever os níveis de vibração em áreas onde não há monitoramento sismográfico;
- Avaliar a eficácia na redução dos níveis de vibração no estudo de uso de diferentes explosivos, na uso planos de fogo alternativos e procedimentos de controle da vibração; e
- Mostrar, de forma convincente e detalhada, à comunidade que os efeitos de uma detonação podem ser previstos e controlados.

No trabalho de BERGER (1997) há um estudo de 1995, realizado nas pedreiras da empresa Bardon Trimount, localizadas próximas à cidade de Boston, nos Estados Unidos.

Da análise de 14 mapas de iso-velocidades em cinco diferentes pedreiras feita pela Geosonics (BERGER, 1997), observou-se o seguinte:

- apesar destas pedreiras estarem relativamente próximas umas as outras, a "impressão digital" de cada uma delas foi significativamente diferente, embora cada local tenha demonstrado que a taxa de redução da propagação ocorreu para uma mesma direção (oeste no caso), as diferenças no geral de pedreira para pedreira enfatizaram a natureza de cada local;
- desmontes de produção e detonações de um único furo dentro de uma mesma área produzem padrões de vibração bastante similares;
- desmontes de produção e desmontes bem menores (um ou mais furos de teste) com cargas máximas por espera parecidos e detonados próximos um ao outro compartilham padrões e valores de vibração similares. Estes autores compararam um desmonte utilizando um total de 5.085 lb (2306,6 kg) com uma carga máxima por espera de 203 lb (92,1 kg) com uma

detonação de um furo com uma carga de 70,76 kg (156 lb) e os resultados foram bastante claros indicando que as taxas e valores de propagação gerados por ambos eram quase idênticos.

O principal propósito deste estudo foi o de proporcionar uma situação em que todas as partes envolvidas (empresas, governo e comunidade) saíssem ganhando. O resultado pode ser medido por meio dos seguintes ganhos:

- a) Comunidade – os vizinhos às pedreiras ganharam de duas formas: *primeiro*, as reclamações foram reduzidas em 68% no ano de 1995 como consequência de mudanças na percepção das pessoas, atribuída diretamente à redução da frequência de detonações como consequência do aumento do diâmetro dos furos e do número de furos por detonação. Este ganho se deve ao conhecimento adquirido pela comunidade e que está diretamente relacionado ao *segundo ganho*: aumento na confiança da comunidade com relação ao nível de segurança graças ao entendimento de que os efeitos do desmonte de rocha podem ser previstos e controlados e, tendo como consequência, o apoio dela para que as mudanças na frequência e no plano de fogo fossem implementadas.
- b) Governo – também obteve ganhos de duas formas: os chefes de bombeiros, que eram freqüentemente chamados para julgar estas disputas, tiveram acesso a evidências concretas para que pudessem aprovar as permissões de detonação, uma vez demonstrado que os níveis de vibração de detonações do passado estavam abaixo dos limites estabelecidos pelas normas. Assim, o primeiro ganho foi a resposta positiva destes chefes após terem conhecimento do número de sismógrafos instalados e do escopo do projeto além de poderem participar e endossar as suas opiniões durante as reuniões. O segundo ganho ocorreu com a criação de um comitê, cuja tarefa foi a de reescrever as regulamentações do estado de Massachusetts concernentes às detonações, onde as informações dos mapas de iso-velocidades ajudaram na promulgação da revisão destas regulamentações.
- c) A empresa de explosivos Austin Powder, por utilizar de forma mais eficiente os seus recursos. O aumento no tamanho da detonação permitiu um ganho na produtividade de sua equipe, redirecionando parte do tempo gasto para outros negócios e maior flexibilidade no agendamento das detonações. Estas podem ser feitas num intervalo maior entre elas. Assim a Austin não fica tão pressionada e pode escolher o dia mais conveniente, como, por exemplo, o dia em que as condições climáticas são as mais favoráveis.
- d) A Bardon Trimount, dona das pedreiras. A principal função de uma empresa é gerar lucros. Ainda que um projeto deste tipo tenha a melhor das intenções, o seu sucesso deve ser medido em termos de ganhos. Nas cinco pedreiras onde o sistema foi implantado, o número de detonações diminuiu em 28% e a quantidade produzida (em toneladas) cresceu 6%. As detonações (tamanho do fogo) ficaram em média 49% maiores. Os custos globais por tonelada para as operações de perfuração e desmonte diminuíram em 3%, onde houve um

aumento de 8% no custo de explosivos e uma redução de 15% no custo de perfuração como consequência do aumento no diâmetro dos furos. Outras formas de economia foram observadas relacionadas a outros ganhos em eficiência: todas as pedreiras estão em locais confinados e por isso quando uma detonação ocorre é necessário parar toda a pedreira por questões de segurança. Antes disso as pedreiras detonavam em média 15 vezes por semana com 15 minutos de parada por fogo, o que resultava em média 4 horas de tempo perdido por semana. A redução de 28% na frequência de detonações permitiu à empresa recuperar 1 hora de produção, o que significa ganhar uma semana inteira de produção num ano. Outro ganho ocorreu nos desmontes secundários, onde as pedras com dimensões superiores aos das operações seguintes foram reduzidas em 28% graças aos aumentos no tamanho do fogo e à mudanças na geometria que permitiram uma melhor fragmentação, observada no aumento da produtividade da britagem. Mas talvez o ganho mais recompensador da empresa tenha sido a redução em 68% no número de reclamações da comunidade. Uma ação pró-ativa, a diminuição provável de futuros litígios e a confiança de poder contar com evidências bastante fortes que permitem um bom planejamento podem ser considerados como os maiores ganhos para a empresa.

No Anexo 1 são apresentados alguns mapas de iso-velocidades levantados pela Geosonics nos Estados Unidos.

CAPÍTULO 10 - NORMAS E CRITÉRIOS DE CONTROLE DA VIBRAÇÃO DE TERRENO

10.1. CRITÉRIOS DE PREVENÇÃO DE DANOS

Na transmissão de uma onda elástica, a deformação é diretamente proporcional à velocidade de partícula. Como em geral o dano estrutural tem relação com a deformação, é admissível que se use a velocidade máxima de vibração de partícula como parâmetro para quantificar os efeitos das vibrações de terreno (ESTON, 1998).

Após a constatação das leis que governam a propagação de uma onda sísmica num maciço rochoso, deve-se estimar o nível máximo de vibração que uma estrutura pode suportar com relação ao local de detonação.

A decisão de quais critérios ou limites de segurança devem ser adotados é um assunto bastante delicado e que exige um grande conhecimento dos mecanismos presentes no fenômeno da detonação e da resposta estrutural. Um critério pouco rigoroso pode resultar em danos e reclamações, ao passo que uma postura excessivamente conservadora pode, às vezes, inviabilizar atividades que fazem uso do desmonte por explosivos. Os limites para as velocidades de vibração de partícula devem levar em conta não apenas o potencial de danos que as ondas vibratórias podem produzir nas estruturas, mas também o tipo de material que as compõe. Sabe-se que a vibração é um entre os vários fenômenos que podem causar trincas e fissuras, sendo ela muitas vezes apenas a desencadeadora de eventos visíveis de um processo de instabilidade que pode ser atribuído a estes fenômenos (como por exemplo, o recalque do terreno em função do peso da estrutura ou de alterações no nível freático; variações térmicas; materiais não apropriados; erros de cálculo; infiltrações, etc.). KONYA (1995) cita uma lista de dezenas de fenômenos que podem ser a causa do aparecimento de fissuras nas construções.

A Figura 59 apresenta um resumo comparativo dos critérios de danos adotados por alguns autores e também entre as normas adotadas por alguns países. Os valores do eixo horizontal se referem à velocidade de vibração de partícula máxima permitida para uma determinada condição como a amplitude de frequência (dados pelos valores do eixo vertical), o tipo de edificação, a intensidade de aceleração (g), o tipo de atividade e o tipo de edificação protegida. Alguns dos critérios de danos já foram apresentados no Capítulo 4.

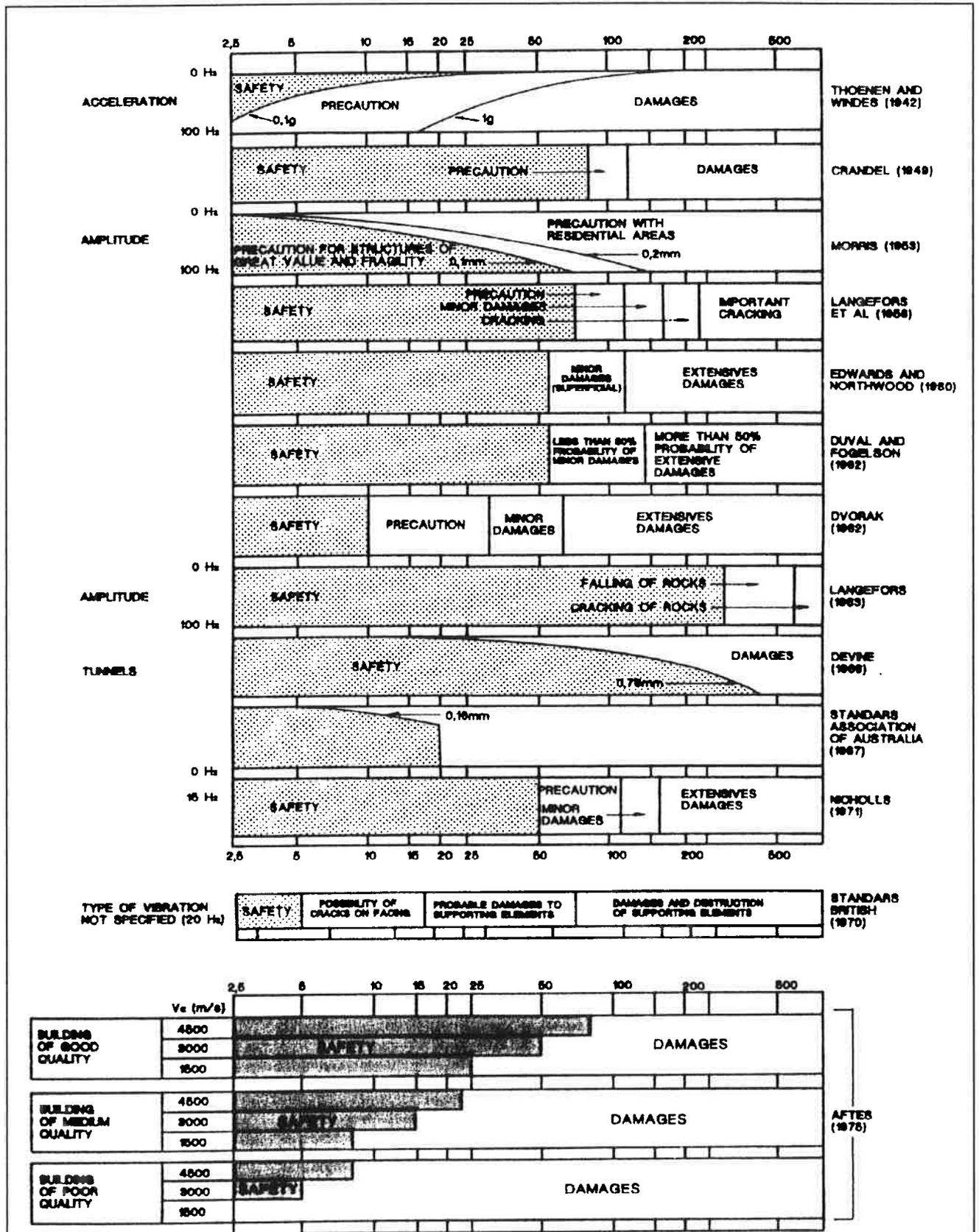


FIGURA 59. Critérios de danos propostos por alguns autores e normas adotadas por alguns países.

* V_c = velocidade de propagação da onda vibratória

As comparações desta Figura demonstram as diferenças que existem entre os autores e as normas, sendo que alguns dos critérios estão ultrapassados e outros, como as normas adotadas por alguns países, já passaram por reformulações. A tendência, no entanto, é a de que as normas e critérios, quando são reformuladas, se tornem cada vez mais restritivas, principalmente no caso do incômodo.

Algumas das principais normas internacionais serão apresentadas na seqüência, assim como as normas brasileiras relacionadas com os limites de vibração para o uso de explosivos em áreas urbanas.

10.2. NORMAS INTERNACIONAIS

10.2.1. Estados Unidos

10.2.1.1. USBM RI 8507

O USBM Report of Investigations - RI 8507 (SISKIND, et al, 1980) é considerado o critério de dano mais recente, onde se aborda a ressonância das estruturas em resposta às vibrações de terreno de baixas freqüências. Neste caso, o que ocorre é um aumento do deslocamento e da tensão, sendo considerado então um grave problema que mereceu atenção destes especialistas. Este critério reintroduziu a dependência do dano com relação à freqüência, ainda que os limites seguros de velocidade de partículas sejam independentes da freqüência. Além disso, ele levou em consideração as medições feitas dentro das estruturas, ao invés de medições nos terrenos adjacentes às estruturas. O limite inferior de dano utilizado pelo RI 8507 foi especificado como o dano cosmético do tipo mais superficial, ou seja, fissuras interiores que se desenvolvem em todas as casas, independentemente de haver detonações ou não.

O nível de vibração seguro foi definido como aquele incapaz de produzir trincas ou outros danos nas residências. Os limites de segurança são seguintes:

- Para casas modernas (revestimentos internos): 19,05 mm/s para freqüências menores do que 40 Hz e 50,80 mm/s para freqüências maiores do que 40 Hz ;
- Para casas antigas (gesso em madeira e estuques interiores): 12,70 mm/s para freqüências menores do que 40 Hz e 50,80 mm/s para freqüências maiores do que 40 Hz ;

Este critério é baseado num nível de confiança de 95%. A Figura 60 mostra a comparação de um evento monitorado com o critério do USBM.

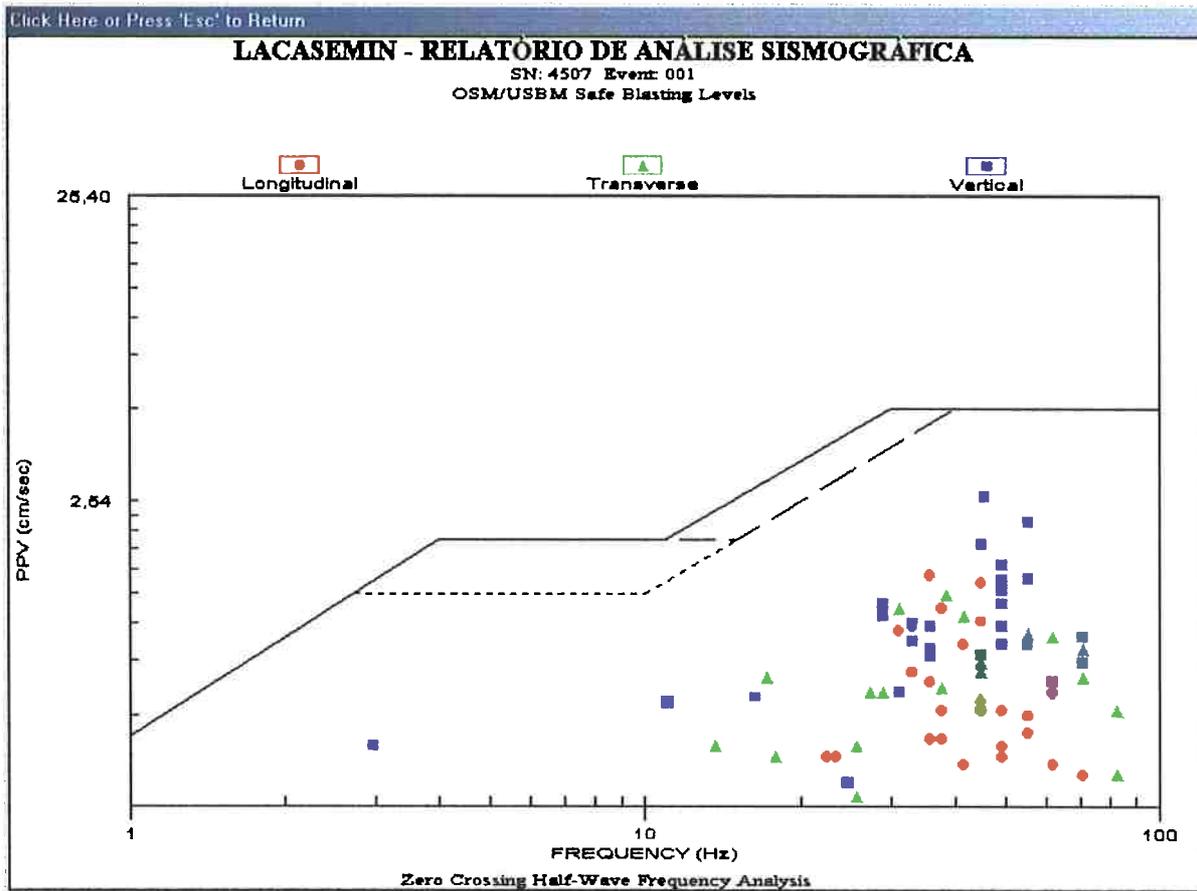


FIGURA 60. Comparação dos resultados de um evento, monitorado pelo LACASEMIN (na Pedreira Riama), com o critério do USBM (envoltória em linha pontilhada)

10.2.1.2. OSM

Segundo KONYA (1995), os limites de vibração estabelecidos pelo USBM, baseados no trabalho de NICHOLLS (1971) foram considerados excessivamente conservadores e duramente criticados pelas indústrias ligadas a este tipo de atividade.

O Office of Surface Mining – OSM modificou o critério proposto pelo USBM, baseando-se em algumas propostas recebidas e apresentou uma proposta menos rigorosa e similar à proposta alternativa do USBM (RI 8507). Ainda que não esteja explicitada, reconhece a dependência da vibração em relação à frequência associada com a distância. A Tabela 9 apresenta um resumo desta regulamentação, enquanto que a Figura 61 mostra um gráfico comparando um evento monitorado com o critério estabelecido pelo OSM.

TABELA 9. Limites de vibração do terreno regulamentados pelo OSM.

Distância em relação ao local da detonação (m)	Velocidade de pico de partícula máxima permitida (mm/s)	Distância Escalonada - Na ausência de monitoramento sísmográfico ($m/kg^{1/2}$)
0 a 91	31,8	22,7
91 a 1524	25,4	25
Acima de 1524	19,0	29,5

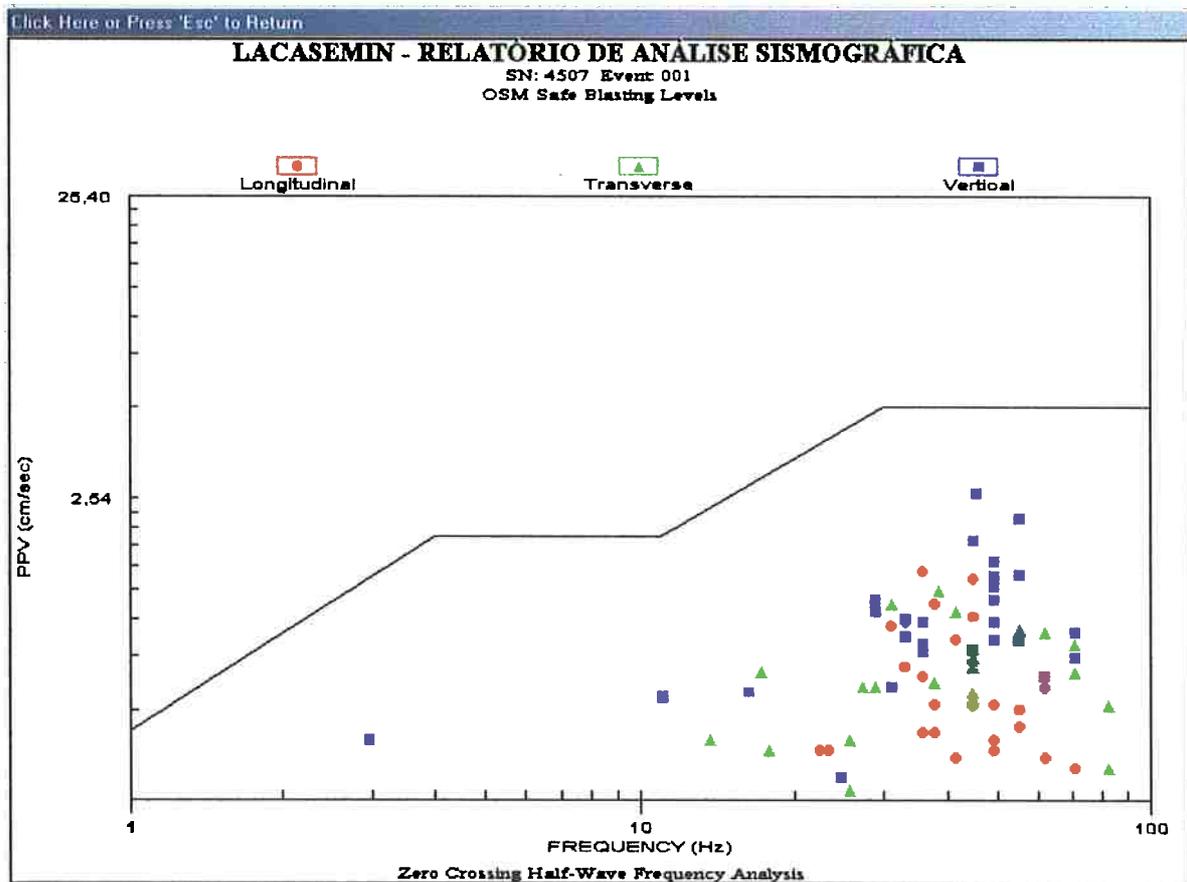


FIGURA 61. Comparação de um evento, monitorado pelo LACASEMIN (na Pedreira Riuma), com o critério do OSM.

A Tabela 9 combina os efeitos da distância e da frequência, ou seja, em distâncias menores predominam as altas frequências ao passo que em distâncias maiores predominam as baixas frequências. Os edifícios possuem características de resposta a baixas frequências podendo vibrar (ressonância) e sofrer danos. Propõe também que se use a distância escalonada como fator de controle da vibração na ausência de monitoramento sísmográfico, ou seja, faça uso de um balanceamento de carga máxima por espera em função da distância da detonação.

10.2.2. Alemanha – Norma DIN 4150

A Norma DIN 4150, de 1983 passou a ser adotada como a norma padrão após a unificação da Alemanha. De acordo com esta norma, os limites de velocidade de vibração de partícula, dados em mm/s, devem considerar o tipo de estrutura civil e a frequência (Hz) para se verificar a existência de risco de danos em edifícios. Ela classifica os edifícios em três tipos:

- a) Edifícios estruturais
- b) Habitações
- c) Monumentos e construções delicadas

As frequências, por sua vez, são analisadas em três intervalos: abaixo de 10 Hz, entre 10Hz e 50 Hz e acima de 50 Hz. Ela ainda considera que para valores de frequência superiores a 100 Hz, a estrutura suporta níveis altos de vibração (BACCI, 2000).

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

Para a avaliação de danos estruturais decorrentes de detonações, segundo Berta (BACCI, 2000) os limites para as velocidades de vibração de partícula admitidos para os diversos tipos de construções, em função da frequência, segundo a norma DIN 4150, são apresentados na Tabela 10, enquanto que a Figura 62 mostra um gráfico onde se compara um evento monitorado com o critério estabelecido pela Norma DIN 4150.

TABELA 10. Valores permitidos de velocidade de partícula (em mm/s) pela norma DIN 4150 para a segurança estrutural em edifícios (BERTA, 1990)

Tipo de estrutura	Fundação			Andar mais alto dos edifícios Qualquer frequência
	Frequência (Hz)			
	< 10	10-50	50 - 100	
Industrial ou comercial	20	20 a 40	40 a 50	40
Edifícios residenciais	5	5 a 15	15 a 20	15
Edifícios históricos e outras construções mais delicadas	3	3 a 8	8 a 10	8

OBS. Para vibrações com frequências superiores a 100 Hz, podem ser aceitos níveis mais elevados.

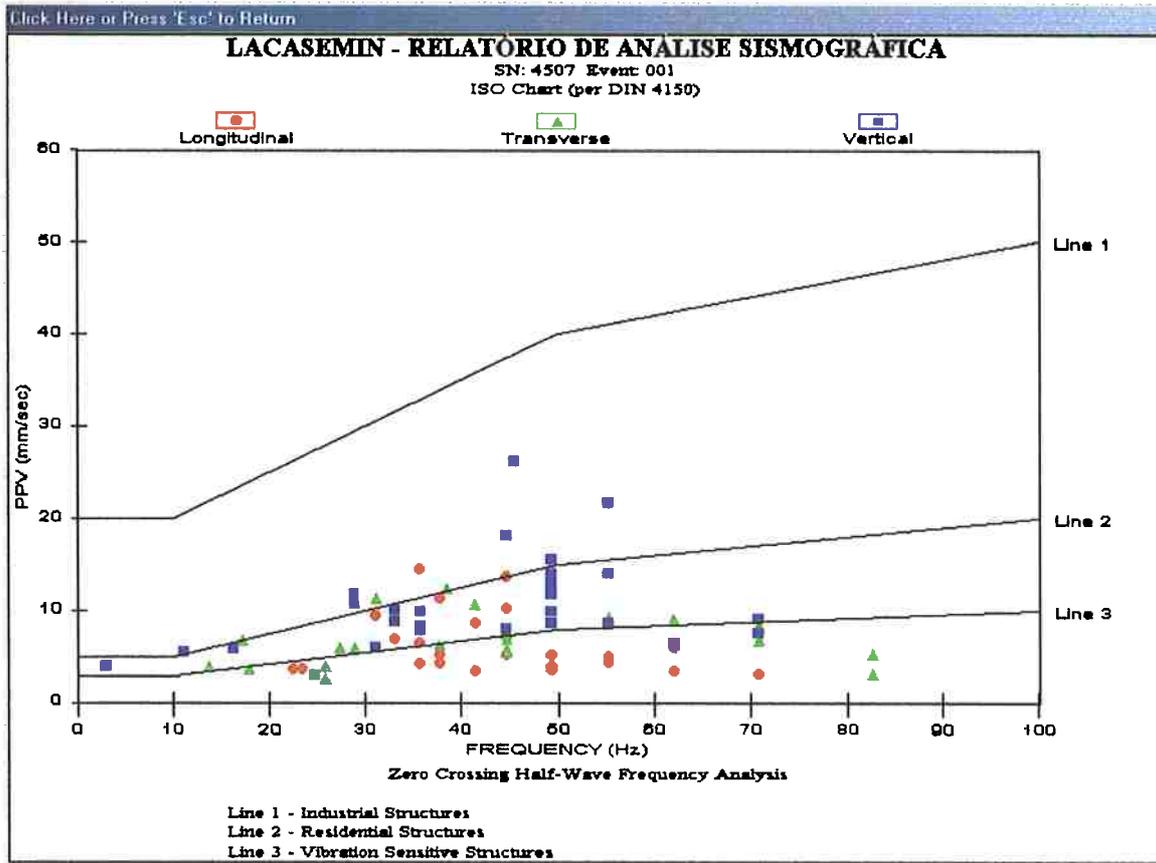


FIGURA 62. Comparação de um evento monitorado, monitorado pelo LACASEMIN (na Pedreira Riuma), com o critério estabelecido pela Norma DIN 4150.

10.2.3. Reino Unido

A BS (British Standard) 7385: Parte 1 de 1990 discute a medição de vibração em edificações em termos gerais, sendo que as recomendações mais específicas para a investigação de dano são dadas pela BS 7385: Parte 2 de 1993 e, para a percepção humana, a BS 6472 de 1992 (SCOTTISH EXECUTIVE, 2001).

Cita quatro parâmetros interrelacionados que podem ser usados de modo a se definir a magnitude da vibração do terreno em qualquer local: Deslocamento de partícula (dado em mm); Velocidade de partícula (em mm/s); Aceleração de partícula (mm/s^2 ou g) e Freqüência (Hz). Assim como nas demais normas citadas há uma preferência pela velocidade de pico de partícula.

A BS também classifica os danos de acordo com os tipos de danos ocorridos estruturas residenciais e que são apresentados na Tabela 11.

TABELA 11. Efeitos sobre as estruturas de acordo com a BS 7385 Parte 1.

Tipo de dano	Descrição	Limites de vibração
Dano cosmético ou limite de dano	Formação de rachaduras ou o aumento de rachaduras existentes em gesso, paredes de reboco e juntas.	Com uma frequência de 4 Hz, o valor de referência é de 15 mm/s para a velocidade de partícula de pico, passando a 20 mm/s para 15 Hz e 50 mm/s para frequências superiores a 40 Hz.
Dano menor	Formação de rachaduras maiores ou desprendimento e queda de gesso ou superfícies de rebocos, ou aparecimento de rachaduras em blocos de concreto ou de tijolo.	Possibilidade de danos para magnitudes de vibração maiores do que o dobro dos valores de referência para os danos cosméticos.
Dano maior ou estrutural	Danos a elementos estruturais de um edifício	Possibilidade de danos para magnitudes de vibração maiores do que quatro vezes os valores de referência para os danos cosméticos.

10.2.4. França

Atualmente na França existem duas recomendações: a sugerida pela AFTES (Association Française des Travaux en Souterrain), de 1974 e a Circular, proposta pelo Ministério do Ambiente, de julho de 1986 e ampliada em setembro de 1993 (BACCI, 2000).

A recomendação da AFTES subdivide os edifícios submetidos às vibrações em três categorias distintas em função das suas características estruturais;

- tipo A – edifício de baixa qualidade mecânica (muros deformados);
- tipo B – construções de média qualidade mecânica (sem deformações aparentes);
- tipo C – construções de boa qualidade mecânica (fundações profundas)

A Figura 63 mostra um gráfico com um resumo da norma francesa.

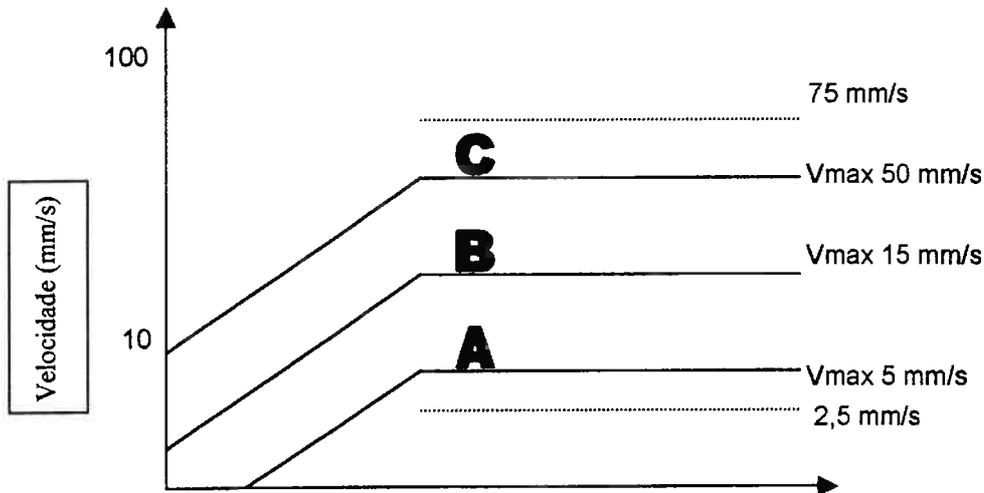


FIGURA 63. Limites de velocidade de vibração de partícula estabelecidos pela AFTES.

10.2.5. Austrália

Os critérios adotados para os limites de velocidade de vibração de partícula na Austrália são baseados nos seguintes órgãos:

- 1) State Pollution Control Commission (SPCC) do New South Wales Environmental Noise Control Manual
- 2) Australian Environmental Council's (AEC) "Draft Technical Basis" – AS2187 – Parte 2, 1983 – Uso de explosivos
- 3) USBM RI 8485

Em 1980 o critério do SPCC era de 7 mm/s para a velocidade de vibração de partícula (sem mencionar a frequência). Adotava ainda um horário (entre 9 h e 15 h) para as detonações a fim de evitar inversões térmicas. Em 1985 sofreu uma reformulação que pode ser observada na Tabela 12.

TABELA 12. Critérios estabelecidos pelo SPCC (SCOTT et al, 1996)

Horário de detonação		PPV máxima permitida (mm/s)
Seg – Sáb	9 h às 15 h	5
Seg - Sáb	6 h às 9 h	2
Seg - Sáb	15 h às 20 h	2
Domingos e feriados	6 h às 20 h	1
Qualquer dia da semana	20 h às 6 h	1

Australian Environmental Council's (AEC) "Draft Technical Basis" – AS2187 – Parte 2, 1983 –
Uso de explosivos

A AS2187 no início estabelecia que os limites de velocidade de vibração de partícula eram de 19 mm/s para frequências acima de 15 Hz, 10 mm/s para frequências entre 15 Hz e 8 Hz e valores mais baixos (não definidos) para frequências abaixo de 8 Hz. (SCOTT et al, 1996).

A AS2187 parte 2 de 1983 estabeleceu os seguintes critérios, apresentados na Tabela 13:

TABELA 13. Critério estabelecido pela AS2187 parte 2 de 1983.

Tipo de estrutura	PPV máxima permitida (mm/s)
Edifícios históricos e monumentos de valor ou significado especial	2
Casas e edifícios industriais de baixa estatura	10
Edifícios comerciais e industriais ou estruturas reforçadas por concreto ou aço	25

A edição da AS2187 parte 2 de 1993 possui o mesmo critério que a anterior com a diferença de que não há limite para edificações históricas e monumentos. Esta norma, por sua vez, não contempla alguns tipos de edifícios como aqueles com vão grandes, os muito altos e os edifícios especiais como os centros de pesquisa com instrumentos sensíveis à vibração.

Há ainda um outro documento do AEC chamado de "Draft technical basis for the control of noise and vibration from blasting", que sugeria as seguintes restrições (Bacci, 2000):

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

10.2.6. Índia

Na Índia, através do CMRI (Central Mining Research Institute), foi proposta uma norma sugerindo limites de vibração de terreno por meio do CMRI S&T Project Report, de 1991 (ROY, 1998).

Esta norma cita a análise por FFT como o meio científico mais simples de se analisar a ressonância e magnificação de problemas para qualquer estrutura, uma vez que ela fornece

informações práticas sobre a faixa de frequência e o comprimento de onda responsável que precisa ser evitado ou eliminado para evitar danos a estruturas e incômodos.

Ela contém ainda uma sugestão simples para a aproximação da estimativa da frequência natural ou fundamental da estrutura de qualquer edifício alto, que é dada pela relação proposta por Newmark e Hall em 1982 apud ROY (1998).

$$p = 2\pi \sqrt{\frac{L}{0,05h}} \quad (63)$$

onde

p = frequência natural ou fundamental

L = largura da estrutura

h = altura da estrutura

A Tabela 14 apresenta os critérios de danos levantados pelo CMRI para as construções típicas do país, enquanto que a Tabela 15 apresenta os limites de vibração estabelecidos pela norma.

TABELA 14. Limites de velocidade de vibração de partícula estabelecidos pelo CMRI

Evento	PPV (mm/s)	Local de medição	Tipo de estrutura
Surgimento da 1ª fissura	50,0	Piso térreo	Estrutura de tijolos
Surgimento da 1ª fissura	76,0	Primeiro piso	Estrutura de tijolos
Surgimento da 1ª fissura	400,0	Paredes laterais	Estrutura de concreto
Alargamento de fissuras existentes	90,0	Piso térreo	Estrutura de tijolos
Fissuras profundas	240,0	---	Estrutura de tijolos
Queda de reboco	280,0	---	Estrutura de tijolos
Fissuras severas	192,0	Paredes laterais e cantos	Casa de barro

TABELA 15. Valores limites estabelecidos pelo CMRI para a vibração do terreno na fundação e para diferentes faixas de frequência.

Tipo	Especificação da estrutura	Valor máximo permitido para PPV (mm/s)	
		$f \leq 24$ Hz	$f > 24$ Hz
(a)	Residências, paredes interiores, estruturas com gesso, pontes	5,0	10,0
(b)	Edifícios industriais, estruturas reforçadas com concreto ou aço	12,5	25,0
(c)	Objetos de importância histórica, estruturas bastante sensíveis, edifícios com idade acima de 50 anos, estruturas em condições precárias e não-reparadas	2,0	5,0

10.3. NORMA BRASILEIRA

10.3.1. Norma ABNT NBR 9653

A norma brasileira ABNT NBR 9653 "Guia para avaliação dos efeitos provocados pelo uso de explosivos nas minerações em áreas urbanas" de novembro de 1986 fixa uma metodologia para reduzir os riscos inerentes ao desmonte de rocha com uso de explosivos em minerações, onde se estabeleceram parâmetros a um grau compatível com a tecnologia disponível para a segurança das populações vizinhas. Ela define parâmetros como velocidade de vibração de partícula resultante e suas componentes (longitudinal, transversal e vertical) e distância escalonada.

Ela estabelece que, para que uma operação de desmonte de rocha seja considerada segura, entre os parâmetros estabelecidos, deve-se garantir que a velocidade de vibração de partícula não ultrapasse o valor de 15 mm/s.

Ela ainda especifica alguns procedimentos que devem ser adotados para o monitoramento sísmográfico como o local de monitoramento, a forma de fixação, tipo de instrumento e suas especificações. Curiosamente esta norma estabelece que o sensor deve possuir uma resposta de frequência linear (de 5 Hz a 150 Hz pelo menos) mas não faz nenhuma menção ou restrição aos níveis de frequência medidos, como é feito pelas normas internacionais (USBM, DIN, etc.). Sabe-se que a frequência é fundamental para se estabelecer critérios de danos às estruturas, o que torna esta norma incompleta. Sabe-se também das dificuldades de se implantar uma norma no Brasil, onde a capacidade técnica nem sempre se impõe. Havia a necessidade de uma solução rápida e simples e foi o que ocorreu (MIDÉA, 1989). Porém ela não atende mais aos interesses da sociedade, o que reforça a necessidade de um fórum de debates, onde será fundamental a participação de profissionais que possuam o embasamento técnico necessário para se conduzir o estudo da norma, assim como a participação de empresários, comunidade e órgãos federais, estaduais e municipais para que se obtenha efetivamente a diminuição dos conflitos ambientais. Recomendações sobre a importância dos monitoramentos sísmográficos, dados e estudos sobre a

freqüência das vibrações vêm sendo feitos desde os anos 80, onde os trabalhos publicados nos anos 80 e 90 apresentavam recomendações e determinações estatísticas, grande parte deles feitos pelo IPT e encabeçados pelo Engenheiro Nilson Figueira Midéa (MIDÉA, 1986, 1987 e 1989). Sem o fórum de debates, os resultados de trabalhos relevantes podem passar despercebidos e podem não ser aproveitados para a criação de uma norma mais completa.

10.3.2. Norma CETESB D7.013

A Norma da CETESB D7.013 “*Mineração por explosivos*” de abril de 1992 fixa as condições exigíveis para a atividade de mineração por explosivos, com relação à poluição e conservação do meio ambiente, e é válida para o estado de São Paulo. Ela também apresenta algumas definições com relação à operação de mineração, assim como os parâmetros relevantes à vibração. Não está explícito no texto, mas subentende-se que ela trata a vibração como uma forma de poluição e ao estabelecer limites procura fazê-lo em termos de incômodo ou desconforto. Não está mencionada no texto a preocupação com possíveis danos estruturais, o que a difere da norma ABNT NBR 9653 em termos de intensidade da vibração.

Deste modo, para a vibração, a norma estabelece que “os valores de vibração provenientes da operação de desmonte de rocha com explosivos não poderão ser superiores a 3,0 mm/s de velocidade de vibração de partícula, medida na componente vertical. Quando a medição for realizada com utilização de instrumentos cujos resultados sejam a integração das três componentes, o valor máximo permitido será de 4,2 mm/s”. Ela estabelece ainda os critérios para a escolha dos locais de monitoramento e fixação do sensor assim como remete à ela a responsabilidade pela inspeção das operações para exigir o cumprimento da norma.

Assim como a norma ABNT NBR 9653, a CETESB não estabelece critérios com relação à freqüência da vibração, o que a torna incompleta também. Assim como para os danos estruturais, a freqüência possui grande influência na percepção humana da vibração e conseqüentemente o nível de incômodo.

10.3.3. Proposta de revisão da Norma ABNT

Existe atualmente um projeto de Pós-Doutoramento intitulado “*Proposta de revisão da NBR 9653 – limites admissíveis para danos e incômodos associados ao uso de explosivos, envolvendo velocidade de vibração de partícula e freqüência*”, processo FAPESP nº 01/09402-7, aprovado em novembro de 2001. O projeto será desenvolvido junto ao LACASEMIN, no qual já se encontram em andamento outros projetos na área de desmonte de rochas com explosivos em pedreiras e minas a céu aberto e seus efeitos e relações com os meios físico e urbano que as circundam. Os dados fornecidos por um grande número de monitoramentos serão analisados e discutidos pelo corpo técnico do LACASEMIN e por especialistas ligados à esta área para que haja uma recomendação bastante consistente a respeito dos níveis de vibração e de valores de freqüências permitidos para as áreas que circundam um local de desmonte de rocha.

CAPÍTULO 11 - PARTE EXPERIMENTAL

11.1. LOCAL ESCOLHIDO PARA AS MEDIÇÕES

11.1.1. Características gerais

A IUDICE Mineração Ltda. foi fundada em março de 1982 e é uma empresa oriunda da divisão da Comercial e Pavimentadora RIUMA Ltda., que por sua vez foi fundada em maio de 1960. Ela produz pedra britada para construção civil e se destaca como uma das maiores no setor, respondendo por 5% do mercado da Região Metropolitana de São Paulo e por 22% do mercado da região Noroeste da cidade de São Paulo.

11.1.1.1. Localização

A pedreira localiza-se na Zona Oeste da Cidade de São Paulo, entre a Serra da Cantareira e o Pico do Jaraguá. Há dois acessos para o empreendimento, sendo um deles pela Rodovia Anhanguera ou pelo Rodoanel, cruzando o centro de Perus e o outro pela Marginal do Tietê e Avenida Raimundo Pereira de Magalhães. A Figura 64 mostra a localização da pedreira dentro da Grande São Paulo.



FIGURA 64. Localização da lúdice Mineração dentro da região da Grande São Paulo
(Fonte: www.geoportal.com.br)

Atualmente a região encontra-se profundamente alterada em função da ocupação antrópica que vem sendo feita há muito tempo, com a exploração agrícola agropecuária e a silvicultura no início e mais recentemente com a ocupação urbana. Com isto, a cobertura vegetal original restringe-se atualmente ao Parque Estadual do Jaraguá, nas proximidades do Pico do Jaraguá. Isto pode ser observado na Figura 65, que apresenta uma seqüência de fotos mostrando parte do entorno da pedreira.

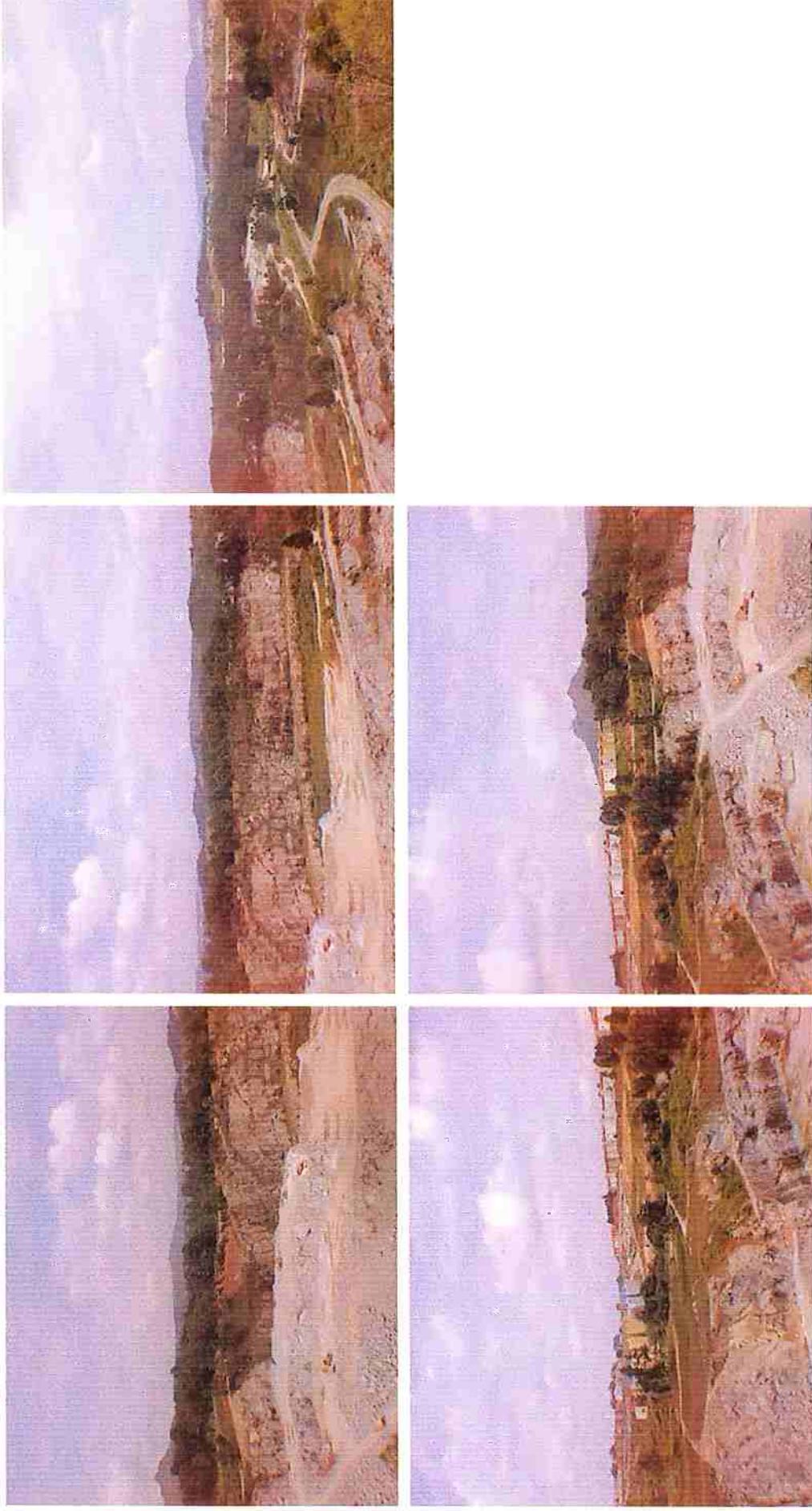


FIGURA 65. Sequência de fotos mostrando o entorno do empreendimento, indo desde a Rodovia dos Bandeirantes (foto superior à direita) até os condomínios do CDHU (fotos inferiores, com o Pico do Jaraguá ao fundo da última foto).

11.1.1.2. Processo produtivo

A empresa produz pedra britada a partir de rocha granítica. O processo de extração e beneficiamento consiste de perfuração e desmonte do maciço rochoso, carregamento e transporte do material para as etapas de britagem e classificação, com a separação do material nas diferentes faixas granulométricas que caracterizam os produtos finais. Os volumes de produção variam de 50.000 a 80.000 m³/mês. A Figura 66 apresenta um diagrama esquemático do processo de produção da pedreira e a Figura 67 apresenta uma foto de parte das instalações de tratamento e armazenagem do mineral.

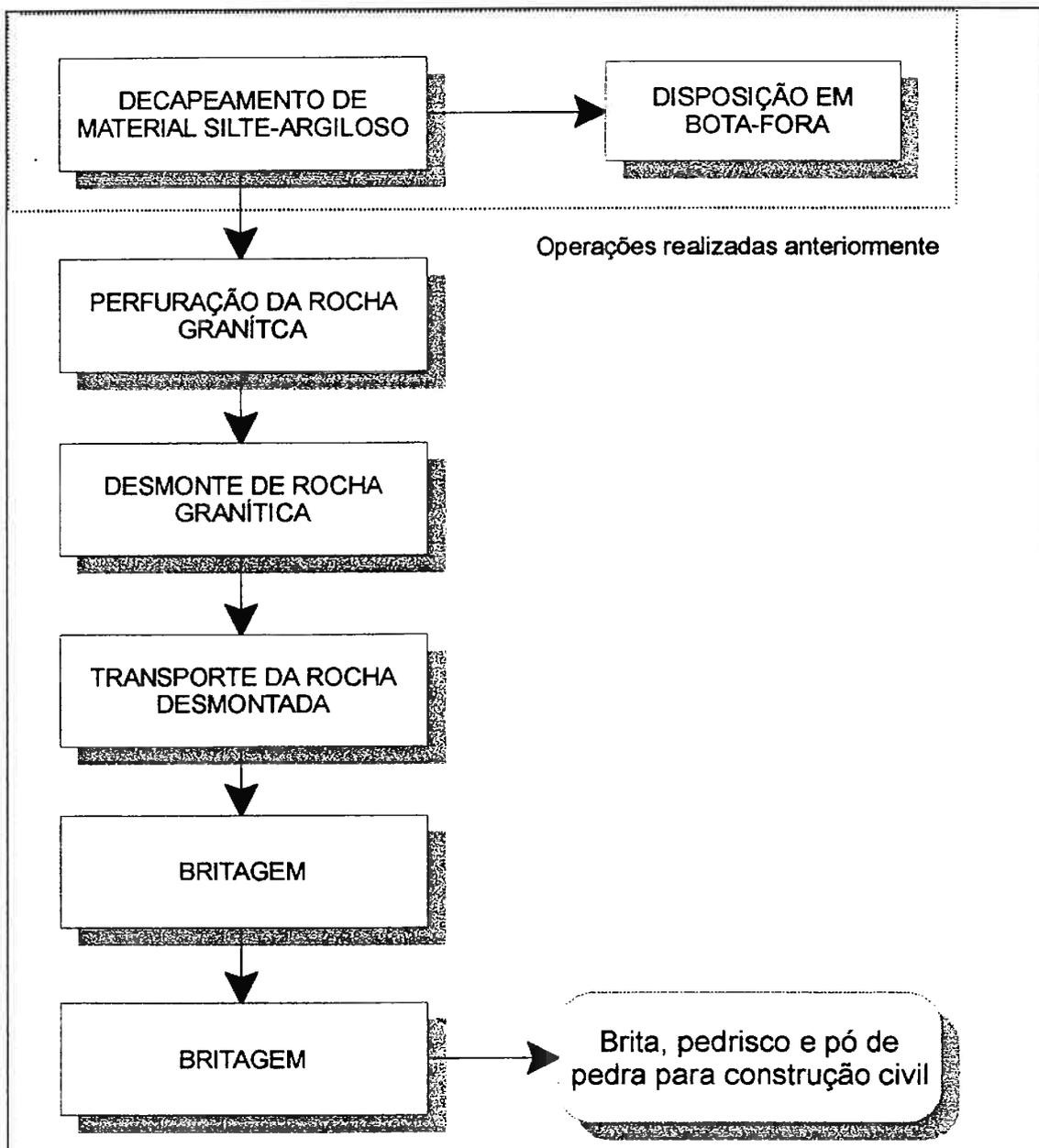


FIGURA 66. Diagrama esquemático do processo produtivo do empreendimento (IÚDICEMINERAÇÃO, 1998).

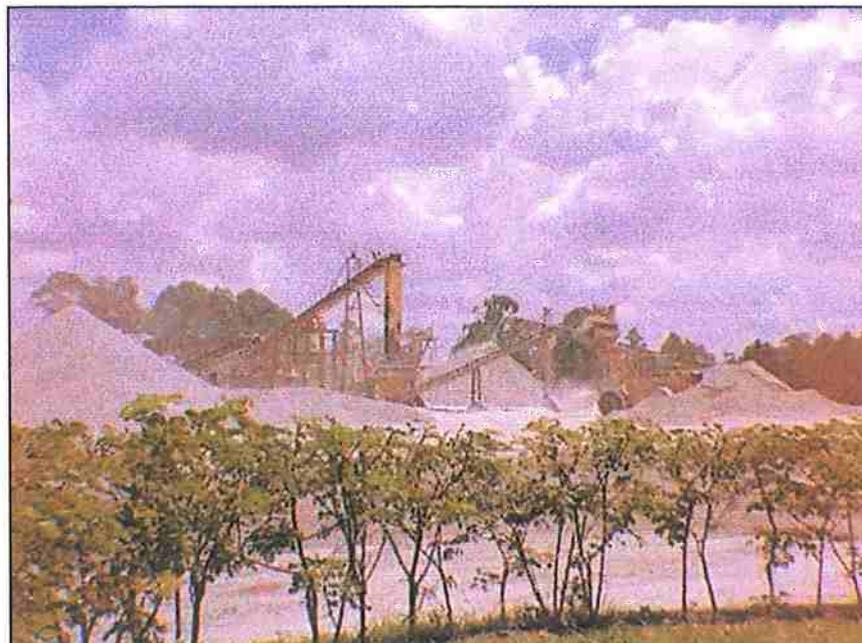


FIGURA 67. Parte das instalações de tratamento e armazenagem de brita

O empreendimento vem explorando economicamente bens minerais desde 1969, sempre lavrando granito para a produção de brita. A área na qual a pedreira se encontra possui 55,73 ha, e é caracterizada por duas cavas, sendo que apenas uma delas está em produção. A Figura 68 mostra a cava em operação (em primeiro plano).

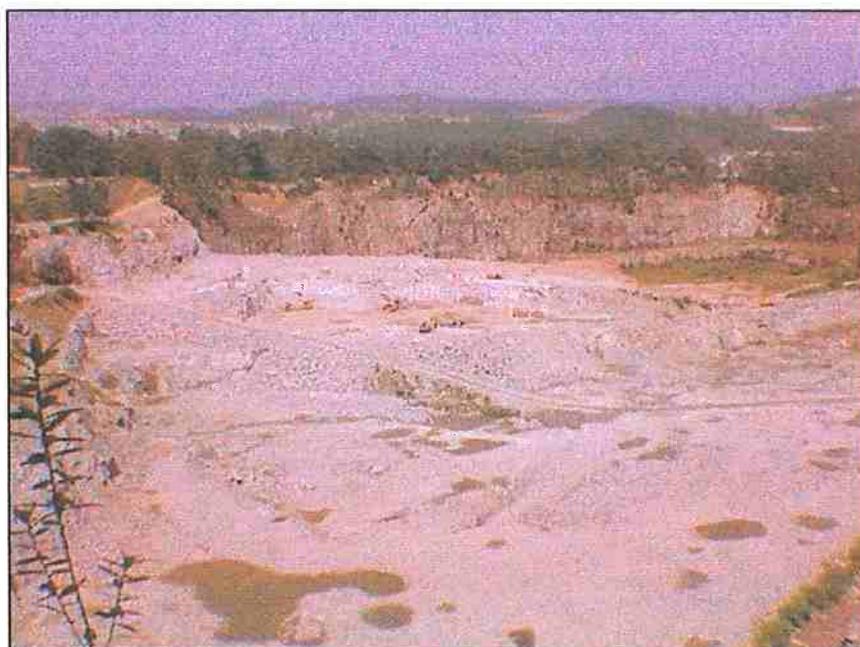


FIGURA 68. Vista geral da área de lavra da pedreira. No primeiro plano a cava em funcionamento, ao fundo na parte mais escura os taludes da cava desativada e entre as duas cavas o septo onde foram realizados os desmontes para os monitoramentos.

Os desmontes de rocha se concentraram numa faixa de rocha remanescente, uma espécie de septo, que divide a cava em atividade (à esquerda da Figura 69) da cava inativa, localizada, nesta figura também, à direita deste septo também.

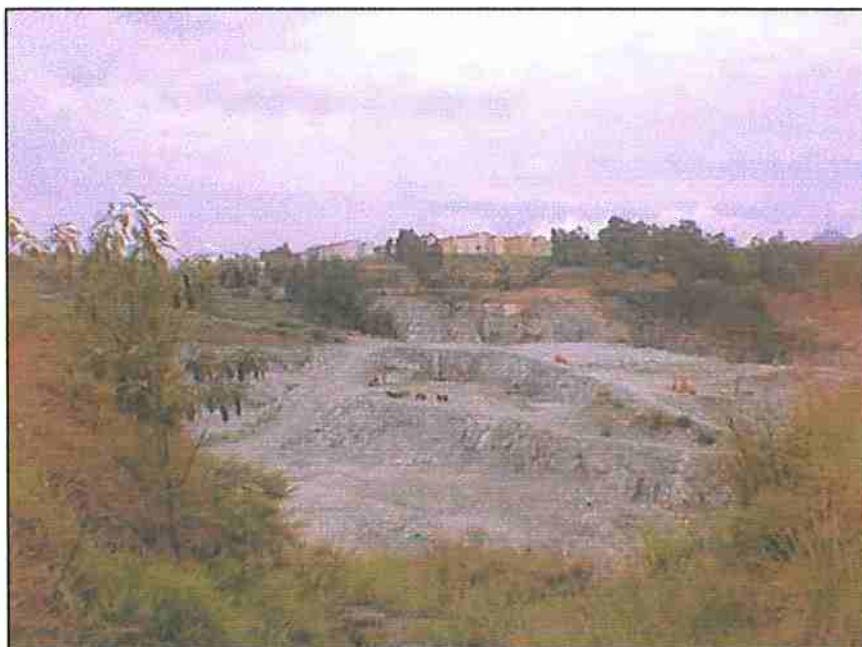


FIGURA 69. Vista do local onde se concentraram todos os desmontes monitorados (à direita na foto, no segundo nível a partir do nível da praça).

Os desmontes de rocha obedeceram basicamente a um tipo apenas de plano de fogo, onde as amarrações e as cargas máximas por espera foram praticamente mantidas, à exceção do último desmonte monitorado. O Capítulo 12 apresenta os dados resumidos das características dos desmontes monitorados. As cópias dos planos de fogo utilizados nos desmontes monitorados estão contidos no Anexo 2. A Figura 70 mostra imagens obtidas da filmagem de um dos desmontes monitorados.

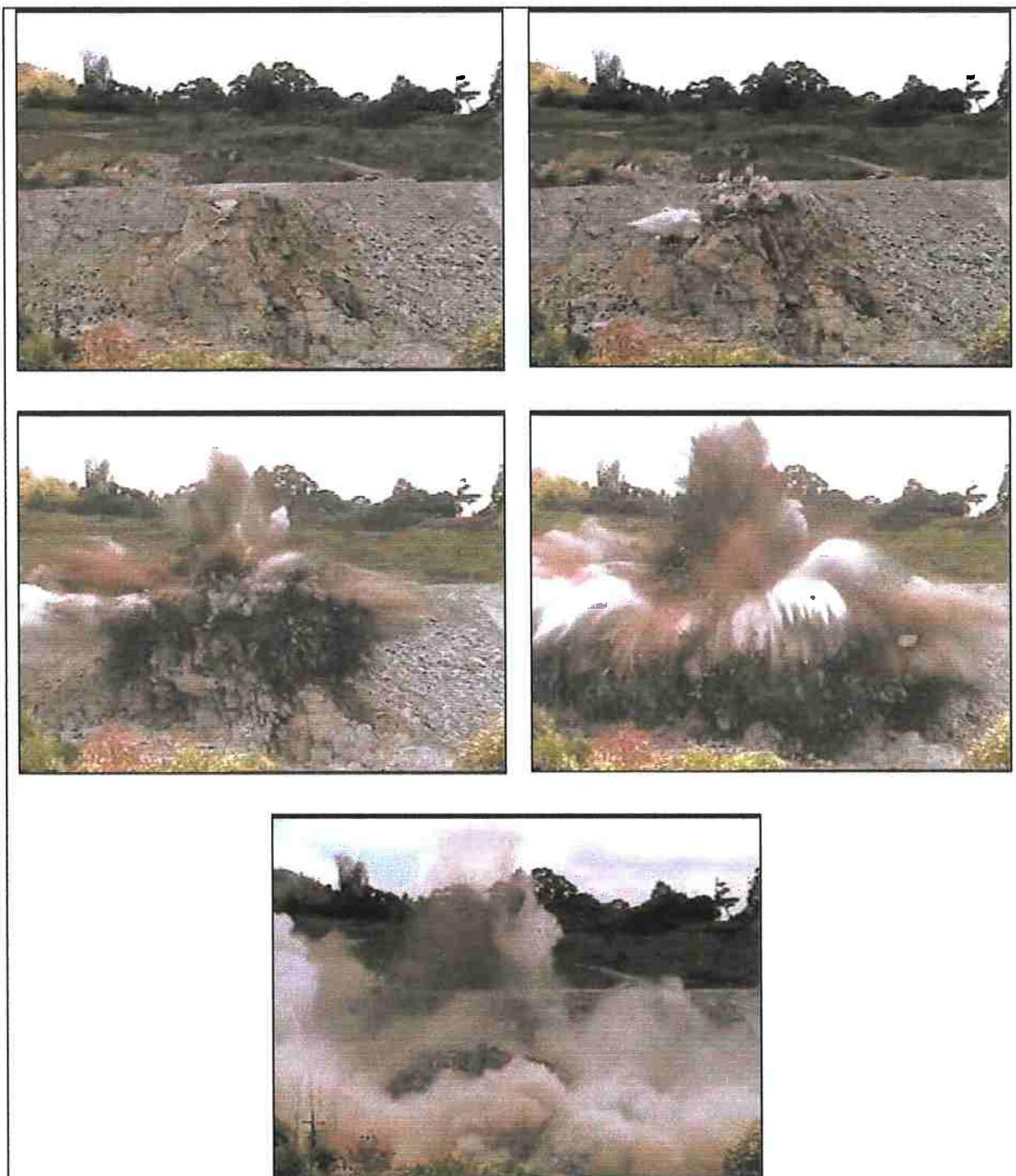


FIGURA 70. Seqüência de detonação de uma bancada da Pedreira Riuma

11.1.2. Caracterização litológica

11.1.2.1. Geologia Regional

Do ponto de vista regional, a região do empreendimento situa-se principalmente sobre os terrenos cristalinos do Grupo São Roque, no grande compartimento geomorfológico denominado

de Província do Planalto Atlântico, subdivisão Zona Serrania de São Roque (IPT, 1981, apud IÚDICE MINERAÇÃO, 1998).

"O Grupo São Roque configura uma faixa de orientação aproximada E-W até a região norte de São Paulo, sofrendo uma inflexão para o nordeste (IPT, 1981). Coutinho (1972) descreve a constituição do Grupo São Roque como sendo essencialmente de sedimentos clásticos, predominando os de natureza argilosa, metamorfoseados em filitos. Os metassedimentos conglomeráticos, anfibolitos e calcários afloram em áreas restritas e os granitos intrusivos são abundantes.

Observa-se que as rochas do referido grupo são cortadas por inúmeras falhas, sendo que os principais falhamentos são transcorrentes, com destaque aos de Jundiuvira, Taxaquara, Monteiro Lobato, Mandaqui e Sertãozinho. Essas falhas apresentam uma faixa de rochas cataclásticas com espessuras consideráveis, de até 1500 metros.

As direções estruturais predominantes no grupo são orientadas a ENE, havendo desvios locais para NW na região de Itu e na região do Jaraguá, bem como uma inflexão marcante para NNE na região a norte de São Paulo, por efeito dos falhamentos transcorrentes (IPT, op. cit.).

As rochas graníticas que ocorrem na área do empreendimento, à nordeste (Serra da Cantareira) e a sudeste da mesma pertencem a Fácies Cantareira, sendo a de maior representatividade no Pré-Cambriano paulista. Constituem-se grandes batólitos e stocks, de caráter alóctone a pauratóctone como feições de contato, tanto transicionais quanto parcialmente discordantes, inclusive com algumas auréolas de contato quando introduzidas em rochas de baixo grau (IPT, 1981). O tipo granítico-gnáissico é o mais comum, com a foliação concordante ao "trend" regional. Possui uma graduação fina e média, composição granítica a granodiorítica e ocorrência conspicua de megacristais de feldspato potássico, oriundos de uma metassomatose tardia, conferindo à rocha caráter porfiróide (IPT, op cit.).

O batólito granítico presente na área do empreendimento encontra-se rodeado por filitos, cuja ocorrência estende-se a sudeste. Há ainda ao norte e a oeste outras rochas metamórficas do Grupo São Roque, tais como xistos, calcários, conglomerados e quartzitos. O alongamento dos batólitos é o mesmo do pacote metassedimentar dobrado e metamorfoseado regionalmente. As direções estruturais principais NE-SW correspondem à xistosidade e estratificação (normalmente idênticas), observando-se todavia, numerosos desvios locais daquela orientação, principalmente nas vizinhanças das intrusões (COUTINHO, op cit).

O batólito granítico onde se assenta a área específica do empreendimento, com forma circular com cerca de 2,25 km de diâmetro, sustenta um relevo ondulado em padrão de morros, característico da Serrania de São Roque. Tal padrão de morros possui topos relativamente amplos e alongados, com declividades predominantes entre 20 e 35% nas porções inferiores e entre 10 e 20% nas superiores. A densidade de drenagem é alta e os vales são fechados com planícies aluviais restritas. As vertentes possuem convexidade desde o terço superior, acentuando-se nos terços médio e inferior, e apresentam na seqüência ruptura côncava nítida com planície aluvionar

(IPT, op cit). A amplitude encontrada na área é de cerca de 120 metros, considerando-se a cota 870 m para um topo próximo e 750 m para o Córrego da Cachoeira que corta a área do empreendimento.” (ÍUDICE MINERAÇÃO, 1998).

11.1.2.2. Geologia Local

“O substrato rochoso na área do empreendimento é constituído por granitos porfíricos, de granulação média a grossa e coloração cinza. Observam-se cristais maiores de microclíneo róseo, imersos na matriz composta essencialmente por quartzos, feldspato e biotita.

Nas frentes de lavra são observadas diversas famílias de fraturamentos do maciço, com direções e mergulhos variados. A maioria das fraturas encontra-se sem preenchimento, podendo estar relacionada com a direção preferencial de fraturamento gerada pelo próprio desmonte de rocha com o emprego de explosivos.

Os terrenos graníticos existentes na área do empreendimento são suscetíveis à erosão, apresentando atualmente sulcos e ravinas, que ocorrem em função da presença de espessas camadas de solo de alteração arenoso-siltoso. Os filitos presentes a noroeste da mineração, possuem menor suscetibilidade à erosão e portanto probabilidade de ocorrência de formas erosivas menos avançadas tais como erosão laminar e em sulcos nos leitos das ruas e taludes de corte. Sulcos profundos e ravinas podem ocorrer em aterros constituídos de solo de alteração, predominantemente siltoso e micáceo.

Os solos superficiais predominantes nos terrenos do Grupo São Roque no entorno e na área específica do empreendimento são, contudo, de baixa erodibilidade, contrastando com o perfil de alteração. De acordo com o mapeamento dos Solos do Estado de São Paulo realizado em 1960 pela Comissão de Solos do Ministério da Agricultura do Centro Nacional de Estudos e Pesquisas Agrônomicas/RJ, estes solos correspondem principalmente à categoria Latossolo Vermelho Amarelo (LV) variação Orto e Podzólico Vermelho-Amarelo (PV) variação Laras.

Os LV ocupam as porções mais planas das formas de relevo, como os topos e as encostas de menor declividade, caracterizando-se pela pouca diferenciação entre os horizontes A, B e C e apresentando profundidades dos horizontes A e B entre 1,5 a 4,0 metros, ausência de minerais primários pouco resistentes ao intemperismo e forte micro-agregação. O estágio de intemperismo dos latossolos é geralmente grande, possuindo argilas do tipo 1:1 e sesquióxidos de ferro e alumínio.

Os PV localizam-se nas porções mais declivosas das encostas, podendo anteceder as áreas de ruptura de relevo e afloramentos de rocha, implicando um sistema de infiltração e erosão em superfície e subsuperfície que lhe atribui uma diferenciação entre os horizontes. Os solos podzólicos caracterizam-se assim, pela presença dos horizontes A, B e C, com variação textural do horizonte A para o B, ou seja, maior porcentagem de argila em B. O PV variação Laras diferencia-se dos outros podzólicos por apresentar horizontes A2 com maior acidez e baixa saturação de bases.

Além dos PV e LV dominantes, podem ser identificadas subordinadamente nas rochas cristalinas da região do empreendimento a ocorrência de Solos Litólicos e Hidromórficos. Os solos Litólicos são pouco desenvolvidos e pouco profundos, apresentando horizonte A sobre C, em áreas de altas declividades e rupturas estruturais bem marcadas, bem como junto aos matacões quando próximos à superfície. Os solos hidromórficos, por sua vez, são encontrados nas cabeceiras de drenagem perenes e intermitentes, conforme a proximidade do lençol freático da superfície. São solos pouco desenvolvidos, caracterizados pela presença de matéria orgânica e feições resultantes de processos de hidromorfia.

Destaca-se também que além das rochas cristalinas do Grupo São Roque, ocorreram ainda na área e entorno do empreendimento sedimentos aluvionares de idade Quaternária com intercalações de camadas sub-horizontais ou lentes, arenosas e argilosas, presentes em planícies aluviais com declividades geralmente inferiores a 5%.

A espessura do pacote aluvionar é variável, atingindo valores de até 6 metros nas planícies mais desenvolvidas. Desenvolvem-se sobre este material inconsolidado de deposição recente os denominados Solos Aluvionares.

Com relação aos fatores apresentados, a área do empreendimento configura-se como duas cavas separadas pelo antigo leito do Córrego da Cachoeira, restringindo-se principalmente a fraturamentos com direções NE e ENE e mergulhos subverticais os quais comumente são preenchidos por veios aplíticos e pegmatíticos. Outro sistema de fraturas que merece destaque é aquele com direção NW e mergulho subvertical, que ocorre subordinadamente na região.

A cava leste, em atividade apresenta várias praças dispostas em patamares, sendo que a mais baixa situa-se na cota 751 m, pouco acima das bordas do antigo leito do Córrego da Cachoeira. Através de levantamentos de campo, foram observadas surgências d'água pelas fraturas do maciço rochoso apenas na porção oeste desta cava, sendo que no restante verifica-se a presença de alguns trechos umedecidos nas paredes da cava, provavelmente pela percolação das águas da chuva. Nestas paredes foram identificados alguns sistemas de fraturas, favoráveis à percolação d'água com as seguintes direções e mergulhos:

- N49°E/88°SE;
- N60°W/89°SW;
- N72°E/87°SE;
- N16°E/88°SE;
- N71°E/61°NW

O solo local é de alteração, com constituição predominantemente silte-arenosa, coloração avermelhada ou acinzentada, com espessuras variando de 5 a 20 metros. Matacões são comuns, podendo ser encontrados próximos ao topo rochoso envoltos por solo." (IÚDICE MINERAÇÃO, 1998).

A geologia local da pedreira pode ser observada no mapa geológico apresentado pela Figura 71.

11.2. PROCEDIMENTOS APLICADOS

Para que os resultados dos trabalhos de campo tivessem uma aplicação concreta foi necessário adotar uma metodologia própria, de modo a compensar as limitações de instrumentação. Esta metodologia será descrita a seguir e pode ser observada também na apresentação dos resultados nos Capítulos 12, 13 e 14.

11.2.1. O Mapa de Iso-Velocidades: Adaptação do método da Geosonics

Como já pôde ser observado no Capítulo 9, para se gerar um mapa de iso-velocidades nos padrões da GeoSonics seria necessário a instalação de pelo menos uma centena de sensores para se obter uma boa aproximação entre o modelo obtido e o comportamento real da vibração gerada por uma detonação. Este número de sismógrafos era inviável para o LACASEMIN, pois efetivamente havia a disponibilidade de até 9 (nove) sismógrafos para os monitoramentos.

A idéia foi desenvolver um modelo híbrido entre as equações de carga-distância e o Sistema Iso-Seismic. Cada monitoramento foi realizado com até oito pontos, mas ao invés de espalhá-los ao redor do local de detonação, estes pontos foram alinhados numa direção em particular para gerar uma equação carga-distância. Considerou-se que estes pontos foram suficientes para gerar de forma razoável uma equação deste tipo (JIMENO et al, 1995).

Para cada direção há uma equação correspondente ao comportamento da vibração gerada, e tendo-se uma série de direções, pode-se gerar um mapa de iso-velocidades com razoável confiabilidade.

A escolha da pedreira foi fundamental para este trabalho. Sabe-se que as condições ideais de monitoramento para uma série de direções seriam bancadas idênticas, com planos de fogo idênticos e com a mesma localização para todas elas. Isto, no entanto, é impossível, pois o caráter dinâmico do processo de produção de uma pedreira faz com que cada desmonte seja único, tanto em termos de localização como em termos dos parâmetros geométricos e os associados ao plano de fogo. A ausência destas condições ideais pôde ser contornada com a escolha dos locais de desmonte. Conforme descrito anteriormente, estes se localizavam num septo, uma fatia de rocha remanescente entre as duas cavas. Estas bancadas estavam bastante próximas umas das outras com as condições da rocha aparentemente preservadas. As alturas das bancadas não variavam muito e os planos de fogo adotados para elas eram muito semelhantes. As equações geradas para cada direção podem ser consideradas então como um retrato real do comportamento da vibração para uma dada direção por apresentarem padrões definidos de amortecimento. Além disso, os dados obtidos foram devidamente tratados de modo que o resultado final foi um mapa contendo isolinhas de valores de vibração para todas as direções. As etapas que compuseram este método foram:

1. Monitoramento de quatro detonações em quatro direções diferentes. Após a escolha inicial de uma direção foram escolhidas as demais;
2. Plotagem em planta de todos os pontos monitorados. Os valores obtidos foram diretamente plotados em planta para a visualização de erros de alinhamento, que ocorreram principalmente devido à dificuldade de acesso e à escolha do local mais adequado para a fixação do sensor;
3. Obtenção da equação carga-distância para cada uma das direções. Fazendo-se a regressão linear dos valores obtidos, obtém-se uma equação para cada direção correlacionando a velocidade de vibração de partícula à distância escalonada;
4. Normalização dos valores obtidos. Como os pontos não estavam perfeitamente alinhados o que se obteve foi uma reta média na correlação. Havia então a necessidade de correção dos valores obtidos para as distâncias consideradas, feita através da projeção das distâncias sobre a reta média;
5. Interpolação em pontos intermediários da reta. Os sensores foram instalados em locais com distâncias bastante variadas em função da necessidade de gerar valores de distâncias escalonadas variados. Alguns pontos não forneceram valores de vibração, o que resultou numa correlação “mais pobre”. Isto ocorreu devido ao não acionamento dos sensores como resultado de valores de vibração inferiores ao limite inferior de sensibilidade do sismógrafo e também devido à falha no acionamento (problemas de bateria, etc.). Depois disto fez-se a normalização das distâncias e a interpolação de novos pontos nesta reta média que foram espaçados de 50 metros entre eles.
6. Geração das isolinhas a partir de uma mesma origem para as 4 direções. Com as quatro direções foi gerado um mapa de tendências da vibração.
7. Verificação do comportamento da vibração. Em função da grande área, o programa responsável pela geração das isolinhas extrapolou diversos valores entre os pontos com os valores medidos. Para diminuir esta extrapolação, que nem sempre é feita de forma correta, optou-se por monitorar mais quatro direções intermediárias às quatro primeiras;
8. Adição de quatro novas direções. A mesma seqüência de procedimentos utilizada nas quatro direções iniciais foi aplicada no tratamento destas quatro novas direções;
9. Mapa final. Com a adição destas novas direções o resultado foi um mapa mais equilibrado do comportamento da vibração para todas as direções.

Os dados obtidos e os resultados serão discutidos capítulos seguintes.

11.3. INSTRUMENTAÇÃO UTILIZADA

11.3.1. Sismógrafos

Os monitoramentos foram efetuados utilizando-se alternadamente 9 sismógrafos de engenharia da marca GEOSONICS, sendo 8 deles modelos SSU Micro-Seismograph, com os números de série SN 4505, SN 4506, SN 4507, SN 4508, SN 4509, SN 4495, SN 4496 e SN 4497 e um sismógrafo modelo SSU DK2000, número de série 2411. Estes sismógrafos apresentam as seguintes características:

- a- Cada unidade compõe-se de um geofone composto de três transdutores posicionados tri-ortogonalmente (L, T e V) e um microfone para captação de sobrepressão atmosférica;
- b - os eventos captados pelos micro-sismógrafos podem ser armazenados em uma unidade central de processamento (SSU DK2000) ou então podem ser transferidos para um microcomputador PC para serem analisados por um software específico.

Estes instrumentos foram programados para atuar com os seguintes parâmetros.

- a - janela temporal de evento para 5 segundos ;
- b – limite inferior de sensibilidade entre 0,5 e 4,80 mm/s;
- c - limite inferior do microfone desativado;
- d - filtro digital desativado;
- e - acionamento manual iniciado entre 10 e 60 minutos antes detonação.
- f - os sismógrafos são ativados todas as vezes em que os limites inferiores de sensibilidade são ultrapassados, sendo que o tempo de rearme varia entre 30s e 90s.

11.3.2. Outros instrumentos

Foram utilizados também um aparelho de GPS da marca Garmin, modelo 100 SRVY II e uma câmera fotográfica digital Epson modelo Photo PC.

CAPÍTULO 12 - VALORES OBTIDOS DOS MONITORAMENTOS SISMOGRÁFICOS

12.1. PRIMEIROS MONITORAMENTOS EFETUADOS

Antes de aplicar o método do mapa de iso-velocidades, foram realizadas algumas medições, como forma de se demonstrar o caráter dos monitoramentos sismográficos atuais.

De uma maneira geral pode-se dizer que uma grande parte dos monitoramentos se destina ao atendimento de exigências legais, ou seja, uma interpelação judicial oriunda de reclamações, reclamações que podem resultar em ações judiciais ou então para o cumprimento de alguma exigência de um órgão ambiental fiscalizador (como, por exemplo, a CETESB no estado de São Paulo). Estes monitoramentos não são sistemáticos e a frequência com que são realizadas varia muito.

Neste item, são apresentados os resultados de dois trabalhos:

- a) Acompanhamento de monitoramentos sistemáticos em uma pedreira, com a medição de dois ou mais pontos.
- b) O monitoramento único de uma detonação em pedreira com cinco pontos alinhados numa mesma direção. Este arranjo permitiu que fosse estabelecido um padrão de amortecimento da vibração para uma direção em particular, ainda que o objetivo inicial fosse o levantamento de níveis de vibração para o atendimento de um órgão ambiental.

12.1.1. Monitoramentos na Pedreira Lageado

O autor acompanhou os trabalhos de monitoramentos de detonações, com bancadas e pontos de medição variados. Como a pedreira está localizada numa área densamente povoada no município de São Paulo, suas detonações têm gerado algumas reclamações por parte de moradores vizinhos. Preocupada com esta situação, ela optou por tentar realizar monitoramentos sistemáticos, sendo que os resultados obtidos foram utilizados para se levantar uma equação carga-distância. Porém, a metodologia adotada para a pedreira, permitiu somente que se obtivesse um comportamento não muito preciso da vibração, pois ela faz uma homogeneização para todas as direções de amortecimento da vibração. Seria como se no método Iso-seismic da Geosonics as isolinhas resultantes fossem círculos perfeitos e concêntricos. É muito pouco provável que este seja o verdadeiro comportamento da vibração. Os locais de detonação e de monitoramento variavam bastante, mas se concentraram apenas numa porção da área que circunda a pedreira, o que não permitiu o estabelecimento de um padrão de vibração para uma direção específica.

As detonações que serviram de fonte para execução dos monitoramentos foram um misto de detonações normais de produção com algumas especialmente preparadas para a realização do trabalho em questão e podem ser observadas na Tabela 16.

Os dados referentes às detonações foram obtidos dos respectivos planos de fogo, enquanto que os dados de vibração foram obtidos dos relatórios sismográficos. Estes documentos são de propriedade da empresa que executou o monitoramento, a Technoblast Serviços de Detonação e Sismografia Ltda.

TABELA 16. Resumo das características dos desmontes monitorados.

CARACTERÍSTICAS	FOGO 1 27/06/00	FOGO 2 22/09/00	FOGO 3 30/11/00	FOGO 4 08/01/01	FOGO 5 11/01/01	FOGO 6 28/03/01	FOGO 7 11/05/01	FOGO 8 25/05/01
Horário	16:21	16:16	11:57	17:24	13:00	12:57	12:58	12:37
Diâmetro do furo (pol)	3	3	3	3	3	3	3	3
Total de furos	40	48	24	16	31	40	22	49
Nº de Linhas	2	2	3	2	2	3	5	2
Tipo de Explosivo	Engelplus e Engetron	Engelplus	Engelplus e Engetron					
Iniciação	Não elétrico / tubo de choque							
Tempo Retardo (ms)	17 / 25 / 42	17 / 25 / 42	17 / 25 / 42	17	17 / 25	17 / 25	9, 17, 25 e 42	17, 25 e 42
Carga Total	775	695	1159	1133	595	770	323,9	784,57
Carga Máx. Esp. (kg)	38,8	18	48,3	70,80	17,5	38,5	18,7	23,4
RC Média (kg/m ³)	0,374	0,310	0,460	0,497	0,359	0,367	0,302	0,259
Tempo de duração do Fogo (s)	0,390	0	0,245	0,255	0,322	0,367	0,547	0,340

Os locais em que foram instalados os sismógrafos variaram de acordo com a detonação monitorada. A definição dos pontos de monitoramento obedeceu a critérios como viabilidade/facilidade de instalação, proximidade de edificações da pedreira e reclamações. No total foram obtidos 21 valores de velocidade de vibração de partícula, provenientes de detonações que foram utilizados para correlacionar a Distância Escalonada à Velocidade de Partícula.

12.1.1.1. Monitoramento das 6 primeiras detonações

A Tabela 17 apresenta, de forma resumida, os resultados dos 6 primeiros monitoramentos (27/06/00 a 28/03/00) que resultaram em 17 pontos de medição. Ela contém as distâncias dos sismógrafos em relação ao local do desmorte e as distâncias escalonadas dadas pela distância e pela carga máxima por espera.

TABELA 17. Resultados dos monitoramentos na Pedreira Lageado

Unidade	Local	Data	Vl (mm/s)	Vt (mm/s)	Vv (mm/s)	Vr (mm/s)	Dist. (m)	DE (m/kg ^{1/2})
SN 2427	Est. N. S. da Fonte, 14	27/06/00	2,79	2,29	2,29	3,30	280	44,95
SN 4842	Campo de futebol	27/06/00	2,03	4,32	3,56	4,57	150	24,08
SN 3173	Rua Macabu, 22	22/09/00	3,49	2,67	3,11	4,25	190	44,78
SN 4518	Campo de futebol	22/09/00	3,30	2,03	3,56	4,06	94	22,15
SN 4842	Igreja 18	22/09/00	1,52	1,78	3,05	3,30	230	54,21
SN 3114	Rua Macabu, 22	30/11/00	4,57	3,56	4,64	5,27	190	27,34
SN 3173	Expedição	30/11/00	1,78	2,22	2,92	2,86	150	21,58
SN 3114	Rua Araçazeiro, 119	08/01/01	0,70	1,21	0,89	1,21	407	48,37
SN 3173	Rua D, 9	08/01/01	1,59	0,95	1,46	1,91	282	33,51
SN 3114	Rua Araçazeiro, 119	11/01/01	1,21	0,76	0,76	1,46	400	95,62
SN 3173	Rua D, 9	11/01/01	0,76	0,95	1,59	1,71	265	63,35
SN 4505	Campo de futebol	11/01/01	5,08	5,33	4,83	6,10	175	41,83
SN 3173	R. Rafael Taliude, 2 (terraço)	28/03/00	0,70	0,51	1,52	1,52	220	35,46
SN 4495	Praça da pedreira	28/03/01	11,43	10,16	15,24	17,53	110	17,73
SN 4496	Praça da pedreira	28/03/01	6,35	5,59	4,32	6,86	228	36,75
SN 4506	Estrada do Bota-fora	28/03/01	6,86	9,65	13,72	14,22	88	14,18
SN 4518	R. Rafael Taliude, 2 (solo)	28/03/01	0,76	2,54	2,54	3,05	230	37,07

Como resultado prático destes 6 monitoramentos, foi levantada uma equação da qual se pôde obter os níveis de vibração através de curvas levantadas especificamente para o corpo rochoso analisado.

Através deste valores elaborou-se uma equação do tipo $V_p = k (D / Q^{1/2})^{-b}$ obtendo-se um coeficiente de correlação de 0,69. A equação obtida foi a seguinte:

$$V_p = 167,7 \left(\frac{D}{\sqrt{Q}} \right)^{-1,0775} \quad (64)$$

Onde

- V_p = pico de velocidade de partícula (PPV)
- D = distância da detonação ao ponto de medição
- Q = carga máxima por espera (massa)

Esta equação poderia ser utilizada como uma ferramenta de planejamento das detonações, uma vez que a previsão dos níveis de vibração permite uma estimativa das condições de segurança em áreas próximas as detonações para os desmontes posteriores.

12.1.1.2. Monitoramentos de 2 detonações adicionais para o refinamento da equação

Quatro novos valores foram somados às medições anteriores com o intuito de melhorar a equação levantada. A Tabela 18 apresenta os novos valores medidos, enquanto que as características destas detonações podem ser observadas na mesma tabela (Tabela 17) em que foram apresentados os demais fogos.

TABELA 18. Novos valores medidos na Pedreira Lageado

Unidade	Local	Data	Vi (mm/s)	Vt (mm/s)	Vv (mm/s)	Vr (mm/s)	Dist. (m)	DE (m/kg ^{1/2})
SN 4518	Rua Pe. Domingos Nunes, 6A	11/05/01	<0,51	<0,51	0,51	0,51	405	93,7
SN 4020	Estrada do Iguatemi Ao lado da pedreira	11/05/01	6,60	9,65	5,08	9,91	88	20,4
SN 4518	Rua Padre Domingos Nunes, 5	25/05/01	0,51	0,51	0,76	0,76	460	95,1
SN 4020	Futura expedição da Pedreira Lageado	25/05/01	4,32	4,32	5,08	5,84	161	33,3

Neste trabalho fez-se também uma comparação entre os valores estimados dos níveis de vibração a partir da equação levantada para os 6 primeiros fogos e os valores efetivamente medidos. Esta comparação pode ser vista na Tabela 19.

TABELA 19. Comparação entre os valores medidos e os valores estimados pela equação

Local	Estimado * (mm/s)	Medido (mm/s)
Rua Padre Domingos Nunes 6A	1,26	0,51
Estrada do Iguatemi	6,53	9,91
Rua Padre Domingos Nunes 5	1,25	0,76
Futura expedição	3,84	5,84

* estimativa feita de acordo com a equação $V_p = 167,7 \left(\frac{D}{\sqrt{Q}} \right)^{-1,0775}$

Estes 4 novos pontos foram somados aos demais pontos e então correlacionados, o que resultou na seguinte equação:

$$V_p = 432,3 \left(\frac{D}{\sqrt{Q}} \right)^{-1,3461} \quad (65)$$

Esta equação apresentou uma correlação de 0,81.

À medida que novos monitoramentos forem realizados, os valores obtidos podem ser adicionados à tabela de pontos, permitindo que se faça um refinamento progressivo da equação. A limitação deste método está em considerar que a vibração se comporte de maneira igual para todas as direções.

12.1.2. Pedreira Intervales

A pedreira da Intervales Minérios Ltda. está localizada no km 73 da Rodovia SP 55 (antiga Piaçaguera) na Cidade de Santos, São Paulo. A área de propriedade da Intervales na qual está inserida a pedreira é bastante extensa e atualmente não existe ocupação fora de sua propriedade num raio aproximado de 1.000 m a partir da sua cava.

O objetivo do monitoramento foi o de evitar possíveis reclamações com relação aos níveis de vibração e de sobrepressão atmosférica oriundas dos desmontes com explosivos. O LACASEMIN

executou o monitoramento alinhando 5 (cinco) sismógrafos numa dada direção para estudar o amortecimento da vibração em função da distância. Isto resultou numa equação carga-distância que representa o comportamento da vibração para esta direção.

12.1.2.1. Valores medidos e dados do desmorte

A Tabela 20 apresenta os parâmetros relativos ao desmorte, a Tabela 21 apresenta os valores obtidos e a Tabela 22 relaciona os valores de carga máxima por espera, carga total de explosivos, a velocidade resultante e a distância ao ponto de detonação, sendo estes os parâmetros mais importantes.

TABELA 20. Características do plano de fogo adotado para o desmorte na Pedreira Intervales.

CARACTERÍSTICAS	FOGO 22/06/01
Horário	12:58
Localização (UTM)	23K 366069 7356356
Diâmetro furo (pol)	3
Malha (A x E) m ²	4 x 3
Altura média da bancada (m)	14
Total de furos de bancada	74
Nº de carreiras	2
Furos de Levante/Comp. (m)	50 / 5
Explosivo	Mag-gel 200 e LM da Magnum
Iniciação	Cordel NP-10 e estopim
Retardo (ms)	25
Carga Total (kg)	4.375
Carga Máx. Esp. (kg)	190,4 (4 furos)

TABELA 21. Valores de vibração obtidos no monitoramento da Pedreira Intevalles

Data : 22/06/01						
Hora: 12:58						
Localização da Bancada: UTM 23K 366069 7356356						
Unidade	Localização / Coord. UTM	Distância (m)	Vi (mm/s)	Vt (mm/s)	Vv (mm/s)	Vr (mm/s)
SN 4505	P1- Atrás da bancada 23K 365969 7356346	100	20,32	29,46	73,15	73,15
SN 4495	P2 - Entre a 2ª e 3ª bacias de contenção 23K 365828 7356461	262	5,08	5,59	7,37	7,37
SN 4507	P3 - Alojamento 23K 365667 7356663	505	2,03	1,78	1,78	2,79
SN 2411	P4 - Escritório 23K 365649 7357008	775	0,51	0,51	0,51	1,27
SN 4020	P5 - EBEC 23K 365676 7357094	836	0,51	0,51	0,76	0,76

TABELA 22. Valores de carga máxima por espera, carga total de explosivos, velocidade resultante, distância ao ponto de detonação e distância escalonada para a Pedreira Intevalles.

Parâmetros do monitoramento	P1 SN 4505	P2 SN 4495	P3 SN 4507	P4 SN 2411	P5 SN 4020
Distância (m)	100	262	505	775	836
Vr (mm/s)	73,15	7,37	2,79	1,27	0,79
CME (kg)	190,4	190,4	190,4	190,4	190,4
DE (m/kg^{1/2})	7,3	19,0	36,6	56,2	60,6

12.1.2.2. Resultados

O resultado do monitoramento numa dada direção pode ser visto na forma da equação carga-distância obtida pela correlação dos pontos monitorados, que se apresenta da seguinte forma:

$$V_p = 3662,2 \left(\frac{D}{\sqrt{Q}} \right)^{-2,02271} \quad (66)$$

Esta equação apresentou uma correlação de 0,99 e é válida para a direção da reta que liga a bancada desmontada ao escritório. Os valores de vibração medidos e a localização dos pontos de monitoramento estão apresentados na Figura 72.

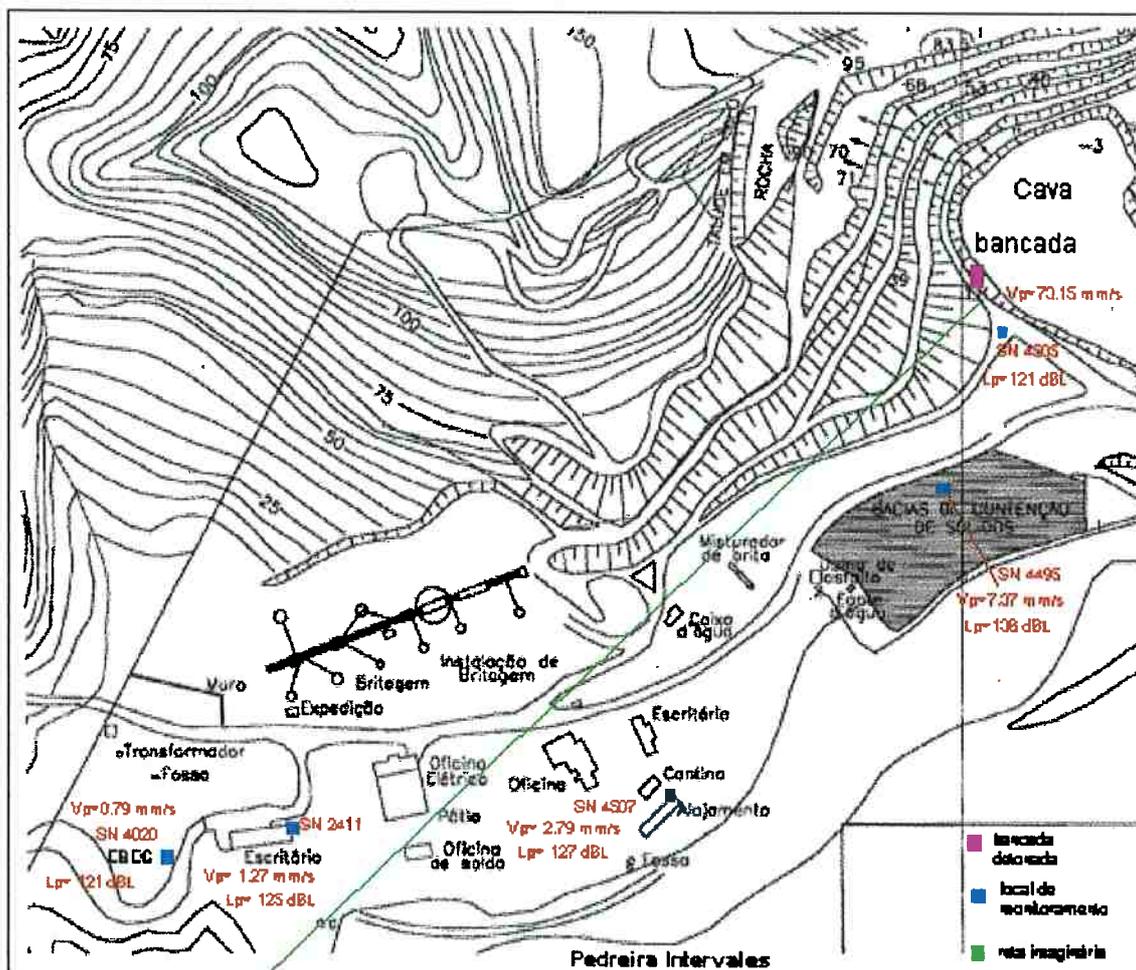


FIGURA 72. Planta da Pedreira Intervals com os pontos de monitoramento.

12.2. MONITORAMENTO COMPLETO - ÍNDICE MINERAÇÃO (PEDREIRA RIUMA)

12.2.1. Características dos desmontes monitorados

A Tabela 23 apresenta um resumo dos dados contidos nos planos de fogo dos 8 desmontes monitorados. Os dados completos dos desmontes estão contidos nos planos de fogo da Índice Mineração e são apresentados no Anexo 2. Algumas imagens das bancadas desmontadas podem ser vistas no Anexo 3.

TABELA 23. Resumo das características dos desmontes monitorados na Pedreira Riuma, da lúdice Mineração.

CARACTERÍSTICAS	FOGO 1 06/12/01	FOGO 2 11/12/01	FOGO 3 19/12/10	FOGO 4 20/12/01	FOGO 5 10/01/02	FOGO 6 16/01/02	FOGO 7 21/01/02	FOGO 8 24/01/02
Horário	12:19	12:29	12:19	12:19	12:26	12:29	12:31	12:18
Cota da bancada	780	780	780	780	780	780	780 Lat	780
Dímetro do furo (pol)	3 1/2	3 1/2	3 1/2	3 1/2	3 1/2	3 1/2	3 1/2	3 1/2
Total de furos	34	21	31	29	34	35	100	55
Nº de Linhas	2	2	2	2	2	2	5	*2
Malha (A x E) (m ²)	2,6 x 3,0	2,6 x 3,0	2,5 x 2,8	2,6 x 3,0	2,7 x 2,8	2,7 x 2,8	2,5 x 2,8	2,7 x 2,8
Altura da bancada (m)	12,0	11,0	11,0	11,0	12,0	12,0	12,0	12,0
Tipo de Explosivo	Powergel 900 Powermix	Powergel 900 Powermix	Powergel 900 Powermix	Powergel 900 Powermix	Powergel 900 Powermix Powergel	Powergel 900 Powermix	Powergel 900 Powermix	Powergel 900 Powermix Powergel
Iniciação	Não elétrico / tubo de choque	Não elétrico / tubo de choque	Não elétrico / tubo de choque	Não elétrico / tubo de choque				
Tempo Retardo (ms)	17 / 25	17 / 25	17 / 25	17 / 25	17 / 25	17 / 25	17 / 25	17 / 25
Carga Total (kg)	2050	875	1175	1475	2200	1550	5400	4300
Carga Máx. Esp. (kg)	65	65	65	65	65	65	150	65
RC Média (kg/m ³)	0,644	0,486	0,492	0,593	0,713	0,488	0,643	0,862

Obs. Os valores de carga máxima por espera correspondem ao furo mais comprido carregado de acordo com o Eng. José Antônio Tortorelli, da lúdice Mineração Ltda.

12.2.2. Valores obtidos para a Pedreira Riuma

Os valores medidos pelos sismógrafos e os parâmetros associados à velocidade de vibração de partícula são apresentados pelas Tabelas 24 a 31. Além da velocidade de vibração de partícula, outro parâmetro importante na análise de vibrações de terreno é a frequência associada a cada uma das componentes vetoriais da velocidade. As frequências medidas também estão contidas nas Tabelas 24 a 31. Os registros sismográficos, contendo estas informações e mais os sismogramas, estão nos Relatórios Sismográficos apresentados no Anexo 4. As imagens de alguns dos locais monitorados podem ser vistas no Anexo 3.

TABELA 24. Valores de vibração e de frequência medidos na Pedreira Riuma – I

Unidade	Local / UTM	Hora	Vi (mm/s)	Vt (mm/s)	Vv (mm/s)	Vr (mm/s)	Frequência			Dist. (m)	DE (m/kg ^{1/2})
							Vi (Hz)	Vt (Hz)	Vv (Hz)		
SN 4505	Praça da pedreira 23K 322472 7407576	12:19	20,07	16,76	27,18	28,96	20,8	26,3	26,3	58,5	7,25
SN 4506	Berma superior 23K 322466 7407568	12:19	32,51	47,75	51,82	53,85	38,5	55,6	41,7	68,5	8,49
SN 4507	Estrada 23K 322432 7407505	12:19	14,48	12,45	26,16	28,96	35,7	38,5	45,5	102,5	12,71
SN 4508	Área aterrada 23K 322332 7407505	12:19	11,18	8,89	6,10	13,46	25,0	21,7	20,0	209,7	26,01
SN 4509	Divisa c/ CDHU 23K 322310 7407452	12:19	5,08	2,54	3,30	5,59	31,2	71,4	38,5	259,9	32,23
SN 4496	Caixa d'água CDHU 23K 322352 7407411	12:19	4,57	4,32	3,81	5,84	23,8	45,5	23,8	262,5	32,55
SN 4497	Calçada CDHU 23K 322318 7407378	12:19	6,60	6,35	4,06	7,37	33,3	55,6	45,5	309,2	38,15
SN 2411	Calçada CDHU 23K 322325 7407278	12:19	4,30	3,00	3,00	4,80	25,0	17,8	16,6	390,5	48,44

TABELA 25. Valores de vibração e de frequência medidos na Pedreira Riuma - II

Unidade	Local / UTM	Hora	Vi (mm/s)	Vt (mm/s)	Vv (mm/s)	Vr (mm/s)	Frequência			Dist. (m)	DE (m/kg ^{1/2})
							Vi (Hz)	Vt (Hz)	Vv (Hz)		
SN 4495	Praça 23K 322563 7407783	12:29	13,72	13,21	6,86	18,29	125,0	100,0	166,7	100	12,40
SN 4496	Praça / estrada 23K 322593 7407827	12:29	4,83	4,57	3,81	6,10	123,0	55,6	62,5	150,5	18,67
SN 4509	Bancada superior 23K 322622 7407897	12:29	6,86	4,06	6,86	7,87	45,5	35,7	55,6	226,2	28,06
SN 4508	Bancada / córrego 23K 322641 7407929	12:29	13,46	10,67	7,62	14,22	71,4	45,5	71,4	262,9	32,61
SN 4507	Casa do compressor 23K 322654 7407979	12:29	2,29	2,03	1,78	2,54	22,7	13,5	31,2	314,3	38,98
SN 4506	Casa compressor 1 23K 322679 7408038	12:29	1,78	1,78	1,78	2,54	21,7	17,2	38,5	378,3	46,92
SN 2411	Casa compressor 2 23K 322703 7408051	12:29	2,03	2,54	1,78	2,79	31,2	83,3	26,3	399,4	49,54
SN 4505	Divisa / Construcap 23K 322748 7408123	12:29	1,02	1,52	1,02	1,78	55,6	55,6	45,5	483,6	59,98

TABELA 26. Valores de vibração e de frequência medidos na Pedreira Riuma – III

Unidade	Local / UTM	Hora	VI (mm/s)	Vt (mm/s)	Vv (mm/s)	Vr (mm/s)	Frequência			Dist. (m)	DE (m/kg ^{1/2})
							VI (Hz)	Vt (Hz)	Vv (Hz)		
SN 4496	Praça 23K 322693 7407668	12:19	7,11	7,37	7,37	9,65	125,0	125,0	62,5	212,2	26,32
SN 4497	Praça / rampa 23K 322728 7407686	12:19	3,05	2,29	3,56	4,32	41,7	41,7	45,5	244,2	30,29
SN 4505	Praça 23K 322472 7407576	12:19	*	*	*	< 4,83	*	*	*	270,0	33,49
SN 4506	Bancada / córrego 23K 322838 7407674	12:19	3,56	2,79	2,79	4,06	41,7	41,7	50,0	354,8	44,01
SN 4507	Topo do Talude 23K 322907 7407652	12:19	1,52	1,52	1,52	2,29	29,4	35,7	22,7	426,0	52,84
SN 4508	Divisa/ Vista Linda 23K 322949 7407623	12:19	0,76	0,76	0,51	1,02	22,7	35,7	13,9	472,1	58,56
SN 4509	Muro div Vista Linda 23K 322980 7407592	12:19	1,02	0,76	0,76	1,02	20,8	38,5	27,8	508,9	63,12
SN 2411	Divisa / Construcap 23K 323038 7407613	12:19	1,52	1,52	0,76	2,03	38,5	45,5	17,2	561,4	69,63

* Valor não processado – velocidade de vibração abaixo ao limite inferior de sensibilidade em função do limite de sensibilidade ligeiramente superior devido ao tráfego intenso de caminhões.

TABELA 27. Valores de vibração e de frequência medidos na Pedreira Riuma – IV

Fogo R4: Pedreira Riuma – Bancada UTM 23K 322485 7407710												
Carga Máxima por Espera (kg): 65												
Data: 20/12/01												
Unidade	Local / UTM	Hora	VI (mm/s)	Vt (mm/s)	Vv (mm/s)	Vr (mm/s)	Frequência			Dist. (m)	DE (m/kg ^{1/2})	
							VI (Hz)	Vt (Hz)	Vv (Hz)			
SN 4507	Pé do talude 23K 322378 7407752	12:19	4,83	5,84	3,81	6,86	45,5	41,7	50,0	167,6	20,79	
SN 4496	Bancada abandonada 23K 322142 7407912	12:19	2,29	2,03	3,30	3,56	31,2	55,6	33,3	448,5	55,63	
SN 4495	Casa do compressor 23K 322062 7407930	12:19	1,02	1,78	1,02	2,03	2,5	11,4	12,2	522,7	64,83	
SN 4508	Pátio caminhões 23K 322004 7407929	12:19	1,02	1,02	1,02	1,52	7,0	9,1	25,0	570,7	70,79	
SN 4506	Garagem/expedição 23K 321947 7407940	12:19	*	*	*	< 1,27	*	*	*	624,5	77,46	
SN 4505	Balança 23K 3218517407981	12:19	0,76	0,51	0,51	0,76	27,8	29,4	33,3	728,1	90,31	
SN 4509	Próx. chuveiro 23K 321790 7407960	12:19	*	*	*	< 0,76	*	*	*	772,4	95,80	
SN 2411	Estrada de ferro 23K 321722 7407963	12:19	*	*	*	< 0,51	*	*	*	835,3	103,61	

* Valor não processado – velocidade de vibração abaixo ao limite inferior de sensibilidade em função do limite de sensibilidade ligeiramente superior devido ao tráfego intenso e também à distância.

TABELA 28. Valores de vibração e de frequência medidos na Pedreira Riuma -- V

Fogo R5: Pedreira Riuma – Bancada UTM 23K 322478 7407710											
Carga Máxima por Espera (kg): 65											
Data: 10/01/02											
Unidade	Local / UTM	Hora	VI (mm/s)	Vt (mm/s)	Vv (mm/s)	Vr (mm/s)	Frequência			Dist. (m)	DE (m/kg ^{1/2})
							VI (Hz)	Vt (Hz)	Vv (Hz)		
SN 4507	Praça/fogacho 23K 322426 7407872	12:26	10,92	7,62	7,37	11,68	27,8	45,5	20,8	170,1	21,10
SN 4497	Estrada, ao lado 23K 322346 7408006	12:26	5,33	5,59	7,40	9,14	18,5	16,7	17,2	324,1	40,20
SN 4505	Perto do córrego 23K 322270 7408256	12:26	2,29	1,78	3,30	3,56	23,8	13,2	19,2	584,3	72,47
SN 2411	Próximo à oficina 23K 323261 7408312	12:26	1,02	1,52	2,79	3,05	20,0	23,8	16,7	639,9	79,37
SN 4509	Campo de futebol 23K 322297 7408402	12:26	1,78	0,76	2,29	2,54	21,7	11,6	16,1	715,3	88,72

TABELA 29. Valores de vibração e de frequência medidos na Pedreira Riuma – VI

Unidade	Local / UTM	Hora	VI (mm/s)	Vt (mm/s)	Vv (mm/s)	Vr (mm/s)	Frequência			Dist. (m)	DE (m/kg ^{1/2})
							VI (Hz)	Vt (Hz)	Vv (Hz)		
SN 4507	Praça (+ próx.) 23K 322488 7407703	12:29	18,03	18,54	16,26	23,37	62,5	100,0	50,0	85,5	10,60
SN 4506	Praça / rampa 23K 322521 7407636	12:29	9,40	7,37	5,84	9,65	62,5	55,6	45,5	160,2	19,87
SN 4508	Praça inferior 23K 322552 7407597	12:29	5,59	4,57	4,32	7,11	50,0	55,6	55,6	208,9	25,91
SN 4509	Berma superior I 23K 322588 7407554	12:29	5,84	5,59	3,81	8,13	26,3	26,3	50,0	264,1	32,76
SN 4496	Berma superior II 23K 322661 7407535	12:29	2,03	1,78	1,78	2,54	23,8	33,3	26,3	322,2	39,96
SN 4497	Área de revegetação 23K 322694 7407522	12:29	1,27	1,02	0,76	1,52	22,7	27,8	41,7	353,8	43,88
SN 4505	Depois do córrego 23K 322756 7407488	12:29	1,27	1,02	1,52	1,78	31,2	21,7	29,4	393,7	48,83

TABELA 30. Valores de vibração e de frequência medidos na Pedreira Riuma – VII

Fogo R7: Pedreira Riuma – Bancada UTM 23K 322418 7407764											
Carga Máxima por Espera (kg): 65											
Data: 21/01/02											
Unidade	Local / UTM	Hora	VI (mm/s)	Vt (mm/s)	Vv (mm/s)	Vr (mm/s)	Frequência			Dist. (m)	DE (m/kg ^{1/2})
							VI (Hz)	Vt (Hz)	Vv (Hz)		
SN 4507	Antiga cava/bomba 23K 322285 7407855	12:31	2,29	2,03	3,30	3,56	27,8	62,5	62,5	161,2	19,99
SN 4506	Antiga caval/bancada 23K 322144 7407843	12:31	1,78	2,03	4,57	5,33	33,3	45,5	45,5	285,2	35,37
SN 4508	Casa da sirene 23K 322071 7407830	12:31	4,06	2,54	2,79	4,32	55,6	41,7	45,5	353,2	43,81
SN 4496	Estrada / sirene 23K 322037 7407829	12:31	1,02	1,27	1,02	1,52	33,3	41,7	41,7	386,5	47,94
SN 4505	Paioi 23K 322024 7407763	12:31	1,27	1,78	1,02	2,03	26,3	38,5	13,5	394,0	48,87
SN 4509	Alojamento 23K 321781 7407738	12:31	0,51	0,25	0,76	0,76	4,2	83,3	20,8	637,4	79,06
SN 4497	Oficina 23K 321766 7407647	12:31	1,02	0,76	0,76	1,27	41,7	41,7	41,7	662,4	82,16
SN 2411	Escritório 23K 321689 7407647	12:31	0,76	0,51	0,76	1,02	6,2	6,2	38,5	738,7	91,62

TABELA 31. Valores de vibração e de frequência medidos na Pedreira Riuma – VIII

Fogo R8: Pedreira Riuma – Bancada UTM 23K 322475 7407742											
Carga Máxima por Espera (kg): 150											
Data: 24/01/02											
Unidade	Local / UTM	Hora	VI (mm/s)	Vt (mm/s)	Vv (mm/s)	Vr (mm/s)	Frequência			Dist. (m)	DE (m/kg ^{1/2})
							VI (Hz)	Vt (Hz)	Vv (Hz)		
SN 4507	Praça (+ próx.) 23K 322550 7407765	12:18	25,91	26,42	18,80	30,99	166,7	71,4	166,7	78,5	6,41
SN 4506	Praça (Estrada) 23K 322590 7407774	12:18	12,19	9,40	4,83	13,21	50,0	62,5	71,4	119,4	14,81
SN 4508	Praça (Bancada) 23K 322648 7407792	12:18	8,13	6,35	4,83	9,40	50,0	38,5	41,7	180,1	22,34
SN 4505	Córrego 23K 322674 7407801	12:18	7,62	5,59	4,32	8,13	50,0	71,4	55,6	207,6	25,75
SN 4497	Topo do Morro 23K 322751 7407823	12:18	2,54	1,78	2,03	3,05	22,7	27,8	20,0	287,6	35,67
SN 4496	Atrás do morro 23K 322800 7407842	12:18	1,78	1,52	2,03	2,29	15,2	35,7	20,0	340,0	42,17
SN 2411	Estrada (Vista Linda) 23K 322852 7407879	12:18	1,27	1,52	1,52	1,78	12,8	35,7	25,0	401,1	49,75
SN 4509	Divisa c/ Vista Linda 23K 322923 7407876	12:18	1,52	1,27	1,27	1,78	41,7	33,3	50,0	467,6	58,00

CAPÍTULO 13 – EQUAÇÕES CARGA-DISTÂNCIA PARA A PEDREIRA RIUMA

13.1. DISTRIBUIÇÃO DOS PONTOS MONITORADOS

Após os monitoramentos nas direções escolhidas, os pontos monitorados foram plotados para se verificar as condições de alinhamento. A Figura 73 apresenta um desenho da distribuição dos alinhamentos feitas em planilha, de acordo com as coordenadas UTM fornecidas pelo GPS. Já a Figura 74 mostra esta mesma distribuição sobre uma planta da pedreira para melhor visualização dos pontos monitorados e das bancadas desmontadas.

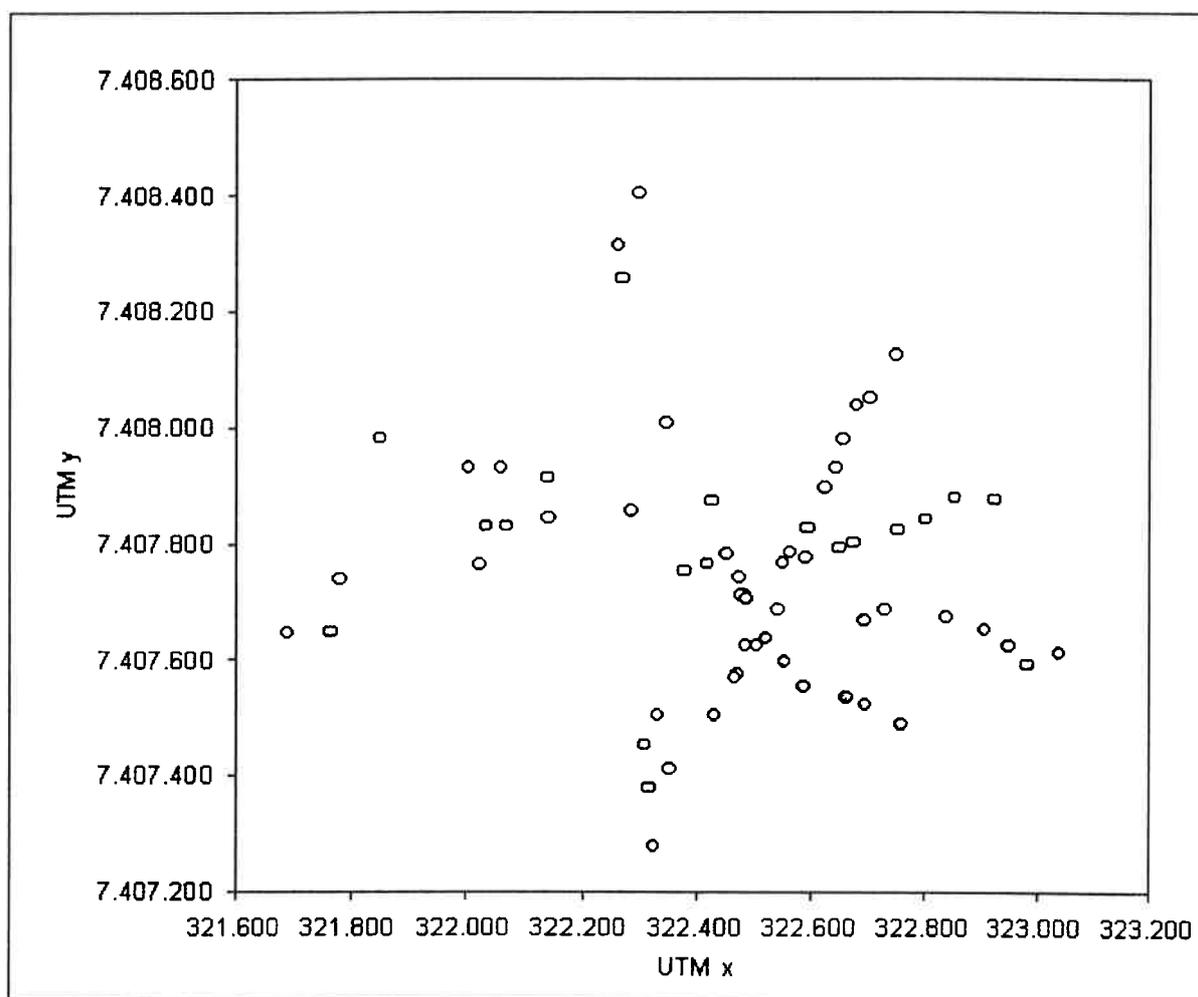


FIGURA 73. Distribuição espacial dos pontos monitorados na Pedreira Riuma, de acordo com as coordenadas UTM.

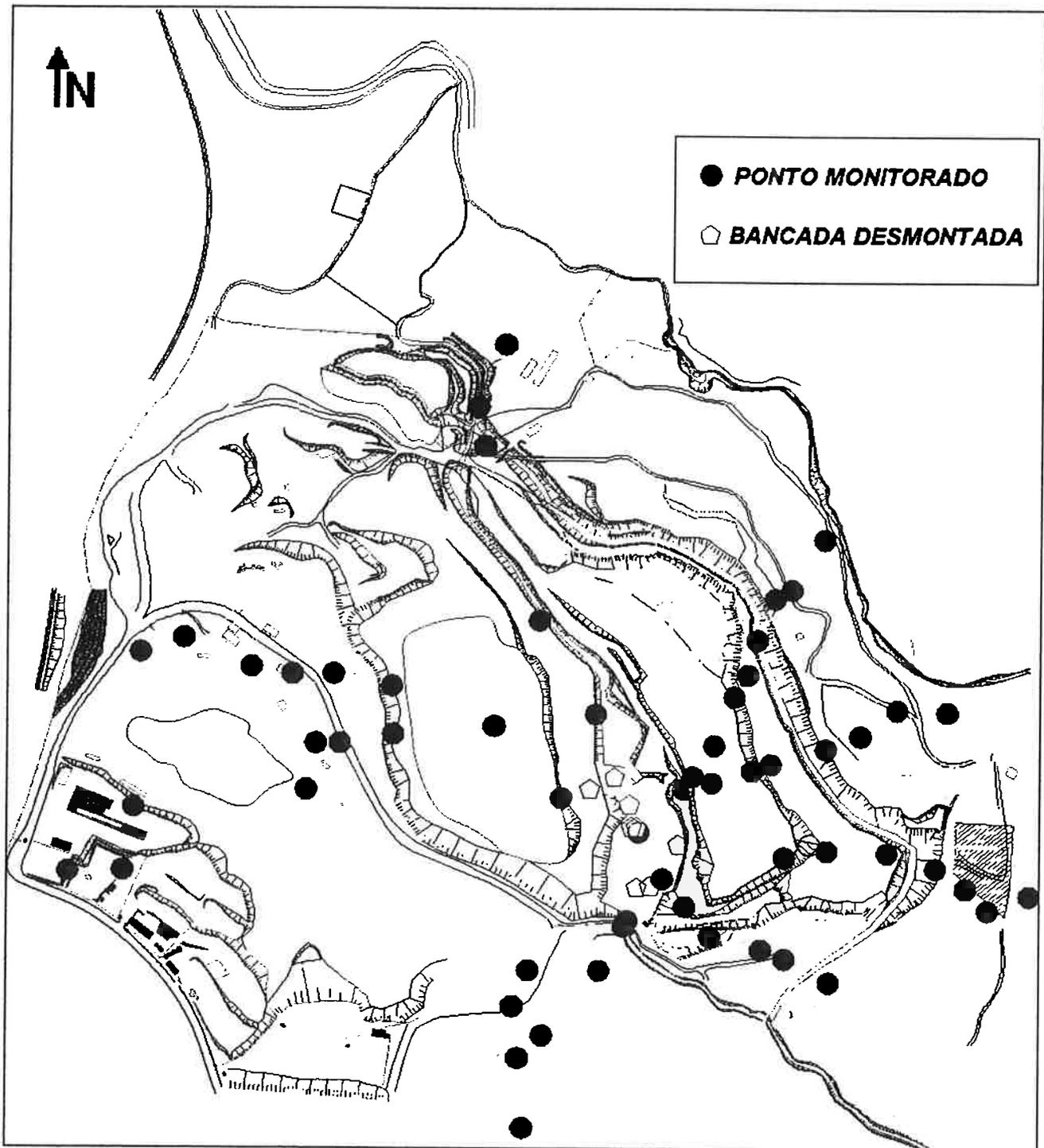


FIGURA 74. Distribuição dos pontos monitorados e localização das bancadas desmontadas na Pedreira Riuma.

13.2. OBTENÇÃO NUMÉRICA DAS EQUAÇÕES CARGA-DISTÂNCIA

Para as oito direções monitoradas, foram levantadas as equações que correlacionam a velocidade de vibração de partícula com a distância escalonada. Isto significa que cada uma destas direções possui um padrão único de amortecimento da vibração. As Figuras 75 a 82 apresentam os gráficos utilizados para a regressão dos pontos e as equações resultantes. Os gráficos foram construídos apenas com os pontos válidos, que são aqueles que foram processados e possuem um registro sismográfico. Os pontos não válidos são aqueles cujos sismógrafos não foram capazes de processar os valores em função da velocidade de vibração de partícula ser inferior ao limite de sensibilidade do geofone. Os valores das abscissas se referem à distância escalonada dada em $[m/kg^{0,5}]$ enquanto que os valores das ordenadas representam a velocidade de vibração de partícula dada em $[mm/s]$. Os gráficos foram calculados com base na Carga Máxima por Espera contida nos planos de fogo fornecidos pela Mineração.

13.2.1. Direção Sul - Sudoeste

Nesta direção foram instalados 8 sismógrafos que resultaram no gráfico apresentado pela Figura 75. A litologia estudada neste caso foi o granito.

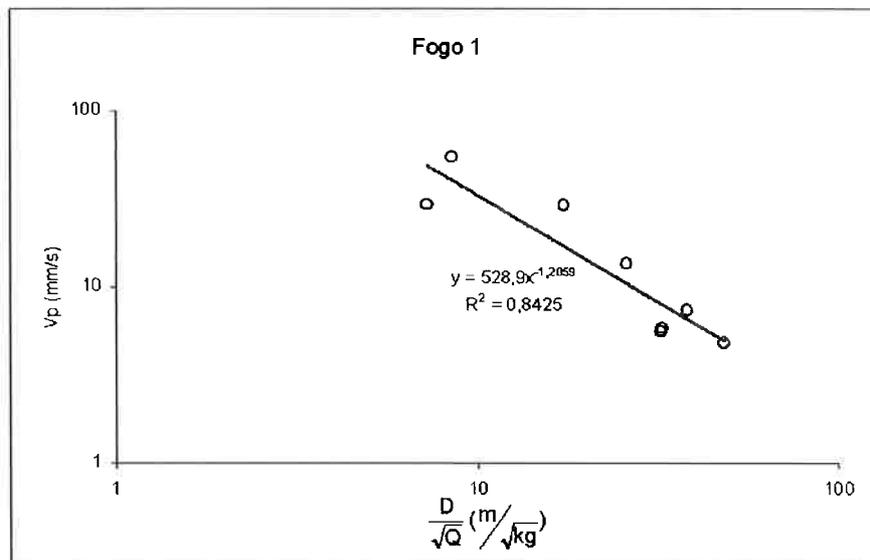


FIGURA 75. Regressão de 8 pontos monitorados na direção sul-sudoeste da Pedreira Riuma.

A equação carga – distância resultante desta regressão é dada por:

$$V_p = 528,9 \left(\frac{D}{\sqrt{Q}} \right)^{-1,2059} \quad (67)$$

Onde

V_p = Velocidade de vibração de partícula resultante em mm/s

D = Distância ao ponto de detonação em m

Q = Carga máxima por espera em kg

13.2.2. Direção Nordeste

Nesta direção foram instalados 8 sismógrafos que resultaram no gráfico apresentado pela Figura 76. A litologia estudada neste caso foi o granito.

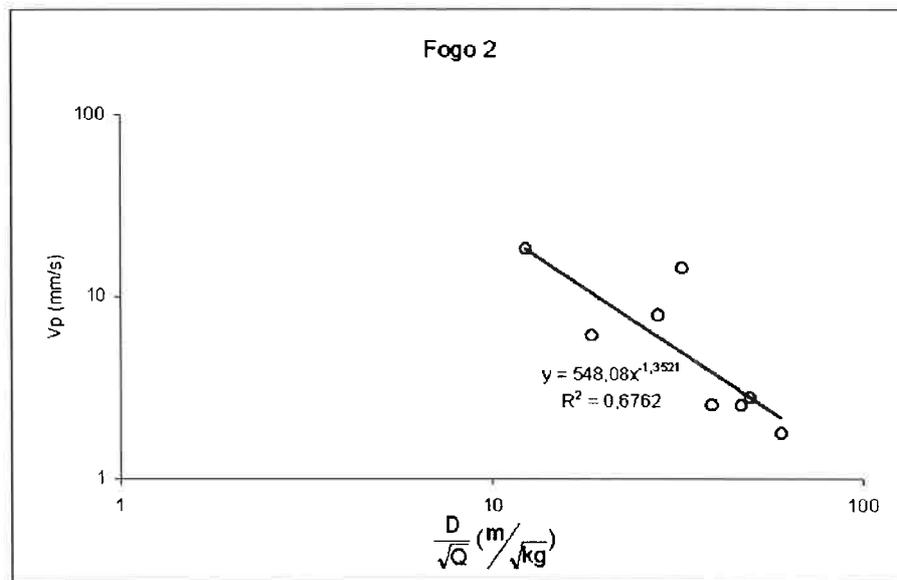


FIGURA 76. Regressão de 8 pontos monitorados na direção nordeste da Pedreira Riuma.

A equação carga – distância resultante desta regressão é dada por:

$$V_p = 548,1 \left(\frac{D}{\sqrt{Q}} \right)^{-1,3521} \quad (68)$$

13.2.3. Direção Leste

Nesta direção foram instalados 8 sismógrafos, com 7 pontos válidos e que resultaram no gráfico apresentado pela Figura 77. A litologia estudada neste caso foi o granito.

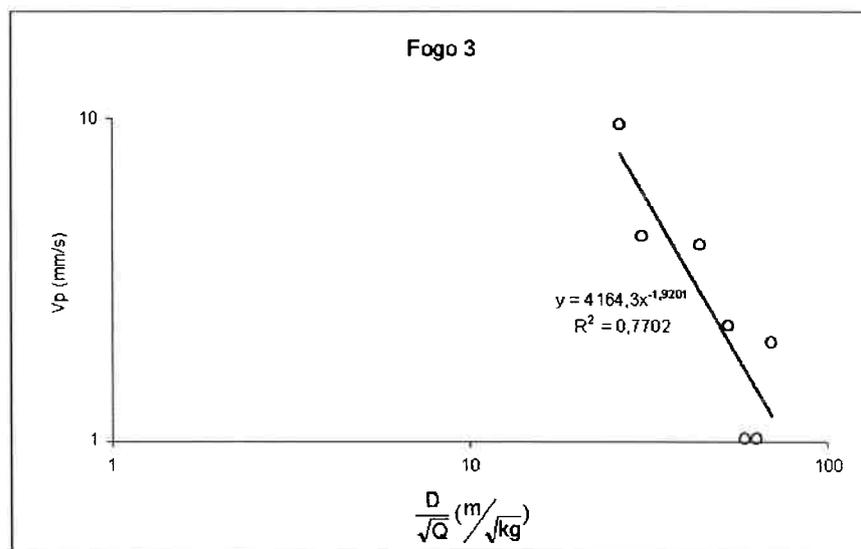


FIGURA 77. Regressão de 7 pontos monitorados na direção leste da Pedreira Riuma.

A equação carga – distância resultante desta regressão é dada por:

$$Vp = 4164,3 \left(\frac{D}{\sqrt{Q}} \right)^{-1,9201} \quad (69)$$

13.2.4. Direção Noroeste

Nesta direção foram instalados 8 sismógrafos, com 5 pontos válidos que resultaram no gráfico apresentado pela Figura 78. A litologia estudada neste caso foi o granito.

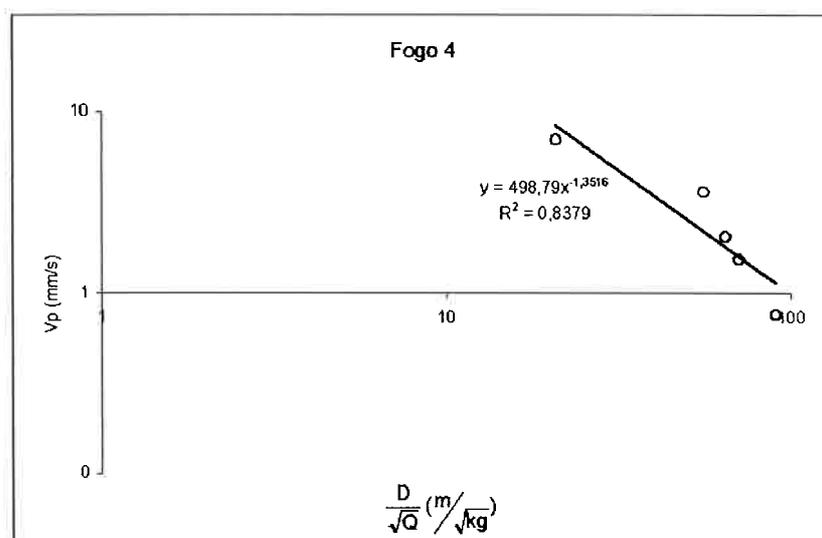


FIGURA 78. Regressão dos 8 pontos (5 válidos) monitorados na direção noroeste da Pedreira Riuma.

A equação carga – distância resultante desta regressão é dada por:

$$Vp = 498,8 \left(\frac{D}{\sqrt{Q}} \right)^{-1,3516} \quad (70)$$

13.2.5. Direção Norte

Nesta direção foram instalados 5 sismógrafos que resultaram no gráfico apresentado pela Figura 79. A litologia estudada neste caso foi o granito.

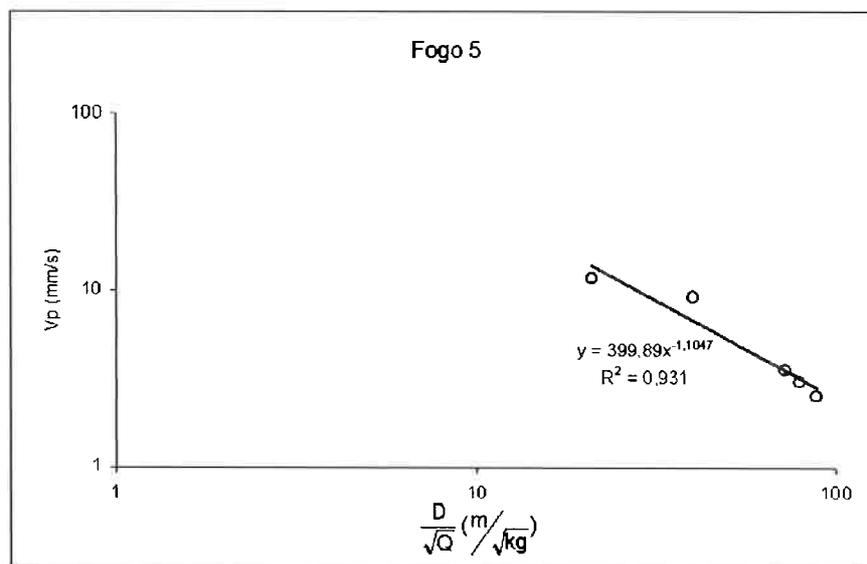


FIGURA 79. Regressão dos 5 pontos monitorados na direção norte da Pedreira Riuma.

A equação carga – distância resultante desta regressão é dada por:

$$Vp = 399,9 \left(\frac{D}{\sqrt{Q}} \right)^{-1,1047} \quad (71)$$

13.2.6. Direção Sudeste

Nesta direção foram instalados 7 sismógrafos que resultaram no gráfico apresentado pela Figura 80. A litologia estudada neste caso foi o granito.

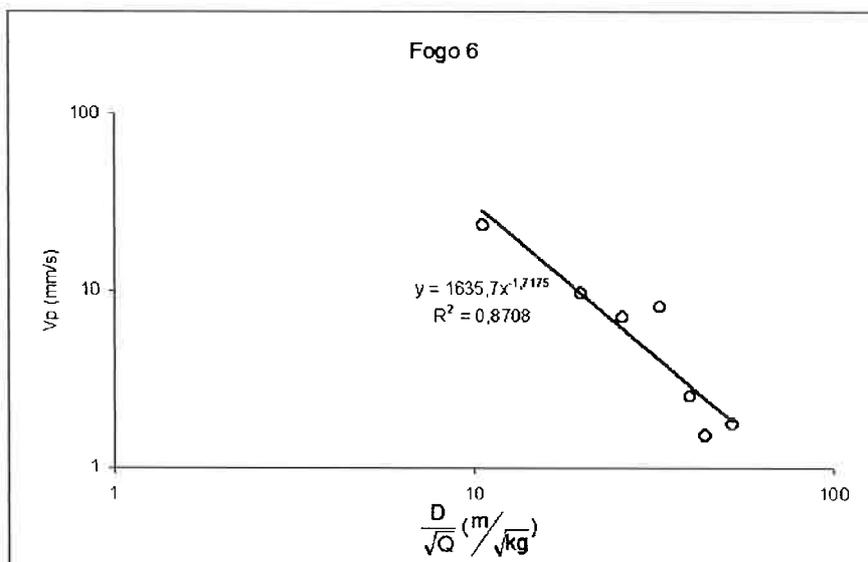


FIGURA 80. Regressão dos 7 pontos monitorados na direção sudeste da Pedreira Riuma.

A equação carga – distância resultante desta regressão é dada por:

$$V_p = 1635,7 \left(\frac{D}{\sqrt{Q}} \right)^{-1,7175} \quad (72)$$

13.2.7. Direção Oeste

Nesta direção foram instalados 8 sismógrafos que resultaram no gráfico apresentado pela Figura 81. A litologia estudada neste caso foi o granito.

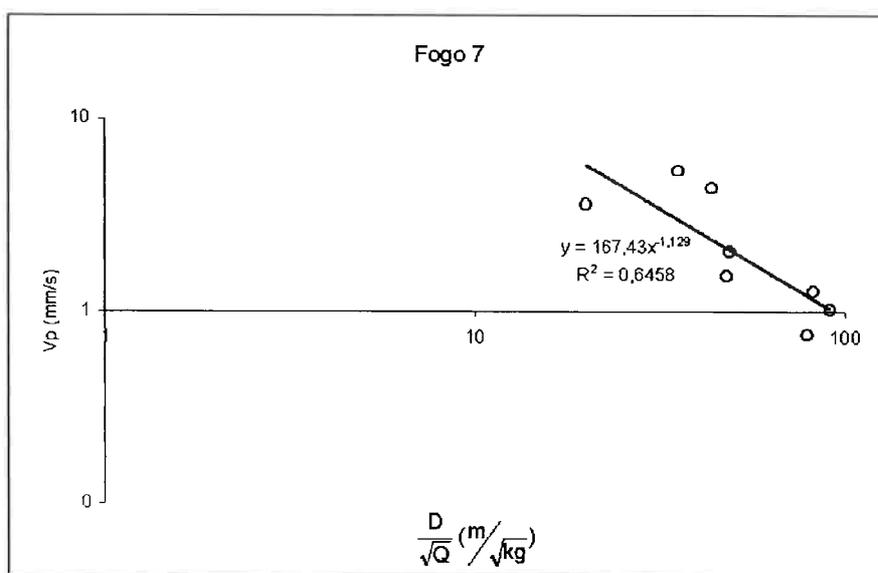


FIGURA 81. Regressão dos 8 pontos monitorados na direção oeste da Pedreira Riuma.

A equação carga – distância resultante desta regressão é dada por:

$$Vp = 167,4 \left(\frac{D}{\sqrt{Q}} \right)^{-1,1290} \quad (73)$$

13.2.8. Direção Leste - Nordeste

Nesta direção foram instalados 8 sismógrafos que resultaram no gráfico apresentado pela Figura 82. A litologia estudada neste caso foi o granito.

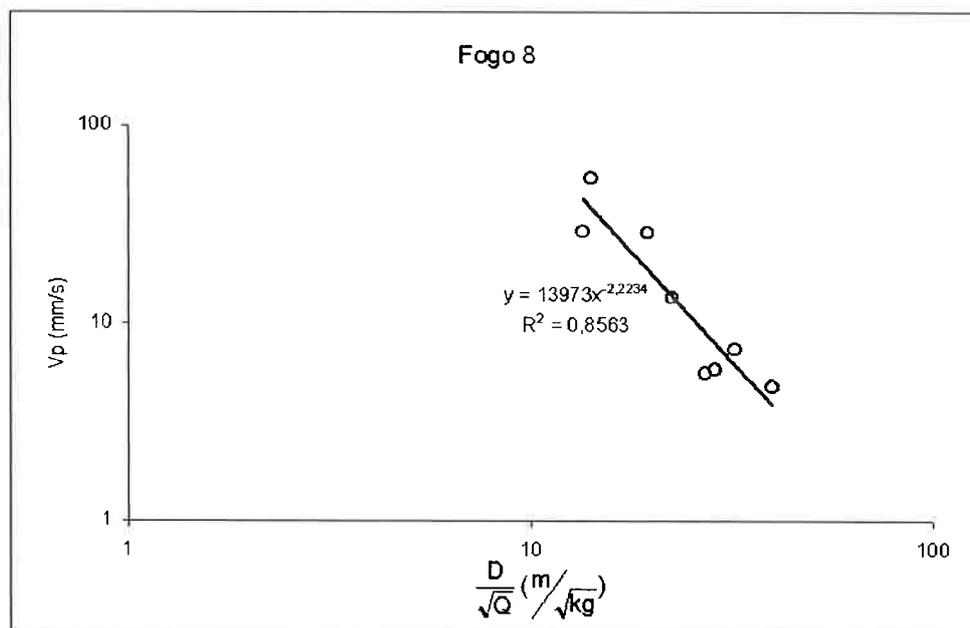


FIGURA 82 . Regressão dos 8 pontos monitorados na direção leste-nordeste da Pedreira Riuma.

A equação carga – distância resultante desta regressão é dada por:

$$Vp = 13973,0 \left(\frac{D}{\sqrt{Q}} \right)^{-2,2234} \quad (74)$$

13.3. DISTRIBUIÇÃO E CORREÇÃO DOS ERROS DE ALINHAMENTO

Devido aos erros de posicionamento dos sensores e ao próprio erro do GPS, pôde-se observar que os pontos não estavam perfeitamente alinhados nas direções determinadas. As bancadas, por sua vez, também estavam posicionadas em coordenadas diferentes. O modelo ideal para esta metodologia seria o de se fazer um alinhamento perfeito, com todos os pontos situados sobre a reta da direção de alinhamento e espaçados igualmente entre eles até se atingir uma distância na qual os valores de vibração fossem inferiores a 1 mm/s. Obviamente isto não foi possível pois não havia sensores suficientes para espaçá-los igualmente até se atingir o valor abaixo de 1 mm/s e também pelo fato de não haver uma única origem (bancada) para estas direções. A Figura 83 apresenta as retas médias obtidas com os pontos espaçados de igual distância e que possuem uma origem em comum, estas retas representam o modelo ideal de espaçamento e distribuição a ser adotado para esta metodologia.

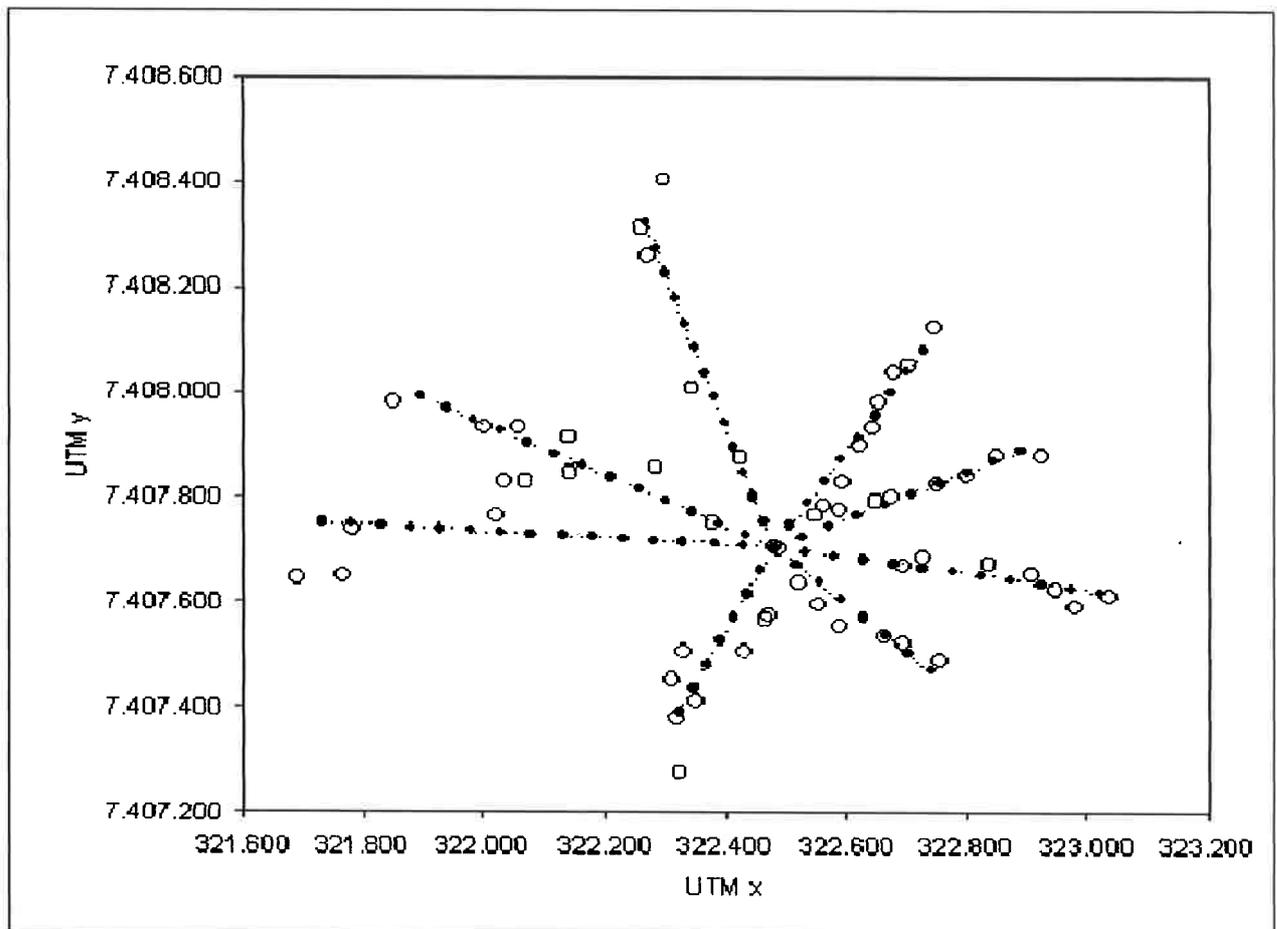


FIGURA 83. Comparação entre a distribuição real e as retas médias ideais das direções, com uma mesma origem e com os pontos espaçados igualmente entre eles.

CAPÍTULO 14. MAPAS DE ISO-VELOCIDADES OBTIDOS PARA A PEDREIRA RIUMA

14.1. MAPAS DE ISO-VELOCIDADES A PARTIR DE VALORES REAIS

14.1.1. Mapa de iso-velocidades feito com o programa 3Dfield

A Figura 84 mostra o mapa obtido através da interpolação dos pontos reais obtidos nos monitoramentos para as oito direções. Nela também são mostrados os limites da ABNT (15 mm/s), o limite da CETESB (4,2 mm/s) e o limite proposto pelo LACASEMIN (8 mm/s, ESTON, 1998).

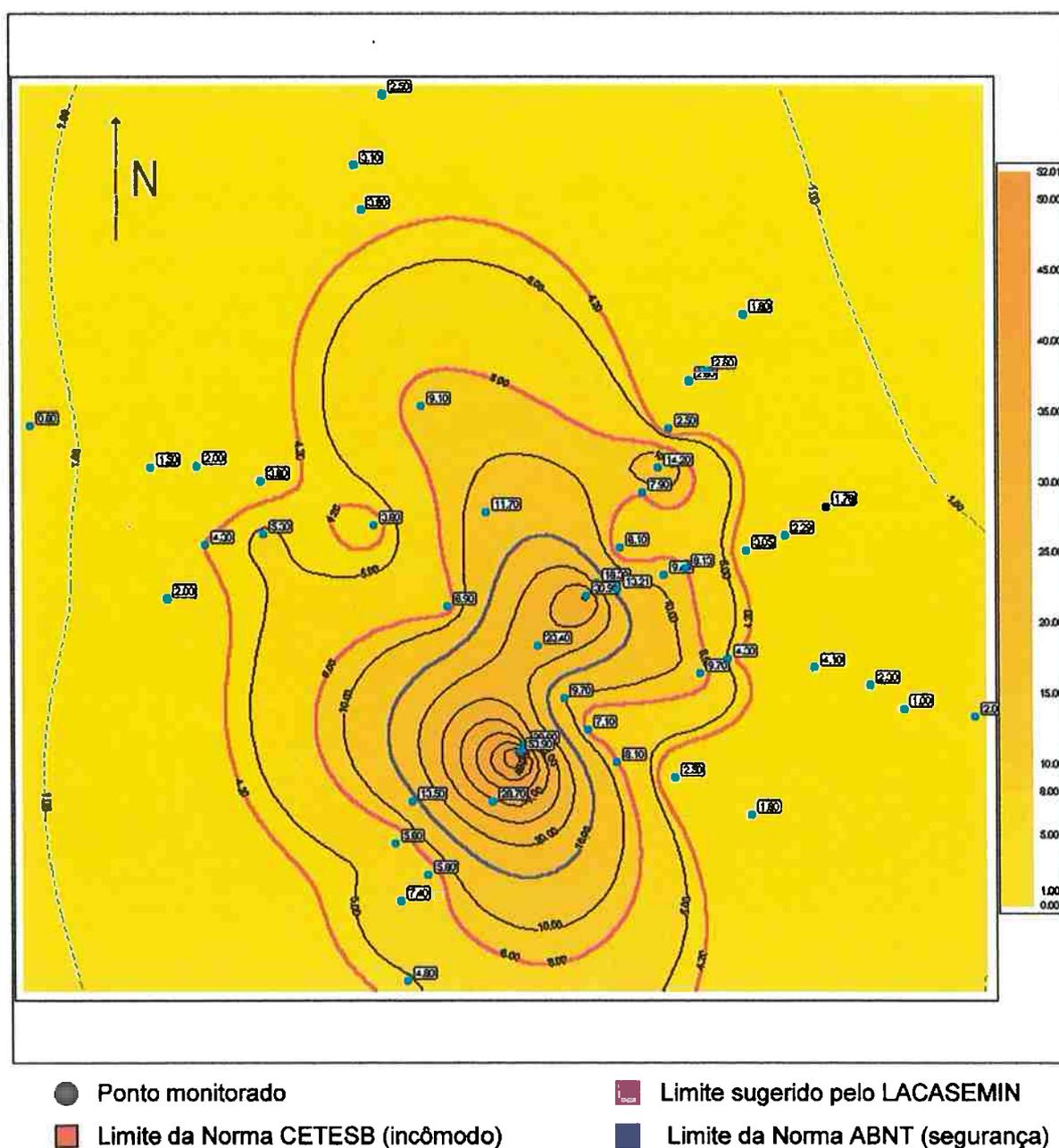


FIGURA 84. Mapa de iso-velocidades com valores medidos, obtido do programa 3Dfield.

14.1.2. Mapa de iso-velocidades feito com o programa Surfer

A Figura 85 mostra o mapa obtido através da interpolação dos pontos reais obtidos nos monitoramentos para as oito direções. O programa Surfer mostrou-se mais completo para a geração de gráficos e superfícies sendo, portanto, o programa utilizado para as demais análises.

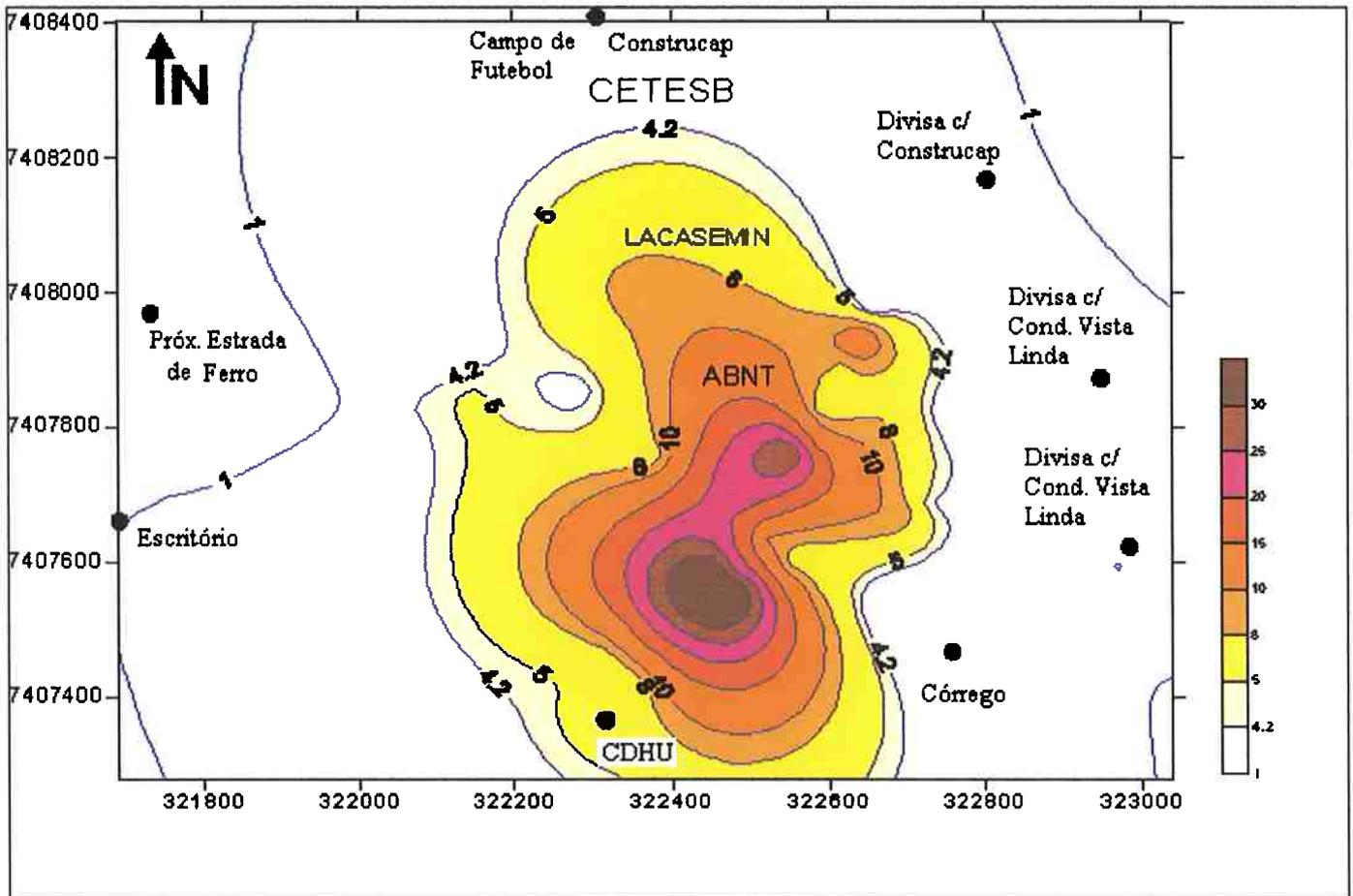


FIGURA 85. Mapa de valores reais obtido com o programa Surfer no sistema de coordenadas UTM. Foram plotados também alguns pontos de referência próximos à divisa da propriedade da pedreira

14.1.3. Plotagem tridimensional das linhas de iso-velocidades obtida com o programa Surfer

A Figura 86 mostra a superfície obtida através da interpolação dos pontos reais obtidos nos monitoramentos para as oito direções.

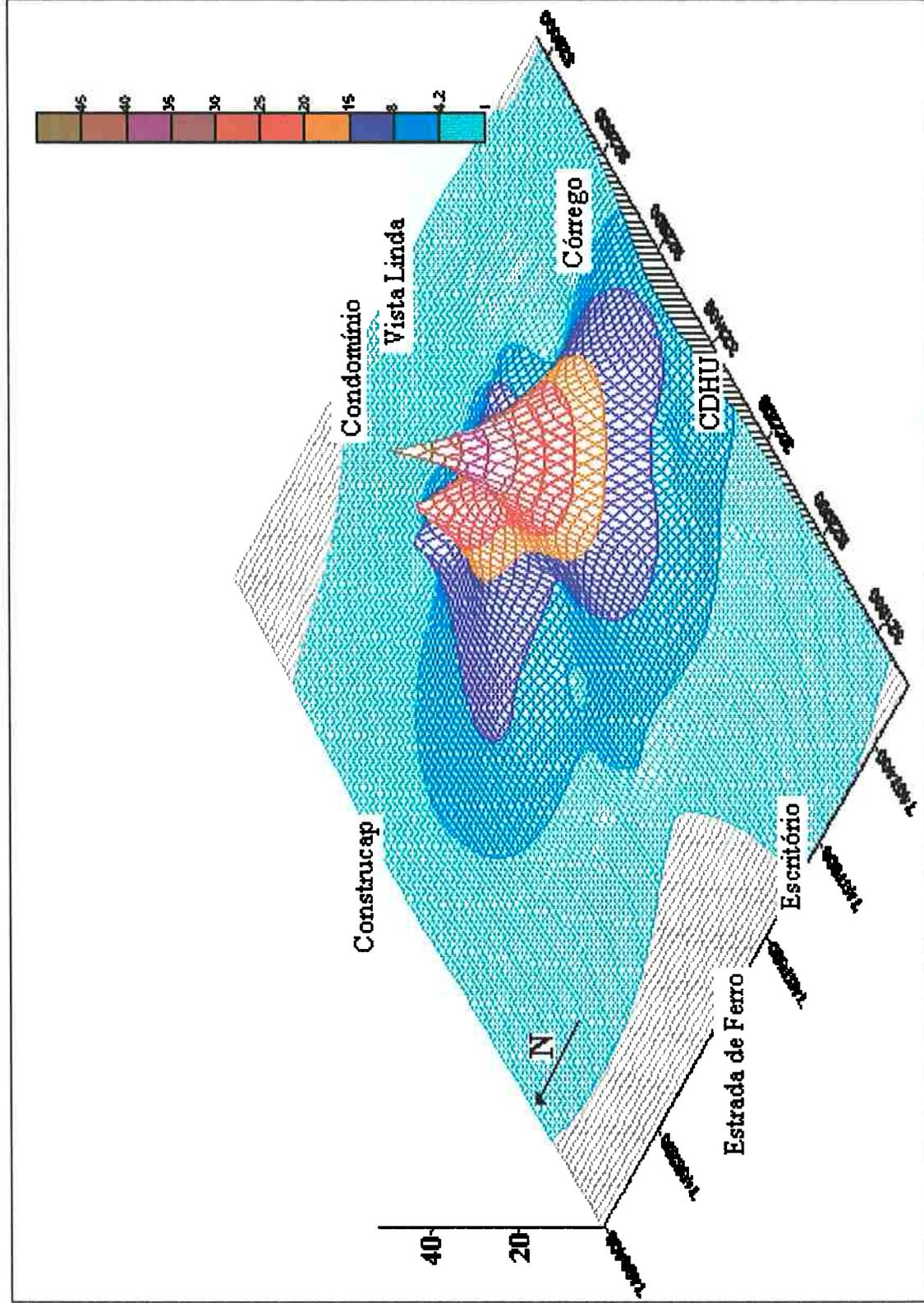


FIGURA 86. Superfície obtida através da interpolação dos pontos reais obtidos nos monitoramentos para as oito direções no sistema de coordenadas UTM. Foram incluídos também alguns pontos de referência próximos à divisa da propriedade.

14.2. MAPAS DE ISO-VELOCIDADES A PARTIR DE SIMULAÇÃO

A seguir são apresentados os mapas obtidos a partir da simulação de um modelo ideal da metodologia adotada. Os valores obtidos foram através de pontos (equidistantes entre eles) interpolados sobre as retas médias e com uma mesma origem.

14.2.1. Mapa de iso-velocidades feito com o programa Surfer

A Figura 87 mostra um mapa obtido, pelo programa Surfer, através da interpolação dos pontos calculados sobre as retas médias que representam as oito direções escolhidas e que também são mostradas no desenho.

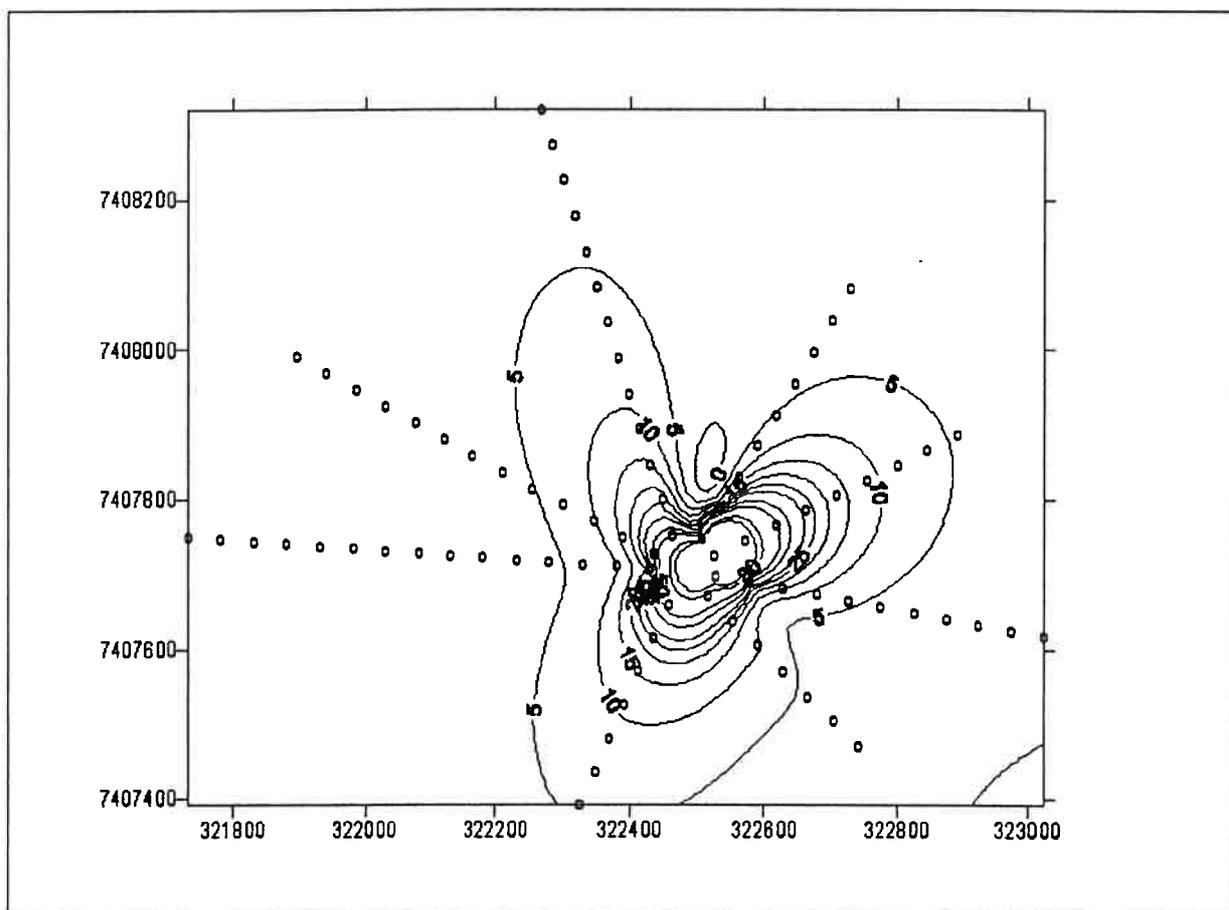


FIGURA 87. Mapa de iso-velocidades simulando-se um modelo ideal de distribuição para as oito direções escolhidas no sistema de coordenadas UTM.

14.2.2. Plotagem tridimensional de linhas de iso-velocidades obtida com o programa Surfer

A Figura 88 mostra a superfície obtida através da interpolação dos pontos obtidos do modelo simulado.

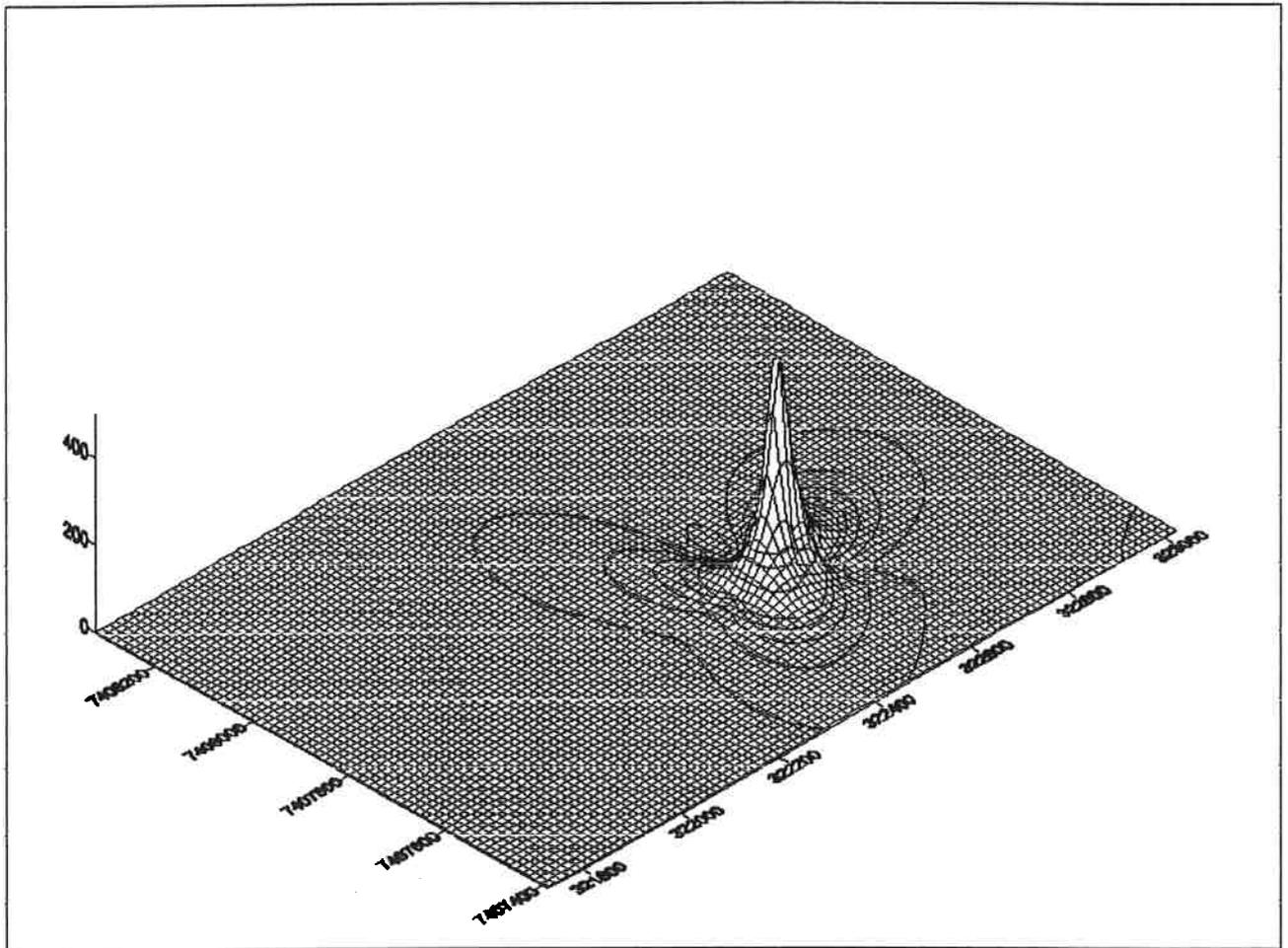


FIGURA 88. Superfície obtida através da interpolação dos pontos obtidos no modelo simulado no sistema de coordenadas UTM.

14.2.3. Comparação das isolinhas de velocidade corrigidas com as Normas da ABNT e da CETESB

As Figuras 89 e 90 mostram, respectivamente, as isolinhas correspondentes aos limites de vibração estabelecidos pela ABNT e pela CETESB para a simulação do modelo ideal.

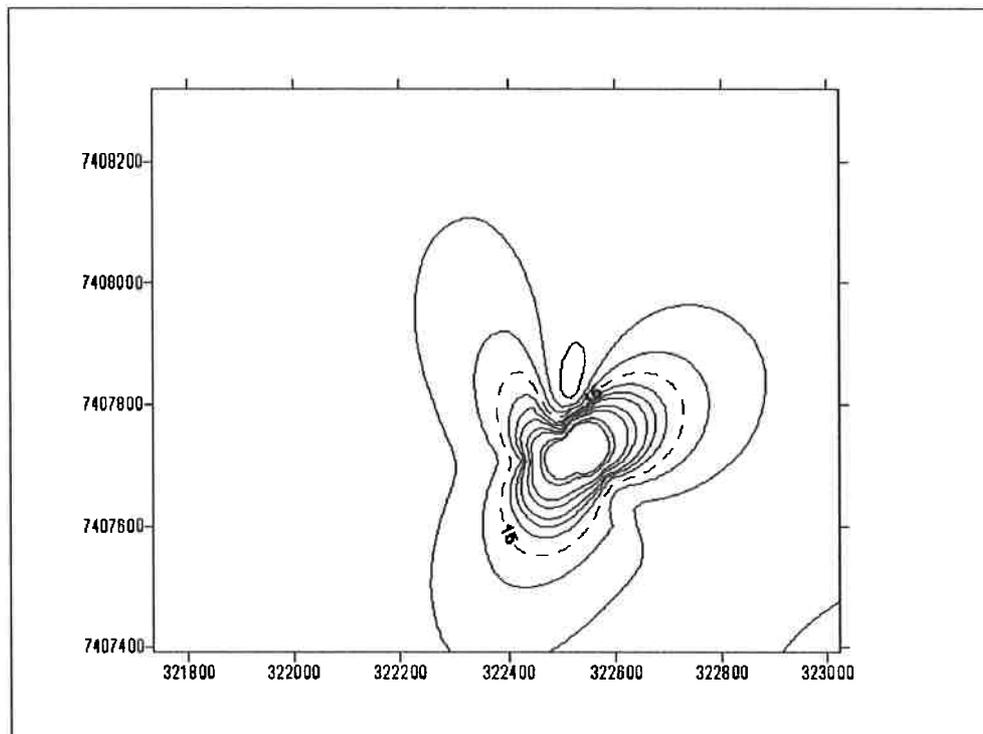


FIGURA 89. Limite da Norma ABNT NBR-9653 para o modelo simulado no sistema de coordenadas UTM.

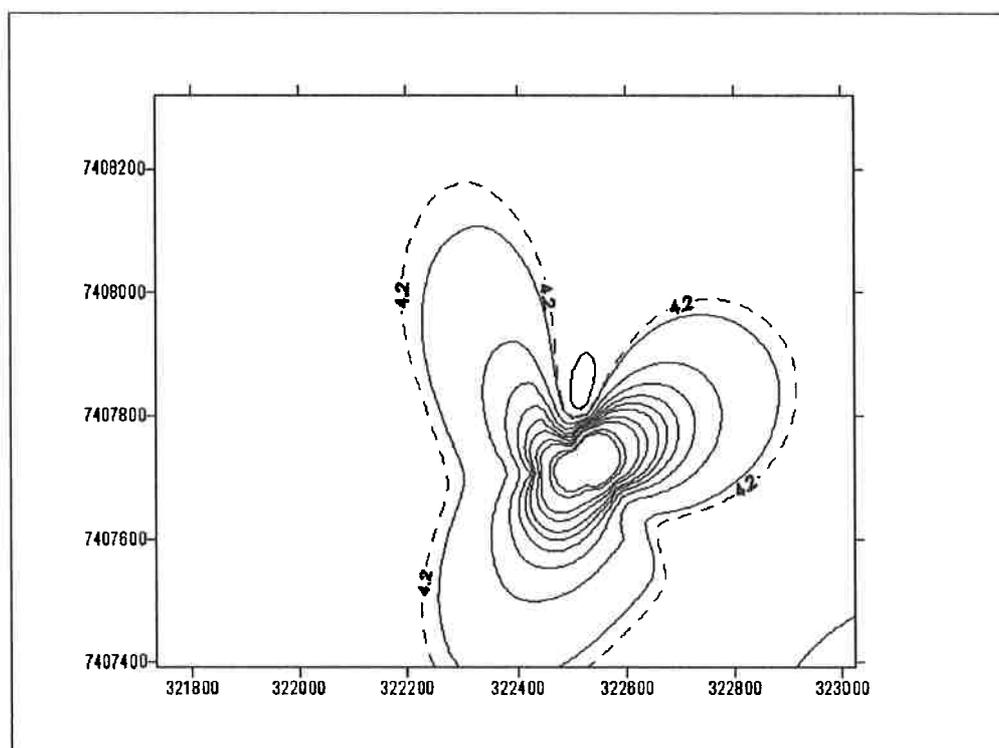


FIGURA 90. Limite da Norma da CETESB para o modelo simulado no sistema de coordenadas UTM.

CAPÍTULO 15 - APLICAÇÃO DO MAPA DE ISO-VELOCIDADES DENTRO DE UM SISTEMA DE GESTÃO INTEGRADA DE SEGURANÇA E MEIO AMBIENTE

15.1. A QUESTÃO DA VIBRAÇÃO DE TERRENO NA MINERAÇÃO

As atividades que induzem um evento sísmico normalmente envolvem a extração de energia ou de recursos naturais ou então a disposição de rejeitos. Como a população humana continua a aumentar, estas extrações também aumentam em número de locais e de intensidade dos efeitos. Crescem também o número e a severidade de danos induzidos por eventos sísmicos que podem ser causadas por vibrações. Nestes casos, as compensações para os danos causados por estes eventos devem ser feitas por quem os provocou, como ocorre, por exemplo, nos Estados Unidos, onde o responsável por um dano sísmico muitas vezes é obrigado a reparar o prejuízo causado.

A responsabilidade legal para os danos causados pelas vibrações pode ser analisada sob diversos aspectos legais, como invadir ou ultrapassar alguma propriedade ("trespass"), como responsabilidade legal estrita, negligência ou incômodo. As vibrações provocadas por detonações são muitas vezes vistas como uma ultrapassagem análoga à uma invasão física. Elas também se encaixam no conceito de poluição, como sendo uma forma de energia que ultrapassa algum limite estabelecido.

Os eventos sísmicos induzidos pelo homem podem ocorrer sob as seguintes formas:

- *evento sísmico induzido por injeção*. Injeção de fluidos para a disposição de rejeitos ou uma recuperação secundária de petróleo ou gás que podem ocasionar tremores. CYPSER (1998) cita uma série de casos documentados nos Estados Unidos de tremores provocados por tais injeções;
- *evento sísmico induzido por produção*. A produção de petróleo, gás ou energia geotermal por si só pode provocar tremores em função do recalque do terreno, subsidência de blocos subterrâneos, criação de novas fraturas e deslizamento de falhas. Segundo CYPSER (1998), existem vários casos deste tipo, inclusive o do maior tremor já produzido pelo homem, com magnitude comparável a dos maiores terremotos naturais;
- *evento sísmico induzido por assentamento de reservatório*. Atividade também responsável por tremores de grande magnitude;
- *evento sísmico induzido por minerações e pedreiras*. Além do uso de explosivos para a remoção do minério, grandes aberturas na rocha podem provocar deslizamento de taludes e subsidências de blocos subterrâneos, que podem resultar em tremores. Segundo um estudo de 1988, realizado pelo Serviço Geológico Britânico, cerca de 25 % de todos os terremotos registrados podem estar de alguma forma ligados à mineração de carvão daquele país (CYPSER, 1998).

Os terremotos, por sua vez, são eventos naturais e uma expressão muito comum em países onde estes ocorrem é de que se tratam de um "ato de Deus", e embora causem grandes danos materiais e lesões em pessoas, não se pode culpar ninguém. Em termos legais um "ato de Deus" é definido como algo acima de qualquer controle, ou mesmo fora da influência de qualquer atividade humana. Em países com terremotos freqüentes, isto pode levar a interpretações equivocadas, pois muitas pessoas desconhecem o termo evento sísmico induzido (CYPSEER, 1998).

Os impactos ambientais negativos causados pela mineração no meio ambiente são bastante significativos, ocorrendo nas mais variadas formas, sendo observados desde longa data. Embora seja de reconhecida importância em função do seu impacto socio-econômico, por suprir produtos e garantir a sobrevivência de muitos, há uma ambigüidade quanto à mineração, por se tratar de uma atividade que degrada o meio ambiente com a mesma magnitude que outras atividades industriais, resultando num alto índice de rejeição por diversos setores da sociedade. Para que estes impactos tivessem pouco efeito sobre as pessoas, a lavra e o processamento dos minérios deveriam ocorrer somente a grandes distâncias dos núcleos urbanos, das estradas, rios, etc.

No entanto, antes mesmo de se iniciar um empreendimento já surgem problemas em função de sua localização, e o art. 225, parágrafo 2º da Constituição Federal dispôs que "aquele que explorar recursos minerais fica obrigado a recuperar o meio ambiente degradado, de acordo com solução técnica exigida pelo órgão público competente, na forma da lei" (FREIRE, 2001).

Este dispositivo influenciou na Lei No 6.938/81 e nas Resoluções do CONAMA, que já exigiam os planos de recuperação de áreas degradadas quando do licenciamento ambiental. Seu efeito, elevando a exigência ao nível constitucional, é o de ressaltar a relevância e preocupação que o legislador demonstrou com o setor mineral. Por mais relevante que seja, FREIRE (2001) cita que "a defesa do meio ambiente é apenas um dos vetores constitucionais, que precisa ser conciliado com muitos outros. Dentre esses outros valores igualmente destacáveis, situa-se o desenvolvimento nacional, elevado à categoria de princípio fundamental da ordem constitucional brasileira (art. 3º, II). Disso resulta que o constituinte admitiu a hipótese de que certas atividades econômicas, ainda que lesivas ao meio ambiente, deveriam ser executadas. Conformou-se assim com a inevitabilidade do dano, mas cuidou de determinar a recuperação do meio ambiente degradado".

O surgimento de normas ambientais da série ISO 14.000 fez com que os problemas associados à mineração passassem a se refletir em toda a complexa cadeia produtiva da indústria da qual ela faz parte. O setor mineral vem-se destacando então como participante nas elaborações de novas normas internacionais, assim como na concepção e implementação de sistemas de gestão ambiental, inicialmente com suas unidades produtoras de minerais destinados ao comércio internacional e atualmente com as unidades produtoras de minerais de destaque no cenário nacional, entre as quais se destaca o setor de agregados. Por isso, as empresas deste

setor começaram a adotar uma postura pró-ativa, adotando ou desenvolvendo e implantando um sistema de gestão ambiental (DIAS, 1996).

Conforme já discutido no Capítulo 4, os principais efeitos adversos associados à mineração são as emissões para a atmosfera, emissões para as águas superficiais, contaminação do solo e das águas subterrâneas, impactos associados à disposição dos resíduos sólidos, emissões de ruídos e vibrações, impactos visuais, impactos sobre o ecossistema e sobre o meio antrópico. Estes impactos também ocorrem na mineração de agregados, porém alguns dos impactos considerados muito importantes em nível mundial não ocorrem neste caso (DIAS, 1996). Se por um lado a mineração de agregados não contribui significativamente para o agravamento dos grandes problemas ambientais do planeta – como chuvas ácidas, aumento do buraco na camada de ozônio, efeito estufa – é responsável por diversos danos e incômodos que atingem principalmente as populações que vivem no entorno das minerações. Os agregados, por definição, são utilizados na indústria da construção civil, e por isso as quantidades envolvidas na maioria dos casos são grandes e os valores adicionados são relativamente pequenos. Além disso, são materiais relativamente abundantes, podendo ser encontrados nas proximidades dos centros urbanos ou nos canteiros de grandes obras civis em construção. Esta singularidade do setor de agregados contribui significativamente para a potencialização dos problemas ambientais, que são percebidos intensamente pela vizinhança (DIAS, 1996). Além disso, existe o fato importante de que a mineração de agregados pode ser executado com numerosos pequenos e médios empreendimentos próximos uns aos outros. Este fato, facilmente explicável em função da conjunção de fatores como proximidade de mercado e ocorrência de reservas minerais externas à área de concessão de lavra de um empreendimento, favorece o acúmulo dos impactos, ou seja, cada empreendimento isoladamente pode causar impactos que podem ir de pouco a bastante agressivos. O conjunto deles pode levar a um agravamento ainda maior da qualidade ambiental de uma determinada região.

Do ponto de vista organizacional, a área de meio ambiente de uma empresa de mineração deve ser integrada com a segurança do trabalho, chamada assim de *Gestão Integrada de Segurança e Meio Ambiente*. Sempre que mencionarmos o termo gestão de meio ambiente, na realidade estamos nos referindo à gestão integrada de segurança e meio ambiente.

15.2. SISTEMA DE GESTÃO INTEGRADA DE SEGURANÇA E MEIO AMBIENTE

Um Sistema de Gestão Integrada de Segurança e Meio Ambiente é caracterizado por uma política e uma ferramenta de gerenciamento de informações, sendo adotado pelas empresas e governos em todo o mundo e cujo objetivo é o de se obter melhorias na segurança e proteção ambiental. Uma grande parte deste sistema se baseia no sistema de Gestão Ambiental, sendo que o catalisador para a aceitação deste Sistema foi a introdução na Europa do Sistema de Gestão

Ecológica e de Auditorias (EMAS) e os padrões da ISO 14000, com a bem sucedida experiência com a ISO 9000 (Sistema de Gestão da Qualidade). Este Sistema pode atingir tanto as necessidades da indústria como as necessidades políticas das regulamentações ambientais das autoridades. Ele é uma parte integral da estrutura de gerenciamento de uma organização que se preocupa com os benefícios e impactos adversos, imediatos e a longo prazo, das atividades de uma organização (produtos, serviços) sobre o meio ambiente e a segurança. Este sistema de gestão ambiental, baseado nas definições da ISO 14000 (SZWILSKI, 2000) e da BS 8800, pode ser descrito como uma "estrutura organizacional, responsabilidade, práticas, procedimentos, processos e recursos para o desenvolvimento, implementação, obtenção, revisão e manutenção da política de meio ambiente". O Sistema de Qualidade Total (TQM) baseado no conceito PDCA (dos termos em inglês planejar, executar, checar e agir) é a base do Sistema de Gestão Integrada e proporciona os mecanismos de credibilidade para a melhoria sistemática da eficiência operacional da proteção ao meio ambiente e da segurança.

A ISO (International Organization for Standardization) procura desenvolver padrões técnicos voluntários com o objetivo de adicionar valores às atividades e também em função de exigência do mercado. O objetivo destes padrões é o de contribuir para a eficiência operacional, segurança e garantir uma atividade ambientalmente amigável.

A ISO/TC 207 é o comitê técnico responsável pelo desenvolvimento e manutenção da "família" de padrões de:

- Sistema de Gestão Ambiental;
- Auditoria Ambiental;
- Avaliação da Performance Ambiental;
- Rotulagem ambiental;
- Estudo do ciclo de vida;
- Aspectos ambientais em padrões de produtos

A adoção de um Sistema de Gestão Integrada pode trazer grandes benefícios para as empresas que abraçam este comprometimento, uma vez que um sistema bem planejado proporciona uma ferramenta eficaz para identificar sistematicamente os processos chaves, procedimentos e atividades associados com os aspectos ambientais e de segurança significativos. A partir daí, medidas apropriadas e monitoradas são tomadas. Esta realimentação contínua dos processos fornece informações para a melhoria do desempenho de segurança e de meio ambiente e proporciona também uma oportunidade para codificar valores de conhecimentos técnicos. Para indústrias como a mineração, o conhecimento exigido para se executar as tarefas e as operações são bastante mutáveis por natureza e não são facilmente usados e codificados, embora os benefícios comerciais relacionados a uma boa performance ambiental e de segurança estejam cada vez mais claros e tendem a melhorar com o tempo (FOSTER, 1999). Para a performance operacional ótima, os principais processos devem ser efetivos e controlados, o que pode ser executado através de (SZWILSKI, 2000):

- Monitoramento;
- Auditoria e ações de correção;
- Identificação contínua de problemas potenciais e busca por soluções novas e inovadoras;
- Oportunidades de coleta, análise e comunicação para as lições aprendidas e boas práticas.

Com as referências indicadas pelos padrões, as indústrias podem se direcionar para os métodos de medição de desempenho. O interesse por estes métodos aumenta à medida que as empresas encontram novos usos internos para a informação obtida, que vão desde aplicações no desenvolvimento de produtos até oportunidades de valorizar a sua imagem. Cada vez mais as empresas estão vendo o desempenho ambiental e de segurança como uma área potencial de vantagens competitivas. Porém, uma grande parte destas vantagens ainda permanecem invisíveis para diversas companhias e indústrias, entre elas a de extração mineral.

Apesar de muitas empresas possuírem sistemas próprios com graus de eficiência variados, torna-se cada vez mais importante o uso de padrões aceitos mundialmente e que se refletirão na aceitação de produtos dentro de uma determinada especificação. Uma das maneiras de se fazer isto é se basear nas diretrizes propostas por normas como (CRABBE, 2000 ; CORKERY, 1998)

- The Quarries Miscellaneous Health and Safety Provisions Regulations, datada de 1995 e atualizada em 1998; e
- A BS 8800:1996. Guide to Occupational Health and Safety Management System;
- ISO 14004 – EMS – General guidelines on principles, system and supporting techniques

A Figura 91 mostra um exemplo de interações entre as partes envolvidas num sistema de gestão integrada com uma descrição das partes envolvidas na seqüência (ARBUCKLE, 2002).

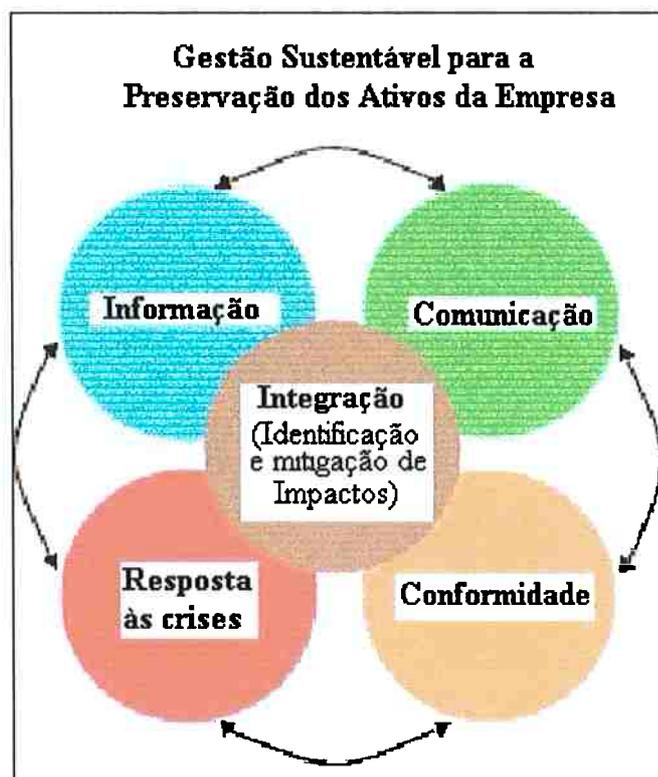


FIGURA 91. Modelo de interação entre as partes envolvidas num sistema de gestão integrada (ARBUCKLE, 2002)

- Integração da identificação e mitigação dos impactos. Uma maneira de se fazer isto é fazer com que o sistema reflita as seguintes premissas da ISO14000:
 1. Qualquer sistema de gestão ambiental deve estar baseado em uma política de meio ambiente e segurança definida;
 2. O trabalho deve ser decorrente de uma identificação baseada em algum tipo de critério para identificar os aspectos ambientais e de segurança que caracterizam uma operação da empresa, através de um processo de classificação e priorização e do agendamento para a implementação de melhorias ou medidas de mitigação;
 3. Os esforços devem ser documentados por meio de evidências objetivas, ou ao menos através de um compromisso para estar em conformidade.

Uma maneira de se verificar isto pode ser respondendo às seguintes perguntas:

- Quão agressivo a nossa política precisa ser ?
- Quais são os riscos reais associados com as nossas operações ?
- Como nós sabemos disso ?
- Quais são os riscos com os quais precisamos lidar primeiro ?
- Como nós decidimos e o que precisamos saber para decidir ?
- Quais são as medidas de prevenção ou mitigação apropriadas ?
- Como nós decidimos isso?

- Quais são os incidentes potenciais e como devemos responder a eles ?
- O que precisamos saber para responder ?
- A quem precisamos responder

À medida que estas questões são respondidas, sabe-se como os demais subsistemas se comportam e como deverá ser o sistema de gestão integrada.

- o Sistema de Informação alimenta e é alimentado pela Integração, que indica ao sistema de informação o que deve ser documentado e quais informações são ou serão necessárias. Este, por sua vez, indica à Integração o que é preciso saber para se identificar os riscos, classifica-los e prevenir ou mitiga-los e como responder caso estes incidentes ocorram.
- se o sistema de informação indica o que se deve saber, o Sistema de Comunicação, por sua vez, indica a quem deve ser informado este conhecimento e como isto deve ser feito. Atualmente, um sistema de comunicação é extremamente importante num mundo onde a mídia tem grande influência sobre a opinião. Histórias sobre o comportamento e o compromisso das corporações, sejam elas verdadeiras ou não podem tomar rumos completamente imprevisíveis e desastrosos se não houver um sistema de comunicação eficiente. Mais do que nunca as companhias necessitam de um sistema de comunicação com mecanismos sólidos de endereçamento das comunicações tanto externas como internas e a sua eficiência é altamente dependente da facilidade em se absorver e devolver informações aos demais componentes do sistema de gestão integrada. Outra atribuição é a publicação de relatórios periódicos sobre a responsabilidade ambiental e social da empresa. Estes tipos de publicações fazem com que o sistema de gestão integrada tenha uma melhor aceitabilidade por parte de acionistas, clientes e demais partes envolvidas. Mas para serem bem sucedidas elas devem ser honestas, diretas com informações recentes numa linguagem adequada para que possam ser entendidas tanto pela alta direção da empresa, funcionários e comunidades de interesse. Além disso o sistema deve ser capaz de responder a questionamentos externos e levar em conta as informações e opiniões destas fontes externas para regular as atividades da empresa.
- Resposta à crise. Embora um grande número de empresas tenha iniciado um programa de gerenciamento de crises, a maioria delas adotou-os de forma a trabalhar isoladamente de outros programas, nada mais fazendo do que treinamentos generalizados em habilidades de comunicação e com formação de times de advogados e relações públicas para se defender ou minimizar os incidentes após a sua ocorrência. Não desmerecendo estes esforços, seria muito mais efetivo o trabalho em conjunto dos subsistemas de modo a:
 - saber se um problema alegado é real ou somente suposição;
 - saber o ponto onde a falha do sistema ocorre, que unidades podem ter sido afetadas e onde elas estão;
 - demonstrar esforços para gerenciar o risco;

- saber quais são as comunidades que podem ser potencialmente afetadas, a quem se reportar e documentar isto.

Os gerenciadores de crise devem estar sempre preparados a qualquer tipo de situação juntamente com porta-vozes e advogados com as informações certas, as soluções e as responsabilidades para o incidente.

- Sistema de Conformidade. A ISO 14000 exige que no mínimo um sistema demonstre comprometimento com a conformidade legal, embora muitas empresas possuam metas e limites mais rigorosos que a própria legislação como uma maneira de buscar a excelência na performance ambiental. Com esta mentalidade, a gestão integrada busca obter de forma automática a conformidade legal além de obter ganhos em termos de monitoramento e outros custos relacionados a estes trabalhos.

As organizações empregam esforços consideráveis para garantir a segurança de seus trabalhadores e o seu ambiente de trabalho. Por razões financeiras ou corporativas muitas delas ultrapassam também o mínimo necessário exigido pela legislação em termos de higiene e segurança ocupacional, uma vez que estas empresas obtêm ganhos neste tipo de investimento em função (FUTUREPAST, 2002):

- Da redução nos acidentes de trabalho e doenças ocupacionais e nos custos associados a eles;
- Do aumento da performance pela maior motivação dos trabalhadores e da adesão aos procedimentos e políticas de segurança;
- Do reforço na reputação de uma empresa a responsável e bem gerenciada perante os clientes, acionistas e comunidades.

A seguir é apresentado um exemplo de uma estrutura de higiene ocupacional e segurança (FUTUREPAST INC, 2002).

Fase 1: Pré-estudo

- Conduzir uma análise de falhas;
- Rever a política de Higiene e Segurança com a alta gerência;
- Estabelecer um projeto de trabalho em grupo;
- Desenvolver um plano de ação

Fase 2: Planejamento

- Fluxograma do sistema de gerenciamento de higiene e segurança para os processos;
- Atribuir a responsabilidade de cada um dos processos a uma pessoa;
- Identificar as documentações necessárias do sistema de gerenciamento de higiene e segurança;
- Identificar os perigos e conduzir estudos de riscos;
- Identificar requerimentos legais aplicáveis;

- Preparar um plano de implementação;
- Revisar os objetivos e o plano de implementação com a alta direção;

Fase 3: Implementação e Treinamento

- Criar ou revisar os procedimentos do sistema de gerenciamento de higiene e segurança;
- Considerar as mudanças no projeto à luz dos objetivos e revisar os processos quando necessário;
- Estabelecer planos operacionais para implementar meios de controlar os riscos;
- Documentar procedimentos operacionais adicionais exigidos;
- Treinar os funcionários nos procedimentos revistos e/ou melhorados

Fase 4: Ações de checagem e prevenção

- Implementar procedimentos de monitoramento da performance de Higiene e Segurança Ocupacional (H&SMS);
- Utilizar procedimentos de investigação e de não-conformidade;
- Conduzir auditorias internas.

Fase 5: Revisão do gerenciamento

- Conduzir revisões de gerenciamento para garantir que o sistema de gestão continue adequado aos propósitos;
- Identificar mudanças necessárias para assegurar a melhoria contínua.

Uma forma de sintetizar os subsistemas e as etapas mostrados das estruturas exemplificadas acima poder ser uma analogia com o ciclo PDCA (Plan – Do – Check – Act) dos sistemas de qualidade total. O ciclo aplicado ao sistema de gestão integrada de segurança e meio ambiente pode ser representado como PDCR (Plan – Do – Check – Review) como é sugerido pela ISO 14001 ou, segundo os preceitos mais modernos, como PDMI (Plan – Do – Measure – Improve), que indica o comprometimento com a melhoria contínua (CORKERY, 1998)

15.3. EXEMPLO DE APLICAÇÃO

Toda empresa, independentemente do seu ramo de atuação deve possuir uma política para o meio ambiente de modo a balizar o seu desempenho perante a sociedade. Ela deve ser formalizada em documento com o aval da alta direção e apresentar temas principais que expressam os seus princípios de atuação. Um exemplo destes princípios pode ser observado na política para o meio ambiente adotada pelo Grupo Lafarge em 1995 (DIAS, 1997). Embora à época deste trabalho o sistema de gestão ambiental ainda não estivesse integrado a uma gestão de higiene ocupacional e segurança, trata-se de um exemplo bastante interessante e que poderia se transformar em um sistema de gestão integrada de segurança e meio ambiente.

15.3.1. O modelo do Grupo Lafarge

15.3.1.1. Princípios de atuação

Os princípios de atuação para com o meio ambiente do Grupo Lafarge podem ser divididos em oito grandes temas (DIAS, 1997):

- **Regulamentações** - Pauta-se pelo respeito às normas e regulamentos vigentes nos países onde atua, sem prejuízo de uma postura crítica colaborativa com relação às vantagens e custos da implementação de legislações ecológicas, suas prioridades e cronograma. Paralelamente propõe-se a aplicar nas novas unidades e em todas as modificações importantes efetuadas nas unidades existentes, normas próprias, baseadas em padrões internacionais. Para as unidades existentes propõe a formulação de planos de modernização e adequação às normas.
- **Técnicas mais adaptadas** – propõe-se a investir em melhoria constante do conhecimento em tecnologias limpas, despoluição e redução de efeitos nocivos.
- **Pesquisa e inovação** – define como campos de pesquisa o desenvolvimento de materiais de construção inovadores, ambientalmente saudáveis, considerando o ciclo de vida do produto (extração, fabricação, distribuição, utilização, eliminação, reutilização); a melhoria dos produtos, processos e resíduos e a economia de materiais naturais.
- **Prevenção de riscos** – análise sistemática e práticas de medidas preventivas.
- **Paisagem e patrimônio** – integração com as paisagens do entorno e plano de recuperação respeitado à medida em que avança a exploração.
- **Formação e sensibilização** – conscientização dos colaboradores em todos os níveis, diálogo permanente, organização de ações de sensibilização e formação, abrangendo o conhecimento e respeito às leis, regulamentações e boas práticas.
- **Comunicação** – adaptada e fundamentada em transparência e diálogo, englobando as relações com parceiros, associações, poder público, políticos, imprensa e público em geral.
- **Avaliação dos resultados** – com base em planos de ação específicos, propõe-se a avaliar o desempenho e medir os progressos. Os objetivos relacionados à proteção do meio ambiente são considerados na avaliação de desempenho dos responsáveis.

A política do grupo aborda ainda a questão da organização, optando por uma gestão descentralizada, cabendo a cada uma das unidades formular sua política específica, nomear seus responsáveis, fixar seus objetivos, elaborar seus planos de ação e dotar-se dos meios apropriados para garantir sua eficácia. Ao grupo ficam reservadas as tarefas de controle, acompanhamento, incentivo e relacionamento político de alto nível.

A implantação do Sistema de Gestão Ambiental – SGA, nos moldes da série de normas ISO 14.000 é ainda considerada uma das melhores e mais econômicas formas de se atingir esta meta, além de ser condição necessária para a futura certificação ambiental da empresa (DIAS, 1997). Uma complementação a este sistema seria a utilização de elementos de outras normas como a

BS 8800 e as recomendações da OHSAS 18000 que englobam a gestão de segurança e meio ambiente e que dariam o caráter de integração entre as áreas.

15.3.1.2. Política de meio ambiente

A seguir é apresentada a transcrição da política de meio ambiente da empresa (DIAS, 1997).

"A empresa consciente de suas responsabilidades e na busca constante da excelência, de modo a promover a qualidade de vida e o desenvolvimento econômico e social, tem formalizado o seu respeito ao meio ambiente através da sua política de meio ambiente, apresentada a seguir:

É compromisso da empresa:

- I. Planejar, construir, operar e desativar os projetos ou instalações em conformidade com as normas e disposições regulamentadoras, atendendo à legislação ambiental vigente.
- II. Na ausência de legislação específica, adotar práticas orientadas pelas normas ambientais internacionais.
- III. Adotar as melhores tecnologias, ao mais baixo custo possível, para gerenciar e garantir proteção ambiental, minimizando impactos ambientais e reduzindo riscos à saúde ocupacional, às populações vizinhas e ao meio ambiente.
- IV. Aperfeiçoar os processos e instalações no sentido de economizar energia e recursos naturais.
- V. Implementar um Sistema de gerenciamento Ambiental que garanta a elaboração e aplicação de planos e programas de ação ambientais que permita a avaliação permanente do desempenho frente ao controle e preservação ambiental.
- VI. Desenvolver regras de trabalho e práticas padrão que permitam implementar e acompanhar os planos e programas de ação ambiental.
- VII. Treinar, motivar e envolver as equipes, em todos os níveis hierárquicos, sensibilizando e desenvolvendo a consciência ambiental, em busca da melhoria contínua dos processos e do desempenho ambiental.
- VIII. Estabelecer com órgãos governamentais, comunidades locais, clientes e fornecedores e o público em geral uma relação profissional e respeitosa, promovendo a sinergia.
- IX. Participar, de forma ativa, das discussões sobre critérios e normas de proteção ambiental, "legislações ecológicas", em conjunto com entidades de classe, Governos e comunidade, visando o aperfeiçoamento do ordenamento jurídico e administrativo no âmbito da proteção ambiental.
- X. Tratar os preceitos ambientais instituídos com profundo rigor profissional."

O Sistema de Gestão Ambiental (SGA) visa a implementação de um conjunto de medidas e procedimentos que, adequadamente aplicados, assegurem a melhoria contínua das condições ambientais de segurança, higiene e saúde ocupacional. Sua implantação requer a realização de três etapas, definidas por três questões fundamentais (DIAS, 1997):

- Onde estamos?
- Onde queremos chegar ?
- Como chegar lá ?

Portanto, para se responder a estas perguntas deve-se proceder o levantamento da situação ambiental (e de segurança) atual da empresa o que requer uma auditoria inicial (PPRA, etc.), o estabelecimento de objetivos e metas e a elaboração de programas específicos, os chamados planos de ação.

15.4. APLICAÇÃO DO MAPA DE ISO-VELOCIDADES DENTRO DE UM SISTEMA DE GESTÃO INTEGRADA

A aplicação do mapa de iso-velocidades dentro do Sistema de Gestão Integrada de Segurança e Meio Ambiente poderia ser baseada no modelo adotado pelo Grupo Lafarge.

Antes de tudo, a empresa deve ter uma visão clara dos tipos de sistemas sobre os quais ela vai atuar. Uma das formas é classificar os sistemas em ecológicos (água, ar, solo, etc.) e sociais (por exemplo saúde e segurança e a vibração) e definir a integração entre eles (WESTMAN, 1985).

Assim pode-se responder às perguntas do exemplo apresentado no item anterior fazendo um levantamento da situação na qual se encontra a empresa por meio de uma auditoria inicial, para então se estabelecer os objetivos e metas e, por fim, elaborar os planos de ação (programas específicos). O problema da vibração do terreno decorrente das detonações pode ser então abordado da seguinte forma:

- a) Durante a auditoria inicial é feita a identificação dos impactos ambientais significativos, entre eles a vibração, seus efeitos e sua duração. Estão incluídos o levantamento das intensidades e dos sistemas de controle existentes, devendo-se prever a identificação dos riscos associados à vibração, os procedimentos internos a serem adotados, os programas de capacitação interna (treinamento do cabo de fogo ou "blaster"), as relações com a comunidade e a avaliação das deficiências com relação ao gerenciamento da vibração para se estabelecer prioridades. É feita a comparação do desempenho ambiental (da vibração) da empresa com padrões, normas, leis códigos, princípios externos e outras empresas como referência. Ao final desta etapa, os resultados da avaliação da vibração devem ser documentados e transmitidos a todos os setores responsáveis;
- b) Na segunda etapa, de estabelecimento de objetivos e metas, serão definidas e priorizadas as metas globais e os objetivos específicos. O objetivo é o de controlar a vibração do terreno em excesso e evitar reclamações e para que isto seja possível deve-se primeiro assegurar o atendimento aos requisitos legais e obedecer ao planejamento indicado. O planejamento é fundamental e é nele onde reside a importância do uso do mapa de iso-velocidades, como ferramenta para a identificação de zonas potenciais de reclamação.

Por último devem ser elaborados os planos de ação com relação à vibração do terreno, onde devem ser levados em consideração:

- a política da empresa;
- os objetivos e metas;
- a previsão de recursos humanos, físicos e financeiros, que aparecerão na forma de levantamento do mapa de iso-velocidades, monitoramentos sistemáticos, treinamento, uso de novos explosivos e acessórios, procedimentos de segurança, mudanças no plano de fogo, etc.;
- o cronograma e as responsabilidades, e
- o calendário de acompanhamento

Assim, uma mineração poderia adotar um modelo para os planos de ação contemplando a vibração do terreno baseado no modelo apresentado pela Tabela 32.

As grandes empresas de mineração reconhecem a necessidade de se antecipar às exigências da sociedade e uma das formas de se fazer isto é participar efetivamente na elaboração de normas da série ISO 14000, BS 8800 e OHSAS 18000 uma vez que elas são particularmente vulneráveis às barreiras que poderão ser impostas a seus produtos. Em vista das numerosas exigências da legislação, dos conflitos com a comunidade do seu entorno e da pressão da sociedade, cada vez menos tolerante à atividade mineral, a implantação de um sistema de Gestão Integrada de Segurança e Meio Ambiente pode ser um forte aliado para a sobrevivência destas empresas. DIAS (1997) cita as seguintes frases de importantes dirigentes: "Uma empresa capaz de conciliar seus interesses com os da comunidade está mais preparada para competir em um mundo onde o poder dos consumidores e da sociedade civil está cada vez mais forte."; e "As empresas que são líderes na área ambiental também tendem a ser líderes em resultados e crescimento" que poderia ser complementada com a palavra segurança.

Outra intervenção, com relação à vibração, é a aplicação de um sistema de qualidade no fornecimento de explosivos (HACKETT, 1997), principalmente os bombeados, para garantir que os resultados sejam os previstos no planejamento ao mesmo tempo em que possibilita melhor controle da vibração. Além disso, o uso seguro de explosivos e acessórios garante um ambiente de trabalho mais tranquilo e, de certa forma, contribuirá para que os resultados da vibração não sejam considerados como desvios dentro do sistema.

TABELA 32. Modelo dos planos de ação a serem adotados para o problema da vibração do terreno dentro de um sistema de gestão integrada de segurança e meio ambiente

Aspectos Ambientais	Impactos	Requisitos Legais	Critérios Internos	Objetivos	Metas	Prazos	Custos	Responsabilidade
Propagação de vibração em excesso pelo terreno	a) Danos materiais em estruturas vizinhas b) Incômodo à população	a) Padrões de Poluição (Vibração) b) Padrões da CETESB c) Norma ABNT - 9653	a) USBM, b) OSM c) de outros países	a) Controlar a vibração em excesso b) Evitar reclamações	a) Assegurar atendimento aos requisitos legais e padrões internos b) Obedecer ao planejamento indicado pelo mapa de iso - velocidades	12 meses	a) Levantamento do mapa de iso – velocidades b) Monitoramento sistemático c) Novos explosivos e acessórios d) Alterações no plano de fogo (el. geográficos) e) Compra de terrenos com potencial de reclamações	a) Alta direção b) Engenharia c) Produção

CAPÍTULO 16 – CONCLUSÕES

16.1. VIABILIDADE DE APLICAÇÃO DE UM MAPA DE ISO-FREQUÊNCIAS

Discutiu-se somente as curvas de iso-velocidade para uma aplicação baseada na comparação com as normas da ABNT (15 mm/s), da CETESB (4,2 mm/s) e o padrão sugerido pelo LACASEMIN (8 mm/s). Para estes critérios o mapa mostrou-se bastante eficaz na visualização de zonas potenciais de reclamações uma vez que as normas são baseadas somente em intensidades de velocidade de vibração de partícula dadas pelas linhas de iso-velocidade.

A dificuldade surge quando se discutem critérios mais completos como os do USBM, do OSM, da Índia, etc. baseados na frequência. Uma sugestão para a atualização da norma NBR-9653 da ABNT deve obrigatoriamente levar em consideração a importância da frequência. MIDÉA (1986) já discutia a necessidade de uma norma mais completa em meados dos anos 80. A importância da frequência associada à intensidade da velocidade de vibração de partícula já foi discutida em outros capítulos. Por este motivo considerou-se pertinente a proposição de um método gráfico onde poderiam ser destacadas as áreas cujas frequências (associadas a um determinado nível de vibração) fossem indicativas de potencial de dano.

Com a mesma técnica empregada para a construção das linhas de iso-velocidade e com o uso de programas de desenhos, pode-se obter mapas de linhas de iso-frequências. Como as coordenadas UTM são as mesmas da vibração, os mapas de iso-velocidade e de iso-frequências podem ser sobrepostos, com as curvas de velocidade e de frequência num único plano. A partir deste desenho pode-se utilizar um critério para se verificar as zonas com potencial de dano. Como as normas e critérios brasileiros não levam em consideração o parâmetro frequência, optou-se por utilizar um critério simplificado próprio para este trabalho.

Ele se baseia em uma frequência de referência de 24 Hz, como a norma indiana faz. Parece ser mais sensato se basear nas características construtivas da Índia do que nas dos Estados Unidos. Como as frequências produzidas pelas detonações (pedreiras em áreas urbanas) a uma determinada distância ficam em torno de 40 a 50 Hz (MIDÉA, 1989), a faixa de 24 Hz trabalha em favor da segurança. Acima de 24 Hz o limite de velocidade de vibração de partícula não poderia exceder 15 mm/s como preconiza a NBR-9653. Abaixo de 24 Hz, pode-se ter ressonância devido à frequência natural das edificações, e por isso, os níveis de vibração devem ser menores. Uma sugestão, baseada nos dados apresentados por ESTON (1998), é a de que a velocidade de vibração de partícula não exceda 8 mm/s. Portanto, as zonas a serem evitadas são aquelas cuja vibração não exceda 15 mm/s para frequências maiores do que 24 Hz e 8 mm/s para frequências menores do que 24 Hz. A Figura 92 apresenta este critério sob forma de gráfico.

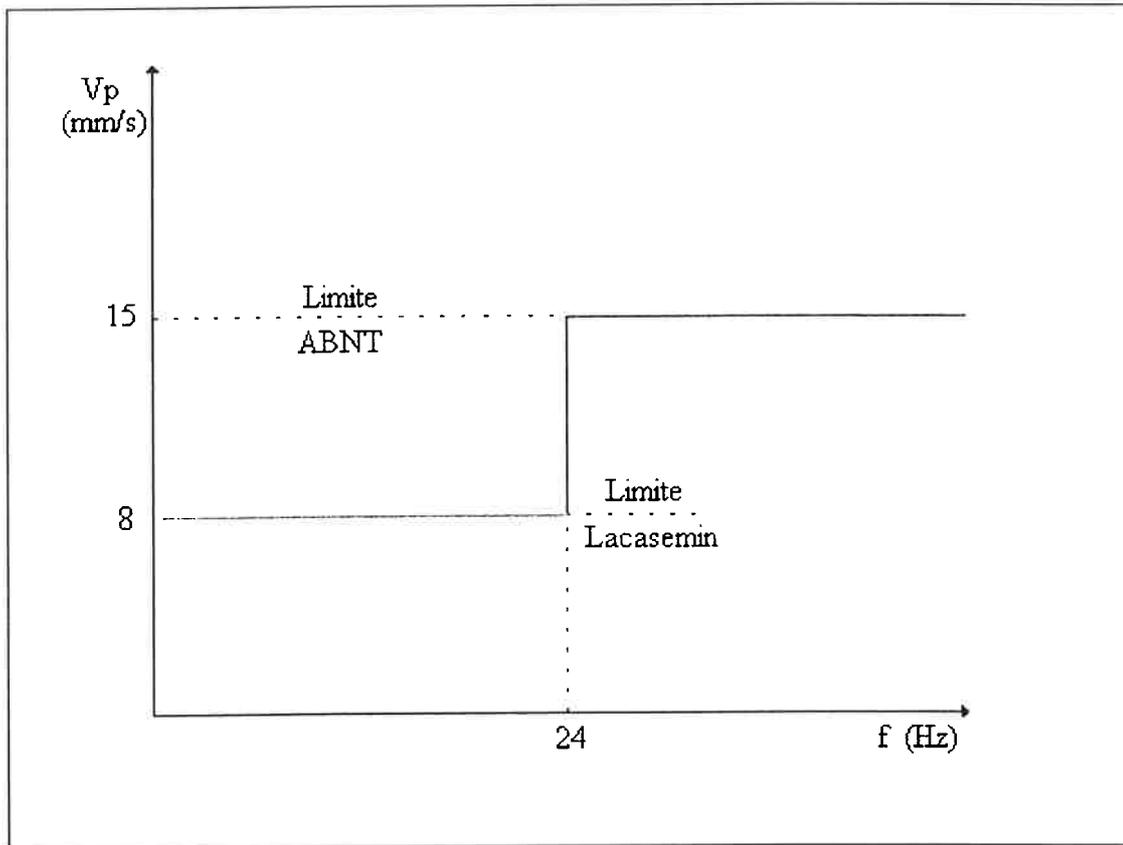


FIGURA 92. Critério do autor desenvolvido para este trabalho.

Elaborar um mapa comparando os valores com este critério não é difícil uma vez que se trata de um critério bastante simplificado e os registros sismográficos fornecem os dados necessários. Porém, há um grande complicador: os atuais sismógrafos de engenharia foram projetados para uso em países cujas normas levam em consideração a componente de maior intensidade ao invés da resultante como é feito do Brasil (BACCI, 2000). Há então uma frequência predominante para cada uma das componentes e por conveniência opta-se pela frequência da componente de maior intensidade. Como já mencionado no Capítulo 8 esta pode não ser a frequência verdadeira que representa a onda no espaço (CRENWELGE, 1988). Portanto, como não há uma frequência que represente a resultante nos registros sismográficos, uma alternativa seria a análise por Transformada Rápida de Fourier (FFT) que forneceria efetivamente a frequência predominante através da concentração de energia para cada faixa de frequência.

Foram feitos mapas de iso-velocidades para cada uma das componentes de vibração sobrepostas às linhas de iso-freqüência correspondentes, e os resultados podem ser observados nas Figuras 93 a 95.

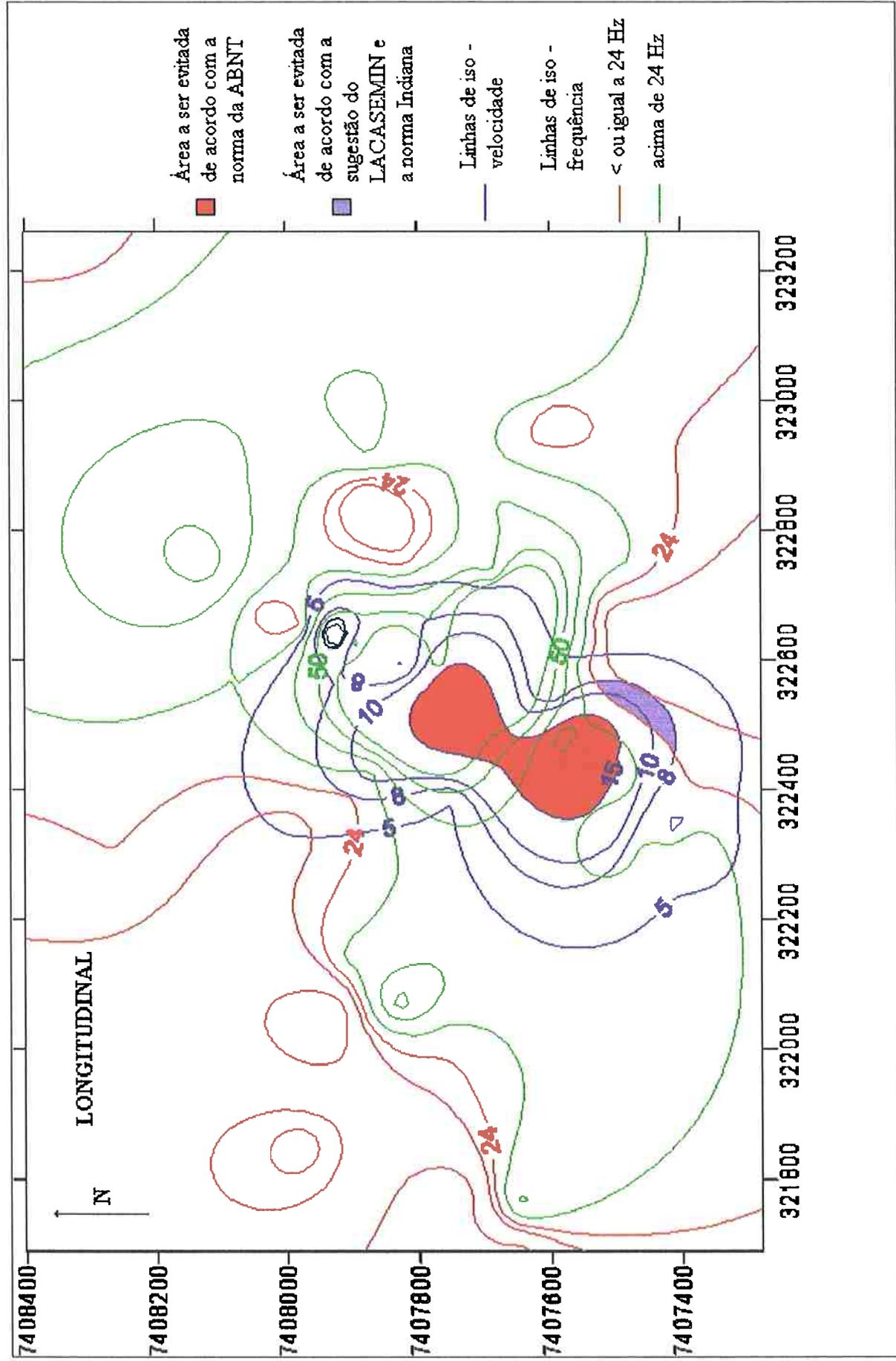


FIGURA 93. Mapa de iso-freqüências sobreposto ao mapa de iso-velocidades para a componente longitudinal da velocidade de partícula.

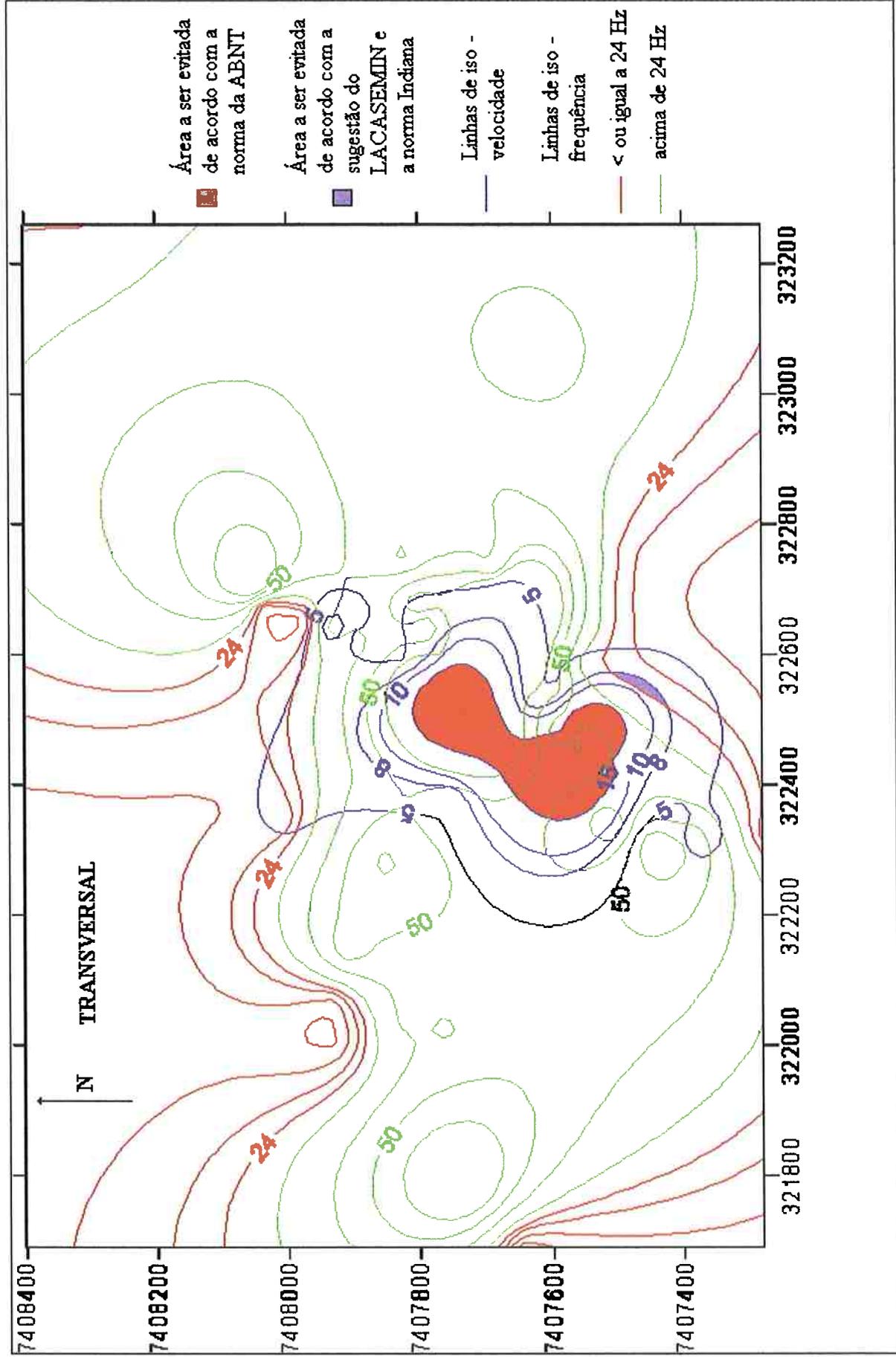


FIGURA 94. Mapa de iso-freqüências sobreposto ao mapa de iso-velocidades para a componente transversal da velocidade de partícula.

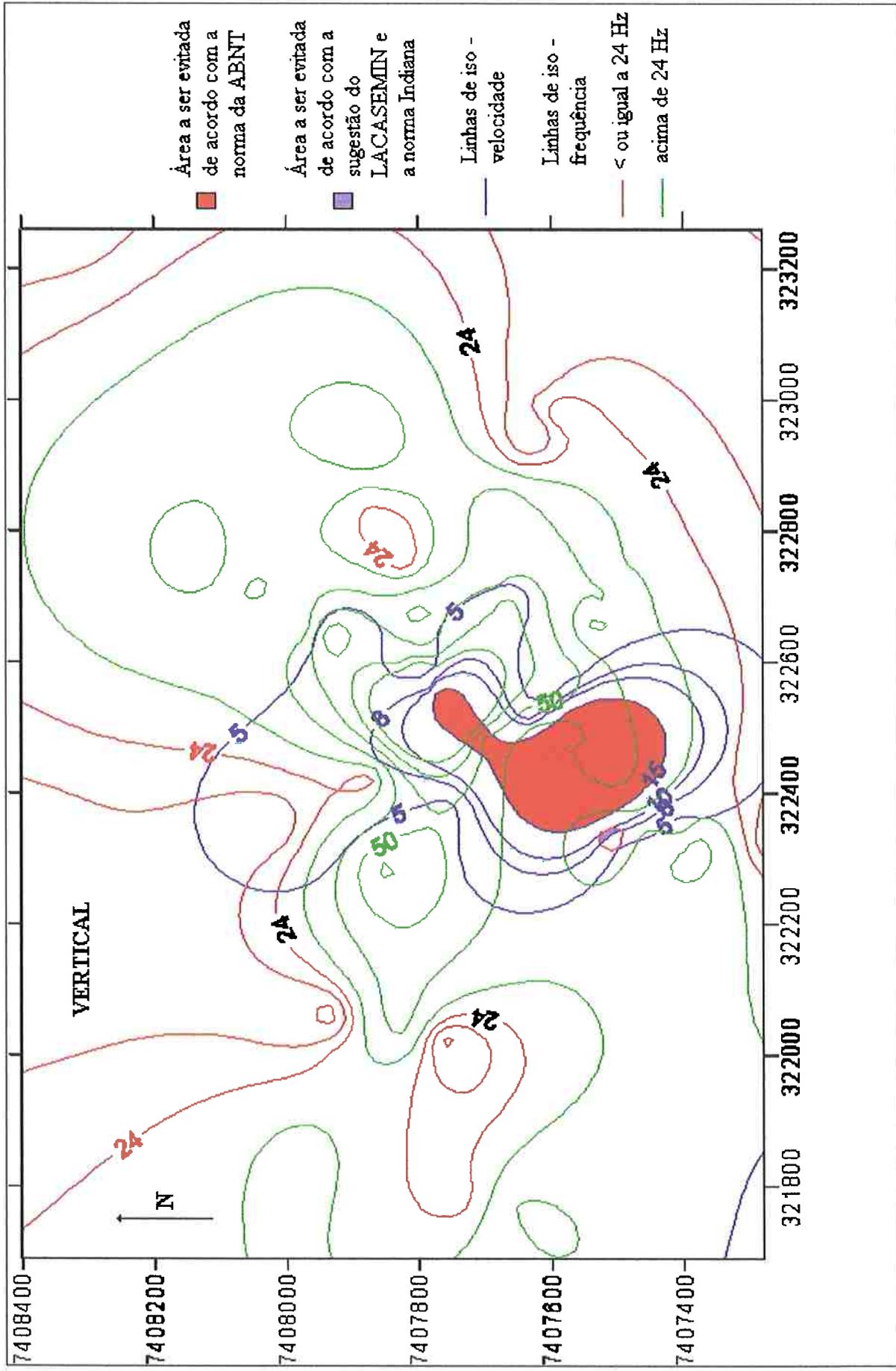


FIGURA 95. Mapa de iso-freqüências sobreposto ao mapa de iso-velocidades para a componente vertical da velocidade de partícula.

De acordo com as figuras podemos observar que:

- De uma maneira geral, as frequências das três componentes se comportaram da mesma forma, ou seja, os valores mais altos se concentraram junto aos locais de detonação, diminuindo à medida que se afasta destes locais;
- As frequências, assim como as velocidades de vibração de partícula, possuem uma direção preferencial de atenuação, ou seja, para esta direção percorre-se distâncias menores para chegar a frequências abaixo de 24 Hz;
- Cada uma das componentes de frequência apresenta padrões próprios como concentrações ("hot spots") abaixo de 24 Hz dentro de áreas onde se esperariam frequências maiores;
- A grande maioria dos locais onde as frequências estiveram abaixo de 24 Hz apresentou valores de velocidade de vibração de partícula abaixo de 5 mm/s, o que favorece a segurança estrutural;
- Comparando-se as áreas onde a velocidade de vibração de partícula ultrapassou 8 mm/s com frequências abaixo de 24 Hz para as três componentes, verifica-se que estas estão bastante próximas umas às outras;
- Nas figuras mencionadas surgem regiões que não apareceriam se o critério fosse apenas relativo a valores de velocidade de partícula, sem considerar a frequência.

16.2. CONCLUSÕES FINAIS

Os monitoramentos realizados na pedreira da Lúdice Mineração Ltda. permitiram o levantamento de 8 (oito) equações carga-distância, cada uma delas para uma direção diferente. Cada uma delas apresentou um padrão próprio de amortecimento da vibração proporcional à distância.

A intensidade da vibração do terreno decrescia conforme a vibração se propagava para longe da sua fonte. Em alguns pontos, no entanto, as amplitudes da vibração aumentaram com o aumento na distância, ocorrendo também o contrário. Estas áreas, quando amplificavam a vibração ("hot spots"), podem ser identificadas via círculos concêntricos de crescente velocidade de partícula, indicando uma resposta geológica da superfície. Estas áreas devem ser o foco das técnicas de controle da vibração.

De modo geral, para cada direção, a vibração foi significativamente diferente, como pode ser observado ao se comparar as equações obtidas no Capítulo 13, que apresentam grandes diferenças, de uma para outra, entre as constantes e os coeficientes de inclinação. Parte destas diferenças pode ser atribuída ao número de sismógrafos utilizados, que variou de 5 a 8, porém as taxas de atenuação diferentes também devem ser consideradas. O mapa mostra as regiões e as direções da pedreira onde há amortecimentos mais acentuados.

Foi levantado também um mapa de iso-velocidades a partir de dados estimados pela interpolação de pontos numa simulação do que seria um modelo ideal para esta metodologia. Nesta simulação, os pontos foram espaçados equidistantemente sobre cada uma das retas médias correspondentes a uma dada direção. Estes pontos foram calculados a partir de projeções dos valores reais que não estavam alinhados. No entanto, ainda que haja uma padronização da distribuição dos pontos, ela não representa a real tendência de amortecimento da vibração para estas direções. Deste modo, os primeiros mapas gerados (Figuras 84 e 85) são muito mais confiáveis pelo simples fato de que foram gerados a partir de valores medidos reais. Os outros mapas somente seriam mais confiáveis se todos os pontos reais estivessem efetivamente sobre a reta média, e com um número maior de pontos na reta da direção. Por ora, eles servem como uma estimativa da tendência da vibração e mostram que pode ser aplicado no futuro quando for possível o uso de um grande número de sismógrafos e também de um alinhamento perfeito.

A seqüência deste trabalho sugere que se faça um estudo para se explicar o porquê da vibração se comportar de modos diferentes para as diferentes direções. Caso a pedreira disponibilize informações pertinentes a respeito do terreno, poder-se-ia estudar ainda:

- as feições de litologia do maciço;
- o estado de fraturamento do maciço;
- as variações topográficas;
- as condições de capeamento de solo;
- preenchimento de fissuras por outros materiais;
- existência de cavidades;
- influência do lençol freático.

O mapa de iso-velocidades pode ser utilizado como uma ferramenta bastante útil de planejamento para evitar possíveis reclamações de incômodo, que são muito mais freqüentes do que as reclamações por danos estruturais.

O mapa de iso-velocidades, como parte de um programa de gerenciamento global do empreendimento, chamada de *Gestão Integrada de Segurança e Meio Ambiente* pode ser uma alternativa interessante para se efetivar uma política para a segurança e meio ambiente. Isto poderia ser formalizado com o aval da alta direção, com a vibração do terreno sendo analisada como uma forma de poluição, desvio ou não conformidade, devendo receber o mesmo tratamento que outros assuntos aparentemente de maior impacto como a contaminação do ar, água ou solo.

A obtenção de um mapa com linhas de iso-freqüências, sobreposto ao mapa de iso-velocidades, transforma-se em uma ferramenta mais completa para o planejamento da gestão ambiental, antecipando inclusive a possibilidade de atendimento a uma possível reformulação da norma da ABNT NBR-9653 que poderá levar em consideração, além da intensidade de vibração, a freqüência predominante.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, A. S., coord. **Controle e recuperação ambiental na mina de Cana Brava - Goiás**. São Paulo, IPT, 1992. (Boletim, 66. Publicação IPT, 2006).
- ANDERSON, D. A. **Blast vibration frequencies: what do they mean?** In: 23TH ANNUAL CONFERENCE ON EXPLOSIVES AND BLASTING TECHNIQUE, Las Vegas, 1997. Proceedings, ISEE – International Society of Explosives Engineers. Versão eletrônica. 1CD-ROM.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Minerações em áreas urbanas com uso de explosivos: redução de riscos**. Rio de Janeiro, ABNT, 1989. (NBR-9653).
- ARBUCKLE, G. **Environmental management to asset preservation**. Disponível em: <http://emsnet.com/articles.html> Acesso em 03/04/02.
- BACCI, D. C. **Vibrações geradas pelo uso de explosivos no desmonte de rochas: avaliação dos parâmetros físicos do terreno e dos efeitos ambientais**. Tese apresentada ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas da Universidade Estadual Paulista para a obtenção do título de Doutor. Rio Claro, SP, 2000.
- BERGER JR., P. R. ; LEONARD, T. PAPILLON, B.E. **Using vibration prediction to reduce blasting costs and complaints**. In: 23TH ANNUAL CONFERENCE ON EXPLOSIVES AND BLASTING TECHNIQUE, Las Vegas, 1997. Proceedings, ISEE – International Society of Explosives Engineers. Versão eletrônica. 1 CD-ROM.
- BERTA, G. **Explosives: An Engineering Tool**. Milano, Italesplosivi, 1990.
- BROCHU, R.R.; ELTSCHLAGER, K.K. **Proposed draft of the ISEE seismograph performance specification and general guidelines for seismograph field use**. In: TWENTY-FIFTH ANNUAL CONFERENCE OF EXPLOSIVES AND BLASTING TECHNIQUE, Proceedings, Nashville, 1999. V.1, pg 279-85.
- COBBY, M. **Fourier Series**. University of Strathclyde. Disponível em: <http://www.spd.eee.strath.ac.uk/~interact/fourier/fseries.html> . Acesso em 13/07/01
- COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **Mineração por explosivos**. São Paulo, CETESB, 1992. (CETESB / D7. 013).
- CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução CONAMA n. 011 de 23/01/86**. S.m.t.
- CORKERY, R. **Developing an environmental management system**. Quarry Management. June, 1998, p. 29-37.

- CRABBE, J. **The use of explosives in quarries**. The Journal of the Institute of Explosive Engineers. p. 3-8, September, 2000.
- CRENWELGE JR., O. E. **Method for determining amplitude-frequency components of blast induced ground vibrations**. In: 14th ANNUAL CONFERENCE OF EXPLOSIVES AND BLASTING TECHNIQUE, Proceedings, Anaheim, 1988. P. 70-85.
- CYSPER, D. A. ; DAVIS, S. D. **Induced seismicity and the potential for liability under U.S law**. Tectonophysics, 289. Elsevier Science Ltda, 1998, p. 239-55. Versão eletrônica.
- DIAS, E.G.C.S.; MERLO, E.M. **A mineração de agregados implanta Sistema de Gestão Ambiental**. IV Encontro Nacional sobre Gestão Empresarial e Meio Ambiente. São Paulo, 1997.
- DINIS DA GAMA, C. (1998). **Ruídos e vibrações ligados à utilização dos explosivos e equipamentos**. Comunicações do 1º seminário de auditorias ambientais internas. Divisão de Minas e Pedreiras do Instituto Geológico e Mineiro. Disponível em: http://www.igm.pt/edicoes_online/diversos/auditorias_amb/capitulo4.htm Acesso em 09/01/02.
- DOWN, C. G.; STOCKS, J. **Environmental impact of mining**. London, Applied Science Publishers, 1978.
- DU PONT OF CANADA LIMITED. **A short course on blasting vibrations and air blast**. s.l., 1979.
- ESTON, S. M. **Uma análise dos níveis de vibração associados a detonações**. Tese apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para a obtenção do Título de Livre Docente. São Paulo, 1998.
- FOSTER, S. M. **Environmental management structures in the extractive industry**. Quarry Management. September, 1999, p. 47-50.
- FREIRE, W. **William Freire & Advogados e Associados. Capítulo 14, Mineração e meio ambiente**. Disponível em: <http://www.williamfreire.com.br/014htm>. Acesso em 11/06/01.
- FROEDGE, D. T. **Mapping of vibrations patterns around a blast with the Iso-seismic System**. In: Second High-Tech Seminar. Orlando, Florida, USA, 1990. Blasting technology, instrumentation, and explosives applications.
- FROEDGE, D. T.; GOULD, J.; DAVIS, H. **Case Study of an Iso-Seismic Survey in an East Pennsylvania Quarry**. In: Explosives 94 Conference. The Institute of Explosives Engineers. The European Federation of Explosives Engineers. University of Leeds, Sept. 1994.
- FUTUREPAST INC. **Health and safety management systems**. Disponível em: <http://www.futurepast.com/h-ssys.htm>. Acesso em 03/04/02.

- GOLDER ASSOCIATES. **Safe and cost effective blasting for surface mines and quarries**. s. l., s. d.
- HACKETT, J. A.. **Environmental blasting – a quality approach** . The Journal of the Institute of Explosive Engineers. p. 25 - 28, Dezembro, 1997.
- HOFFMAN, F. **An introduction to Fourier Theory**. Versão online, capturado no site <http://aurora.phys.utk.edu/~forrest/papers/Fourier/index.html>. Acesso em: 13/07/2001.
- IRAMINA, W. S. **Desmonte de rocha e controle ambiental**. Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para a obtenção do título de Mestre. São Paulo, 1997.
- IÚDICE MINERAÇÃO. **Estudo de Impacto Ambiental / Relatório de Impacto Ambiental – EIA/RIMA da Iúdice Mineração Ltda**. MS – Milissegundo Representações Ltda. São Paulo, 1998.
- JIMENO, C. L.; JIMENO, E. L.; CARCEDO, F. J. A. **Drilling and blasting of rocks**. Balkema, Rotterdam, 1995.
- KONYA, C. J. **Blast design**. Ohio, Intercontinental Development, 1995.
- LANGFORS, U. & KIHLLSTROM. **The modern technique of rock blasting**. John Wiley & Sons, Inc., New York, and Almqvist & Wiksell, Stockholm, 1963.
- LEPPLE, C. **The Fast Fourier Transform Demystified**. Disponível em: <http://www.ghz.cc/charles/fft.pdf> . Acesso em 10/07/2001.
- MIDÉA, N. F. **Uso de explosivos na exploração de pedreiras em centros urbanos – compatibilidade entre a produção de brita e a sociedade**. In: I Simpósio Nacional de Agregados. São Paulo, 1986. Anais. São Paulo, Departamento de Engenharia de Construção Civil da EPUSP. p.103-14.
- MIDÉA, N. F. **Uso de explosivos: histórico, recomendações e normalização**. Brasil Mineral. Ano V, edição especial, 1987. p. 44-58.
- MIDÉA, N. F. **“Explosivos, mineração e meio ambiente” - Estágio atual das normas brasileiras e internacionais de controle de vibrações e ultralanchamentos na mineração**. In: I Simpósio EPUSP sobre controle ambiental em mineração. São Paulo, 1989. Anais. São Paulo, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. p.11-22.
- MIDÉA, N. F. **Uso de explosivos na exploração de pedreiras próximas a áreas urbanas**. In: Seminário internacional sobre mineração em áreas urbanas. São Paulo, 1989. Anais. São Paulo, Ministério da Infra-estrutura, DNPM, Pró-minério, Secretaria da ciência, tecnologia e desenvolvimento econômico do estado de São Paulo. p. 44-50.

- MIDÉA, N. F. **Uso de explosivos na exploração de pedreiras próximas a áreas urbanas.** Mineração e metalurgia. N. 511, p. 22-23, Jan / Fev. 1990.
- NICHOLLS, H. R. ; JOHNSON, C. F. ; DUVALL, W. I. **Blasting vibrations and their effects on structures.** US. Bureau of Mines Bulletin 656. Washington US. Department of the Interior, Bureau of Mines. 1971.
- PREFEITURA MUNICIPAL. **Revista de Negócios Municipais.** Editora EMEP. Ano 5, no 52, março de 1992. p. 42-44.
- RANDALL, R. B.; TECH, B.; B.A. **Application of B & K equipment to frequency analysis.** Brüel & Kjaer, 1977.
- REIL, J.W. **Preparing for the inevitable.** Defending your blasting operations. 4th Annual Blasting Vibration Technology Conference, 2000.
- RELATÓRIO LACASEMIN. **Monitoramento sismográfico de desmonte por explosivos na Pedreira Intervalles, Santos – SP.** São Paulo, LACASEMIN, 2001. (LACASEMIN, Relatório 10/01).
- RELATÓRIO TECHNOBLAST. **Levantamento de equação carga / distância e análise de resultados - Pedreira Lageado.** São Paulo, SP. Abril de 2001.
- RELATÓRIO TECHNOBLAST. **Monitoramento sismográfico de desmontes de rocha por explosivos – Pedreira Lageado.** Maio de 2001.
- ROMÃO, F. L.et al. **Tudo que se precisa saber sobre a Teoria da FFT – Transformada Rápida de Fourier.** Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP. Departamento de Engenharia Elétrica. BT/PEE/94-12. São Paulo, 1994.
- ROST, H. **Das iso-seismic-system - chancen zur emissionsenkung und weiterentwicklung der sprengtechnik.** Disponível em: <http://sprengtechnik.com/eugeo/siegen93.htm>. Acesso em 15/06/2001.
- ROY, P. P. **Characteristics of ground vibrations and structural response to surface and underground blasting.** Geotechnical and Geological Engineering. Chapman & Hall. V. 16, n.2, 1998.P. 151-66.
- RUDENKO, D. **Understanding blast vibrations – a key to gaining control.** In: 2nd Annual Blasting Vibration Technology Conference, Key West, FL, 1998. Proceedings.
- RUDENKO, D. **Structural response – the primary cause of blasting complaints.** In: 3rd Biennial Blasting Vibration Technology Conference, Key West, FL, 2000. Proceedings.

- SAMES, F. **Advanced Analysis of Airblast and Vibration Signals for Optimizing Blast Design.** In: 23TH ANNUAL CONFERENCE ON EXPLOSIVES AND BLASTING TECHNIQUE, Las Vegas, 1997. Proceedings, ISEE – International Society of Explosives Engineers. Versão eletrônica. 1 CD ROM.
- SAMES, F.; HIVICK, R. **Techniques to assess the influence os blast design parameters on airblast and blast vibration.** In: TWENTY-FIFTH ANNUAL CONFERENCE OF EXPLOSIVES AND BLASTING TECHNIQUE, Proceedings, Nashville, 1999. V.1, p. 297-307.
- SANSONE, E. C. **Estudo de aspectos geomecânicos aplicados ao projeto de minas subterrâneas.** Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para a obtenção do título de mestre em engenharia. São Paulo, 1997.
- SCOTT, A. et. al. **Open pit blast design analysis and optimisation**, 1996.
- SCOTTISH EXECUTIVE. Pan 50 Annex D; controlling the environmental effects of surface mineral workings. Annex D; the control of blasting at surface mineral workings. Disponível em : <http://www.scotland.gov.uk/library/pan/pan50d-03.asp>. Acesso em 19/10/2001.
- SMITH, S. W. **The scientist and engineer's guide to digital signal processing.** Segunda edição. Disponível em: <http://www.DSPguide.com> . Acesso em 08/08/2001.
- SINGH, P. K.; VOGT, W.; SINGH, D.P.. **Effect of direction of initiation on ground vibrations.** International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment, v. 12, n. 2, p. 75-8, 1998.
- SINGH, S. P. & LAMOND, R. D. **Prediction and measurement of blast vibrations.** International Journal of Surface Mining and Reclamation, V. 7, n. 4, p. 149 - 154, 1993.
- SISKIND, D. E. **Ground vibration effects on structures** In: 24TH ANNUAL CONFERENCE ON EXPLOSIVES AND BLASTING TECHNIQUE, New Orleans, 1998. Proceedings, ISEE – International Society of Explosives Engineers. Versão eletrônica. 1 CD ROM.
- SISKIND, D. E. **The effects os vibrations and environmental forces: a guide for the investigation of structures.** International Society of Explosive Engineers, 2000.
- SISKIND, D. E. **Vibration damages in industrial situations.** Journal of Explosive Engineers, v. 14, n. 6, p. 40-1, 1997.
- SISKIND, D. E.; STAGG, M. S.; KOPP, J. W.; DOWDING, C. H. **Structure Response and Damage Produced by Ground Vibration from Surface Mine Blasting.** United States Department of the Interior. Bureau of Mines. Report of Investigatios 8507, 1980.
- STUART, R. D. **An introduction to Fourier Analysis.** London, John Wiley & Sons Inc. [1961].

SZWILSKI, T. B.; **Using environmental management systems to systematically improve operational performance and environmental protection.** The International Journal for Blasting and Fragmentation. Balkema, Rotterdam. V. 14, n. 3, p. 183-191, 2000.

WESTMAN W. E. **Ecology, impact assessment and environmental planning.** New York, John Wiley, 1985. (Environmental Science and Technology Series).

ZIEGLER, D. **Be prepared, respond quickly to blasting complaints.** Versão online do artigo da revista Aggregate Manager, disponível em <http://www.aggman.com>. Acesso em 11/06/2001.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

- ANDERSON, D. A.; MILLER, D. K.; MATHESON, G.A. **Vibration Spectral Mapping**. Schnabel Engineering Associates. S.l, s.d.
- AYRES DA SILVA, L. A. **Methodology for rock mass compressive strength characterization from laboratory tests**. In: International Workshop on Scale Effects in Rock Masses, 2. Proceedings. Rotterdam : Balkema, 1993.
- BALIKTSIS, E. K.; KALIAMPAKOS, D. C.; DAMIGOS, D. G. **Blasting vibration limits to prevent human annoyance remarks from some case studies**. Mineral Resources Engineering. Imperial College Press. V. 10, n. 1, Jan-Mar/2001, p. 71-82.
- BLAIR, D.P.; ARMOSTRONG, L. W. **The spectral control of ground vibration using electronic delay detonators**. The International Journal for Blasting and Fragmentation. Balkema, Rotterdam. V. 3, n. 4, p. 303-334, 1999.
- BOLLINGER, G. A. **Blast vibration analysis**. Carbondale, Southern Illinois University press, 1980.
- BRACEWELL, R. N. **The fourier transform**. Scientific American. June, 1989, p. 62-9.
- BRASIL. Ministério das Minas e Energia. Departamento Nacional da Produção Mineral. **Coletânea de trabalhos técnicos sobre controle ambiental na mineração**, 2. ed. Brasília, DNPM, 1985.
- BRUNO, R.E.M. DANTINI & G. GASPA. Environmental issues analysis for quarrying activity close to urban centres. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENVIRONMENTAL ISSUES AND MANAGEMENT OF WASTE IN ENERGY AND MINERAL PRODUCTION, 2., Calgary, 1992. Environmental issues and management of waste in energy and mineral production. Proceedings, Rotterdam, Balkema, 1992, p 219-25.
- CAMERON, M. **Environmentally effective blasting for quarries**. Australian Mining. V. 83, n. 8, p. 22-4, Aug. 1991.
- COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **Normas : controle ambiental da mineração**. São Paulo, CETESB,1990.
- CONSEDINE, R. L. **Community relations - key to survival of Montreal-East quarry**. Canadian Aggregates. P. 7-16. Apr/May 1992.
- DAVIS, M.L.; CORNWEL, D. A. **Introduction to environmental engineering**. 2. ed. New York, McGraw-Hill, 1991. (McGraw-Hill Series in Water Resources and Environmental Engineering).
- DIAZ, J. J.; BALBÁS, M. **Frequency domain processing of mechanical blasting vibrations for environment protection**. IJSM, V. 11, n. 3, 1997, p. 155-8.

- DOR - The Indiana Department of Natural Resources Division of Reclamation - **Citizen's Guide to Blasting**. Disponível em: <http://www.state.in.us/dnr/reclamation/blastguide.html>. Acesso em 10/07/2001.
- DOWDING, C. H. **Vibration analisys software**. In: 23TH ANNUAL CONFERENCE ON EXPLOSIVES AND BLASTING TECHNIQUE, Las Vegas, 1997. Proceedings, ISEE – International Society of Explosives Engineers. Versão eletrônica. 1 CD ROM.
- DOWDING, C. H. **Vibration control by direct measurement**. In: 25TH ANNUAL CONFERENCE ON EXPLOSIVES AND BLASTING TECHNIQUE, Nashville, 1999. Proceedings, ISEE – International Society of Explosives Engineers. Versão eletrônica. 1 CD ROM.
- DOWDING, C. H., coord. **Suggested method for blast vibration monitoring**. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, v. 29, n. 2, p. 143-56, Mar. 1992.
- DRAKE, T. **Good neighbor policy opens door for quarry expansion**. Pit & Quarry Vol. 84. no. 4, p. 28-30, Oct. 1991.
- FOLCHI, R. **Seismic transient with low-frequencies at short distances. Case history tunnel blasting in an urban site at Isola Liri, Italy**. The Journal of Explosives Engineering, V.11, n. 4, p. 35 - 38, Nov/Dec. 1993.
- GEERTSON, C.; DAEMON, J. J. K. . **Open-pit blast vibration prediction**. In: 24TH ANNUAL CONFERENCE ON EXPLOSIVES AND BLASTING TECHNIQUE, New Orleans, 1998. .Proceedings, ISEE – International Society of Explosives Engineers. Versão eletrônica. 1CD ROM
- GROGAN A. **A review of suggested geophone attachment methodologies from commonly referred to monitoring standards**. In: 24TH ANNUAL CONFERENCE ON EXPLOSIVES AND BLASTING TECHNIQUE, New Orleans, 1998. Proceedings, ISEE – International Society of Explosives Engineers. Versão eletrônica. 1CD ROM.
- HAGAN, T. N. ; CAMERON, A. R. **Selecting explosives systems and monitoring their performance in surface mines**. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON MINE PLANNING AND EQUIPMENT SELECTION, 3, Istanbul, 1994. Mine planning and equipment selection 1994, Proceedings Rotterdam, Balkema, 1994, p. 635-41.
- IMBEL / NITRO NOBEL. **Nonel - Manual do usuário**. São Paulo, 1992. (BI nr C 962 br/9201).
- INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ROCK FRAGMENTATION BY BLASTING, 3. Brisbane, 1990. Proceedings. Victoria, Australian Institute of Mining and Metallurgy, 1990.
- IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas. **Atualização de aspectos técnicos e legais no desmonte de rocha com explosivos**. Relatório no. 30.991. São Paulo, 1993.

- IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas. **Caracterização dos níveis de vibração e pressão sonora decorrentes de detonação na Pedreira Lageado**. Relatório no. 29.720. São Paulo, 1991.
- IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas. **Treinamento para implantação de fiscalização no uso de explosivos em minerações urbanas (2ª. Etapa)**. Relatório no. 26.435. Volume 1. São Paulo, 1988.
- KAHRIMAN, A. ; TUNCER, G. **Prediction of ground vibration produced from bench blasting**. In: TWENTY-FIFTH ANNUAL CONFERENCE OF EXPLOSIVES AND BLASTING TECHNIQUE, Proceedings, Nashville, 1999. V.1, pg 379-86.
- KAHRIMAN, A. ; TUNCER, G.; GORGUN, S.; KARADOĞAN, A. K. **Estimation Particle velocity on the basis os blast event measurements**. In: TWENTY-SIXTH ANNUAL CONFERENCE OF EXPLOSIVES AND BLASTING TECHNIQUE, Proceedings, Anaheim, 2000. V.1, pg 107-15.
- KENNEDY, A. **Advances in blasting**. Mining magazine V. 170, n. 6, p. 348-54, Jun. 1994.
- LILLY, D. **Neural network simulation : charting the future of blast process control**. The Journal of Explosives Engineering , V. 11, n. 5, p. 18 - 20, Jan/Mar. 1994.
- MIDÉA, N. F. ; DE PAULA, L. C. ; DOCCI, L. S. **Desmonte de rochas com explosivos: critérios práticos para determinação de cargas por espera e distâncias seguras em basaltos**. Construção pesada. Ano 8, n. 92, p. 141-4, Set. 1978.
- MILLER, D. K.; SANTORO, J. M. **Blasting in congested areas** . In: TWENTY-SIXTH ANNUAL CONFERENCE OF EXPLOSIVES AND BLASTING TECHNIQUE, Proceedings, Anaheim, 2000. V.2, pg 319-35.
- MOHANTY, B.; YANG, R. **Blasting Vibrations and Explosives Performance** In: 23TH ANNUAL CONFERENCE ON EXPLOSIVES AND BLASTING TECHNIQUE, Las Vegas, 1997. Proceedings, ISEE – International Society of Explosives Engineers. Versão eletrônica. 1CD-ROM..
- MORHARD, R. C. **Explosives and rock blasting**. Dallas, atlas Powder Company, 1987.
- MOSTAK, P. **The Institute Lecture: The Application of plastic explosives in civil blasting techniques**. Explosives Engineering, p. 8-14, June 1993.
- MUELLER, B.; HOHFFELD, T. **New possibilities of reducing blasting vibrations with na improved prognosis**. The International Journal for Blasting and Fragmentation. Balkema, Rotterdam. V. 1, n. 3, p. 379-92, 1997.
- OLOFSSON, S. O. **Applied explosives technology for construction and mining**. 2. ed., Oslo, APPLEPLEX, 1990.

- ORTOLANO, L. **Environmental planning and decision making**. New York, John Wiley, 1984.
- PEARSON, C.; STUMP, B.W.; MARTIN, R.L. **Azimuthal variation of radiation of seismic energy from cast blasts**. Disponível em: [http:// www.geology.smu.edu/~dpa-www/papers/pdf/azimutha.pdf](http://www.geology.smu.edu/~dpa-www/papers/pdf/azimutha.pdf) . Acesso em 25/10/2001.
- PEPPER, J. ; JOHNSON, M.; MCLELLAN, G. **Attenuation of blasting vibrations in South Florida**. In: TWENTY-SIXTH ANNUAL CONFERENCE OF EXPLOSIVES AND BLASTING TECHNIQUE, Proceedings, Anaheim, 2000. V.1, pg 83-95.
- PERSSON, P. A. **Recent developments in explosives and accessories - Nobel Lecture 1992**. Explosives Engineering, p. 9-20, July 1992. Apresentado ao Annual General Meeting and Conference of the Institute of Explosives Engineers, Harrogate, 1992.
- PERSSON, P. A.; HOLMBERG, R.; LEE, J. **Rock blastings and explosives engineer**, 1994
- REPOLA, S. , ATKINSON, J. **Blasting conditions couldn't be worse**. Explosives Engineering, p. 45-8, Mar. 1994.
- ROSENSTOCK, W; ORLANDI, C. P. **The eletronic option, future aspects in blasting**. In: 26TH ANNUAL CONFERENCE ON EXPLOSIVES AND BLASTING TECHNIQUE, Annahein, 2000. Proceedings, ISEE – International Society of Explosives Engineers. Versão eletrônica. 1 CD ROM.
- ROY, P. P. **Characteristics of ground vibrations and structural response to surface and underground blasting**. Geotechnical and Geological Engineering. Chapman & Hall. V. 16, n.2, 1998.P. 151-66.
- RUSILO, L. C. ; SANSONE, E. C. ; AYRES DA SILVA, L. A. ; HENNIES, W. T. **Design and optimization of tunneling blasting operations**. Third International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection. Istambul, Turquia, out. 1994.
- RUSTAN, A. & NIE, S. L. **New methods to test the rock breakings properties of explosives in full scale**. International Journal of Surface Mining, V. 6, n. 4, p. 191 - 200, 1992.
- SAMES, F. **Advanced analysis of airblast and vibration signals for optimizing blast design**. In: 23TH ANNUAL CONFERENCE ON EXPLOSIVES AND BLASTING TECHNIQUE, Las Vegas, 1997. Proceedings, ISEE – International Society of Explosives Engineers. Versão eletrônica. 1 CD ROM.
- SAMES, F.; HIVICK, R. **Techniques to assess the influence of blast design parameters on airblast and blast vibration**. In: TWENTY-FIFTH ANNUAL CONFERENCE OF EXPLOSIVES AND BLASTING TECHNIQUE, Proceedings, Nashville, 1999. V.1, pg 297-307.

- SANSONE, E. C. **Estudo de aspectos geomecânicos aplicados ao projeto de minas subterrâneas**. Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para a obtenção do título de mestre. São Paulo, 1997.
- SANSONE, E. C.; AYRES DA SILVA, L. A.; HENNIES, W. T. **Peak particle velocity as a blast performance index**. In: International Symposium on Environmental Issues and Waste Management in Energy and Mineral Production, 5. Environmental issues and waste management in energy and mineral production: proceedings Rotterdam : Balkema, 1998.
- SILVA, M. A. R. ; SIRIANI, F. A. **Considerações gerais sobre o desmonte de rochas: Análise de custo - índice de produtividade e otimização da malha de perfuração**. São Paulo, EPUSP, 1992. (Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Minas, BT/PMI/010).
- SILVA, V. C. ; AYRES DA SILVA, L. A. **Os efeitos da frequência na vibração das edificações**. Brasil Mineral, n. 157, p. 56-58, dez. 1997.
- SILVA, V. C. ; AYRES DA SILVA, L. A. **Variáveis que interferem nos problemas ambientais gerados durante os desmontes de rochas**. São Paulo : EPUSP, 1999. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP. Departamento de Engenharia de Minas, BT/PMI/089.
- SIMPÓSIO EPUSP SOBRE CONTROLE AMBIENTAL E SEGURANÇA EM MINERAÇÃO, São Paulo, 1990. **Controle ambiental e segurança em mineração**. Trabalhos apresentados e organizados por W. T. Hennies e S.M. Eston. São Paulo, EPUSP, 1990.
- SINGH, P. K.; VOGT, W.; SINGH, R. B.; SINGH, M. M.; SINGH, D. P. **Response of surface structures to rock blasting**. Mineral Resources Engineering. Imperial College Press. V. 6, n. 4, Oct-Dec/1997, pp. 185-194.
- SISKIND, D. A. **Site procedures for a blast vibration program and impact assessment**. In: 25TH ANNUAL CONFERENCE ON EXPLOSIVES AND BLASTING TECHNIQUE, Nashville, 1999. Proceedings, ISEE – International Society of Explosives Engineers. Versão eletrônica. 1 CD ROM.
- SPIEGEL, M. R. **Schaum's outline of theory and problems of Fourier analysis, with applications to boundary value problems**. New York, McGraw-Hill, 1974.
- THE evolution of a successful blast**. Australian Mining. V. 86, n. 7, p. 50-53, aug/1994.
- UENISH, K. ; ROSSMANITH, H. **Blast wave propagation in rock mass. Part I: monolithic medium**. The International Journal for Blasting and Fragmentation. Balkema, Rotterdam. V 1, n3, p. 317-59, 1997.
- UENISH, K. ; ROSSMANITH, H. **Blast wave propagation in rock mass. Part II: monolithic medium**. The International Journal for Blasting and Fragmentation. Balkema, Rotterdam. V 2, n1, p. 39-77, 1998.

VENKATESH, H. S.; BHATAWDEKAR, R.M.; ADHIKARI, G.R.; THERESRAJ, A.I. **Assessment and mitigation of ground vibrations and flyrock at a limestone quarry.** In: TWENTY-FIFTH ANNUAL CONFERENCE OF EXPLOSIVES AND BLASTING TECHNIQUE, Proceedings, Nashville, 1999. V.1, pg 297-307.

VIBRATION can be controlled. Rock products. V. 94, n. 6, p. 73-5, Jun. 1991.

WARD, C.C. **An introduction to vibration measurements.** Mining technology. V. 73, n. 849, p. 266-9, Oct. 1991.

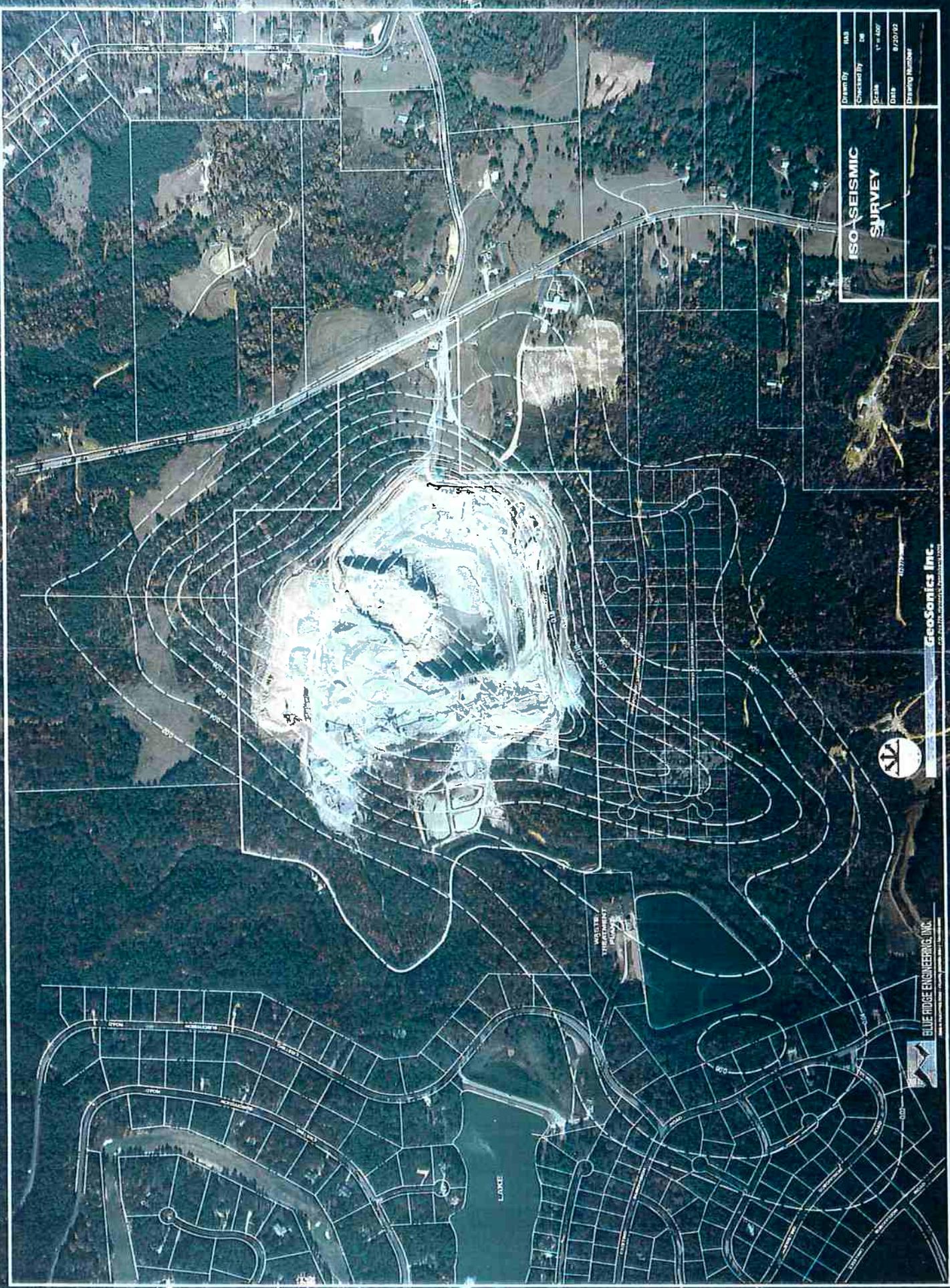
WHITE, T. J.; FARNFIELD, R. A. **Computers and blasting.** Transactions of The Institution of Mining and Metallurgy. Section A. V. 102, Jan-Apr/1993, pp. A19-A24.

ANEXO 1

**MAPAS DE ISO-VELOCIDADES LEVANTADOS PELA GEOSONICS NOS
ESTADOS UNIDOS**

Drawn By	MA
Checked By	DB
Scale	1" = 100'
Date	9/20/09
Drawing Number	

ISO-SEISMIC SURVEY



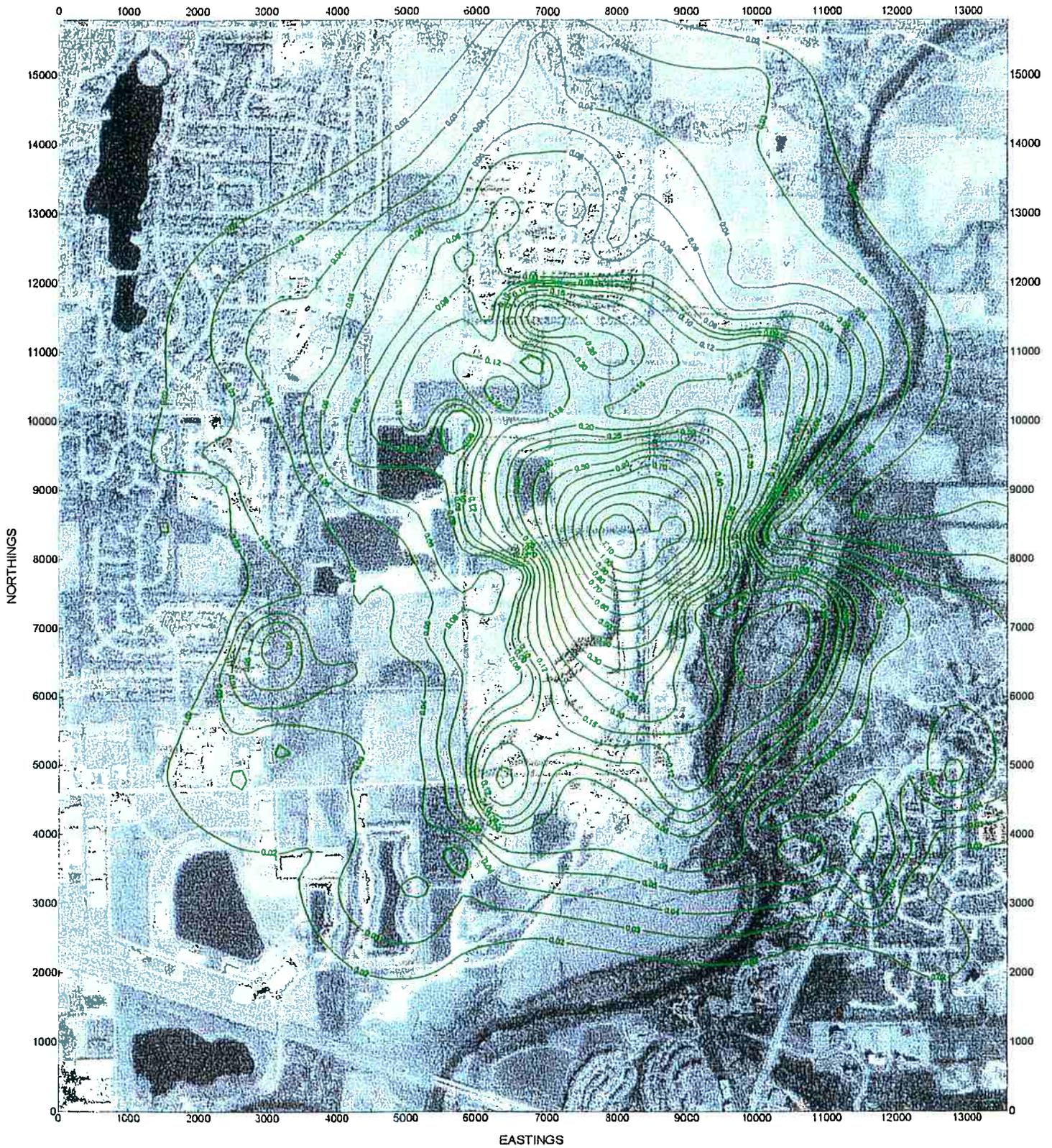
GeoSonics Inc.
 100-22477-000001-GeoSonics.com

BLUE RIDGE ENGINEERING, INC.
 100-22477-000001-BlueRidgeEngineering.com

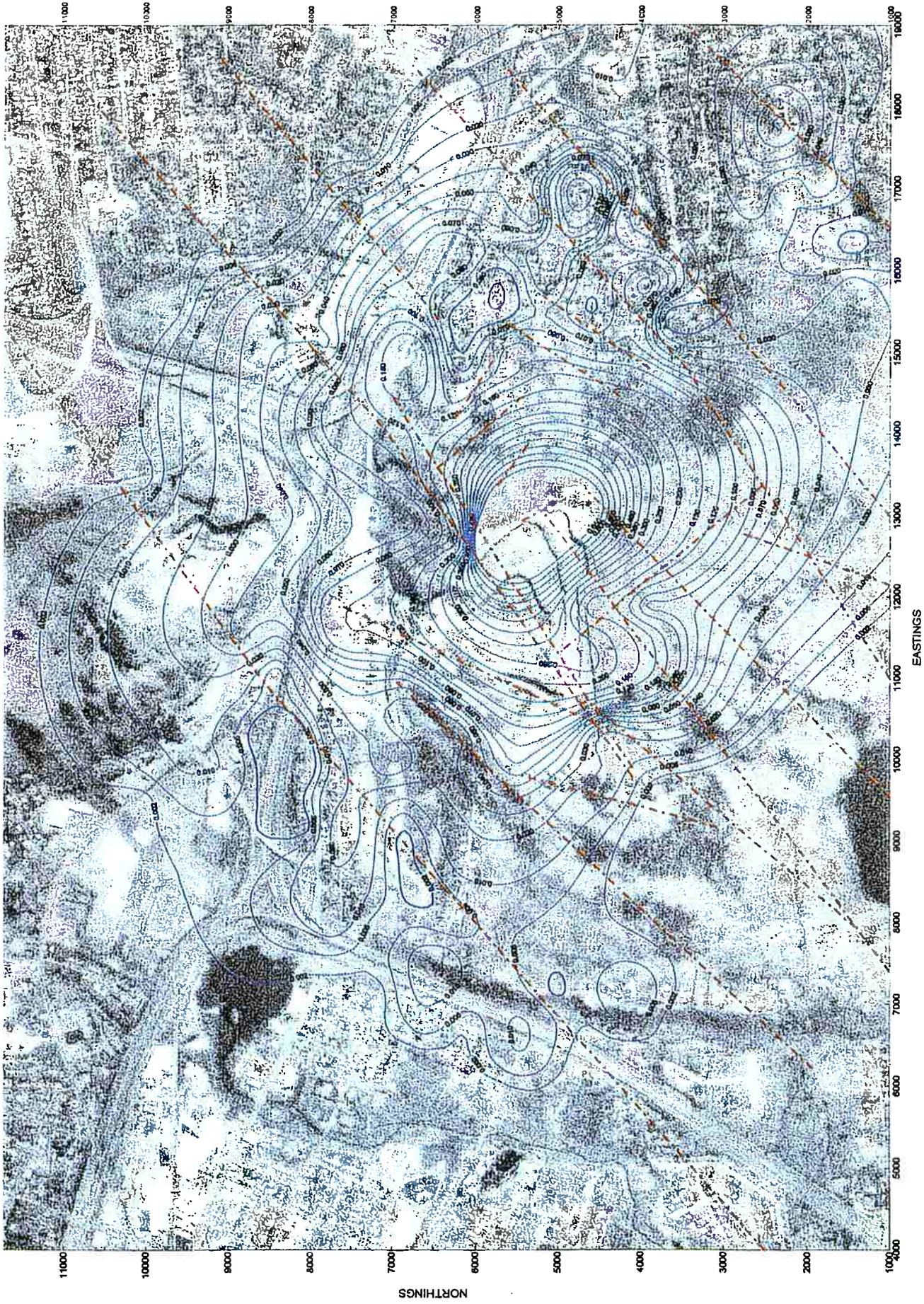




Iso-Seismic Contour Map of Peak Particle Velocity from the detonation of a single explosive column at a New England Traprock Quarry



Iso-Seismic Contour Map of Peak Particle Velocity from the detonation of a single explosive column at a Midwest Limestone Quarry



Iso-Seismic Contour Map of Peak Particle Velocity from the detonation of a production blast at a New England Basalt Quarry with mapped fault lineaments



Iso-Seismic Contour Map of Peak Particle Velocity from the detonation of a production blast at a Pennsylvania Coal Mine



**Iso-Seismic Contour Map of Peak Particle Velocity
from the detonation of a single hole explosive column at a
Pennsylvania Coal Mine**

ANEXO 2

PLANOS DE FOGO DAS DETONAÇÕES

Relatório de Fogo - Índice Mineração

Data:	6-dez-2001
Hora:	12:00
Frente:	780

<i>Perfuração</i>	
Quantidade de minas	34
Quantidade de linhas	2
Comprimento das minas (m)	13,0
Inclinação	15
Afastamento (m)	2,6
Espaçamento (m)	3,0
Altura da Bancada (m)	12,0
Altura de Tampão (m)	2,0
Subfuração (m)	0,6
Furos de levante	0
Volume <i>in situ</i>	3182

<i>Carregamento</i>	
Powergel 900 2 1/4 x 24" (kg)	750
Powermix (kg)	1300
Powergel SE Bombeado (Kg)	0
Excel CA 15m/250ms	34
Excel CA 6m/275ms	34
Excel HTD 17ms	16
Excel HTD 25ms	17
Booster	34
Razão de Carga (g/m ³)	644
Total de explosivos (kg)	2050
Carga por furo (kg)	60,3
Carga máxima (kg)	65,0

<i>Resultado do Fogo</i>	
Lançamento	Médio
Fragmentação	Boa
Pilha	Alta

Relatório de Fogo - Índice Mineração

Data:	11-dez-01
Hora:	12:00
Frente:	780

<i>Perfuração</i>	
Quantidade de minas	21
Quantidade de linhas	2
Comprimento das minas (m)	12,0
Inclinação	15
Afastamento (m)	2,6
Espaçamento (m)	3,0
Altura da Bancada (m)	11,0
Altura de Tampão (m)	2,0
Subfuração (m)	0,6
Furos de levante	0
Volume <i>in situ</i>	1802

<i>Carregamento</i>	
Powergel 900 2 1/4 x 24 (kg)	250
Powermix (kg)	625
Powergel SE Bombeado (kg)	0
Excel CA 15m/250ms	21
Excel CA 6m/275ms	21
Excel HTD 17ms	10
Excel HTD 25ms	10
Booster	21
Razão de Carga (g/m ³)	486
Total de explosivos (kg)	875
Carga por furo (kg)	41,7
Carga máxima (kg)	65,0

<i>Resultado do Fogo</i>	
Lançamento	bom
Fragmentação	boa
Pilha	baixa

Relatório de Fogo - Índice Mineração

Data:	19-dez-01
Hora:	12:00
Frente:	780

<i>Perfuração</i>	
Quantidade de minas	31
Quantidade de linhas	2
Comprimento das minas (m)	12,0
Inclinação	15
Afastamento (m)	2,5
Espaçamento (m)	2,8
Altura da Bancada (m)	11,0
Subfuração (m)	0,6
Altura do Tampão (m)	2,0
Volume <i>in situ</i>	2387

<i>Carregamento</i>	
Powergel 900 2 1/4 x 24 (kg)	275
Powermix (kg)	900
Powergel SE Bombeado (kg)	0
Excel CA 15m/250ms	31
Excel CA 6m/275ms	31
Excel HTD 17ms	15
Excel HTD 25ms	15
Booster	31
Razão de Carga (g/m ³)	492
Total de explosivos (kg)	1175
Carga por furo (kg)	37,9
Carga máxima (kg)	65,0

<i>Resultado do Fogo</i>	
Lançamento	bom
Fragmentação	boa
Pilha	média

Relatório de Fogo - Índice Mineração

Data:	20-dez-01
Hora:	12:00
Frente:	780

<i>Perfuração</i>	
Quantidade de minas	29
Quantidade de linhas	2
Comprimento das minas (m)	12,0
Inclinação	15
Afastamento (m)	2,6
Espaçamento (m)	3,0
Altura da Bancada (m)	11,0
Altura de Tampão (m)	2,0
Subfuração (m)	0,6
Furos de levante	0
Volume <i>in situ</i>	2488

<i>Carregamento</i>	
Powergel 900 2 1/2 x 24 (kg)	475
Powermix (kg)	1000
Powergel SE (kg)	0
Excel CA 15m/250ms	29
Excel CA 6m/275ms	29
Excel HTD 17ms	14
Excel HTD 25ms	15
Booster	29
Razão de Carga (g/m ³)	593
Total de explosivos (kg)	1475
Carga por furo (kg)	50,9
Carga máxima (kg)	65,0

<i>Resultado do Fogo</i>	
Lançamento	bom
Fragmentação	boa
Pilha	baixa

Relatório de Fogo - Índice Mineração

Data:	10/1/2002
Hora:	12:00
Frente:	780

<i>Perfuração</i>	
Quantidade de minas	34
Quantidade de linhas	2
Comprimento das minas (m)	13,0
Inclinação	15
Afastamento (m)	2,7
Espaçamento (m)	2,8
Altura da Bancada (m)	12,0
Altura de Tampão (m)	2,0
Subfuração (m)	0,6
Furos de levante	0
Volume <i>in situ</i>	3084

<i>Carregamento</i>	
Powergel 900 2 1/4 x 24 (kg)	0
Powermix (kg)	0
Powergel SE Bombeado (kg)	2200
Excel CA 15m/250ms	34
Excel CA 6m/275ms	34
Excel HTD 17ms	16
Excel HTD 25ms	17
Booster	34
Razão de Carga (g/m ³)	713
Total de explosivos (kg)	2200
Carga por furo (kg)	64,7
Carga máxima (kg)	65

<i>Resultado do Fogo</i>	
Lançamento	bom
Fragmentação	boa
Pilha	baixa

Relatório de Fogo - Índice Mineração

Data:	16/1/2002
Hora:	12:00
Frente:	780

<i>Perfuração</i>	
Quantidade de minas	35
Quantidade de linhas	2
Comprimento das minas (m)	13,0
Inclinação	15
Afastamento (m)	2,7
Espaçamento (m)	2,8
Altura da Bancada (m)	12,0
Subfuração (m)	0,6
Altura do Tampão (m)	2,0
Volume <i>in situ</i>	3175

<i>Carregamento</i>	
Powergel 900 2 1/4 x 24 (kg)	550
Powermix (kg)	1000
Powergel SE Bombeado (kg)	0
Excel CA 15m/250ms	35
Excel CA 6m/275ms	35
Excel HTD 17ms	17
Excel HTD 25ms	17
Booster	35
Razão de Carga (g/m ³)	488
Total de explosivos (kg)	1550
Carga por furo (kg)	44,3
Carga máxima (kg)	65

<i>Resultado do Fogo</i>	
Lançamento	bom
Fragmentação	boa
Pilha	média

Relatório de Fogo - Índice Mineração

Data:	21/1/2002
Hora:	12:00
Frente:	780lateral

<i>Perfuração</i>	
Quantidade de minas	100
Quantidade de linhas	5
Comprimento das minas (m)	13,0
Inclinação	15
Afastamento (m)	2,5
Espaçamento (m)	2,8
Altura da Bancada (m)	12,0
Altura de Tampão (m)	2,0
Subfuração (m)	0,6
Furos de levante	0
Volume <i>in situ</i>	8400

<i>Carregamento</i>	
Powergel 900 2 1/2 x 24 (kg)	1400
Powermix (kg)	4000
Powergel SE (kg)	0
Excel CA 15m/250ms	100
Excel CA 6m/275ms	100
Excel HTD 17ms	49
Excel HTD 25ms	50
Booster	100
Razão de Carga (g/m ³)	643
Total de explosivos (kg)	5400
Carga por furo (kg)	54,0
Carga máxima (kg)	150

<i>Resultado do Fogo</i>	
Lançamento	bom
Fragmentação	boa
Filha	baixa

Relatório de Fogo - Índice Mineração

Data:	24/1/2002
Hora:	12:00
Frente:	780

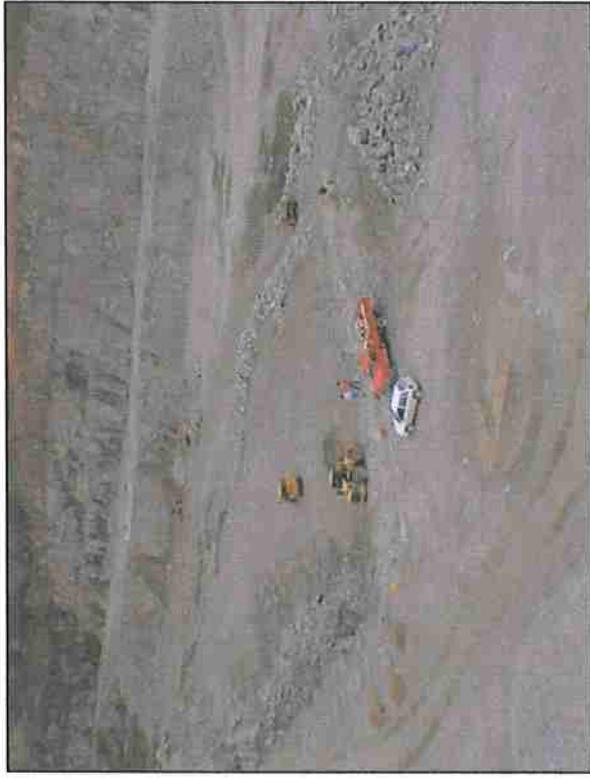
<i>Perfuração</i>	
Quantidade de minas	55
Quantidade de linhas	2
Comprimento das minas (m)	13,0
Inclinação	15
Afastamento (m)	2,7
Espaçamento (m)	2,8
Altura da Bancada (m)	12,0
Altura de Tampão (m)	2,0
Subfuração (m)	0,6
Furos de levante	0
Volume <i>in situ</i>	4990

<i>Carregamento</i>	
Powergel 900 2 1/2 x 24 (kg)	475
Powermix (kg)	175
Powergel SE (kg)	3650
Excel CA 15m/250ms	55
Excel CA 6m/275ms	55
Excel HTD 17ms	27
Excel HTD 25ms	27
Booster	55
Razão de Carga (g/m ³)	862
Total de explosivos (kg)	4300
Carga por furo (kg)	78,2
Carga máxima (kg)	65

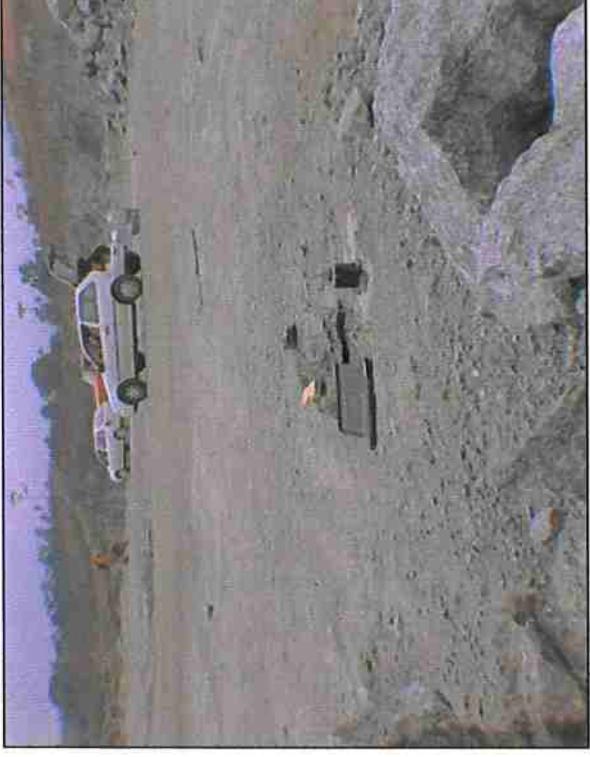
<i>Resultado do Fogo</i>	
Lançamento	bom
Fragmentação	boa
Pilha	baixa

ANEXO 3

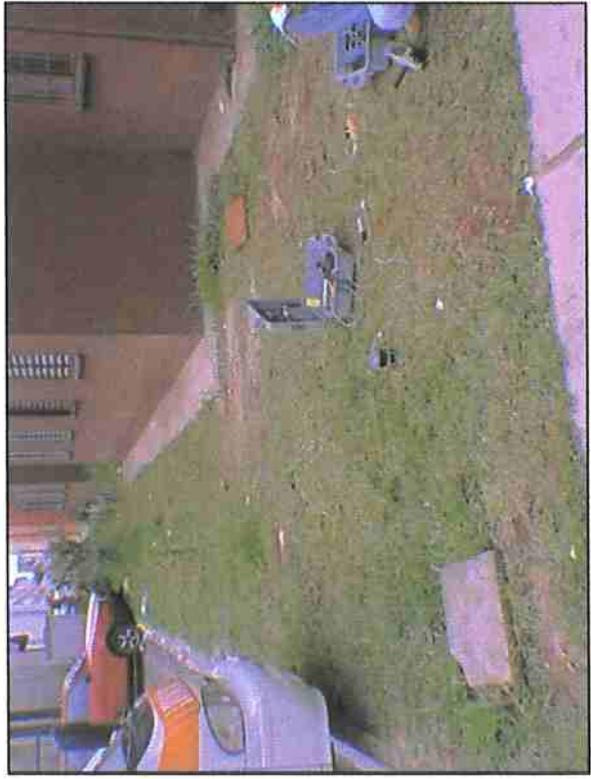
FOTOS DOS MONITORAMENTOS



Vista da bancada a ser detonada (06/12/01)



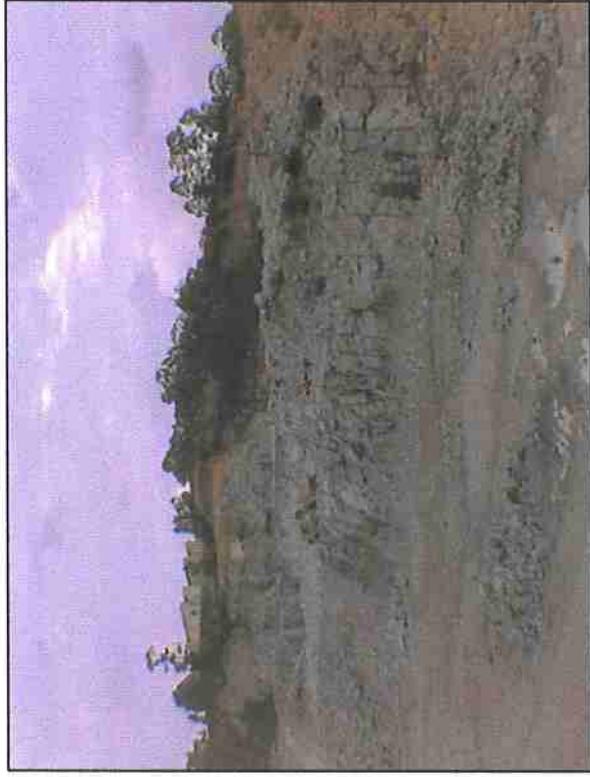
Sismógrafo fixado na rocha (06/12/01)



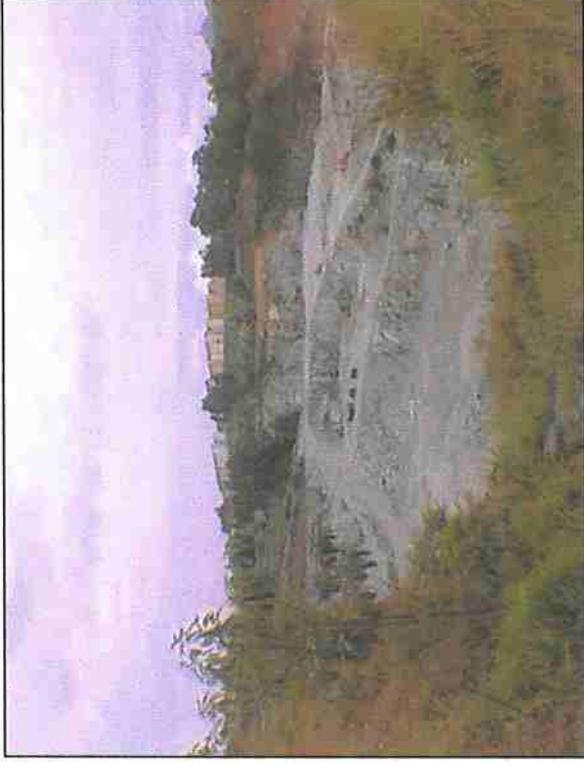
Sismógrafo instalado junto a um prédio do CDHU (06/12/01)



Sismógrafo instalado junto a uma caixa d'água do CDHU (06/12/01)



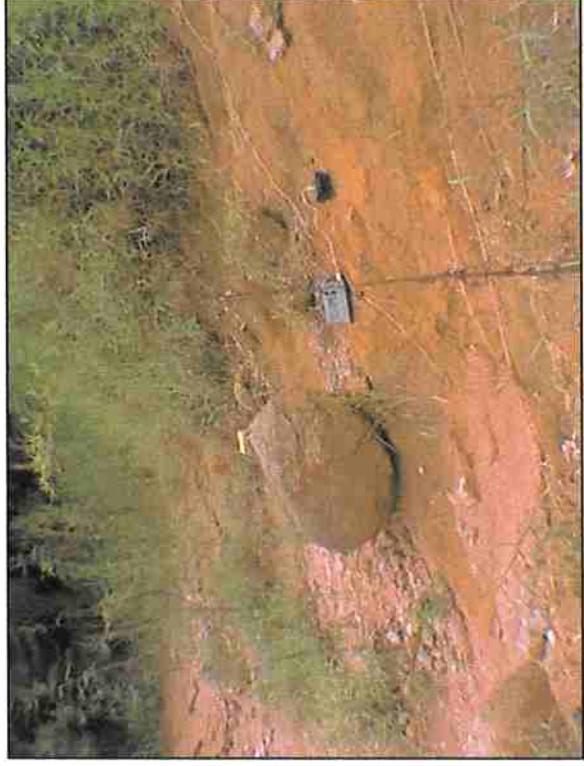
Vista da bancada a ser detonada (11/12/01)



Vista da direção escolhida (11/12/01)



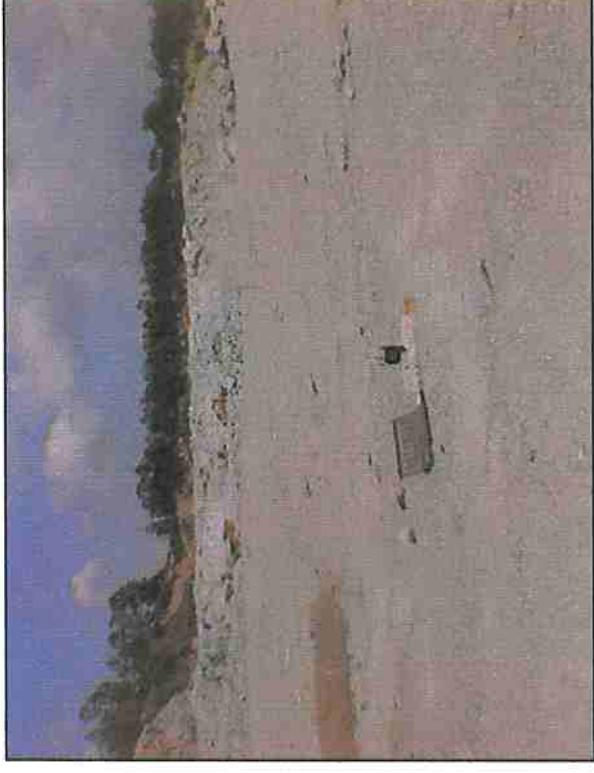
Sismógrafo fixado na rocha da praça (11/12/01)



Sismógrafo fixado no solo na divisa com a Construcap (11/12/01)



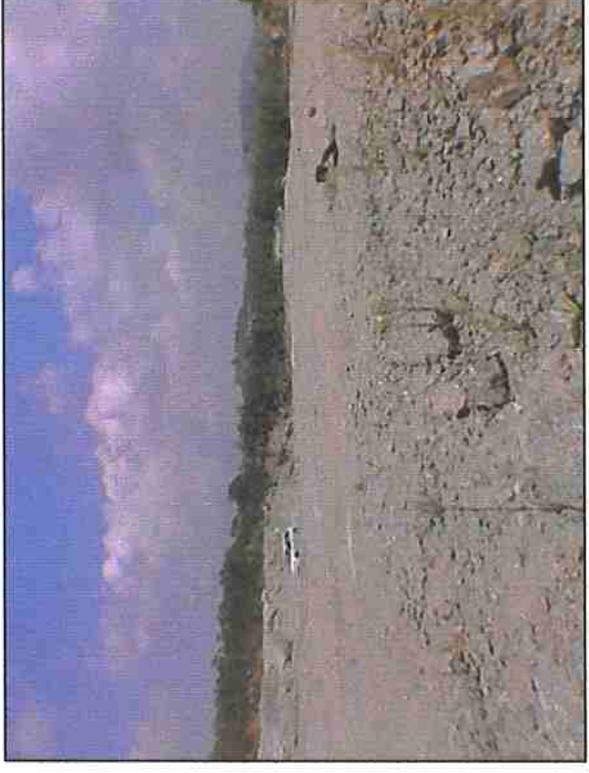
Vista da bancada e da direção escolhida (19/12/01)



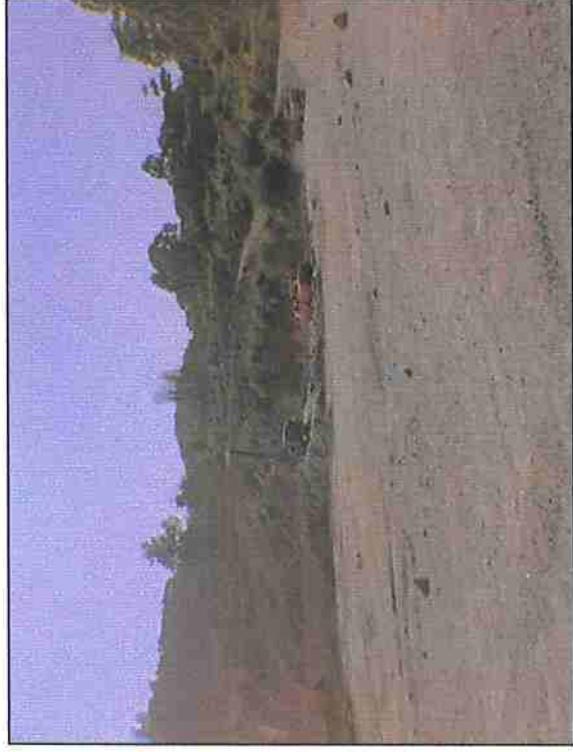
Sismógrafo fixado na rocha e bancada a ser desmontada (19/12/01)



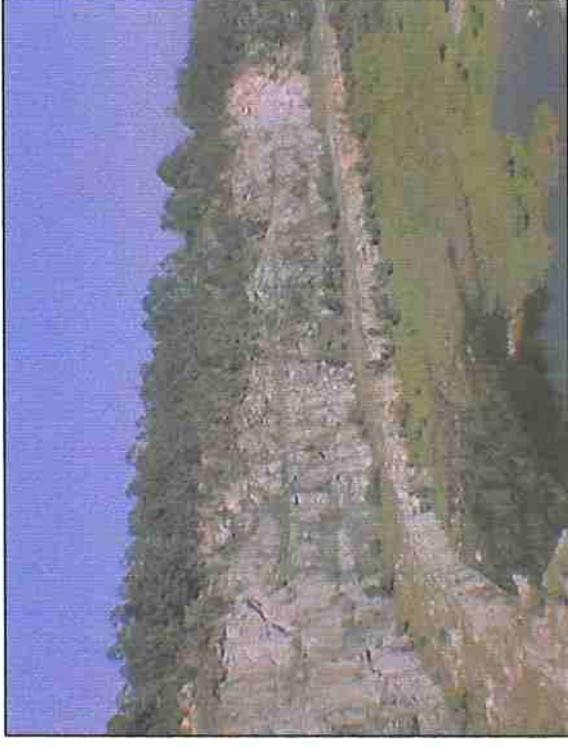
Sismógrafo fixado no solo do Cond. Vista Linda (19/12/01)



Sismógrafo fixado na rocha próximo ao córrego (19/12/01)



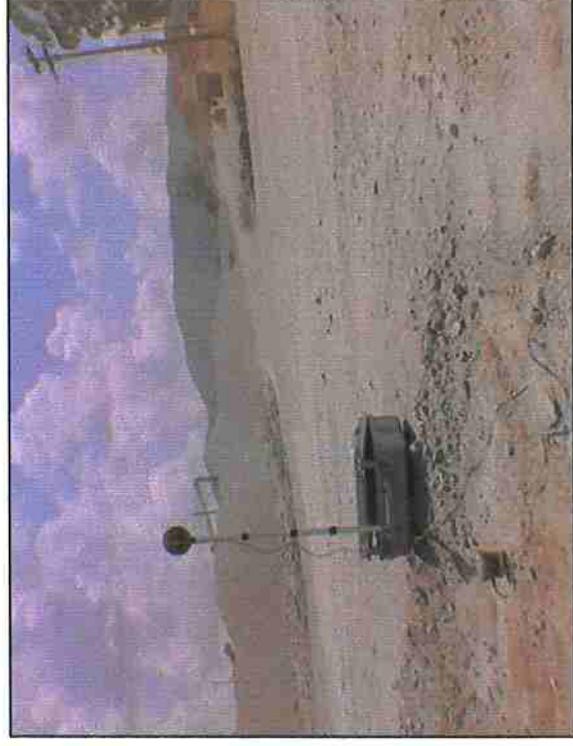
Vista da bancada a ser detonada (20/12/01)



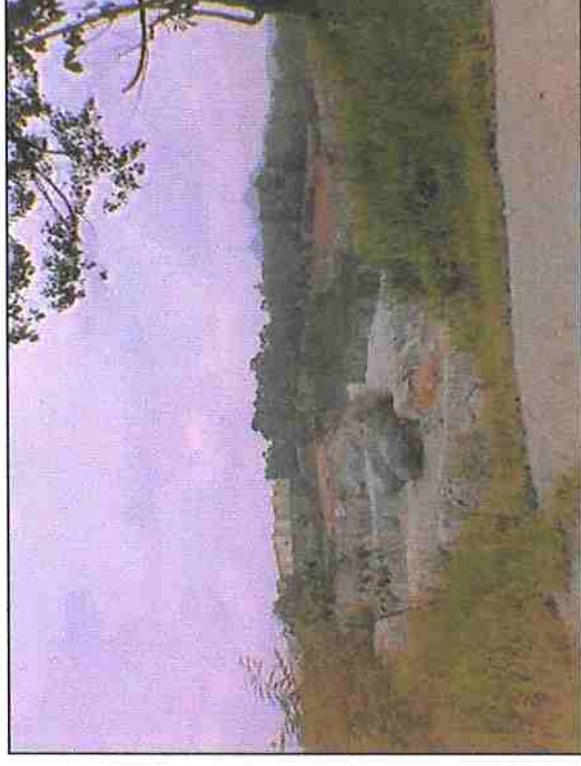
Antiga cava atualmente inundada (20/12/01)



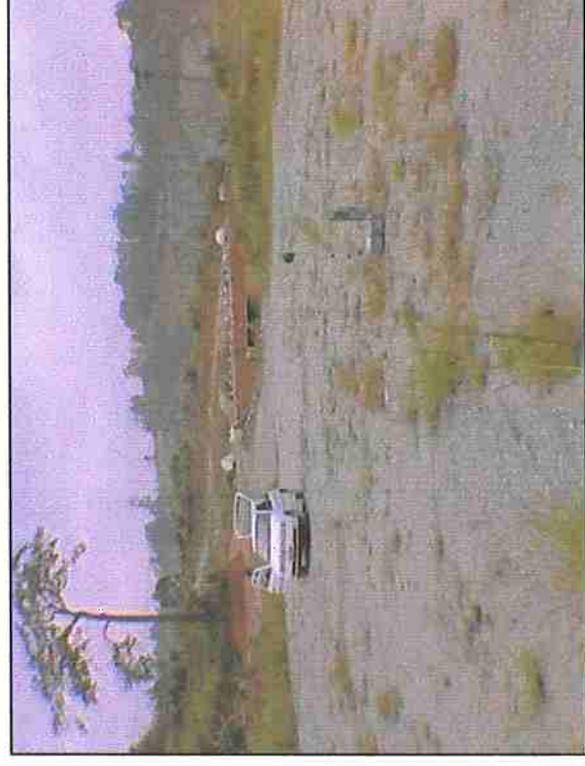
Sismógrafo fixado na rocha e vista da direção escolhida (20/12/01)



Sismógrafo instalado próximo à linha da estrada de ferro (20/12/01)



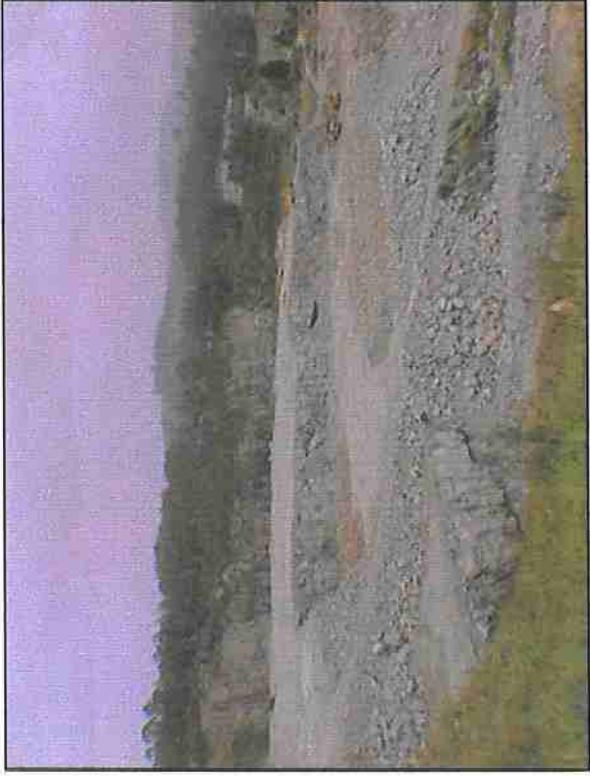
Momento da detonação da bancada (10/01/02)



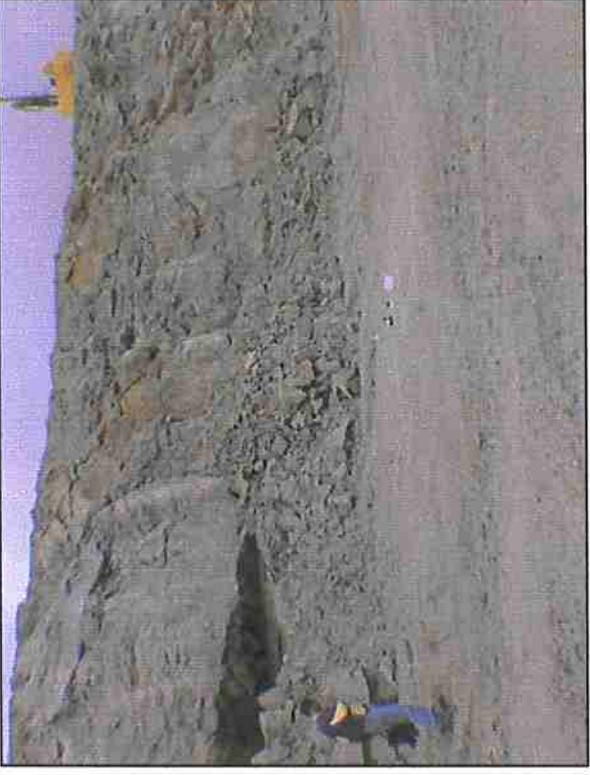
Direção escolhida e sismógrafo fixado próximo à oficina (10/01/02)



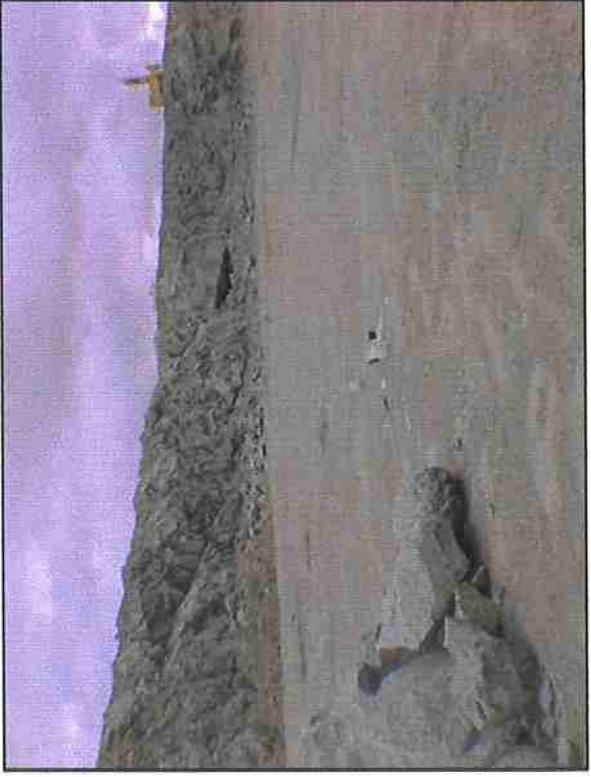
Vista da bancada a ser desmonta (fundo) e sismógrafo fixado na rocha (10/01/02)



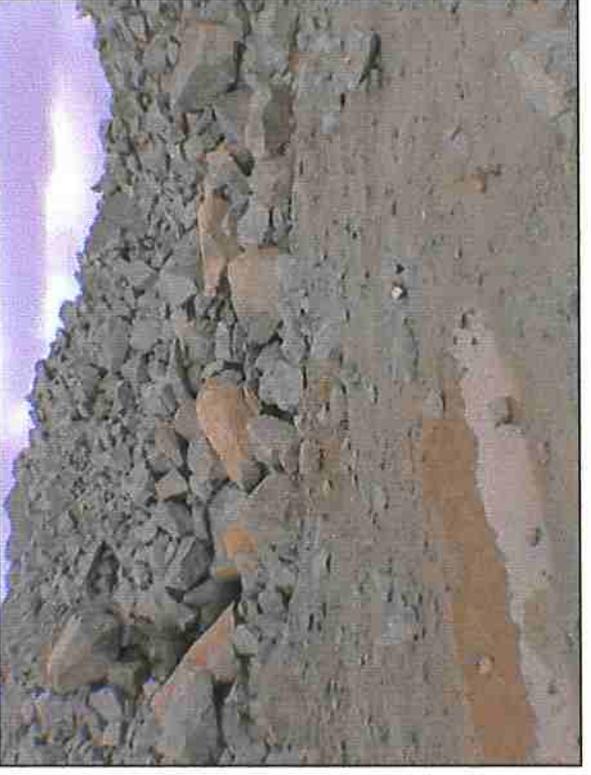
Vista do septo onde estão todas as bancadas monitoradas (16/01/02)



Sismógrafo fixado na rocha aflorante de uma das praças (16/01/02)



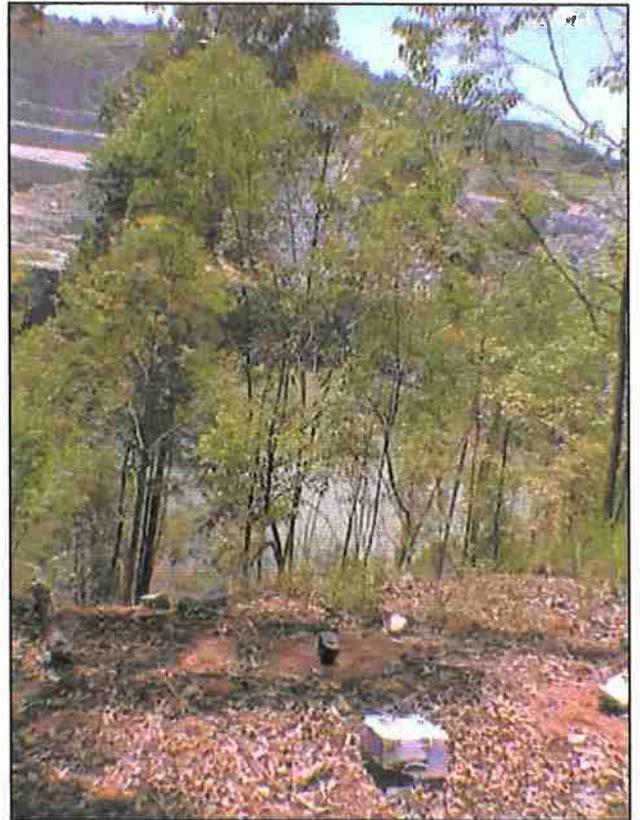
Sismógrafo fixado na rocha e direção escolhida (16/01/02)



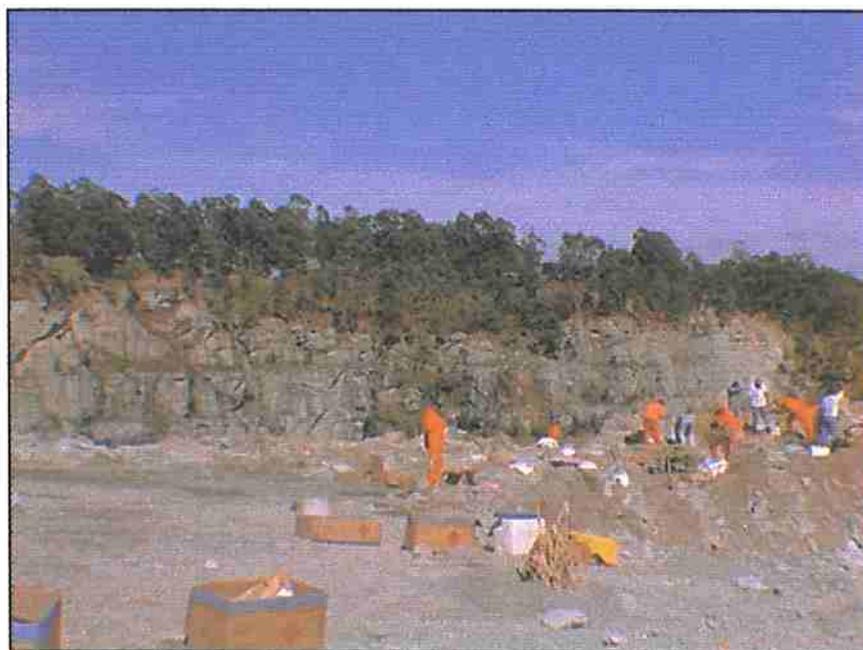
Sismógrafo fixado na rocha atrás de uma da rampa (16/01/02)



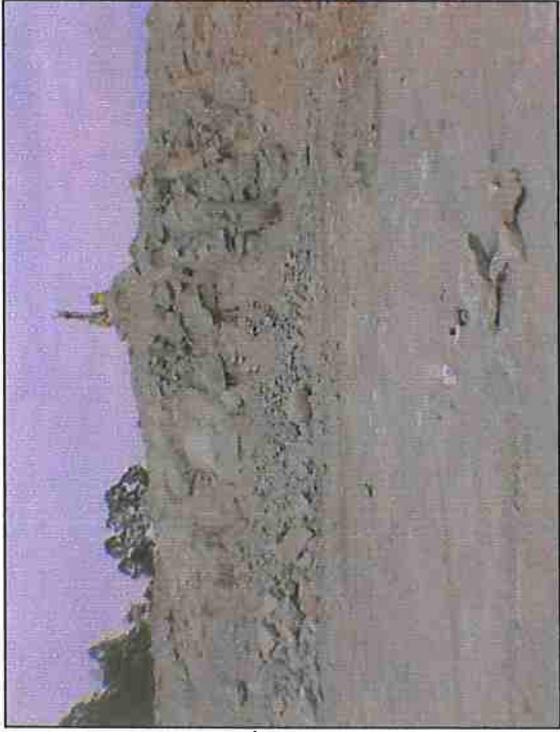
**Sismógrafo fixado no solo próximo ao escritório
(21/01/02)**



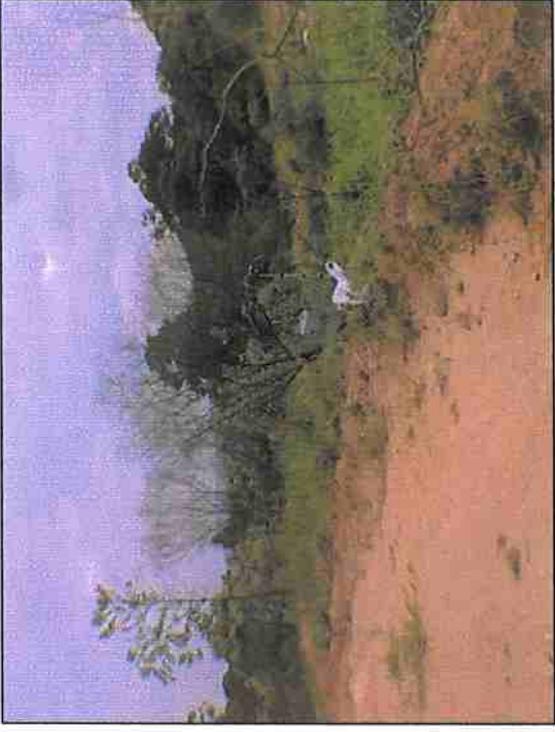
**Sismógrafo fixado no solo próximo à casa do
compressor (bancada ao fundo, 21/01/02)**



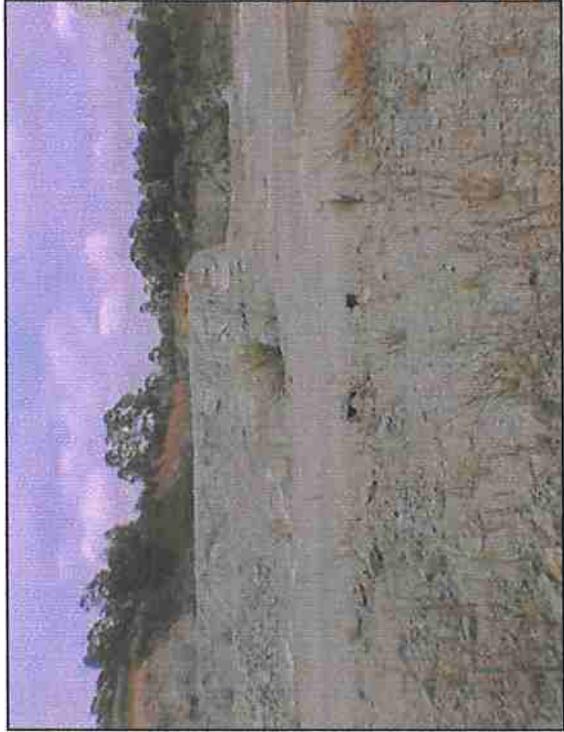
Trabalho de carregamento dos furos com explosivos na bancada (21/01/02)



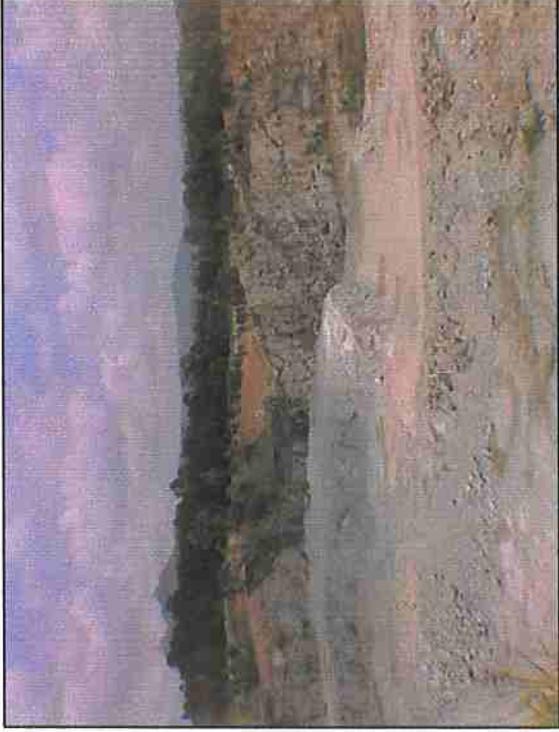
Vista da bancada a ser detonada e direção escolhida (24/01/02)



Sismógrafo fixado no solo próximo ao Cond. Vista Linda (24/01/02)



Sismógrafo fixado na rocha e direção escolhida (24/01/02)



Vista do septo na direção escolhida (24/01/020)

ANEXO 4

RELATÓRIOS DE ANÁLISE SISMOGRÁFICA

LACASEMIN - RELATÓRIO DE ANÁLISE SISMOGRÁFICA

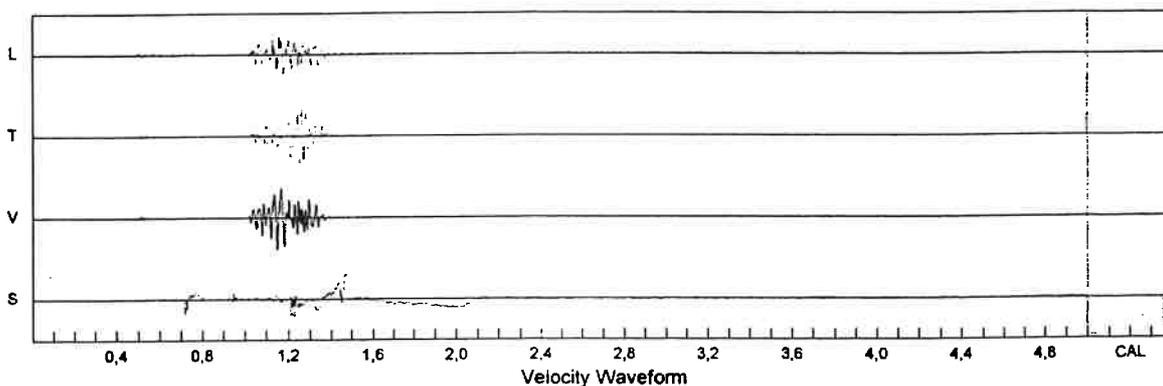
SN: 4506
Date: 06.12.2001 **Time:** 12:19:51
Event: 001 **Record Time:** 5,0 s
Client: PEDREIRA RIUMA
Operation: CURVA DE ISO-VELOCIDADES
Location: 233224667407568
Distance:
Operator:
Comment: Carpe Diem.
Trigger Level: 1,27 mm/s

Summary Data			
	L	T	V
PPV (mm/s)	32,51	47,75	51,82
PD (.01mm)	17,5	27,9	25,9
PPA (g)	2,78	3,64	1,87
FREQ (Hz)	38,5	55,6	41,7
Resultant PPV:	53,85 mm/s		
Peak Air Pressure:	138 db 154.00 Pa		

Shaketable Calibrated: 06.06.2001
By: GeoSonics Inc.
 P.O. Box 779
 Warrendale, PA 15095 U.S.A.
 TEL: 724.934.2900 FAX: 724.934.2999

LACASEMIN - RELATÓRIO DE ANÁLISE SISMOGRÁFICA

SN: 4506



Velocity Waveform Graph Scale:
Time = 0.100 s
Seismic = +/- 2,56 mm/s
Sound = +/- 256.00 Pa

Printed: fevereiro 4, 2002 File: evn2m001.evt (GeoSonics Inc. Analysis v6.1.0)

LACASEMIN - RELATÓRIO DE ANÁLISE SISMOGRÁFICA

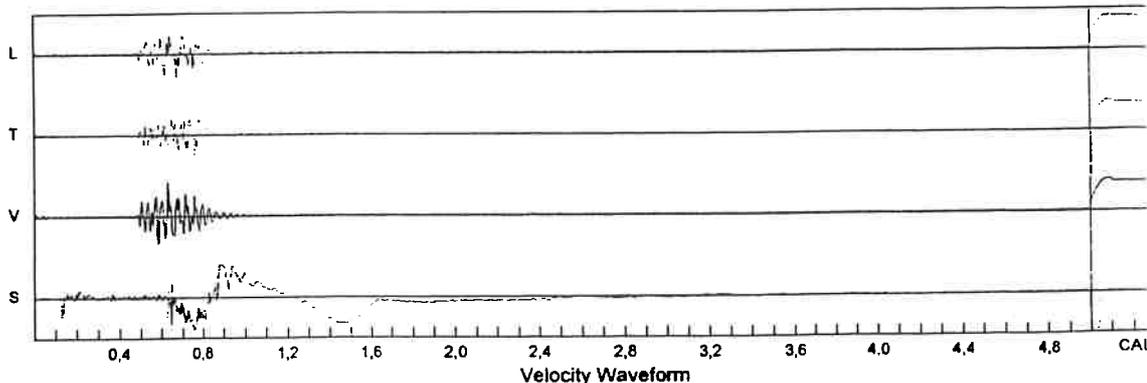
SN: 4505
Date: 06.12.2001 **Time:** 12:23:12
Event: 000 **Record Time:** 5,0 s
Client: Curva de Iso-velocidades
Operation:
Location: 233224727407576
Distance:
Operator: LACASEMIN- EPUSP
Comment: Carpe Diem.
Trigger Level: 4,83 mm/s

Summary Data			
	L	T	V
PPV (mm/s)	20,07	16,76	27,18
PD (.01mm)	12,2	8,1	11,2
PPA (g)	0,46	0,49	0,83
FREQ (Hz)	20,8	26,3	26,3
Resultant PPV:	28,96 mm/s		
Peak Air Pressure:	141 db 212.00 Pa		

Shaketable Calibrated: 06.06.2001
By: GeoSonics Inc.
 P.O. Box 779
 Warrendale, PA 15095 U.S.A.
 TEL: 724.934.2900 FAX: 724.934.2999

LACASEMIN - RELATÓRIO DE ANÁLISE SISMOGRÁFICA

SN: 4505



Velocity Waveform Graph Scale:
Time = 0.100 s
Seismic = +/- 1,28 mm/s
Sound = +/- 256.00 Pa

Printed: fevereiro 4, 2002 File: evn2m001.evt (GeoSonics Inc. Analysis v6.1.0)

LACASEMIN - RELATORIO DE ANALISE SISMOGRAFICA

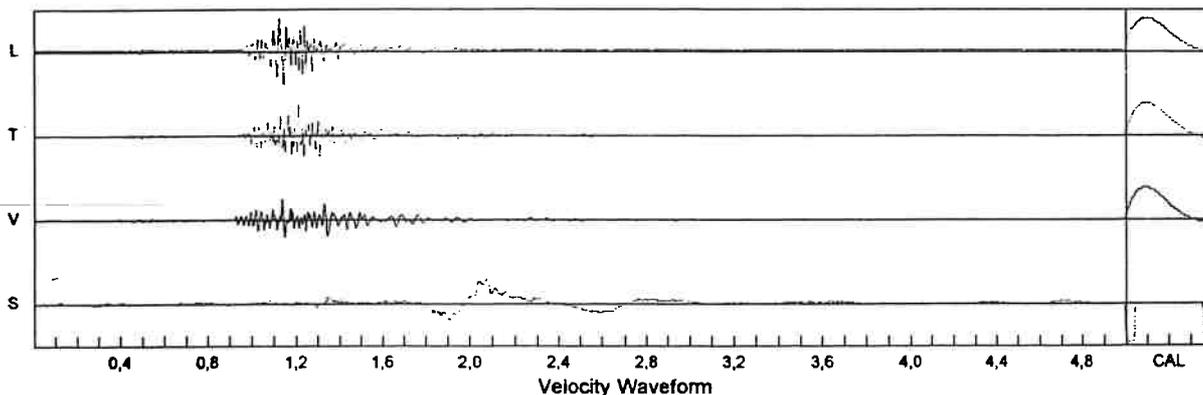
SN: 4497
 Date: 06.12.2001 Time: 12:19:55
 Event: 000 Record Time: 5,0 s
 Client: PEDREIRA RIUMA
 Operation: CURVA DE ISO-VELOCIDADES
 Location:
 Distance:
 Operator: LACASEMIN- EPUSP
 Comment: Carpe Diem.
 Trigger Level: 0,51 mm/s

Summary Data			
	L	T	V
PPV (mm/s)	6,60	6,35	4,06
PD (.01mm)	3,8	2,0	3,3
PPA (g)	0,18	0,26	0,10
FREQ (Hz)	33,3	55,6	45,5
Resultant PPV:	7,37 mm/s		
Peak Air Pressure:	126 db		
	38.00 Pa		

Shaketable Calibrated: 10.02.2001
 By: GeoSonics Inc.
 P.O. Box 779
 Warrendale, PA 15095 U.S.A.
 TEL: 724.934.2900 FAX: 724.934.2999

LACASEMIN - RELATÓRIO DE ANÁLISE SISMOGRÁFICA

SN: 4497



Velocity Waveform Graph Scale:
 Time = 0.100 s
 Seismic = +/- 0.32 mm/s
 Sound = +/- 64.00 Pa

Printed: Fevereiro 4, 2002 File: evnlm000.evt (GeoSonics Inc. Analysis v6.1.0)

LACASEMIN - RELATÓRIO DE ANÁLISE SISMOGRÁFICA

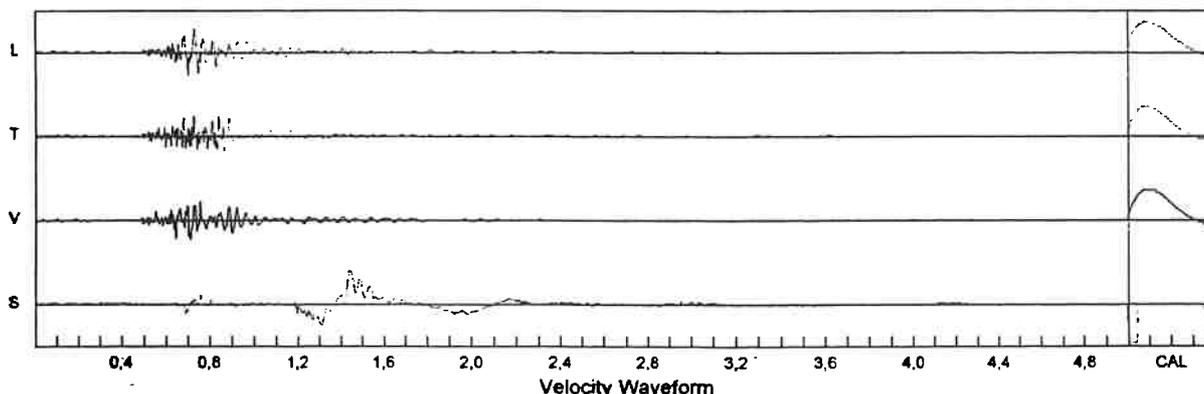
SN: 4496
 Date: 06.12.2001 Time: 12:19:35
 Event: 001 Record Time: 5,0 s
 Client: PEDREIRA RIUMA
 Operation: MAPA DE ISO-VELOCIDADES
 Location:
 Distance:
 Operator:
 Comment: CDHU(cx dagua) D=262m
 Trigger Level: 0,51 mm/s

Summary Data			
	L	T	V
PPV (mm/s)	4,57	4,32	3,81
PD (.01mm)	3,3	3,8	2,5
PPA (g)	0,13	0,18	0,15
FREQ (Hz)	23,8	45,5	23,8
Resultant PPV:	5.84 mm/s		
Peak Air Pressure:	128 db		
	52.00 Pa		

Shaketable Calibrated: 10.02.2001
 By: GeoSonics Inc.
 P.O. Box 779
 Warrendale, PA 15095 U.S.A.
 TEL: 724.934.2900 FAX: 724.934.2999

LACASEMIN - RELATÓRIO DE ANÁLISE SISMOGRÁFICA

SN: 4496



Velocity Waveform Graph Scale:
 Time = 0.100 s
 Seismic = +/- 0.32 mm/s
 Sound = +/- 64.00 Pa

Printed: Fevereiro 4, 2002 File: evnlm001.evt (GeoSonics Inc. Analysis v6.1.0)

LACASEMIN - RELATÓRIO DE ANÁLISE SISMOGRÁFICA

SN: 4509
 Date: 06.12.2001 Time: 12:19:22
 Event: 008 Record Time: 5,0 s
 Client: PEDREIRA RIUMA
 Operation: CURVA DE ISO-VELOCIDADES
 Location: 233223107407452
 Distance:
 Operator:
 Comment: Carpe Diem.
 Trigger Level: 0,51 mm/s

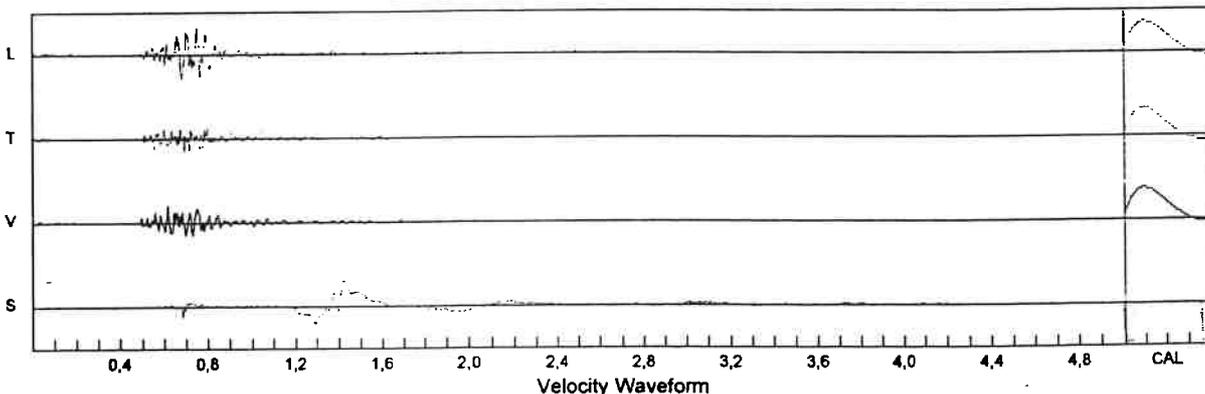
Summary Data

	L	T	V
PPV (mm/s)	5,08	2,54	3,30
PD (.01mm)	3,8	1,3	2,3
PPA (g)	0,18	0,18	0,10
FREQ (Hz)	31,2	71,4	38,5
Resultant PPV:	5,59 mm/s		
Peak Air Pressure:	125 db		
	36.00 Pa		

Shaketable Calibrated: 08.06.2001
 By: GeoSonics Inc.
 P.O. Box 779
 Warrendale, PA 15095 U.S.A.
 TEL: 724.934.2900 FAX: 724.934.2999

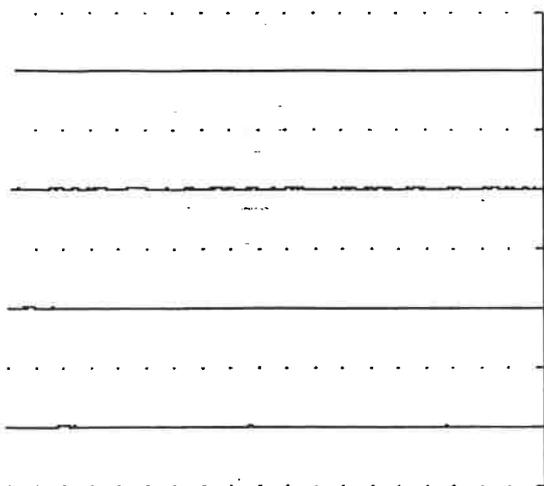
LACASEMIN - RELATÓRIO DE ANÁLISE SISMOGRÁFICA

SN: 4509



Velocity Waveform Graph Scale:
 Time = 0.100 s
 Seismic = +/- 0.32 mm/s
 Sound = +/- 64.00 Pa

Printed: Fevereiro 4, 2002 File: evntm000.evt (GeoSonics Inc. Analysis v6.1.0)

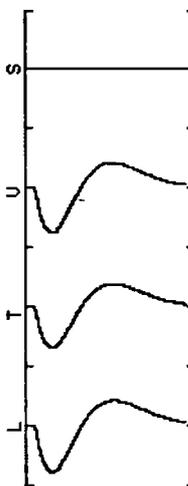


SUMMARY

PPV (mm/sec)	L 4.3	T 3.0	U 3.0
PD (.01 mm)	3.8	2.2	4.1
PPA (g)	0.13	0.13	0.05
FREQ (hz)	25.0	17.8	16.6
RESULTANT PPV (mm/sec)	4.8		
PEAK AIR PRESSURE (db)	100		
PEAK AIR PRESSURE (Pa)	1.99		

Friday, 12/06/01 12:15:28

DYNAMIC CALIBRATION CHECK



SHAKETABLE CALIBRATED: 7/06/01
 By GeoSonics, Inc.
 Box 779, Warrendale, PA 15095
 TEL: 412-776-3688

TRIGGER ACTIVE, 12/06/01 12:16:32

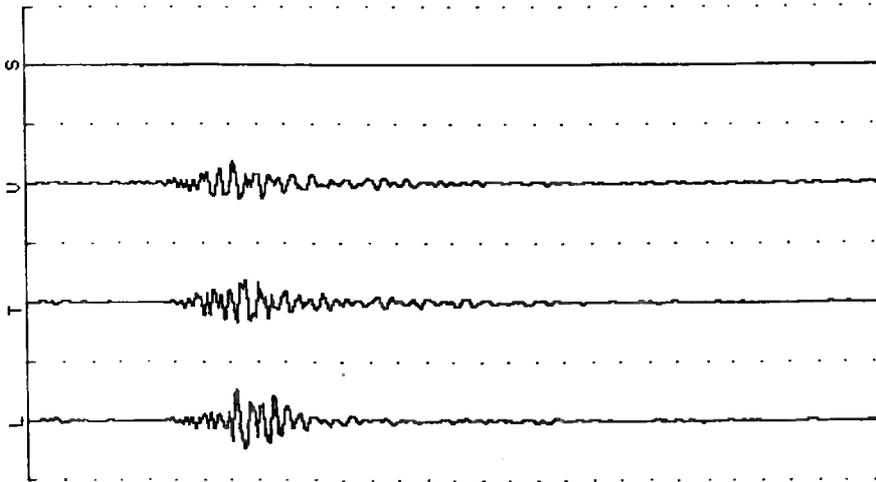
TRIGGER ACTIVE, 12/06/01 12:12:35

** SAFEGUARD SEISMIC UNIT 2000DK **
 SN: 2411
 Friday, 12/06/01 12:15:28

Event: 001
 Client: PEDREIRA RIUMA
 Operation: MAPA ISOVELOCIDADES
 SSU Location: CDHU
 Distance to Blast:
 Operator:
 Comments:
 Trigger Level: 0.5 mm/sec, No db
 Record Time: 5 secs
 Range: Auto 126 mm/sec

VIBRATION & SOUND TIME HISTORY

Time Scale: 0.1 (sec/div)
 Data Scale (seismic): 8 (mm/sec)
 Data Scale (air): 61 Pa



LACASEMIN - RELATORIO DE ANALISE SISMOGRAFICA

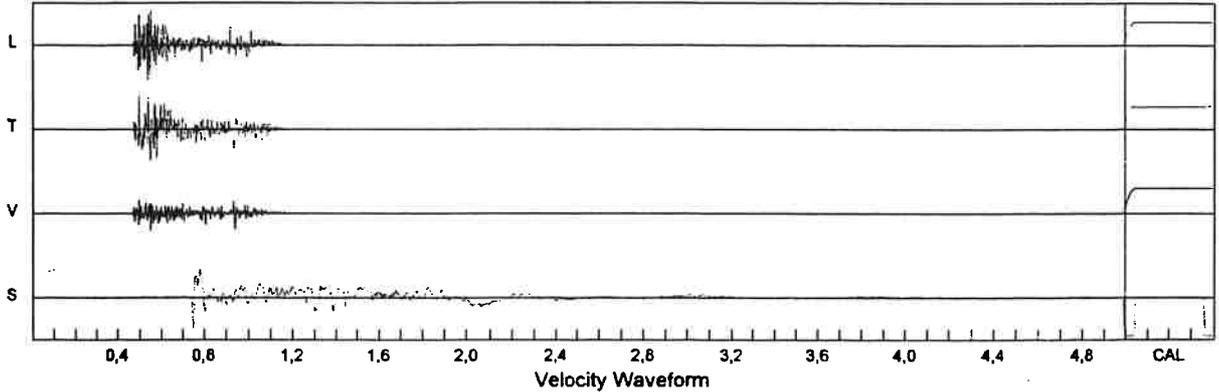
SN: 4495
Date: 11.12.2001 Time: 12:29:47
Event: 023 Record Time: 5,0 s
Client: PEDREIRA RIUMA
Operation: CURVA DE ISO-VELOCIDADES
Location: PRACA
Distance:
Operator:
Comment: UTM 23K 322563 7407783
Trigger Level: 4,83 mm/s

	Summary Data		
	L	T	V
PPV (mm/s)	13,72	13,21	6,86
PD (.01mm)	4,1	11,4	1,8
PPA (g)	1,14	0,98	0,59
FREQ (Hz)	125,0	100,0	166,7
Resultant PPV:	18,29 mm/s		
Peak Air Pressure:	140 db		
	204.00 Pa		

Shaketable Calibrated: 10.02.2001
By: GeoSonics Inc.
P.O. Box 779
Warrendale, PA 15095 U.S.A.
TEL: 724.934.2900 FAX: 724.934.2999

LACASEMIN - RELATÓRIO DE ANÁLISE SISMOGRAFICA

SN: 4495



Velocity Waveform Graph Scale:
Time = 0.100 s
Seismic = +/- 0,64 mm/s
Sound = +/- 256.00 Pa

Printed: fevereiro 4, 2002 File: evntm023.evt (GeoSonics Inc. Analysis v6.1.0)

LACASEMIN - RELATÓRIO DE ANÁLISE SISMOGRAFICA

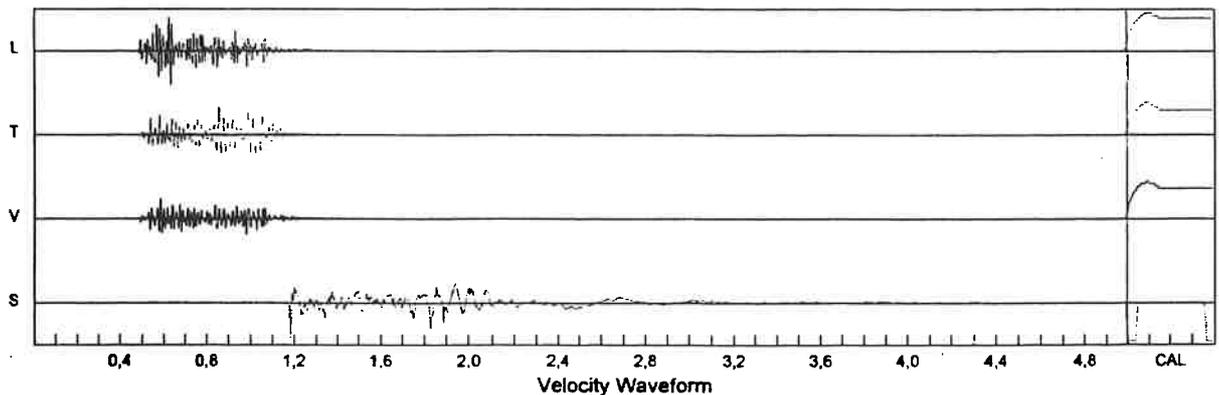
SN: 4508
Date: 11.12.2001 Time: 12:30:51
Event: 001 Record Time: 5,0 s
Client: PEDREIRA RIUMA
Operation: CURVA DE ISO-VELOCIDADES
Location: ESTRADA CORREGO
Distance:
Operator: LACASEMIN- EPUSP
Comment: UTM 23K 322641 7407929
Trigger Level: 1,78 mm/s

	Summary Data		
	L	T	V
PPV (mm/s)	13,46	10,67	7,62
PD (.01mm)	3,3	3,8	2,0
PPA (g)	0,57	0,28	0,31
FREQ (Hz)	71,4	45,5	71,4
Resultant PPV:	14,22 mm/s		
Peak Air Pressure:	135 db		
	108.00 Pa		

Shaketable Calibrated: 08.06.2001
By: GeoSonics Inc.
P.O. Box 779
Warrendale, PA 15095 U.S.A.
TEL: 724.934.2900 FAX: 724.934.2999

LACASEMIN - RELATÓRIO DE ANÁLISE SISMOGRAFICA

SN: 4508



Velocity Waveform Graph Scale:
Time = 0.100 s
Seismic = +/- 0,64 mm/s
Sound = +/- 128.00 Pa

Printed: fevereiro 4, 2002 File: evntm001.evt (GeoSonics Inc. Analysis v6.1.0)

LACASEMIN - RELATÓRIO DE ANÁLISE SISMOGRÁFICA

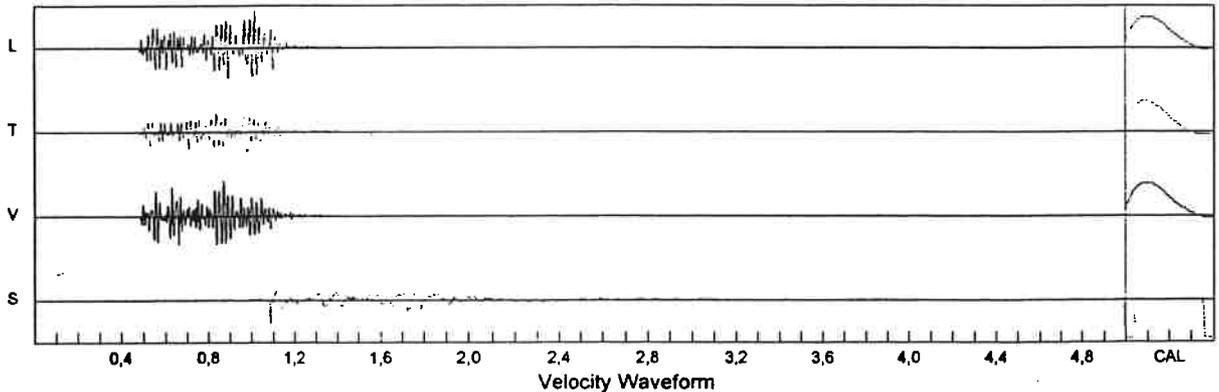
SN: 4509
Date: 11.12.2001 **Time:** 12:29:56
Event: 010 **Record Time:** 5,0 s
Client: PEDREIRA RIUMA
Operation: CURVA DE ISO-VELOCIDADES
Location: BANCADA SUP PRACA
Distance:
Operator:
Comment: UTM 23K 322622 7407897
Trigger Level: 1,78 mm/s

	Summary Data		
	L	T	V
PPV (mm/s)	6,86	4,06	6,86
PD (.01mm)	2,5	2,3	2,3
PPA (g)	0,20	0,10	0,23
FREQ (Hz)	45,5	35,7	55,6
Resultant PPV:	7,87 mm/s		
Peak Air Pressure:	138 db		
	150.00 Pa		

Shaketable Calibrated: 08.06.2001
By: GeoSonics Inc.
 P.O. Box 779
 Warrendale, PA 15095 U.S.A.
 TEL: 724.934.2900 FAX: 724.934.2999

LACASEMIN - RELATÓRIO DE ANÁLISE SISMOGRÁFICA

SN: 4509



Velocity Waveform Graph Scale:
Time = 0.100 s
Seismic = +/- 0,32 mm/s
Sound = +/- 256.00 Pa

Printed: fevereiro 4, 2002 File: evntm010.evt (GeoSonics Inc. Analysis v6.1.0)

LACASEMIN - RELATÓRIO DE ANÁLISE SISMOGRÁFICA

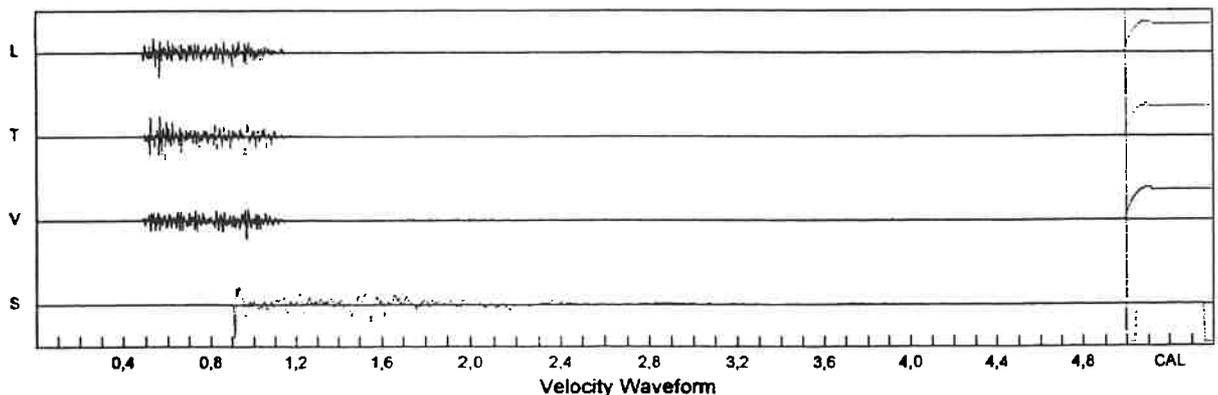
SN: 4496
Date: 11.12.2001 **Time:** 12:30:08
Event: 006 **Record Time:** 5,0 s
Client: PEDREIRA RIUMA
Operation: MAPA DE ISO-VELOCIDADES
Location:
Distance:
Operator:
Comment: UTM 23K 322593 7407827
Trigger Level: 0,51 mm/s

	Summary Data		
	L	T	V
PPV (mm/s)	4,83	4,57	3,81
PD (.01mm)	1,3	1,8	1,8
PPA (g)	0,44	0,36	0,26
FREQ (Hz)	125,0	55,6	62,5
Resultant PPV:	6,10 mm/s		
Peak Air Pressure:	141 db		
	214.00 Pa		

Shaketable Calibrated: 10.02.2001
By: GeoSonics Inc.
 P.O. Box 779
 Warrendale, PA 15095 U.S.A.
 TEL: 724.934.2900 FAX: 724.934.2999

LACASEMIN - RELATÓRIO DE ANÁLISE SISMOGRÁFICA

SN: 4496



Velocity Waveform Graph Scale:
Time = 0.100 s
Seismic = +/- 0,32 mm/s
Sound = +/- 256.00 Pa

Printed: fevereiro 4, 2002 File: evntm006.evt (GeoSonics Inc. Analysis v6.1.0)

LACASEMIN - RELATORIO DE ANALISE SISMOGRAFICA

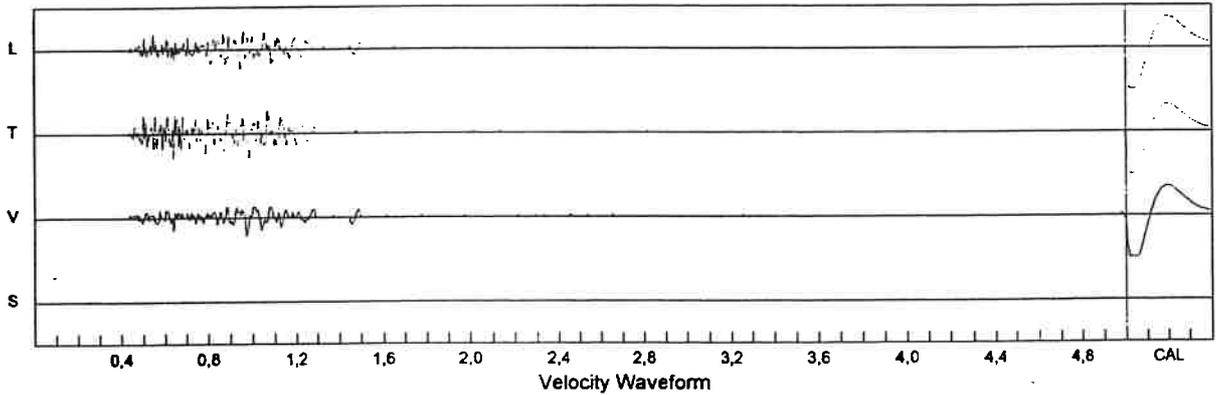
SN: 2411
Date: 11.12.2001 Time: 12:25:26
Event: 002 Record Time: 5,0 s
Client: PEDREIRA RIUMA
Operation: MAPA ISOVELOCIDADES
Location: COMP
Distance:
Operator:
Comment: UTM 23K 322703 7408051
Trigger Level: 0,51 mm/s

	L	T	V
PPV (mm/s)	2,03	2,54	1,78
PD (.01mm)	3,0	1,8	4,1
PPA (g)	0,07	0,13	0,05
FREQ (Hz)	31,2	83,3	26,3
Resultant PPV:	2,79 mm/s		
Peak Air Pressure:	100 db		
	2.00 Pa		

Shaketable Calibrated: 06.07.2001
By: GeoSonics Inc.
P.O. Box 779
Warrendale, PA 15095 U.S.A.
TEL: 724.934.2900 FAX: 724.934.2999

LACASEMIN - RELATÓRIO DE ANÁLISE SISMOGRÁFICA

SN: 2411



Velocity Waveform Graph Scale:
Time = 0.100 s
Seismic = +/- 0,16 mm/s
Sound = +/- 16.00 Pa

Printed: fevereiro 4, 2002 File: svmts002.evt (GeoSonics Inc. Analysis v6.1.8)

LACASEMIN - RELATÓRIO DE ANÁLISE SISMOGRÁFICA

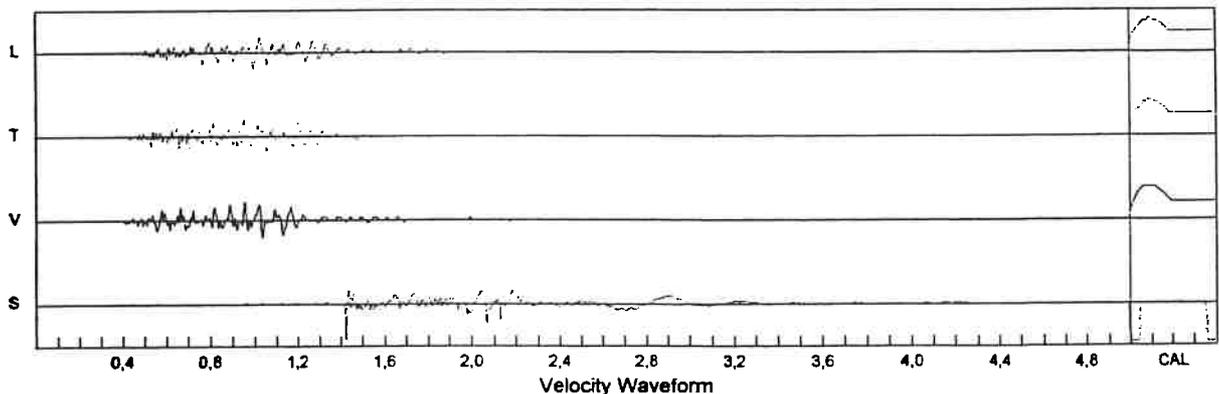
SN: 4506
Date: 11.12.2001 Time: 12:30:32
Event: 002 Record Time: 5,0 s
Client: PEDREIRA RIUMA
Operation: CURVA DE ISO-VELOCIDADES
Location: PATIO COMPRESSOR
Distance:
Operator:
Comment: UTM 23K 322679 7408038
Trigger Level: 0,76 mm/s

	L	T	V
PPV (mm/s)	1,78	1,78	1,78
PD (.01mm)	2,0	1,8	2,5
PPA (g)	0,05	0,05	0,05
FREQ (Hz)	21,7	17,2	38,5
Resultant PPV:	2,54 mm/s		
Peak Air Pressure:	129 db		
	56.00 Pa		

Shaketable Calibrated: 06.06.2001
By: GeoSonics Inc.
P.O. Box 779
Warrendale, PA 15095 U.S.A.
TEL: 724.934.2900 FAX: 724.934.2999

LACASEMIN - RELATÓRIO DE ANÁLISE SISMOGRÁFICA

SN: 4506



Velocity Waveform Graph Scale:
Time = 0.100 s
Seismic = +/- 0,16 mm/s
Sound = +/- 64.00 Pa

Printed: fevereiro 4, 2002 File: svmts002.evt (GeoSonics Inc. Analysis v6.1.8)

LACASEMIN - RELATORIO DE ANALISE SISMOGRAFICA

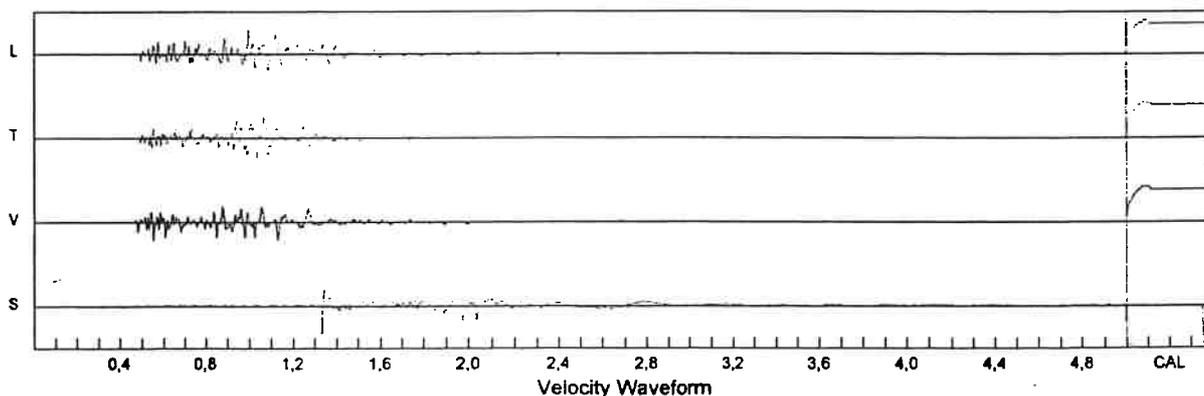
SN: 4507
Date: 11.12.2001 Time: 12:29:24
Event: 002 Record Time: 5,0 s
Client: PEDREIRA RIUMA
Operation: CURVA DE ISO-VELOCIDADES
Location: CASA COMPRESSOR
Distance:
Operator:
Comment: UTM 23K 322654 7407979
Trigger Level: 0,76 mm/s

Summary Data			
	L	T	V
PPV (mm/s)	2,29	2,03	1,78
PD (.01mm)	1,8	1,8	2,0
PPA (g)	0,05	0,07	0,05
FREQ (Hz)	22,7	13,5	31,2
Resultant PPV:	2,54 mm/s		
Peak Air Pressure:	133 db 90.00 Pa		

Shaketable Calibrated: 18.04.2000
By: GeoSonics Inc.
P.O. Box 779
Warrendale, PA 15095 U.S.A.
TEL: 724.934.2900 FAX: 724.934.2999

LACASEMIN - RELATÓRIO DE ANÁLISE SISMOGRÁFICA

SN: 4507



Velocity Waveform Graph Scale:
Time = 0.100 s
Seismic = +/- 0,16 mm/s
Sound = +/- 128.00 Pa

Printed: fevereiro 4, 2002 File: evmln002.evt (GeoSonics Inc. Analysis v4.1.8)

LACASEMIN - RELATÓRIO DE ANÁLISE SISMOGRÁFICA

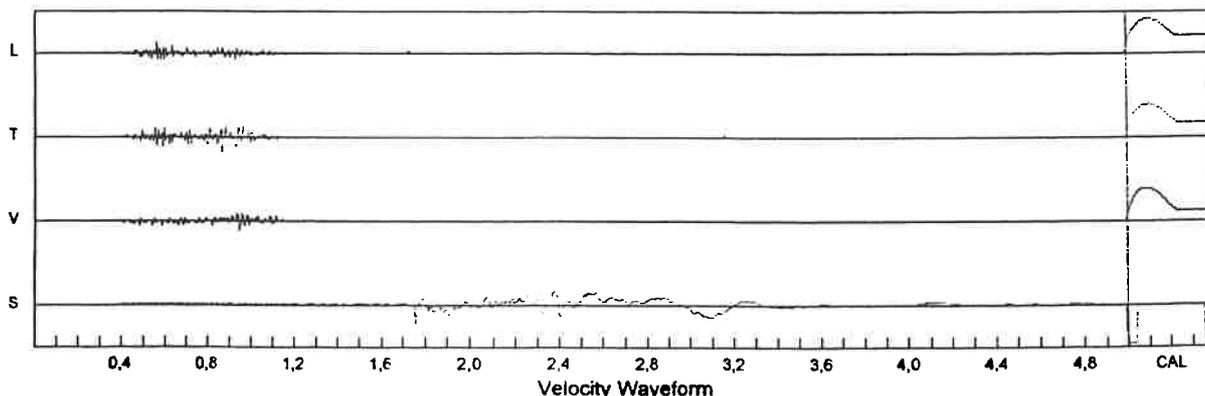
SN: 4505
Date: 11.12.2001 Time: 12:33:44
Event: 001 Record Time: 5,0 s
Client: PEDREIRA RIUMA
Operation:
Location: DIV. CONSTRUCAP
Distance:
Operator: LACASEMIN- EPUSP
Comment: 23K 322748 7408123
Trigger Level: 0,76 mm/s

Summary Data			
	L	T	V
PPV (mm/s)	1,02	1,52	1,02
PD (.01mm)	1,3	1,0	1,3
PPA (g)	0,05	0,07	0,05
FREQ (Hz)	55,6	55,6	45,5
Resultant PPV:	1,78 mm/s		
Peak Air Pressure:	124 db 32.00 Pa		

Shaketable Calibrated: 06.06.2001
By: GeoSonics Inc.
P.O. Box 779
Warrendale, PA 15095 U.S.A.
TEL: 724.934.2900 FAX: 724.934.2999

LACASEMIN - RELATÓRIO DE ANÁLISE SISMOGRÁFICA

SN: 4505



Velocity Waveform Graph Scale:
Time = 0.100 s
Seismic = +/- 0,16 mm/s
Sound = +/- 64.00 Pa

Printed: fevereiro 4, 2002 File: evmln001.evt (GeoSonics Inc. Analysis v4.1.8)

LACASEMIN - RELATORIO DE ANÁLISE SISMOGRÁFICA

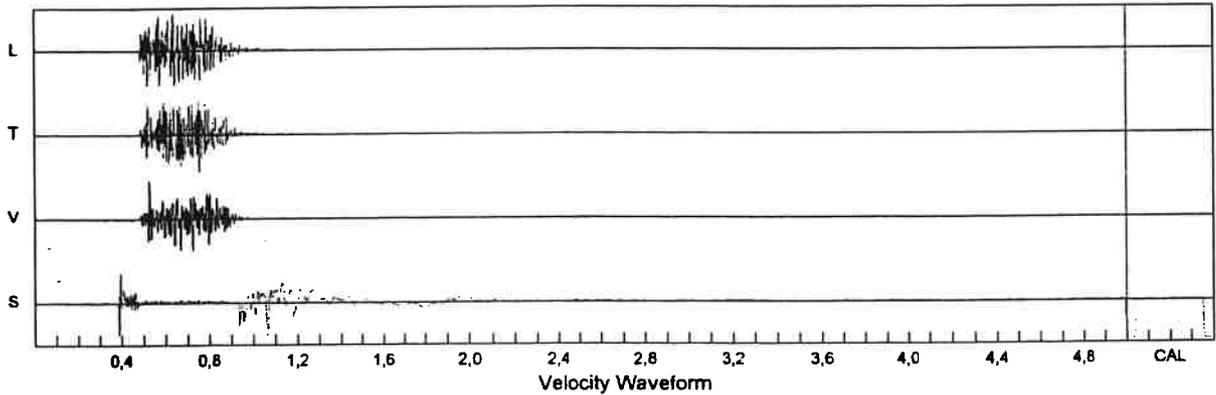
SN: 4496
Date: 19.12.2001 **Time:** 12:16:41
Event: 003 **Record Time:** 5,0 s
Client: PEDREIRA RIUMA
Operation: MAPA DE ISO-VELOCIDADES
Location:
Distance:
Operator: LACASEMIN- EPUSP
Comment: NOF:Carpe Diem.
Trigger Level: 1,78 mm/s

	Summary Data		
	L	T	V
PPV (mm/s)	7,11	7,37	7,37
PD (.01mm)	2,5	2,5	2,5
PPA (g)	0,59	0,52	0,41
FREQ (Hz)	125,0	125,0	62,5
Resultant PPV:	9,65 mm/s		
Peak Air Pressure:	141 db		
	212.00 Pa		

Shaketable Calibrated: 10.02.2001
By: GeoSonics Inc.
 P.O. Box 779
 Warrendale, PA 15095 U.S.A.
 TEL: 724.934.2900 FAX: 724.934.2999

LACASEMIN - RELATÓRIO DE ANÁLISE SISMOGRÁFICA

SN: 4496



Velocity Waveform Graph Scale:
Time = 0.100 s
Seismic = +/- 0,32 mm/s
Sound = +/- 256.00 Pa

Printed: março 27, 2002 File: evnm003.evt (GeoSonics Inc. Analysis v6.1.0)

LACASEMIN - RELATÓRIO DE ANÁLISE SISMOGRÁFICA

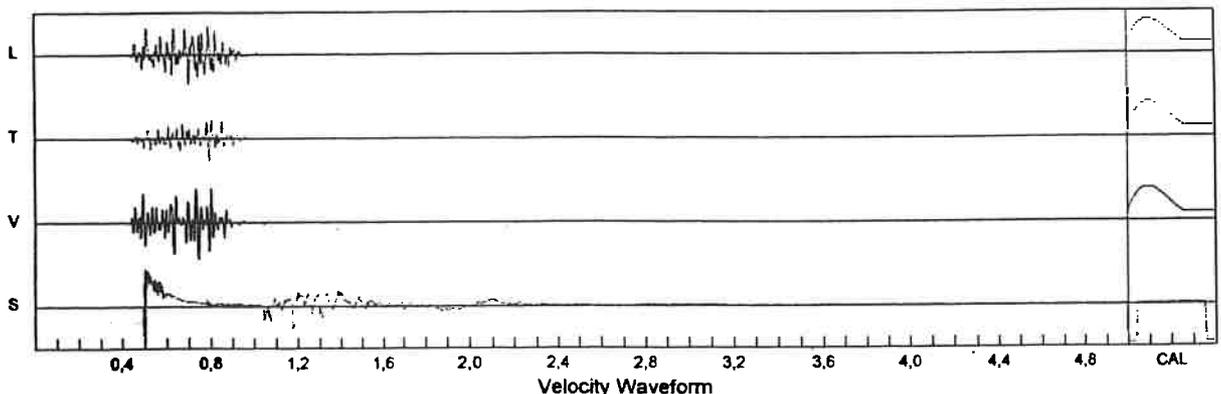
SN: 4497
Date: 19.12.2001 **Time:** 12:16:44
Event: 000 **Record Time:** 5,0 s
Client: PEDREIRA RIUMA
Operation: MAPA DE ISO-VELOCIDADES
Location: PRACA
Distance:
Operator: LACASEMIN/EPUSP
Comment: UTM 23K 322728 7407686
Trigger Level: 2,29 mm/s

	Summary Data		
	L	T	V
PPV (mm/s)	3,05	2,29	3,56
PD (.01mm)	1,5	1,3	1,5
PPA (g)	0,10	0,07	0,15
FREQ (Hz)	41,7	41,7	45,5
Resultant PPV:	4,32 mm/s		
Peak Air Pressure:	141 db		
	232.00 Pa		

Shaketable Calibrated: 10.02.2001
By: GeoSonics Inc.
 P.O. Box 779
 Warrendale, PA 15095 U.S.A.
 TEL: 724.934.2900 FAX: 724.934.2999

LACASEMIN - RELATÓRIO DE ANÁLISE SISMOGRÁFICA

SN: 4497



Velocity Waveform Graph Scale:
Time = 0.100 s
Seismic = +/- 0,16 mm/s
Sound = +/- 256.00 Pa

Printed: Setembro 4, 2002 File: evnm000.evt (GeoSonics Inc. Analysis v6.1.0)

LACASEMIN - RELATÓRIO DE ANÁLISE SISMOGRÁFICA

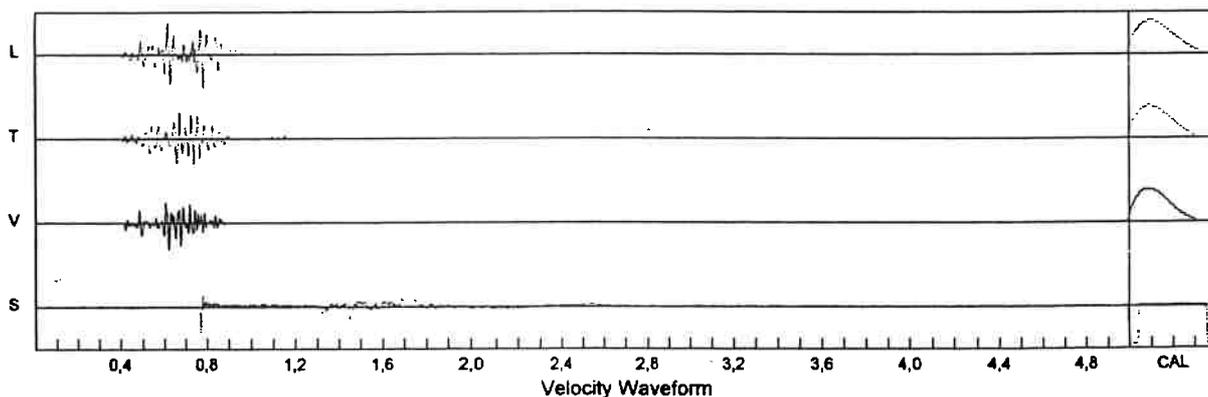
SN: 4506
Date: 19.12.2001 Time: 12:20:23
Event: 006 Record Time: 5,0 s
Client: PEDREIRA RIUMA
Operation: CURVA DE ISO-VELOCIDADES
Location: CORREGO
Distance:
Operator: LACASEMIN- EPUSP
Comment: UTM 23K 322838 7407674
Trigger Level: 1,78 mm/s

Summary Data			
	L	T	V
PPV (mm/s)	3,56	2,79	2,79
PD (.01mm)	1,8	1,5	1,5
PPA (g)	0,07	0,07	0,07
FREQ (Hz)	41,7	41,7	50,0
Resultant PPV:	4,06 mm/s		
Peak Air Pressure:	138 db		
	168,00 Pa		

Shaketable Calibrated: 06.06.2001
By: GeoSonics Inc.
P.O. Box 779
Warrendale, PA 15095 U.S.A.
TEL: 724.934.2900 FAX: 724.934.2999

LACASEMIN - RELATÓRIO DE ANÁLISE SISMOGRÁFICA

SN: 4506



Velocity Waveform Graph Scale:
Time = 0.100 s
Seismic = +/- 0,16 mm/s
Sound = +/- 256.00 Pa

Printed: fevereiro 4, 2002 File: evnta006.evt (GeoSonics Inc. Analysis v6.1.0)

LACASEMIN - RELATÓRIO DE ANÁLISE SISMOGRÁFICA

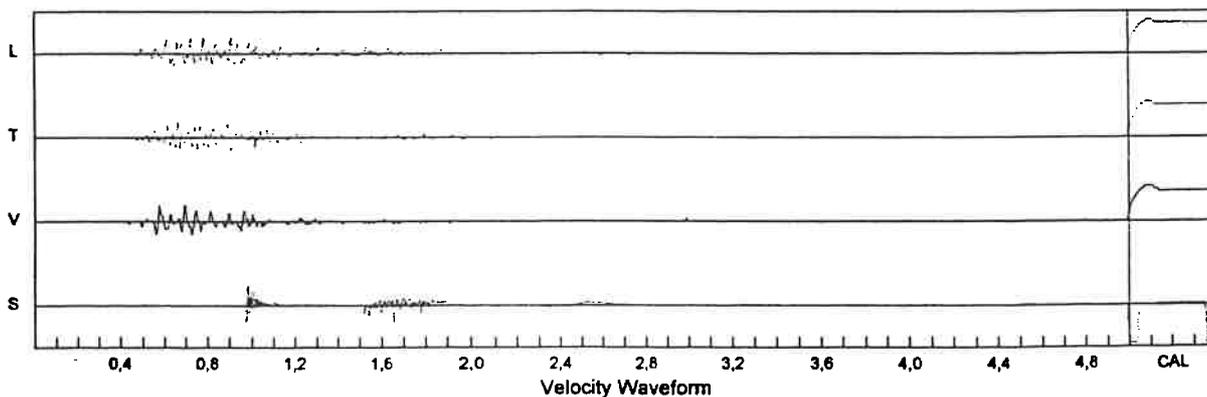
SN: 4507
Date: 19.12.2001 Time: 12:20:14
Event: 000 Record Time: 5,0 s
Client: PEDREIRA RIUMA
Operation: CURVA DE ISO-VELOCIDADES
Location: TOPO TALUDE
Distance:
Operator: LACASEMIN- EPUSP
Comment: UTM 23K 322907 7407652
Trigger Level: 0,76 mm/s

Summary Data			
	L	T	V
PPV (mm/s)	1,52	1,52	1,52
PD (.01mm)	1,5	1,5	1,5
PPA (g)	0,05	0,05	0,05
FREQ (Hz)	29,4	35,7	22,7
Resultant PPV:	2,29 mm/s		
Peak Air Pressure:	136 db		
	128,00 Pa		

Shaketable Calibrated: 18.04.2000
By: GeoSonics Inc.
P.O. Box 779
Warrendale, PA 15095 U.S.A.
TEL: 724.934.2900 FAX: 724.934.2999

LACASEMIN - RELATÓRIO DE ANÁLISE SISMOGRÁFICA

SN: 4507



Velocity Waveform Graph Scale:
Time = 0.100 s
Seismic = +/- 0,16 mm/s
Sound = +/- 256.00 Pa

Printed: fevereiro 4, 2002 File: evnta000.evt (GeoSonics Inc. Analysis v6.1.0)

LACASEMIN - RELATÓRIO DE ANÁLISE SISMOGRÁFICA

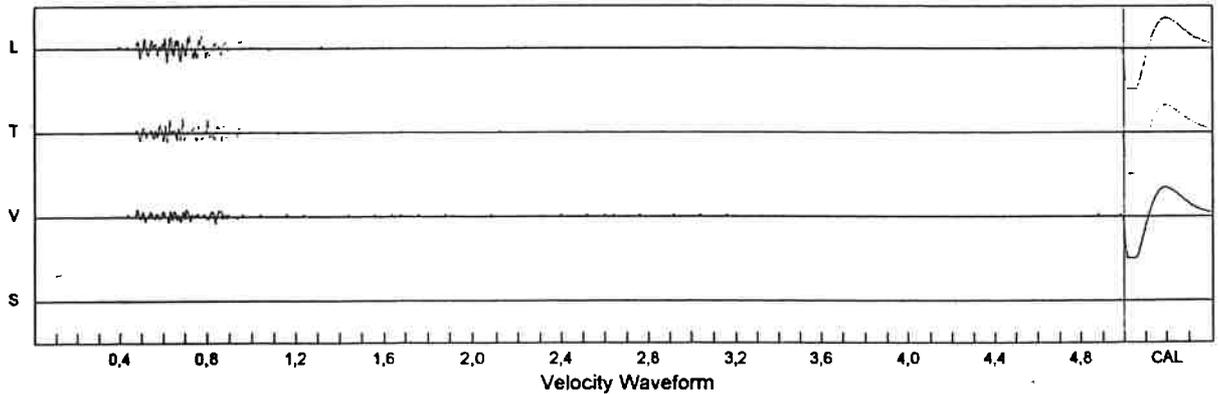
SN: 2411
Date: 19.12.2001 Time: 12:11:02
Event: 003 Record Time: 5,0 s
Client: PEDREIRA RIUMA
Operation: MAPA ISOVELOCIDADES
Location: DIV COND VISTA LINDA
Distance:
Operator:
Comment: UTM 23K 323038 7407613
Trigger Level: 0,51 mm/s

	L	T	V
PPV (mm/s)	1,52	1,52	0,76
PD (.01mm)	2,8	1,3	3,8
PPA (g)	0,07	0,05	0,02
FREQ (Hz)	38,5	45,5	17,2
Resultant PPV:	2,03 mm/s		
Peak Air Pressure:	100 db		
	0.00 Pa		

Shaketable Calibrated: 06.07.2001
By: GeoSonics Inc.
P.O. Box 779
Warrendale, PA 15095 U.S.A.
TEL: 724.934.2900 FAX: 724.934.2999

LACASEMIN - RELATÓRIO DE ANÁLISE SISMOGRÁFICA

SN: 2411



Velocity Waveform Graph Scale:
Time = 0.100 s
Seismic = +/- 0.16 mm/s
Sound = +/- 16.00 Pa

Printed: fevereiro 4, 2002 File: evnts003.wvt (GeoSonics Inc. Analysis v6.1.0)

LACASEMIN - RELATÓRIO DE ANÁLISE SISMOGRÁFICA

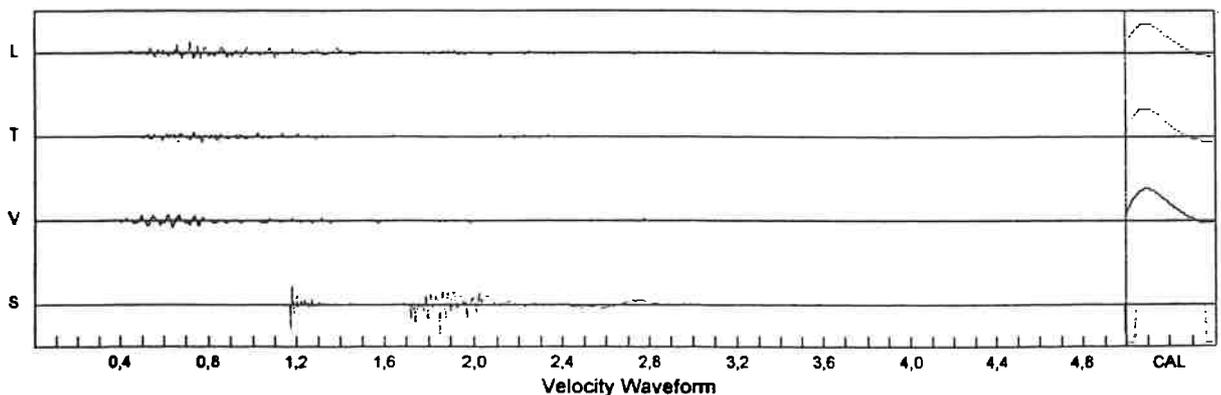
SN: 4509
Date: 19.12.2001 Time: 12:20:18
Event: 000 Record Time: 5,0 s
Client: PEDREIRA RIUMA
Operation: CURVA DE ISO-VELOCIDADES
Location: COND VISTA LINDA
Distance:
Operator: LACASEMIN- EPUSP
Comment: UTM 23K 322980 7407592
Trigger Level: 0,51 mm/s

	L	T	V
PPV (mm/s)	1,02	0,76	0,76
PD (.01mm)	2,3	1,3	1,3
PPA (g)	0,05	0,05	0,02
FREQ (Hz)	20,8	38,5	27,8
Resultant PPV:	1,02 mm/s		
Peak Air Pressure:	134 db		
	96.00 Pa		

Shaketable Calibrated: 08.06.2001
By: GeoSonics Inc.
P.O. Box 779
Warrendale, PA 15095 U.S.A.
TEL: 724.934.2900 FAX: 724.934.2999

LACASEMIN - RELATÓRIO DE ANÁLISE SISMOGRÁFICA

SN: 4509



Velocity Waveform Graph Scale:
Time = 0.100 s
Seismic = +/- 0.16 mm/s
Sound = +/- 128.00 Pa

Printed: fevereiro 4, 2002 File: evnts000.wvt (GeoSonics Inc. Analysis v6.1.0)

LACASEMIN - RELATÓRIO DE ANÁLISE SISMOGRÁFICA

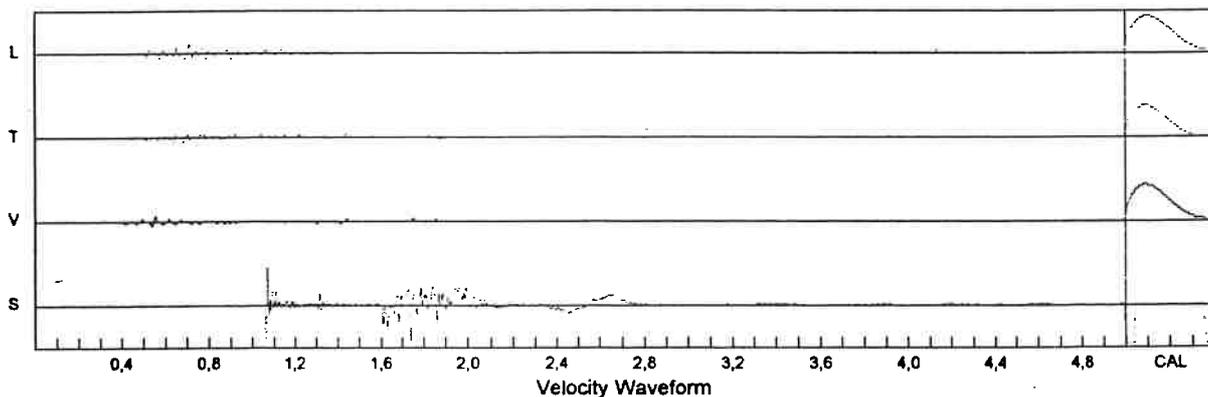
SN: 4508
Date: 19.12.2001 Time: 12:17:32
Event: 000 Record Time: 5,0 s
Client: PEDREIRA RIUMA
Operation: MAPA DE ISO-VELOCIDADES
Location: COND VISTA LINDA 2
Distance:
Operator: LACASEMIN- EPUSP
Comment: UTM 23K 322949 7407623
Trigger Level: 0,76 mm/s

Summary Data			
	L	T	V
PPV (mm/s)	0,76	0,76	0,51
PD (.01mm)	0,8	2,0	1,0
PPA (g)	0,02	0,05	0,02
FREQ (Hz)	22,7	35,7	13,9
Resultant PPV:	1,02 mm/s		
Peak Air Pressure:	130 db		
	62.00 Pa		

Shaketable Calibrated: 08.06.2001
By: GeoSonics Inc.
P.O. Box 779
Warrendale, PA 15095 U.S.A.
TEL: 724.934.2900 FAX: 724.934.2999

LACASEMIN - RELATÓRIO DE ANÁLISE SISMOGRÁFICA

SN: 4508



LACASEMIN - RELATÓRIO DE ANÁLISE SISMOGRÁFICA

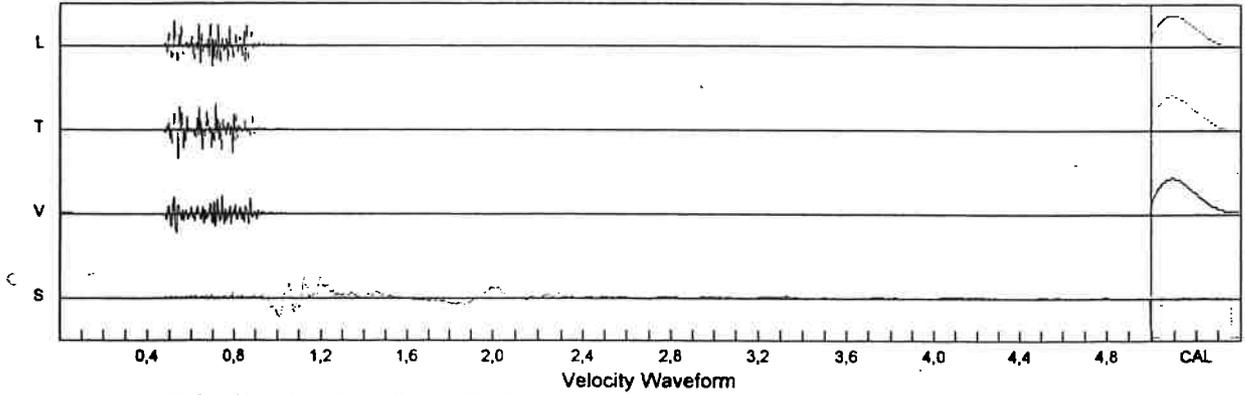
SN: 4507
Date: 20.12.2001 Time: 12:14:49
Event: 001 Record Time: 5,0 s
Client: PEDREIRA RIUMA
Operation: MAPA DE ISO-VELOCIDADES
Location:
Distance:
Operator: LACASEMIN- EPUSP
Comment: UTM 23K 322378 7407752
Trigger Level: 1,78 mm/s

Summary Data			
	L	T	V
PPV (mm/s)	4,83	5,84	3,81
PD (.01mm)	1,8	2,0	2,5
PPA (g)	0,20	0,28	0,15
FREQ (Hz)	45,5	41,7	50,0
Resultant PPV:	6,86 mm/s		
Peak Air Pressure:	125 db		
	34,00 Pa		

Shaketable Calibrated: 18.04.2000
By: GeoSonics Inc.
P.O. Box 779
Warrendale, PA 15095 U.S.A.
TEL: 724.934.2900 FAX: 724.934.2999

LACASEMIN - RELATÓRIO DE ANÁLISE SISMOGRÁFICA

SN: 4507



Velocity Waveform Graph Scale:
Time = 0.100 s
Seismic = +/- 0.32 mm/s
Sound = +/- 64.00 Pa

Inted: Fevereiro 4, 2002 File: evntm001.evt (GeoSonics Inc. Analysis v6.1.0)

LACASEMIN - RELATÓRIO DE ANÁLISE SISMOGRÁFICA

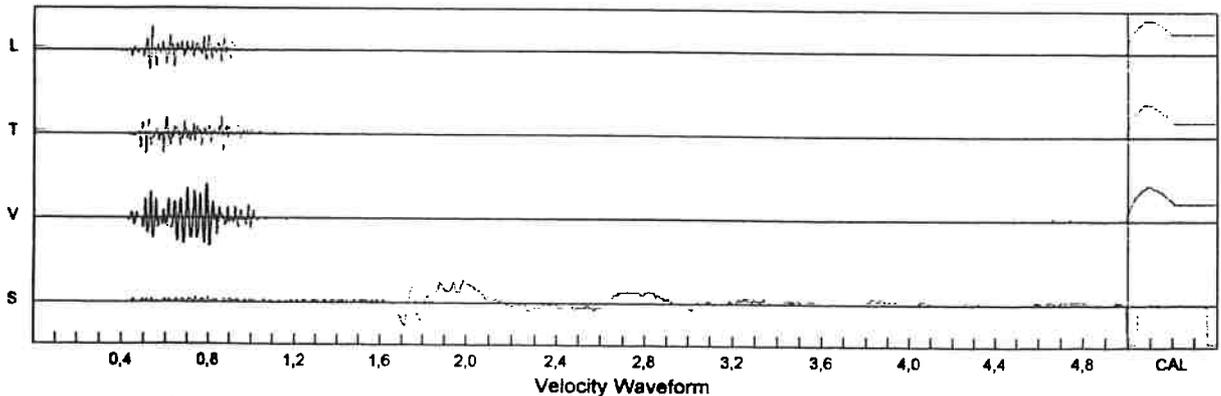
SN: 4496
Date: 20.12.2001 Time: 12:14:51
Event: 000 Record Time: 5,0 s
Client: PEDREIRA RIUMA
Operation: MAPA DE ISO-VELOCIDADES
Location:
Distance:
Operator: LACASEMIN- EPUSP
Comment: UTM 23K 322142 7407912
Trigger Level: 1,52 mm/s

Summary Data			
	L	T	V
PPV (mm/s)	2,29	2,03	3,30
PD (.01mm)	1,8	1,8	1,8
PPA (g)	0,07	0,07	0,10
FREQ (Hz)	31,2	55,6	33,3
Resultant PPV:	3,56 mm/s		
Peak Air Pressure:	119 db		
	18,00 Pa		

Shaketable Calibrated: 10.02.2001
By: GeoSonics Inc.
P.O. Box 779
Warrendale, PA 15095 U.S.A.
TEL: 724.934.2900 FAX: 724.934.2999

LACASEMIN - RELATÓRIO DE ANÁLISE SISMOGRÁFICA

SN: 4496



Velocity Waveform Graph Scale:
Time = 0.100 s
Seismic = +/- 0.16 mm/s
Sound = +/- 32.00 Pa

Inted: Fevereiro 4, 2002 File: evntm000.evt (GeoSonics Inc. Analysis v6.1.0)

LACASEMIN - RELATÓRIO DE ANÁLISE SISMOGRÁFICA

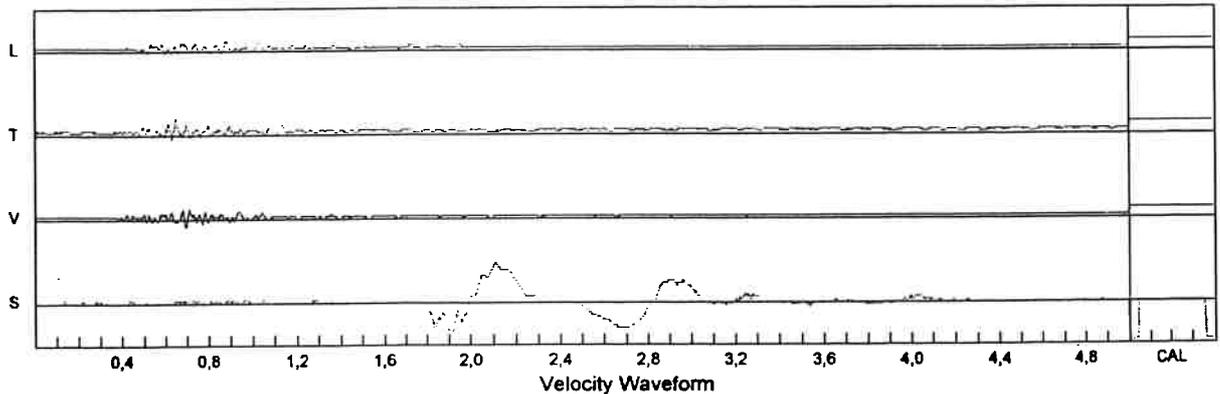
SN: 4495
Date: 20.12.2001 Time: 12:10:52
Event: 002 Record Time: 5,0 s
Client: PEDREIRA RIUMA
Operation: MAPA DE ISO-VELOCIDADES
Location: MAPA DE ISO-VELOCIDADES
Distance:
Operator: LACASEMIN- EPUSP.
Comment: 23K 322062 7407930
Trigger Level: 0,76 mm/s

Summary Data			
	L	T	V
PPV (mm/s)	1,02	1,78	1,02
PD (.01mm)	1,0	2,3	2,8
PPA (g)	0,02	0,05	0,02
FREQ (Hz)	2,5	11,4	12,2
Resultant PPV:	2,03 mm/s		
Peak Air Pressure:	124 db 30.00 Pa		

Shaketable Calibrated: 10.02.2001
By: GeoSonics Inc.
P.O. Box 779
Warrendale, PA 15095 U.S.A.
TEL: 724.934.2900 FAX: 724.934.2999

LACASEMIN - RELATÓRIO DE ANÁLISE SISMOGRÁFICA

SN: 4495



Velocity Waveform Graph Scale:
Time = 0.100 s
Seismic = +/- 0,16 mm/s
Sound = +/- 32.00 Pa

Printed: fevereiro 4, 2002 File: evntm002.evt (GeoSonics Inc. Analysis v6.1.0)

LACASEMIN - RELATÓRIO DE ANÁLISE SISMOGRÁFICA

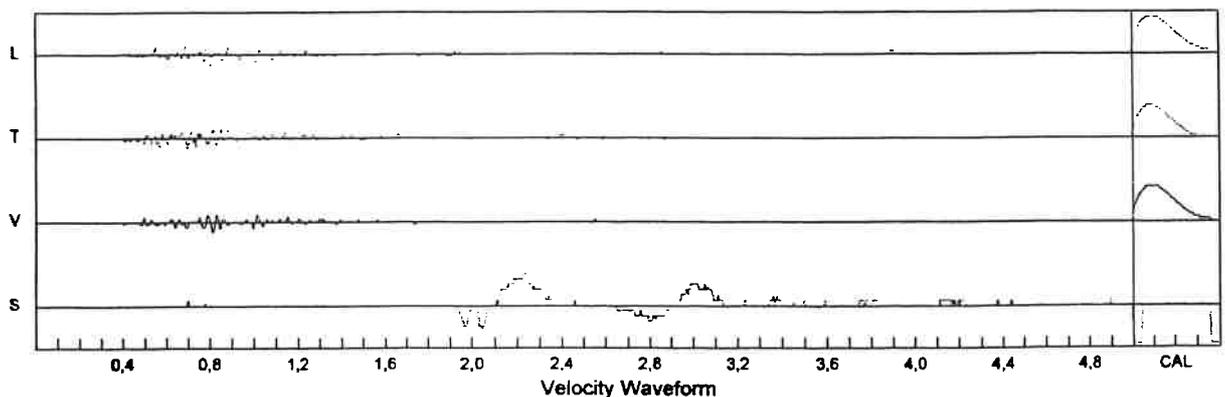
SN: 4508
Date: 20.12.2001 Time: 12:14:52
Event: 008 Record Time: 5,0 s
Client: PEDREIRA RIUMA
Operation: MAPA DE ISO-VELOCIDADES
Location: COND VISTA LINDA 2
Distance:
Operator: LACASEMIN- EPUSP
Comment: UTM 23K 322004 7407929
Trigger Level: 0,76 mm/s

Summary Data			
	L	T	V
PPV (mm/s)	1,02	1,02	1,02
PD (.01mm)	2,3	2,3	1,5
PPA (g)	0,02	0,05	0,05
FREQ (Hz)	35,7	100,0	29,4
Resultant PPV:	1,52 mm/s		
Peak Air Pressure:	116 db 12.00 Pa		

Shaketable Calibrated: 08.06.2001
By: GeoSonics Inc.
P.O. Box 779
Warrendale, PA 15095 U.S.A.
TEL: 724.934.2900 FAX: 724.934.2999

LACASEMIN - RELATÓRIO DE ANÁLISE SISMOGRÁFICA

SN: 4508



Velocity Waveform Graph Scale:
Time = 0.100 s
Seismic = +/- 0,16 mm/s
Sound = +/- 16.00 Pa

Printed: fevereiro 4, 2002 File: evntm008.evt (GeoSonics Inc. Analysis v6.1.0)

LACASEMIN - RELATORIO DE ANALISE SISMOGRAFICA

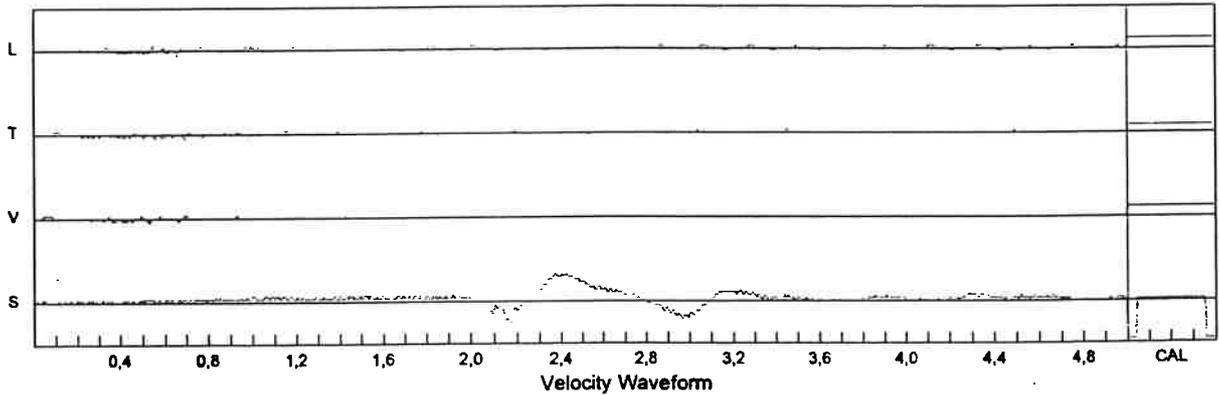
SN: 4505
Date: 20.12.2001 Time: 12:14:51
Event: 003 Record Time: 5,0 s
Client: PEDREIRA RIUMA
Operation: CURVA DE ISO-VELOCIDADES
Location: PRACA
Distance:
Operator: LACASEMIN- EPUSP
Comment: UTM23K 3218517407981
Trigger Level: 0,76 mm/s

	Summary Data		
	L	T	V
PPV (mm/s)	0,76	0,51	0,51
PD (.01mm)	1,5	2,0	0,8
PPA (g)	0,05	0,02	0,02
FREQ (Hz)	27,8	29,4	33,3
Resultant PPV:	0,76 mm/s		
Peak Air Pressure:	120 db		
	20.00 Pa		

Shaketable Calibrated: 06.06.2001
By: GeoSonics Inc.
P.O. Box 779
Warrendale, PA 15095 U.S.A.
TEL: 724.934.2900 FAX: 724.934.2999

LACASEMIN - RELATÓRIO DE ANÁLISE SISMOGRÁFICA

SN: 4505



Velocity Waveform Graph Scale:
Time = 0.100 s
Seismic = +/- 0,16 mm/s
Sound = +/- 32.00 Pa

LACASEMIN - RELATÓRIO DE ANÁLISE SISMOGRÁFICA

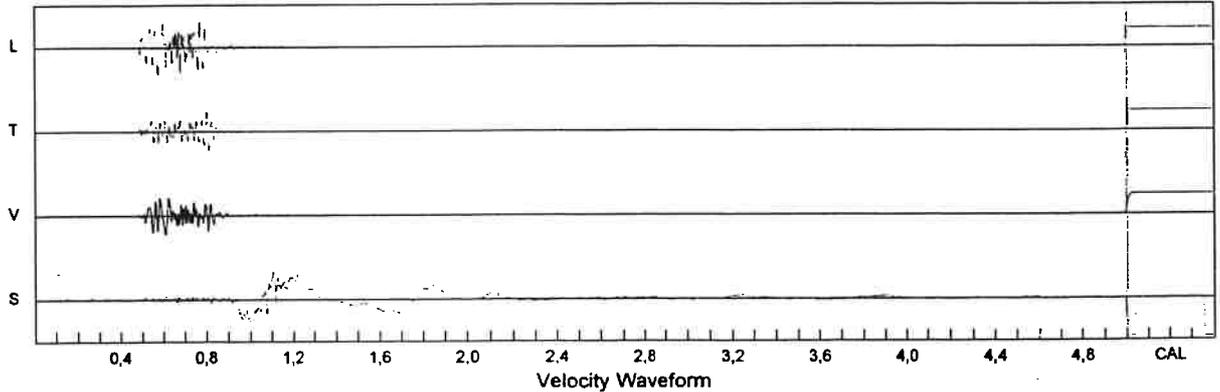
SN: 4507
Date: 10.01.2002 Time: 12:26:16
Event: 001 Record Time: 5,0 s
Client: PEDREIRA RIUMA
Operation: MAPA DE ISO-VELOCIDADES
Location:
Distance:
Operator: LACASEMIN/EPUSP
Comment: UTM 322426 7407872
Trigger Level: 2,29 mm/s

	Summary Data		
	L	T	V
PPV (mm/s)	10,92	7,62	7,37
PD (.01mm)	5,1	3,0	4,8
PPA (g)	0,41	0,23	0,23
FREQ (Hz)	27,8	45,5	20,8
Resultant PPV:	11,68 mm/s		
Peak Air Pressure:	134 db		
	98.00 Pa		

Shaketable Calibrated: 08.06.2001
By: GeoSonics Inc.
P.O. Box 779
Warrendale, PA 15095 U.S.A.
TEL: 724.934.2900 FAX: 724.934.2999

LACASEMIN - RELATÓRIO DE ANÁLISE SISMOGRÁFICA

SN: 4507



Velocity Waveform Graph Scale:
Time = 0.100 s
Seismic = +/- 0,64 mm/s
Sound = +/- 128.00 Pa

Printed: março 27, 2002 File: evnlm001.evt (GeoSonics Inc. Analysis v6.1.8)

LACASEMIN - RELATÓRIO DE ANÁLISE SISMOGRÁFICA

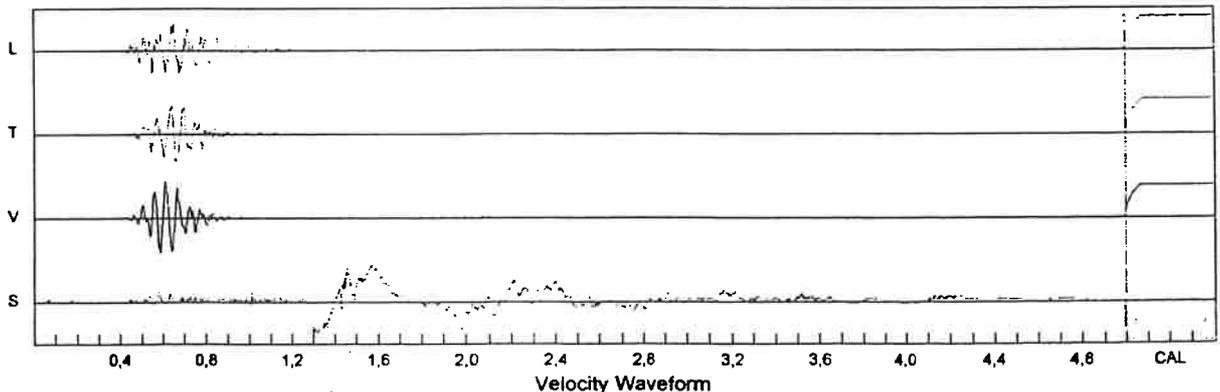
SN: 4497
Date: 10.01.2002 Time: 12:26:15
Event: 001 Record Time: 5.0 s
Client: PEDREIRA RIUMA
Operation: MAPA DE ISO-VELOCIDADES
Location:
Distance:
Operator: LACASEMIN/EPUSP
Comment: UTM 322346 7408006
Trigger Level: 2,29 mm/s

	Summary Data		
	L	T	V
PPV (mm/s)	5,33	5,59	7,11
PD (.01mm)	4,6	5,3	5,8
PPA (g)	0,10	0,13	0,10
FREQ (Hz)	18,5	16,7	17,2
Resultant PPV:	9,14 mm/s		
Peak Air Pressure:	123 db		
	28.00 Pa		

Shaketable Calibrated: 10.02.2001
By: GeoSonics Inc.
P.O. Box 779
Warrendale, PA 15095 U.S.A.
TEL: 724.934.2900 FAX: 724.934.2999

LACASEMIN - RELATÓRIO DE ANÁLISE SISMOGRÁFICA

SN: 4497



Velocity Waveform Graph Scale:
Time = 0.100 s
Seismic = +/- 0,32 mm/s
Sound = +/- 32.00 Pa

Printed: março 27, 2002 File: evnlm001.evt (GeoSonics Inc. Analysis v6.1.8)

LACASEMIN - RELATORIO DE ANALISE SISMOGRAFICA

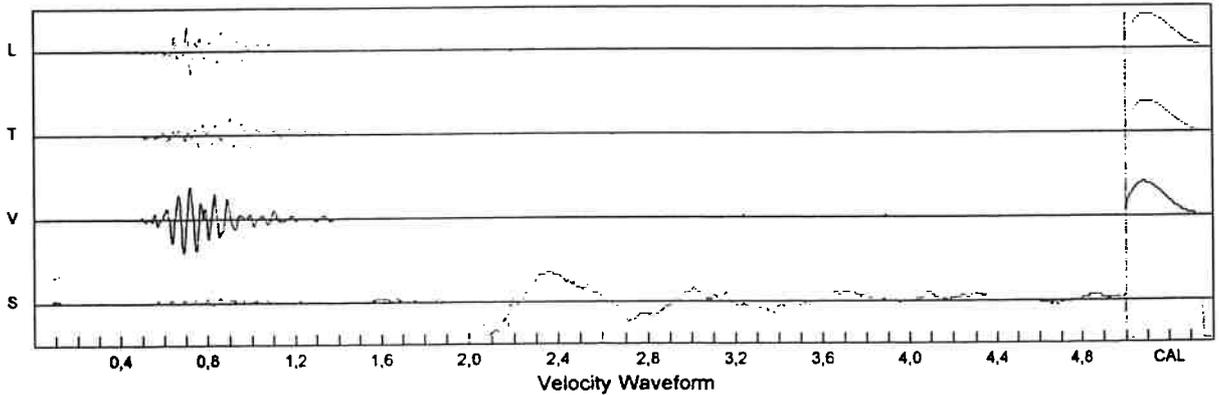
SN: 4505
Date: 10.01.2002 **Time:** 12:26:16
Event: 002 **Record Time:** 5,0 s
Client: PEDREIRA RIUMA
Operation: MAPA DE ISO-VELOCIDADES
Location: CORREGO
Distance:
Operator: LACASEMIN/EPUSP
Comment: UTM 322270 7408256
Trigger Level: 0,51 mm/s

	L	T	V
PPV (mm/s)	2,29	1,78	3,30
PD (.01mm)	1,5	2,3	2,8
PPA (g)	0,05	0,05	0,05
FREQ (Hz)	23,8	13,2	19,2
Resultant PPV:	3,56 mm/s		
Peak Air Pressure:	122 db		
	26,00 Pa		

Shaketable Calibrated: 06.06.2001
By: GeoSonics Inc.
P.O. Box 779
Warrendale, PA 15095 U.S.A.
TEL: 724.934.2900 FAX: 724.934.2999

LACASEMIN - RELATÓRIO DE ANÁLISE SISMOGRÁFICA

SN: 4505



Velocity Waveform Graph Scale:
Time = 0.100 s
Seismic = +/- 0,16 mm/s
Sound = +/- 32.00 Pa

Printed: março 27, 2002 File: evntm002.evt (GeoSonics Inc. Analysis v6.1.0)

LACASEMIN - RELATÓRIO DE ANÁLISE SISMOGRÁFICA

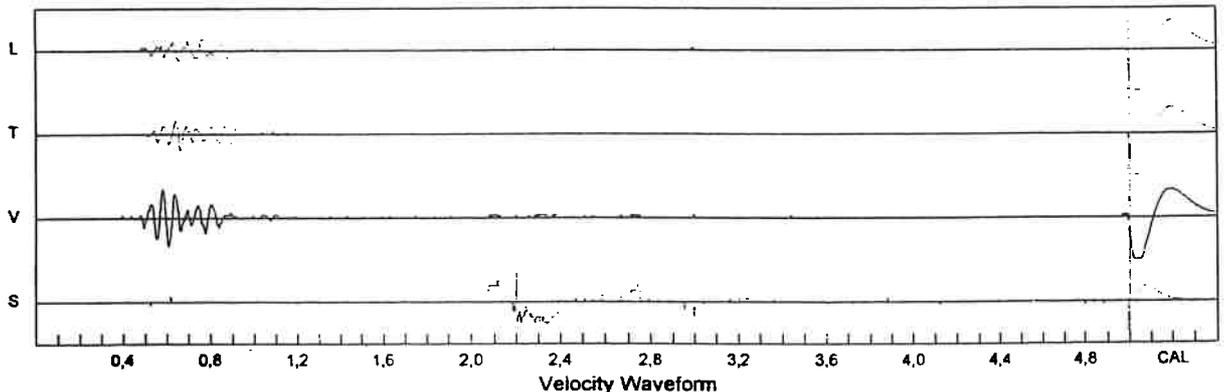
SN: 2411
Date: 10.01.2002 **Time:** 12:23:54
Event: 005 **Record Time:** 5,0 s
Client: PEDREIRA RIUMA
Operation: MAPA ISOVELOCIDADES
Location: PROX. OFICINA
Distance:
Operator:
Comment: UTM 322261 7408312
Trigger Level: 0,51 mm/s

	L	T	V
PPV (mm/s)	1,02	1,52	2,79
PD (.01mm)	2,0	1,5	3,8
PPA (g)	0,02	0,02	0,05
FREQ (Hz)	20,0	23,8	16,7
Resultant PPV:	3,05 mm/s		
Peak Air Pressure:	116 db		
	12,00 Pa		

Shaketable Calibrated: 06.07.2001
By: GeoSonics Inc.
P.O. Box 779
Warrendale, PA 15095 U.S.A.
TEL: 724.934.2900 FAX: 724.934.2999

LACASEMIN - RELATÓRIO DE ANÁLISE SISMOGRÁFICA

SN: 2411



Velocity Waveform Graph Scale:
Time = 0.100 s
Seismic = +/- 0,16 mm/s
Sound = +/- 16.00 Pa

Printed: março 27, 2002 File: evntm005.evt (GeoSonics Inc. Analysis v6.1.0)

LACASEMIN - RELATÓRIO DE ANÁLISE SISMOGRÁFICA

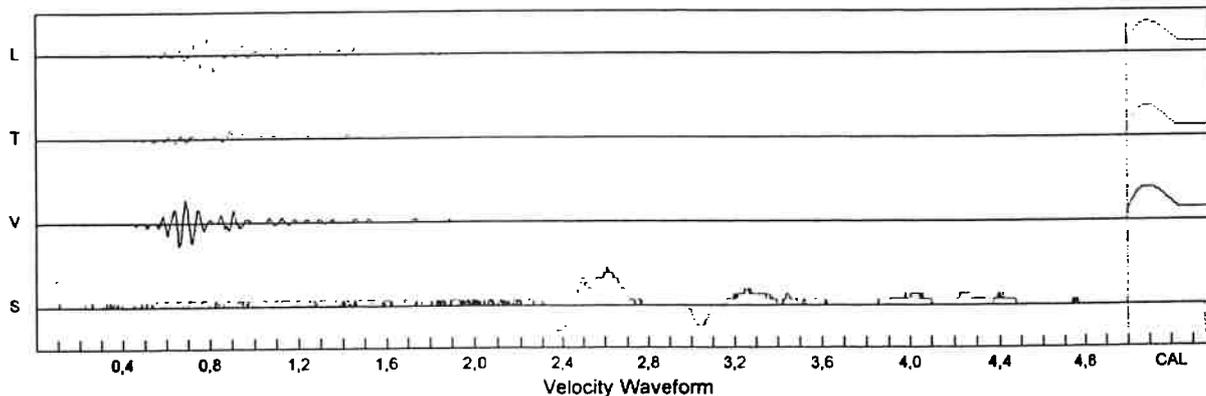
SN: 4509
Date: 10.01.2002 Time: 12:26:17
Event: 001 Record Time: 5,0 s
Client: PEDREIRA RIUMA
Operation: MAPA DE ISO-VELOCIDADES
Location: CAMPO FUT.
Distance:
Operator: LACASEMIN/EPUSP
Comment: UTM 322297 7408402
Trigger Level: 0,51 mm/s

Summary Data			
	L	T	V
PPV (mm/s)	1,78	0,76	2,29
PD (.01mm)	2,5	1,8	3,0
PPA (g)	0,05	0,02	0,05
FREQ (Hz)	21,7	11,6	16,1
Resultant PPV:	2,54 mm/s		
Peak Air Pressure:	117 db		
	14.00 Pa		

Shaketable Calibrated: 08.06.2001
By: GeoSonics Inc.
P.O. Box 779
Warrendale, PA 15095 U.S.A.
TEL: 724.934.2900 FAX: 724.934.2999

LACASEMIN - RELATÓRIO DE ANÁLISE SISMOGRÁFICA

SN: 4509



Velocity Waveform Graph Scale:
Time = 0.100 s
Seismic = +/- 0,16 mm/s
Sound = +/- 16.00 Pa

LACASEMIN - RELATÓRIO DE ANÁLISE SISMOGRÁFICA

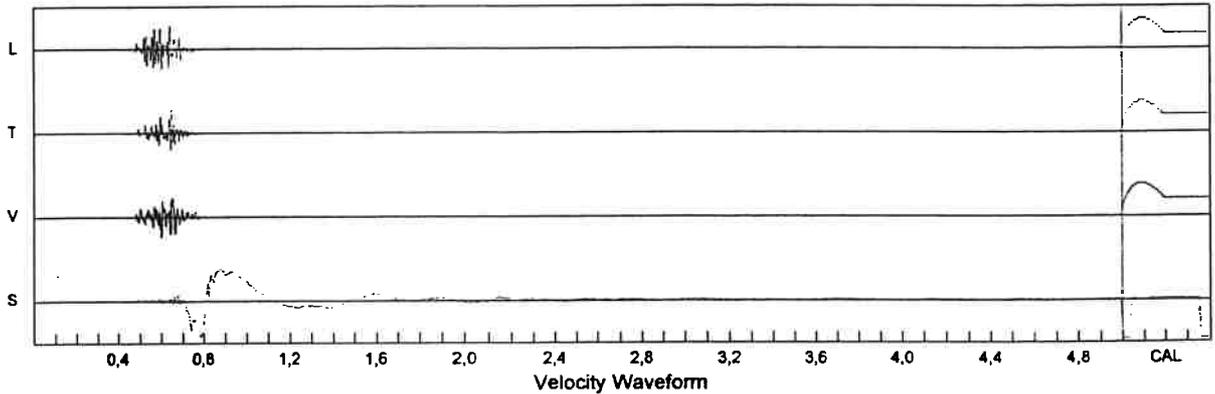
SN: 4507
Date: 16.01.2002 Time: 12:29:28
Event: 002 Record Time: 5,0 s
Client: PEDREIRA RIUMA
Operation: MAPA DE ISO-VELOCIDADES
Location: PRACA + PROX.
Distance:
Operator: LACASEMIN/EPUSP
Comment: NOF:Carpe Diem.
Trigger Level: 3,05 mm/s

Summary Data			
	L	T	V
PPV (mm/s)	18,03	18,54	16,26
PD (.01mm)	5,1	3,8	6,9
PPA (g)	1,17	1,14	1,14
FREQ (Hz)	62,5	100,0	50,0
Resultant PPV:	23,37 mm/s		
Peak Air Pressure:	141 db		
	224.00 Pa		

Shaketable Calibrated: 08.06.2001
By: GeoSonics Inc.
P.O. Box 779
Warrendale, PA 15095 U.S.A.
TEL: 724.934.2900 FAX: 724.934.2999

LACASEMIN - RELATÓRIO DE ANÁLISE SISMOGRÁFICA

SN: 4507



Velocity Waveform Graph Scale:
Time = 0.100 s
Seismic = +/- 1,28 mm/s
Sound = +/- 256.00 Pa

Printed: março 27, 2002 File: evntm002.evt (GeoSonics Inc. Analysis v6.1.0)

LACASEMIN - RELATÓRIO DE ANÁLISE SISMOGRÁFICA

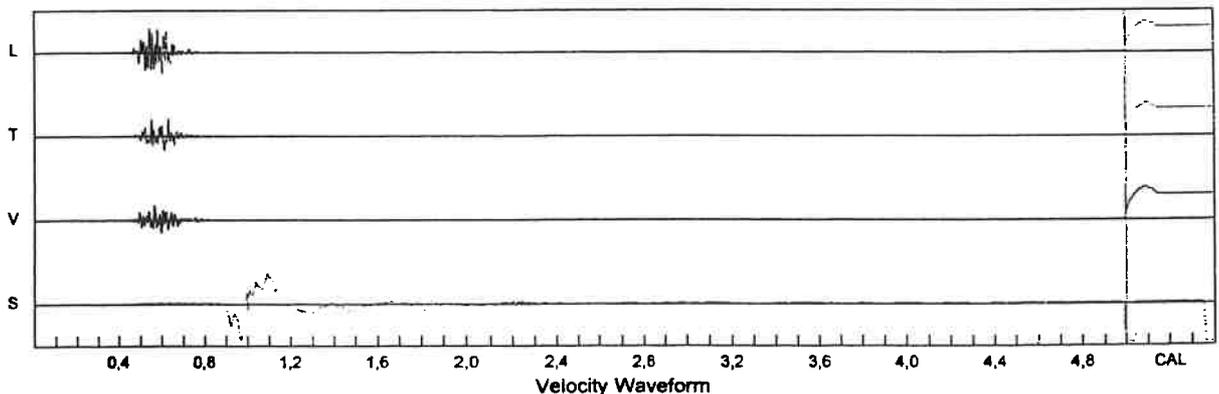
SN: 4506
Date: 16.01.2002 Time: 12:29:30
Event: 000 Record Time: 5,0 s
Client: PEDREIRA RIUMA
Operation: CURVA DE ISO-VELOCIDADES
Location:
Distance:
Operator: LACASEMIN- EPUSP
Comment: NOF:Carpe Diem.
Trigger Level: 2,79 mm/s

Summary Data			
	L	T	V
PPV (mm/s)	9,40	7,37	5,84
PD (.01mm)	3,0	2,8	2,0
PPA (g)	0,39	0,28	0,20
FREQ (Hz)	62,5	55,6	45,5
Resultant PPV:	9,65 mm/s		
Peak Air Pressure:	135 db		
	114.00 Pa		

Shaketable Calibrated: 06.06.2001
By: GeoSonics Inc.
P.O. Box 779
Warrendale, PA 15095 U.S.A.
TEL: 724.934.2900 FAX: 724.934.2999

LACASEMIN - RELATÓRIO DE ANÁLISE SISMOGRÁFICA

SN: 4506



Velocity Waveform Graph Scale:
Time = 0.100 s
Seismic = +/- 0,64 mm/s
Sound = +/- 128.00 Pa

Printed: março 27, 2002 File: evntm000.evt (GeoSonics Inc. Analysis v6.1.0)

LACASEMIN - RELATORIO DE ANALISE SISMOGRAFICA

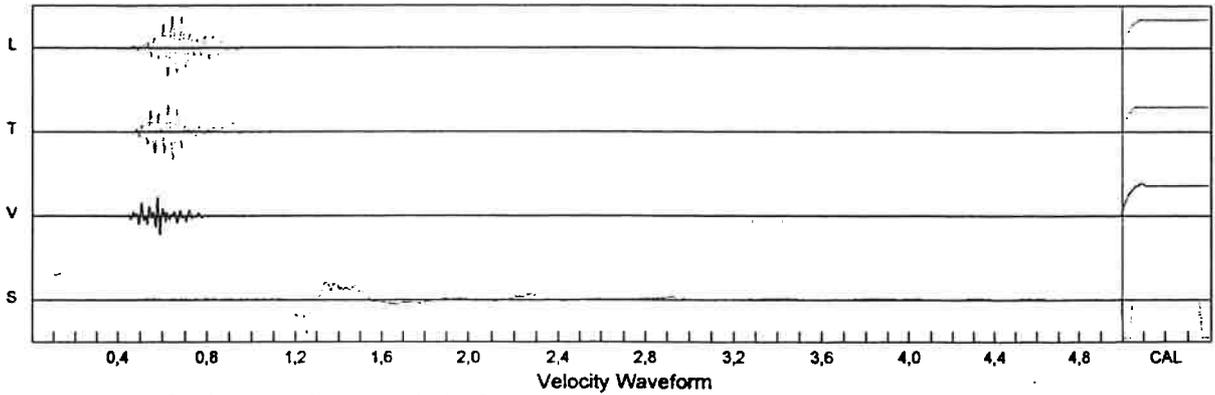
SN: 4509
 Date: 16.01.2002 Time: 12:29:29
 Event: 000 Record Time: 5,0 s
 Client: PEDREIRA RIUMA
 Operation: MAPA DE ISO-VELOCIDADES
 Location:
 Distance:
 Operator: LACASEMIN/EPUSP
 Comment: NOF:Carpe Diem.
 Trigger Level: 1,52 mm/s

	L	T	V
PPV (mm/s)	5,84	5,59	3,81
PD (.01mm)	3,8	3,0	1,5
PPA (g)	0,10	0,13	0,10
FREQ (Hz)	26,3	26,3	50,0
Resultant PPV:	8,13 mm/s		
Peak Air Pressure:	135 db		
	108.00 Pa		

Shaketable Calibrated: 08.06.2001
 By: GeoSonics Inc.
 P.O. Box 779
 Warrendale, PA 15095 U.S.A.
 TEL: 724.934.2900 FAX: 724.934.2999

LACASEMIN - RELATÓRIO DE ANÁLISE SISMOGRÁFICA

SN: 4509



Printed: março 27, 2002 File: eva2m000.evt (GeoSonics Inc. Analysis v6.1.0)

LACASEMIN - RELATÓRIO DE ANÁLISE SISMOGRÁFICA

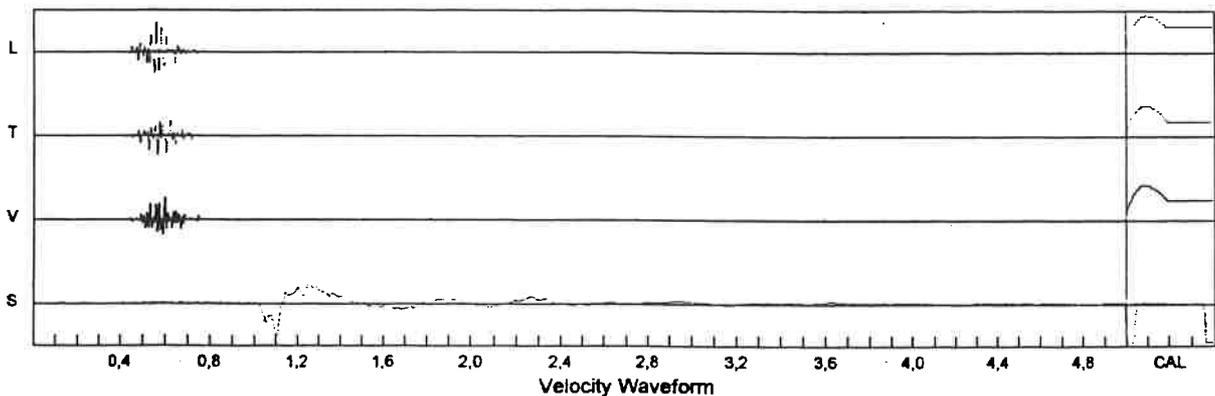
SN: 4508
 Date: 16.01.2002 Time: 12:29:30
 Event: 000 Record Time: 5,0 s
 Client: PEDREIRA RIUMA
 Operation: MAPA DE ISO-VELOCIDADES
 Location:
 Distance:
 Operator: LACASEMIN/EPUSP
 Comment: NOF:Carpe Diem.
 Trigger Level: 1,78 mm/s

	L	T	V
PPV (mm/s)	5,59	4,57	4,32
PD (.01mm)	2,0	1,3	1,3
PPA (g)	0,20	0,15	0,15
FREQ (Hz)	50,0	55,6	55,6
Resultant PPV:	7,11 mm/s		
Peak Air Pressure:	134 db		
	98.00 Pa		

Shaketable Calibrated: 08.06.2001
 By: GeoSonics Inc.
 P.O. Box 779
 Warrendale, PA 15095 U.S.A.
 TEL: 724.934.2900 FAX: 724.934.2999

LACASEMIN - RELATÓRIO DE ANÁLISE SISMOGRÁFICA

SN: 4508



Printed: março 27, 2002 File: eva2m000.evt (GeoSonics Inc. Analysis v6.1.0)

LACASEMIN - RELATÓRIO DE ANÁLISE SISMOGRÁFICA

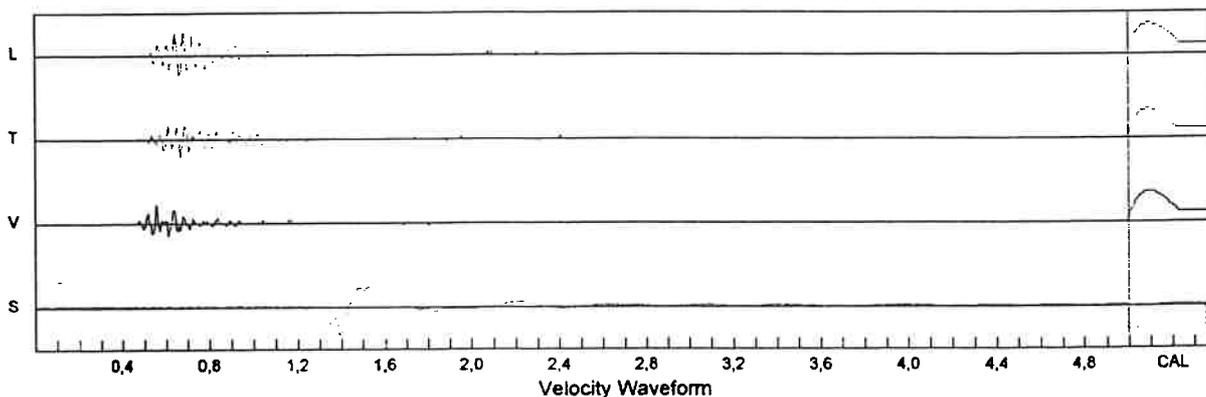
SN: 4496
Date: 16.01.2002 Time: 12:29:29
Event: 000 Record Time: 5,0 s
Client: PEDREIRA RIUMA
Operation: MAPA DE ISO-VELOCIDADES
Location: MAPA DE ISO-VELOCIDADES
Distance:
Operator: LACASEMIN/EPUSP
Comment: NOF:Carpe Diem.
Trigger Level: 0,51 mm/s

Summary Data			
	L	T	V
PPV (mm/s)	2,03	1,78	1,78
PD (.01mm)	1,3	1,3	1,0
PPA (g)	0,05	0,05	0,05
FREQ (Hz)	23,8	33,3	26,3
Resultant PPV:	2,54 mm/s		
Peak Air Pressure:	133 db		
	88.00 Pa		

Shaketable Calibrated: 10.02.2001
By: GeoSonics Inc.
P.O. Box 779
Warrendale, PA 15095 U.S.A.
TEL: 724.934.2900 FAX: 724.934.2999

LACASEMIN - RELATÓRIO DE ANÁLISE SISMOGRÁFICA

SN: 4496



Velocity Waveform Graph Scale:
Time = 0.100 s
Seismic = +/- 0.16 mm/s
Sound = +/- 128.00 Pa

Printed: março 27, 2002 File: eva3400.evt (GeoSonics Inc. Analysis v6.1.0)

LACASEMIN - RELATÓRIO DE ANÁLISE SISMOGRÁFICA

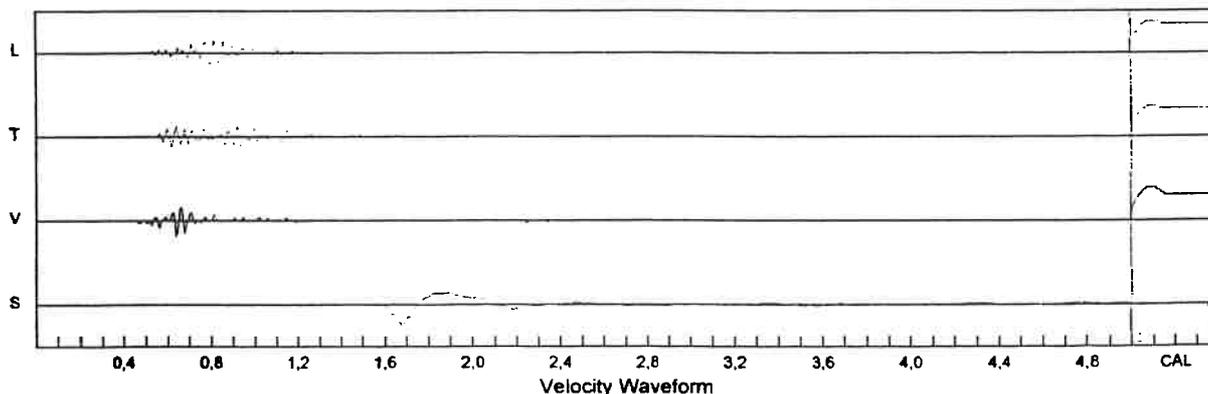
SN: 4505
Date: 16.01.2002 Time: 12:29:29
Event: 005 Record Time: 5,0 s
Client: PEDREIRA RIUMA
Operation: MAPA DE ISO-VELOCIDADES
Location: CORREGO CDHU
Distance:
Operator: LACASEMIN/EPUSP
Comment: NOF:Carpe Diem.
Trigger Level: 0,51 mm/s

Summary Data			
	L	T	V
PPV (mm/s)	1,27	1,02	1,52
PD (.01mm)	1,3	1,0	1,5
PPA (g)	0,05	0,05	0,02
FREQ (Hz)	31,2	21,7	29,4
Resultant PPV:	1,78 mm/s		
Peak Air Pressure:	131 db		
	68.00 Pa		

Shaketable Calibrated: 06.06.2001
By: GeoSonics Inc.
P.O. Box 779
Warrendale, PA 15095 U.S.A.
TEL: 724.934.2900 FAX: 724.934.2999

LACASEMIN - RELATÓRIO DE ANÁLISE SISMOGRÁFICA

SN: 4505



Velocity Waveform Graph Scale:
Time = 0.100 s
Seismic = +/- 0.16 mm/s
Sound = +/- 128.00 Pa

Printed: março 27, 2002 File: eva3405.evt (GeoSonics Inc. Analysis v6.1.0)

LACASEMIN - RELATÓRIO DE ANÁLISE SISMOGRÁFICA

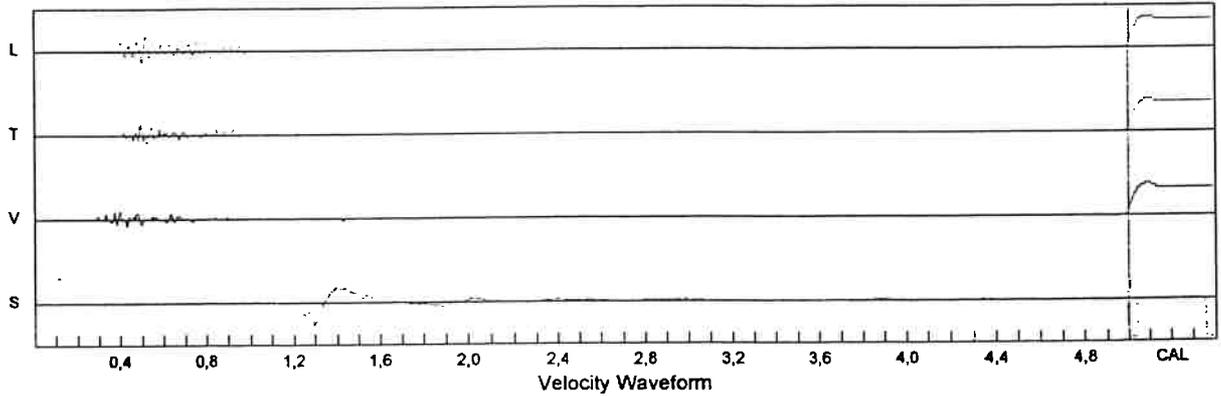
SN: 4497
Date: 16.01.2002 Time: 12:29:28
Event: 002 Record Time: 5,0 s
Client: PEDREIRA RIUMA
Operation: MAPA DE ISO-VELOCIDADES
Location: MAPA DE ISO-VELOCIDADES
Distance:
Operator: LACASEMIN/EPUSP
Comment: NOF:Carpe Diem.
Trigger Level: 1,02 mm/s

Summary Data			
	L	T	V
PPV (mm/s)	1,27	1,02	0,76
PD (.01mm)	2,0	1,3	0,8
PPA (g)	0,02	0,05	0,02
FREQ (Hz)	22,7	27,8	41,7
Resultant PPV:	1,52 mm/s		
Peak Air Pressure:	131 db		
	70.00 Pa		

Shaketable Calibrated: 10.02.2001
By: GeoSonics Inc.
P.O. Box 779
Warrendale, PA 15095 U.S.A.
TEL: 724.934.2900 FAX: 724.934.2999

LACASEMIN - RELATÓRIO DE ANÁLISE SISMOGRÁFICA

SN: 4497



LACASEMIN - RELATÓRIO DE ANÁLISE SISMOGRÁFICA

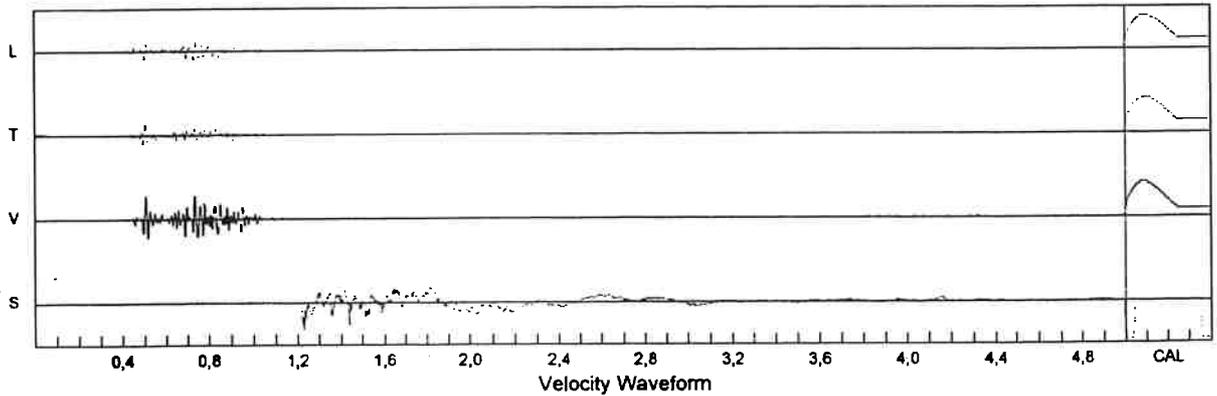
SN: 4506
Date: 21.01.2002 Time: 12:31:58
Event: 000 Record Time: 5,0 s
Client: PEDREIRA RJUMA
Operation: CURVA DE ISO-VELOCIDADES
Location: BANCADA ABAND.
Distance:
Operator: LACASEMIN- EPUSP
Comment: NOF:Carpe Diem.
Trigger Level: 1,78 mm/s

Summary Data			
	L	T	V
PPV (mm/s)	1,78	2,03	4,57
PD (.01mm)	1,0	1,8	2,0
PPA (g)	0,07	0,07	0,15
FREQ (Hz)	33,3	45,5	45,5
Resultant PPV:	5,33 mm/s		
Peak Air Pressure:	133 db		
	94.00 Pa		

Shaketable Calibrated: 06.06.2001
By: GeoSonics Inc.
P.O. Box 779
Warrendale, PA 15095 U.S.A.
TEL: 724.934.2900 FAX: 724.934.2999

LACASEMIN - RELATÓRIO DE ANÁLISE SISMOGRÁFICA

SN: 4506



Velocity Waveform Graph Scale:
Time = 0.100 s
Seismic = +/- 0.32 mm/s
Sound = +/- 128.00 Pa

Printed: março 27, 2002 File: evnm000.evt (GeoSonics Inc. Analysis v6.1.8)

LACASEMIN - RELATÓRIO DE ANÁLISE SISMOGRÁFICA

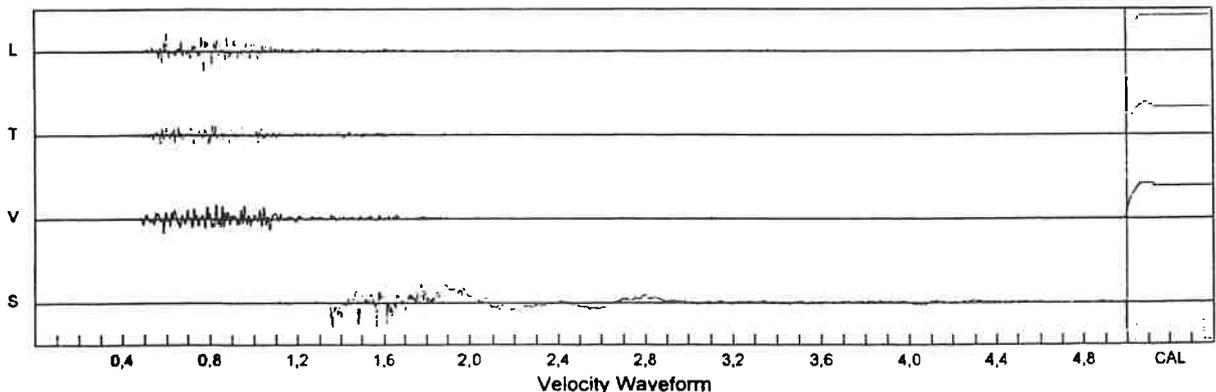
SN: 4508
Date: 21.01.2002 Time: 12:31:55
Event: 000 Record Time: 5,0 s
Client: PEDREIRA RJUMA
Operation: MAPA DE ISO-VELOCIDADES
Location: SIRENE
Distance:
Operator: LACASEMIN/EPUSP
Comment: NOF:Carpe Diem.
Trigger Level: 1,02 mm/s

Summary Data			
	L	T	V
PPV (mm/s)	4,06	2,54	2,79
PD (.01mm)	2,8	2,0	3,6
PPA (g)	0,13	0,13	0,10
FREQ (Hz)	55,6	41,7	45,5
Resultant PPV:	4,32 mm/s		
Peak Air Pressure:	134 db		
	98.00 Pa		

Shaketable Calibrated: 08.06.2001
By: GeoSonics Inc.
P.O. Box 779
Warrendale, PA 15095 U.S.A.
TEL: 724.934.2900 FAX: 724.934.2999

LACASEMIN - RELATÓRIO DE ANÁLISE SISMOGRÁFICA

SN: 4508



Velocity Waveform Graph Scale:
Time = 0.100 s
Seismic = +/- 0.32 mm/s
Sound = +/- 128.00 Pa

Printed: março 27, 2002 File: evnm000.evt (GeoSonics Inc. Analysis v6.1.8)

LACASEMIN - RELATORIO DE ANALISE SISMOGRAFICA

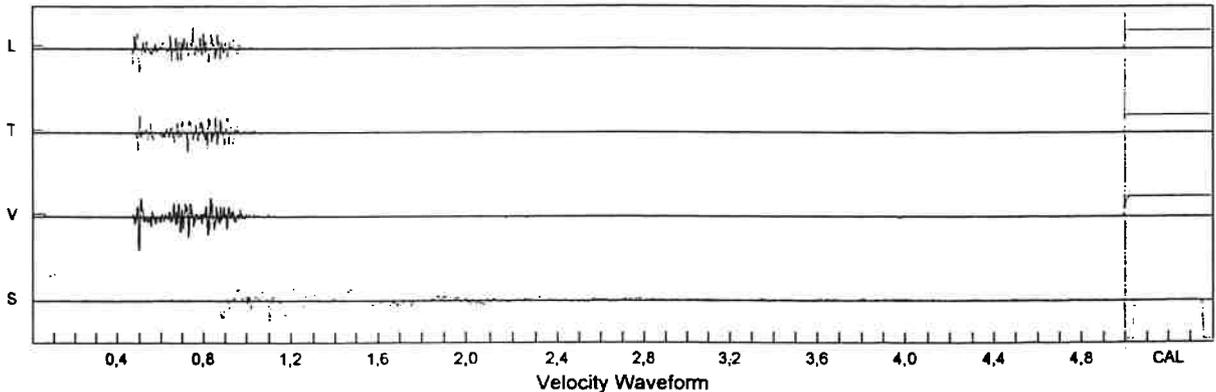
SN: 4507
Date: 21.01.2002 Time: 12:31:43
Event: 000 Record Time: 5.0 s
Client: PEDREIRA RIUMA
Operation: MAPA DE ISO-VELOCIDADES
Location: ANTIGA PRACA CORREG
Distance:
Operator: LACASEMIN/EPUSP
Comment: NOF:Carpe Diem.
Trigger Level: 1,78 mm/s

	L	T	V
PPV (mm/s)	2,29	2,03	3,30
PD (.01mm)	2,0	1,5	1,5
PPA (g)	0,07	0,10	0,10
FREQ (Hz)	27,8	62,5	62,5
Resultant PPV:	3,56 mm/s		
Peak Air Pressure:	136 db 130.00 Pa		

Shaketable Calibrated: 08.06.2001
By: GeoSonics Inc.
P.O. Box 779
Warrendale, PA 15095 U.S.A.
TEL: 724.934.2900 FAX: 724.934.2999

LACASEMIN - RELATÓRIO DE ANÁLISE SISMOGRÁFICA

SN: 4507



Velocity Waveform Graph Scale:
Time = 0.100 s
Seismic = +/- 0,16 mm/s
Sound = +/- 256.00 Pa

Printed: março 27, 2002 File: evn2m000.ert (GeoSonics Inc. Analysis v6.1.0)

LACASEMIN - RELATÓRIO DE ANÁLISE SISMOGRÁFICA

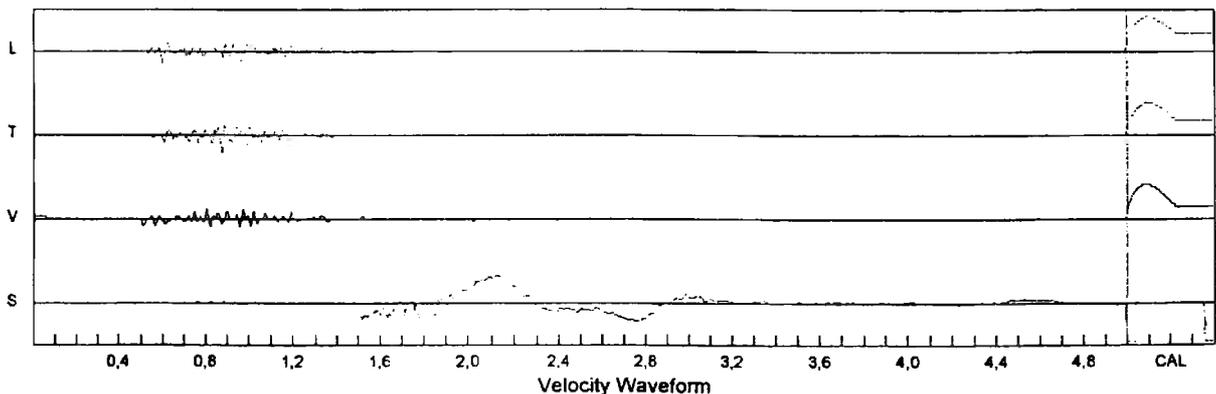
SN: 4505
Date: 21.01.2002 Time: 12:31:48
Event: 000 Record Time: 5.0 s
Client: PEDREIRA RIUMA
Operation: MAPA DE ISO-VELOCIDADES
Location: PAIOL
Distance:
Operator: LACASEMIN/EPUSP
Comment: NOF:Carpe Diem.
Trigger Level: 0,76 mm/s

	L	T	V
PPV (mm/s)	1,27	1,78	1,02
PD (.01mm)	1,3	1,5	1,8
PPA (g)	0,05	0,05	0,05
FREQ (Hz)	26,3	38,5	13,5
Resultant PPV:	2,03 mm/s		
Peak Air Pressure:	126 db 42.00 Pa		

Shaketable Calibrated: 06.06.2001
By: GeoSonics Inc.
P.O. Box 779
Warrendale, PA 15095 U.S.A.
TEL: 724.934.2900 FAX: 724.934.2999

LACASEMIN - RELATÓRIO DE ANÁLISE SISMOGRÁFICA

SN: 4505



Velocity Waveform Graph Scale:
Time = 0.100 s
Seismic = +/- 0,16 mm/s
Sound = +/- 64.00 Pa

Printed: março 27, 2002 File: evntm000.ert (GeoSonics Inc. Analysis v6.1.0)

LACASEMIN - RELATORIO DE ANALISE SISMOGRAFICA

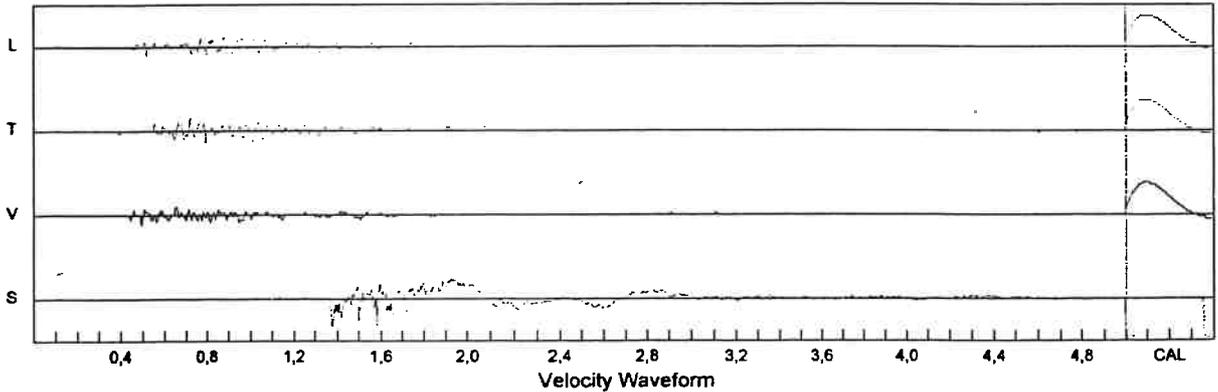
SN: 4496
Date: 21.01.2002 Time: 12:31:50
Event: 000 Record Time: 5,0 s
Client: PEDREIRA RIUMA
Operation: MAPA DE ISO-VELOCIDADES
Location: LACASEMIN/EPUSP
Distance: NOF:Carpe Diem.
Operator: NOF:Carpe Diem.
Comment: NOF:Carpe Diem.
Trigger Level: 0,76 mm/s

	L	T	V
PPV (mm/s)	1,02	1,27	1,02
PD (.01mm)	0,8	1,3	2,0
PPA (g)	0,02	0,05	0,05
FREQ (Hz)	33,3	41,7	41,7
Resultant PPV:	1,52 mm/s		
Peak Air Pressure:	128 db 52.00 Pa		

Shaketable Calibrated: 10.02.2001
By: GeoSonics Inc.
P.O. Box 779
Warrendale, PA 15095 U.S.A.
TEL: 724.934.2900 FAX: 724.934.2999

LACASEMIN - RELATÓRIO DE ANÁLISE SISMOGRÁFICA

SN: 4496



Velocity Waveform Graph Scale:
Time = 0.100 s
Seismic = +/- 0.16 mm/s
Sound = +/- 64.00 Pa

Printed: março 27, 2002 File: evs00000.evt (GeoSonics Inc. Analysis v4.1.0)

LACASEMIN - RELATÓRIO DE ANÁLISE SISMOGRÁFICA

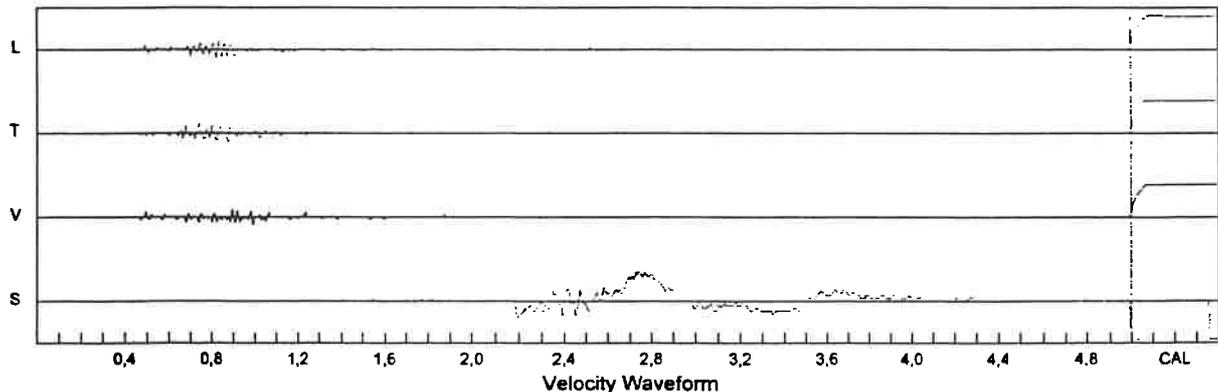
SN: 4497
Date: 21.01.2002 Time: 12:31:42
Event: 000 Record Time: 5,0 s
Client: PEDREIRA RIUMA
Operation: MAPA DE ISO-VELOCIDADES
Location: OFICINA
Distance: LACASEMIN/EPUSP
Operator: NOF:Carpe Diem.
Comment: NOF:Carpe Diem.
Trigger Level: 0,51 mm/s

	L	T	V
PPV (mm/s)	1,02	0,76	0,76
PD (.01mm)	2,0	1,3	1,8
PPA (g)	0,02	0,02	0,05
FREQ (Hz)	41,7	41,7	41,7
Resultant PPV:	1,27 mm/s		
Peak Air Pressure:	121 db 22.00 Pa		

Shaketable Calibrated: 10.02.2001
By: GeoSonics Inc.
P.O. Box 779
Warrendale, PA 15095 U.S.A.
TEL: 724.934.2900 FAX: 724.934.2999

LACASEMIN - RELATÓRIO DE ANÁLISE SISMOGRÁFICA

SN: 4497



Velocity Waveform Graph Scale:
Time = 0.100 s
Seismic = +/- 0.16 mm/s
Sound = +/- 32.00 Pa

Printed: março 27, 2002 File: evs00000.evt (GeoSonics Inc. Analysis v4.1.0)

LACASEMIN - RELATORIO DE ANALISE SISMOGRAFICA

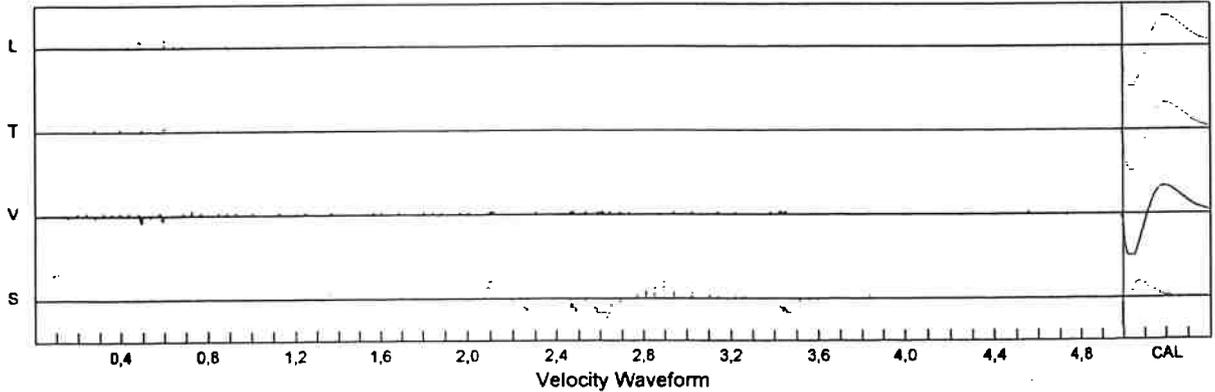
SN: 2411
Date: 21.01.2002 **Time:** 12:30:13
Event: 007 **Record Time:** 5,0 s
Client: PEDREIRA RIUMA
Operation: MAPA ISOVELOCIDADES
Location: ESCRITORIO
Distance:
Operator:
Comment:
Trigger Level: 0,51 mm/s

Summary Data			
	L	T	V
PPV (mm/s)	0,76	0,51	0,76
PD (.01mm)	2,5	1,3	2,8
PPA (g)	0,02	0,02	0,02
FREQ (Hz)	6,2	6,2	38,5
Resultant PPV:	1.02 mm/s		
Peak Air Pressure:	112 db		
	8.00 Pa		

Shaketable Calibrated: 06.07.2001
By: GeoSonics Inc.
 P.O. Box 779
 Warrendale, PA 15095 U.S.A.
 TEL: 724.934.2900 FAX: 724.934.2999

LACASEMIN - RELATÓRIO DE ANÁLISE SISMOGRÁFICA

SN: 2411



Velocity Waveform Graph Scale:
Time = 0.100 s
Seismic = +/- 0,16 mm/s
Sound = +/- 16.00 Pa

Printed: março 27, 2002 File: evm2e007.evt (GeoSonics Inc. Analysis v6.1.0)

LACASEMIN - RELATÓRIO DE ANÁLISE SISMOGRÁFICA

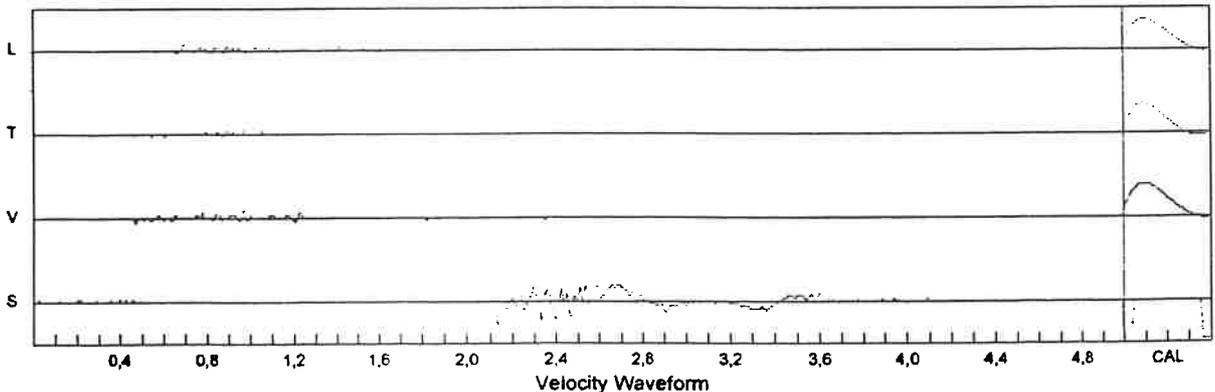
SN: 4509
Date: 21.01.2002 **Time:** 12:31:51
Event: 000 **Record Time:** 5,0 s
Client: PEDREIRA RIUMA
Operation: MAPA DE ISO-VELOCIDADES
Location: ALOJAMENTO
Distance:
Operator: LACASEMIN/EPUSP
Comment: NOF:Carpe Diem.
Trigger Level: 0.51 mm/s

Summary Data			
	L	T	V
PPV (mm/s)	0,51	0,25	0,76
PD (.01mm)	1,5	0,8	1,5
PPA (g)	0,02	0,02	0,02
FREQ (Hz)	4,2	83,3	20,8
Resultant PPV:	0,76 mm/s		
Peak Air Pressure:	120 db		
	20.00 Pa		

Shaketable Calibrated: 08.06.2001
By: GeoSonics Inc.
 P.O. Box 779
 Warrendale, PA 15095 U.S.A.
 TEL: 724.934.2900 FAX: 724.934.2999

LACASEMIN - RELATÓRIO DE ANÁLISE SISMOGRÁFICA

SN: 4509



Velocity Waveform Graph Scale:
Time = 0.100 s
Seismic = +/- 0,16 mm/s
Sound = +/- 32.00 Pa

Printed: março 27, 2002 File: evm2e000.evt (GeoSonics Inc. Analysis v6.1.0)

LACASEMIN - RELATORIO DE ANALISE SISMOGRAFICA

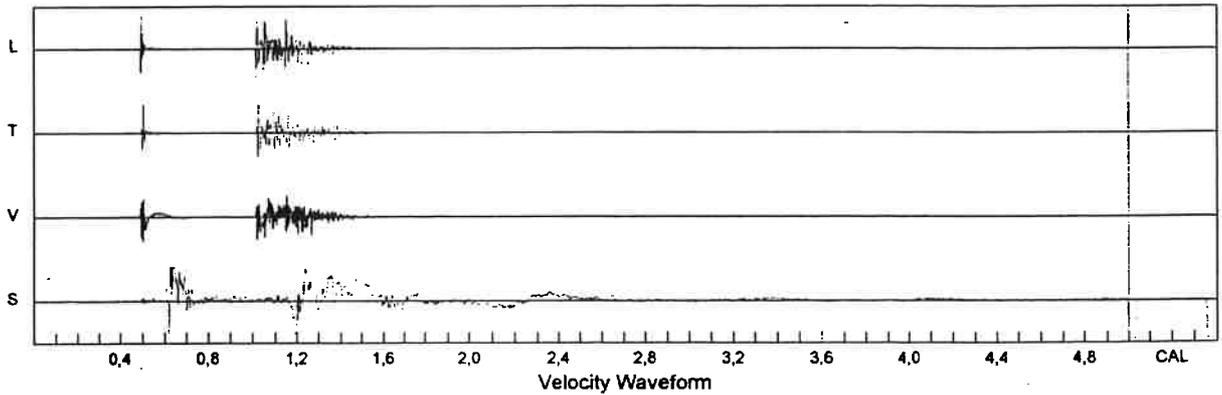
SN: 4507
Date: 24.01.2002 Time: 12:18:13
Event: 000 Record Time: 5,0 s
Client: PEDREIRA RIUMA
Operation: MAPA DE ISO-VELOCIDADES
Location: PRACA + PROX.
Distance:
Operator: LACASEMIN/EPUSP
Comment: NOF:Carpe Diem.
Trigger Level: 2,79 mm/s

Summary Data			
	L	T	V
PPV (mm/s)	25,91	26,42	18,80
PD (.01mm)	6,6	4,8	14,2
PPA (g)	2,63	2,00	2,29
FREQ (Hz)	166,7	71,4	166,7
Resultant PPV:	30,99 mm/s		
Peak Air Pressure:	141 db		
	220.00 Pa		

Shaketable Calibrated: 08.06.2001
By: GeoSonics Inc.
P.O. Box 779
Warrendale, PA 15095 U.S.A.
TEL: 724.934.2900 FAX: 724.934.2999

LACASEMIN - RELATÓRIO DE ANÁLISE SISMOGRÁFICA

SN: 4507



Velocity Waveform Graph Scale:
Time = 0.100 s
Seismic = +/- 1,28 mm/s
Sound = +/- 256.00 Pa

Printed: março 27, 2002 File: evalm000.evt (GeoSonics Inc. Analysis v6.1.0)

LACASEMIN - RELATÓRIO DE ANÁLISE SISMOGRÁFICA

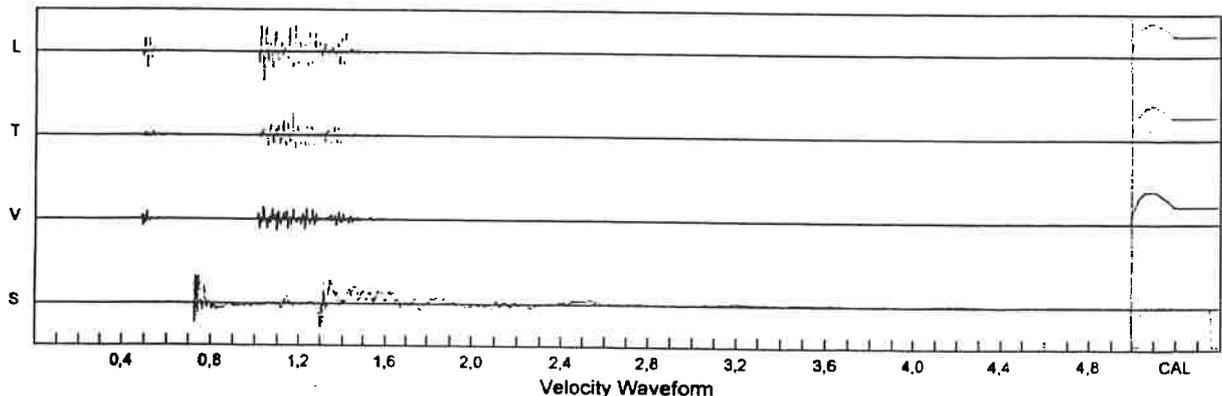
SN: 4506
Date: 24.01.2002 Time: 12:18:35
Event: 000 Record Time: 5,0 s
Client: PEDREIRA RIUMA
Operation: CURVA DE ISO-VELOCIDADES
Location:
Distance:
Operator: LACASEMIN-EPUSP
Comment: NOF:Carpe Diem.
Trigger Level: 1,78 mm/s

Summary Data			
	L	T	V
PPV (mm/s)	12,19	9,40	4,83
PD (.01mm)	4,6	2,5	1,8
PPA (g)	0,44	0,46	0,23
FREQ (Hz)	50,0	62,5	71,4
Resultant PPV:	13,21 mm/s		
Peak Air Pressure:	138 db		
	166.00 Pa		

Shaketable Calibrated: 06.06.2001
By: GeoSonics Inc.
P.O. Box 779
Warrendale, PA 15095 U.S.A.
TEL: 724.934.2900 FAX: 724.934.2999

LACASEMIN - RELATÓRIO DE ANÁLISE SISMOGRÁFICA

SN: 4506



Velocity Waveform Graph Scale:
Time = 0.100 s
Seismic = +/- 0,64 mm/s
Sound = +/- 256.00 Pa

Printed: março 27, 2002 File: evalm000.evt (GeoSonics Inc. Analysis v6.1.0)

LACASEMIN - RELATORIO DE ANALISE SISMOGRAFICA

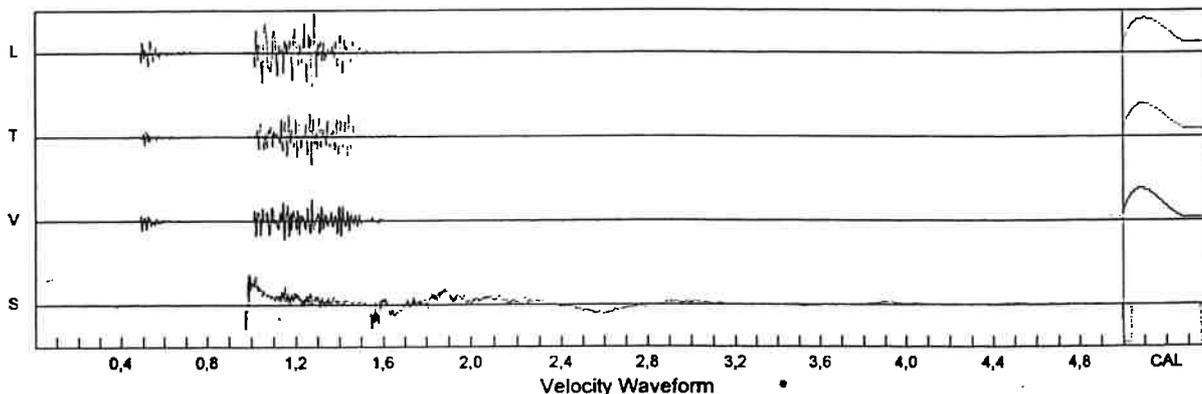
SN: 4505
Date: 24.01.2002 **Time:** 12:18:21
Event: 000 **Record Time:** 5,0 s
Client: PEDREIRA RIUMA
Operation: MAPA DE ISO-VELOCIDADES
Location: CORREGO
Distance:
Operator: LACASEMIN/EPUSP
Comment: NOF:Carpe Diem.
Trigger Level: 1,02 mm/s

	Summary Data		
	L	T	V
PPV (mm/s)	7,62	5,59	4,32
PD (.01mm)	3,3	1,8	1,5
PPA (g)	0,31	0,23	0,20
FREQ (Hz)	50,0	71,4	55,6
Resultant PPV:	8.13 mm/s		
Peak Air Pressure:	141 db		
	216.00 Pa		

Shaketable Calibrated: 06.06.2001
By: GeoSonics Inc.
 P.O. Box 779
 Warrendale, PA 15095 U.S.A.
 TEL: 724.934.2900 FAX: 724.934.2999

LACASEMIN - RELATÓRIO DE ANÁLISE SISMOGRÁFICA

SN: 4505



Velocity Waveform Graph Scale:
Time = 0.100 s
Seismic = +/- 0.32 mm/s
Sound = +/- 256.00 Pa

Printed: março 27, 2002 File: evnm000.evt (GeoSonics Inc. Analysis v6.1.0)

LACASEMIN - RELATÓRIO DE ANÁLISE SISMOGRÁFICA

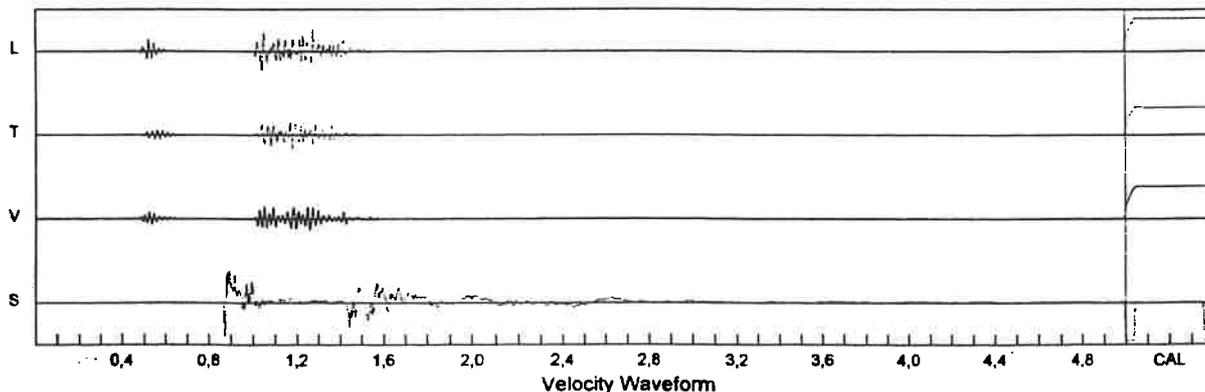
SN: 4508
Date: 24.01.2002 **Time:** 12:18:32
Event: 000 **Record Time:** 5,0 s
Client: PEDREIRA RIUMA
Operation: MAPA DE ISO-VELOCIDADES
Location: PRACA 3
Distance:
Operator: LACASEMIN/EPUSP
Comment: NOF:Carpe Diem.
Trigger Level: 1,27 mm/s

	Summary Data		
	L	T	V
PPV (mm/s)	8,13	6,35	4,83
PD (.01mm)	3,6	2,3	2,0
PPA (g)	0,31	0,20	0,18
FREQ (Hz)	50,0	38,5	41,7
Resultant PPV:	9.40 mm/s		
Peak Air Pressure:	141 db		
	222.00 Pa		

Shaketable Calibrated: 08.06.2001
By: GeoSonics Inc.
 P.O. Box 779
 Warrendale, PA 15095 U.S.A.
 TEL: 724.934.2900 FAX: 724.934.2999

LACASEMIN - RELATÓRIO DE ANÁLISE SISMOGRÁFICA

SN: 4508



Velocity Waveform Graph Scale:
Time = 0.100 s
Seismic = +/- 0.64 mm/s
Sound = +/- 256.00 Pa

Printed: março 27, 2002 File: evnm000.evt (GeoSonics Inc. Analysis v6.1.0)

LACASEMIN - RELATÓRIO DE ANÁLISE SISMOGRÁFICA

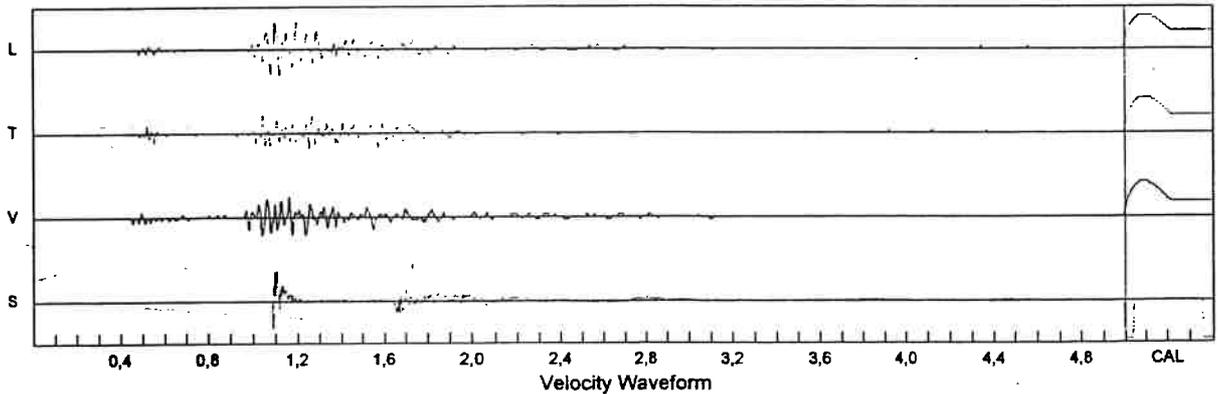
SN: 4497
Date: 24.01.2002 Time: 12:18:11
Event: 000 Record Time: 5,0 s
Client: PEDREIRA RJUMA
Operation: MAPA DE ISO-VELOCIDADES
Location: TOPO DO MORRO
Distance:
Operator: LACASEMIN/EPUSP
Comment: NOF:Carpe Diem.
Trigger Level: 0,76 mm/s

Summary Data			
	L	T	V
PPV (mm/s)	2,54	1,78	2,03
PD (.01mm)	2,5	1,8	2,0
PPA (g)	0,07	0,05	0,05
FREQ (Hz)	22,7	27,8	20,0
Resultant PPV:	3.05 mm/s		
Peak Air Pressure:	140 db		
	196.00 Pa		

Shaketable Calibrated: 10.02.2001
By: GeoSonics Inc.
P.O. Box 779
Warrendale, PA 15095 U.S.A.
TEL: 724.934.2900 FAX: 724.934.2999

LACASEMIN - RELATÓRIO DE ANÁLISE SISMOGRÁFICA

SN: 4497



Velocity Waveform Graph Scale:
Time = 0.100 s
Seismic = +/- 0,16 mm/s
Sound = +/- 256.00 Pa

Printed: março 27, 2002 File: evnm000.evt (GeoSonics Inc. Analysis v6.1.0)

LACASEMIN - RELATÓRIO DE ANÁLISE SISMOGRÁFICA

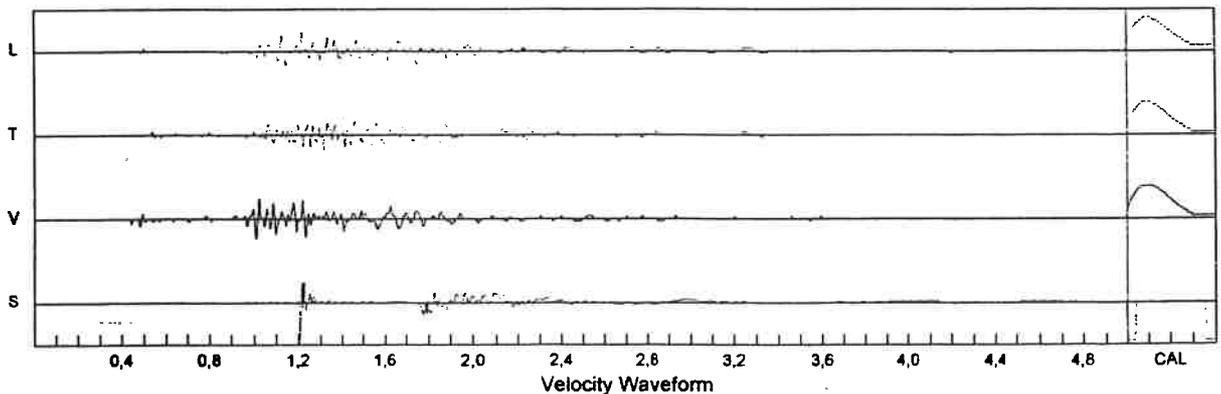
SN: 4496
Date: 24.01.2002 Time: 12:18:23
Event: 000 Record Time: 5,0 s
Client: PEDREIRA RJUMA
Operation: MAPA DE ISO-VELOCIDADES
Location:
Distance:
Operator: LACASEMIN/EPUSP
Comment: NOF:Carpe Diem.
Trigger Level: 0,76 mm/s

Summary Data			
	L	T	V
PPV (mm/s)	1,78	1,52	2,03
PD (.01mm)	2,0	1,3	2,0
PPA (g)	0,05	0,05	0,05
FREQ (Hz)	15,2	35,7	20,0
Resultant PPV:	2,29 mm/s		
Peak Air Pressure:	135 db		
	118.00 Pa		

Shaketable Calibrated: 10.02.2001
By: GeoSonics Inc.
P.O. Box 779
Warrendale, PA 15095 U.S.A.
TEL: 724.934.2900 FAX: 724.934.2999

LACASEMIN - RELATÓRIO DE ANÁLISE SISMOGRÁFICA

SN: 4496



Velocity Waveform Graph Scale:
Time = 0.100 s
Seismic = +/- 0,16 mm/s
Sound = +/- 128.00 Pa

Printed: março 27, 2002 File: evnm000.evt (GeoSonics Inc. Analysis v6.1.0)

LACASEMIN - RELATORIO DE ANALISE SISMOGRAFICA

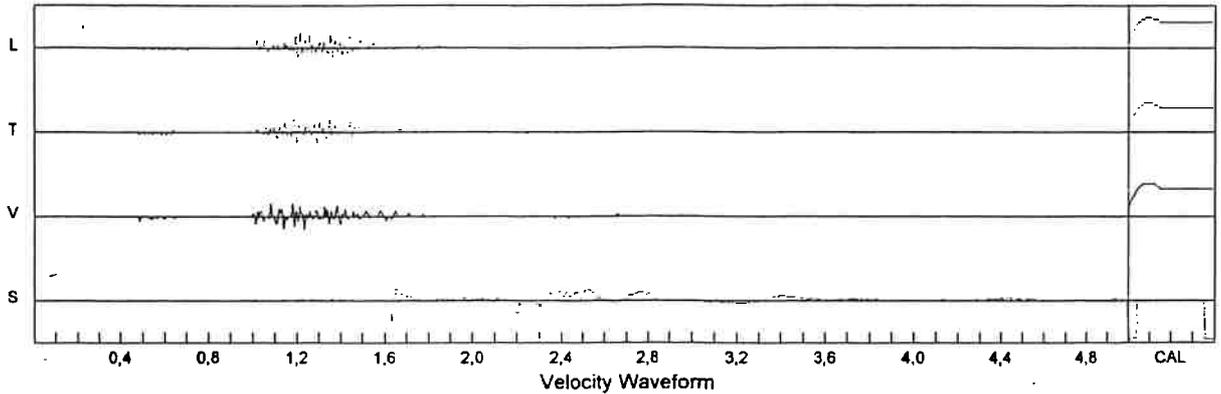
SN: 4509
Date: 24.01.2002 **Time:** 12:18:24
Event: 000 **Record Time:** 5,0 s
Client: PEDREIRA RIJUMA
Operation: MAPA DE ISO-VELOCIDADES
Location: DIV COND VISTA LINDA
Distance:
Operator: LACASEMIN/EPUSP
Comment: NOF:Carpe Diem.
Trigger Level: 0,51 mm/s.

Summary Data			
	L	T	V
PPV (mm/s)	1,52	1,27	1,27
PD (.01mm)	1,5	2,5	2,5
PPA (g)	0,05	0,05	0,05
FREQ (Hz)	41,7	33,3	50,0
Resultant PPV:	1,78 mm/s		
Peak Air Pressure:	125 db		
	34.00 Pa		

Shaketable Calibrated: 08.06.2001
By: GeoSonics Inc.
 P.O. Box 779
 Warrendale, PA 15095 U.S.A.
 TEL: 724.934.2900 FAX: 724.934.2999

LACASEMIN - RELATÓRIO DE ANÁLISE SISMOGRÁFICA

SN: 4509



Velocity Waveform Graph Scale:
Time = 0.100 s
Seismic = +/- 0,16 mm/s
Sound = +/- 64.00 Pa

Printed: março 27, 2002 File: evm000000.evt (GeoSonics Inc. Analysis v4.1.0)

LACASEMIN - RELATÓRIO DE ANÁLISE SISMOGRÁFICA

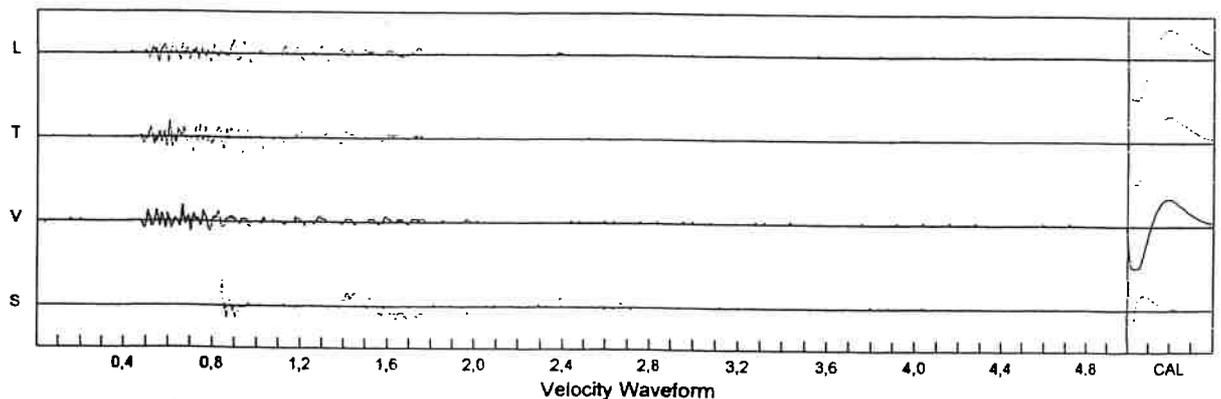
SN: 2411
Date: 24.01.2002 **Time:** 12:16:25
Event: 008 **Record Time:** 5,0 s
Client: PEDREIRA RIJUMA
Operation: MAPA ISOVELOCIDADES
Location: EST C. VISTA LINDA
Distance:
Operator:
Comment:
Trigger Level: 0,51 mm/s

Summary Data			
	L	T	V
PPV (mm/s)	1,27	1,52	1,52
PD (.01mm)	2,3	2,3	2,8
PPA (g)	0,05	0,05	0,02
FREQ (Hz)	12,8	35,7	25,0
Resultant PPV:	1,78 mm/s		
Peak Air Pressure:	120 db		
	20.00 Pa		

Shaketable Calibrated: 06.07.2001
By: GeoSonics Inc.
 P.O. Box 779
 Warrendale, PA 15095 U.S.A.
 TEL: 724.934.2900 FAX: 724.934.2999

LACASEMIN - RELATÓRIO DE ANÁLISE SISMOGRÁFICA

SN: 2411



Velocity Waveform Graph Scale:
Time = 0.100 s
Seismic = +/- 0,16 mm/s
Sound = +/- 32.00 Pa

Printed: março 27, 2002 File: evm000000.evt (GeoSonics Inc. Analysis v4.1.0)