

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Instituto de Geociências e Ciências Exatas

Campus de Rio Claro

**ANÁLISE DAS VIBRAÇÕES RESULTANTES DO DESMONTE DE
ROCHA EM MINERAÇÃO DE CALCÁRIO E ARGILITO
POSICIONADA JUNTO À ÁREA URBANA DE LIMEIRA (SP) E SUA
APLICAÇÃO PARA A MINIMIZAÇÃO DE IMPACTOS AMBIENTAIS**

Caetano Dallora Neto

Orientadora: Profa. Dra. Gilda Carneiro Ferreira

Dissertação de Mestrado elaborada junto ao
Programa de Pós-Graduação em Geociências – Área
de Concentração em Geociências e Meio Ambiente,
para obtenção do título de Mestre em Geociências.

Rio Claro (SP)

2004

550 Dallora Neto, Caetano
D148a Análise das vibrações resultantes do desmonte de rocha em
mineração de calcário e argilito posicionada junto à área
urbana de Limeira (SP) / Caetano Dallora Neto. – Rio Claro :
[s.n.], 2004
82 f. : il., gráfs., tabs.

Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual Paulista,
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Orientador: Gilda Carneiro Ferreira

1. Geologia – Aspectos ambientais. 2. Tempo de retardo. I.
Titulo.

Ficha Catalográfica elaborada pela STATI – Biblioteca da UNESP
Campus de Rio Claro/SP

Comissão Examinadora

Profa. Dra. Gilda Carneiro Ferreira (orientadora)

Prof. Dr. Elias Carneiro Daitx

Prof. Dr. Valdir Costa e Silva

Caetano Dallora Neto

- aluno -

Rio Claro, 26 de novembro de 2004

Resultado:

À Maria
e às nossas crianças.
Sempre serão.

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho foi possível a partir da colaboração direta de:

Alan de Oliveira, IGCE, UNESP.

Ana Carolina Salles Scarpari, IGCE, UNESP.

Antoninho Pedro, Abílio Pedro Ind. e Com. Ltda., Limeira, SP.

Carlos de Almeida Nóbrega, IGCE, UNESP.

Antonio Cezário Porta Junior, IGCE, UNESP.

Elâine Brigatto, IGCE, UNESP.

Elias Carneiro Daitx, IGCE, UNESP.

Francisco Manuel Garcia Barrera, IGCE, UNESP.

Gilberto M. de Souza Rodriguez, Master Demolições e Comércio Ltda., Jardinópolis, SP.

João Carlos Dourado, IGCE, UNESP.

Rubens César dos Santos, Constroeste Ind. e Comércio Ltda., Guará, SP.

Sérgio Barbosa de Couto, Abílio Pedro Ind. e Com. Ltda., Limeira, SP.

A quem manifesto o reconhecimento pela sua contribuição.

Deve ser debitada a responsabilidade por este cometimento à Profa. Dra. Gilda Carneiro Ferreira, amiga e orientadora.

SUMÁRIO

Índice	i
Índice de Tabelas.....	iii
Índice de Figuras	iv
Resumo	vi
Abstract	vii
1 – Generalidades.....	1
2 – Impactos ambientais associados a desmontes de rochas com explosivos	5
3 – Vibrações no terreno decorrentes de desmontes de rochas com explosivos.....	10
4 – Impactos ambientais das vibrações propagadas pelo terreno e formas de mitigação.....	33
5 – Área de estudo.....	42
6 – Análise e interpretação dos dados	52
7 – Determinação dos tempos de retardo	61
8 – Conclusões.....	75
9 – Referências Bibliográficas.....	79
Anexos	

Índice

1 – Generalidades.....	1
1.1 – Introdução	1
1.2 – Objetivos	2
1.3 - Localização da área de estudo	2
1.4 – Materiais e métodos	3
2 - Impactos ambientais associados a desmontes de rochas com explosivos	5
2.1 - Poeiras e gases tóxicos.....	5
2.2 – Ultralanchamentos	6
2.3 - Danos ao maciço remanescente.....	6
2.4 - Ruído e sobrepressão atmosférica	6
2.5 - Vibrações propagadas pelo terreno.....	8
3 – Vibrações no terreno decorrentes de desmontes de rocha com explosivos	10
3.1 – Conceitos básicos utilizados no estudo de vibrações.....	10
3.1.1 – Elasticidade.....	10
3.1.2 - Propagação de ondas elásticas	13
3.1.3 - Partição de energia em uma interface	16
3.1.4 – Mecanismos de atenuação	19
3.1.5 – Vibrações.....	21
3.2 - Desmonte de rochas com explosivos.....	22
3.2.1 - Plano de fogo.....	23
3.2.2 - Explosivos e acessórios de detonação.....	26
a – Explosivos.....	26
b - Acessórios de detonação	27
3.2.3 - Mecanismos de fragmentação	28
3.2.4 - Rendimento energético.....	31
4 – Impactos ambientais das vibrações propagadas pelo terreno e formas de mitigação	33
4.1 – Danos associados a vibrações.....	33
4.2 - Reações humanas às vibrações	35
4.3 - Redução das vibrações que se propagam pelo terreno	36
4.4 - Obtenção de equação de atenuação.....	38

5 - Área de estudo	42
5.1 - Atividades de lavra e beneficiamento.....	42
5.2 – Monitoramento sismográfico	44
5.2.1. Equipamentos utilizados	44
5.2.2. Dados obtidos.....	45
5.2.2.1. Dados obtidos na primeira etapa de monitoramento.....	45
5.2.2.2. Dados obtidos na segunda etapa de monitoramento	49
6 - Análise e interpretação dos dados.....	52
7 - Determinação dos tempos de retardo.....	61
8 – Conclusões	75
9 - Referências bibliográficas	79
Anexo I – Mapa de Localização das Detonações e Pontos de Monitoramento Sismográfico	
Anexo II – Planos de Fogo	
Anexo III – Sismogramas - Planos de fogo	
Anexo IV – Sismogramas - Tempos de retardo	

Índice de Tabelas

Tabela 4.1.1 – Critério para avaliação do risco de danos e edificações proposto por Langefors e Kihlström (1978).....	33
Tabela 4.1.2 – Critério para a avaliação de danos e edificações proposto por Siskind et al. (1980).....	34
Tabela 5.2.2.1.1 – Planos de fogo monitorados no período de 17/12/99 a 08/12/00.....	47
Tabela 5.2.2.1.2 – Registros obtidos no período 17/12/99 a 08/12/00.....	48
Tabela 5.2.2.2.1 – Planos de fogo monitorados no período de 24/04 a 25/11/03	50
Tabela 5.2.2.2.2 – Registros obtidos no período 24/04 a 25/11/03	51
Tabela 7.1 – Tempos de retardo - solo (janeiro de 2004).....	64
Tabela 7.2 – Tempos de retardo - basalto (junho de 2004).....	69

Índice de Figuras

Figura 6.1 -	Registros obtidos na primeira etapa de monitoramentos e equações de atenuação e de máxima energia.....	53
Figura 6.2 -	Registros obtidos na segunda etapa de monitoramentos.....	54
Figura 6.3 -	Registros obtidos em residência situada na rua 16 n.º 35, na primeira e segunda etapas de monitoramento.....	54
Figura 6.4 -	Registros obtidos no escritório da empresa na primeira e segunda etapas de monitoramento.....	55
Figura 6.5 -	Registros obtidos na segunda etapa de monitoramentos, agrupados segundo características dos planos de fogo.....	57
Figura 6.6 -	Registros obtidos na segunda etapa de monitoramentos, agrupados segundo características dos planos de fogo, em escala bilogarítmica.....	57
Figura 6.7 -	Registros obtidos na primeira etapa de monitoramentos, agrupados segundo características dos planos de fogo.....	58
Figura 6.8 -	Registros obtidos na primeira etapa de monitoramentos, agrupados segundo características dos planos de fogo, em escala bilogarítmica.....	58
Figura 6.9 -	Registros obtidos na segunda etapa de monitoramentos e equação de máxima energia desenvolvida a partir dos registros provenientes da primeira.....	59
Figura 6.10 -	Registros das duas etapas de monitoramento e equações 6.2 e 6.4.....	60
Figura 7.1 -	Esquema de montagem do experimento.....	62
Figura 7.2-	Esquema de montagem dos conjuntos espoleta/estopim e não elétrico de retardo.....	63
Figura 7.3.a -	Registros obtidos na componente transversal; eventos monitorados em 22/01/04 a partir de conjuntos compostos por espoleta simples e de retardo de 25 ms.....	65
Figura 7.3.b -	Registros obtidos na componente vertical; eventos monitorados em 22/01/04 a partir de conjunto composto por espoleta simples e de retardo de 25 ms.....	65
Figura 7.3.c -	Registros obtidos na componente longitudinal; eventos monitorados em 22/01/04 a partir de conjuntos compostos por espoleta simples e de retardo de 25 ms.....	65
Figura 7.4.a -	Registros obtidos na componente transversal; eventos monitorados em 22/01/04 a partir de espoleta simples 8.....	66

Figura 7.4.b -	Registros obtidos na componente vertical; eventos monitorados em 22/01/04 a partir de espoleta simples n.º 8.....	66
Figura 7.4.c -	Registros obtidos na componente longitudinal; eventos monitorados em 22/01/04 a partir de espoleta simples n.º 8.....	66
Figura 7.5.a -	Registros obtidos na componente transversal; eventos monitorados em 22/01/04 e representação do sinal "ter 25 ms" deconvoluido do sinal "espoleta 2".....	67
Figura 7.5.b -	Registros obtidos na componente vertical; eventos monitorados em 22/01/04 e representação do sinal "ter 25 ms" deconvoluido do sinal "espoleta 2".....	67
Figura 7.5.c -	Registros obtidos na componente longitudinal; eventos monitorados em 22/01/04 e representação do sinal "ter 25 ms" deconvoluido do sinal "espoleta 2".....	67
Figura 7.6.a -	Comparativo entre os registros 17:31, de 08/06 e 17:05, de 19/06/04, na componente vertical, a partir de retardos com tempos nominais de 17 ms. Os valores observados foram de 16,8 ms.....	71
Figura 7.6.b -	Comparativo entre os registros 17:05 e 17:12, de 19/06/04, na componente vertical, a partir de retardos com tempos nominais de 17 ms. Os valores observados foram de 16,8 ms e 13,2 ms, respectivamente.....	71
Figura 7.7.a -	Comparativo entre os registros 17:20 e 17:24, de 19/06/04, na componente vertical, a partir de retardos com tempos nominais de 25 ms. Os valores observados foram de 25,4 ms.....	72
Figura 7.7.b -	Comparativo entre os registros 17:36 e 18:13, de 08/06/04, na componente vertical, a partir de retardos com tempos nominais de 25 ms. Os valores observados foram de 22,9 ms e 29,3 ms, respectivamente.....	72
Figura 7.8.a -	Comparativo entre os registros 17:41 e 18:21, de 08/06/04, na componente vertical, a partir de retardos com tempos nominais de 250 ms. Os valores observados foram de 251,4 ms e 250,9 ms, respectivamente.....	73
Figura 7.8.b -	Detalhe da figura 7.8.a.....	73
Figura 7.8.c -	Detalhe da figura 7.8.a.....	73
Figura 7.9.a -	Comparativo entre os registros 18:04, 18:17 e 18:22, de 19/06/04, na componente vertical, a partir de retardos com tempos nominais de 250 ms. Os valores observados foram de 260,3 ms, 241,7 ms e 250,5 ms, respectivamente.....	74
Figura 7.9.b -	Detalhe da figura 7.9.a.....	74
Figura 7.9.c -	Detalhe da figura 7.9.a.....	74
Figura 8.1 -	Ábaco distância versus carga máxima por espera.....	78

RESUMO

Neste estudo foi realizado o monitoramento das vibrações geradas por explosivos em uma lavra de calcário e argilito localizada no município de Limeira (SP), com o objetivo de desenvolver equação probabilística de atenuação de vibração e verificação da existência de variação nos níveis de vibração gerados pelo desmonte em diferentes níveis litológicos e estratigráficos. Os registros da velocidade de vibração de partícula e sua frequência foram medidos utilizando-se sismógrafos de engenharia, concentrando-se em área localizada a 300 metros a sudoeste do empreendimento mineiro, no Bairro Belinha Ometto. Os trabalhos foram realizados em duas etapas, na primeira foi gerada uma equação probabilística que foi utilizada pela empresa e reduziu os incômodos causados à população pelas operações de detonação. Os valores obtidos na etapa seguinte indicam ser o principal fator na dispersão das velocidades de partícula os desvios nos tempos nominais de retardo dos acessórios de detonação utilizados, tendo como imprópria a elaboração de planos de fogo que contemplem intervalos de tempo nominais entre a detonação de minas ou grupo de minas menores que 25 milisegundos quando da utilização de acessórios de iniciação da coluna de explosivos dotados de tempo de retardo superior a 200 milisegundos.

Palavras-chave: desmonte de rochas; vibrações; tempo de retardo.

ABSTRACT

This study performs a ground vibrations monitoring generated by blasting in a calcareous and clay quarry at Limeira city (SP). The main objective is develop a ground vibration attenuation probabilistic equation and verify the existence of vibration levels variation due to the blasting in different lithological and stratigraphical quarry levels. Peak particle registrations and frequency were measured through engineering seismographs in an area named Bairro Belinha Ometto located 300 meters southwest from the mining site. The data acquisition had been carried through two stages, the first a probabilistic equation used for the company was applied and it reduced the local population disturbs caused by the blasting procedures operations. In the next stage, the obtained values indicate that the deviation in the nominal time delay derived from blasting accessories are the main factor in the dispersion of the resultant particle being therefore improper blasting plans applied in a quarry or a group of them projected with nominal intervals lesser than 25 miliseconds by using in the initiation an explosives column accessories endowed with a delay time superior than 200 miliseconds.

Keywords: blasting, ground vibration, ms delay.

1 – Generalidades

1.1 - Introdução

A coexistência entre empreendimentos produtivos e núcleos habitacionais próximos a eles nem sempre se dá de forma pacífica. Fruto, na maioria das vezes, de fundadas razões decorrentes de ações poluidoras originadas em tais empreendimentos, a animosidade entre a comunidade e o empreendimento decorre, em outras vezes, de restrições dos moradores à sua existência na proximidade de suas residências - síndrome de NIMBY.

Com as atividades minerárias a situação não se dá de forma diferente. Instalando-se próximas a núcleos urbanos existentes, ou atuando como pólo de atração de novos núcleos que se formam em seu entorno, valendo-se da infra-estrutura viária e energética criada pela sua implantação, criam-se condições mínimas necessárias para o confronto. Agravadas pela sua rigidez locacional, a continuidade de suas atividades sujeita-se ao cumprimento de normas que foram e vêm sendo criadas, estabelecendo condições de conforto e segurança para habitantes e edificações existentes em suas vizinhanças.

Empregam-se operações de desmonte de rocha com utilização de explosivos em minerações e obras civis, quando outros métodos de escavação são impraticáveis ou antieconômicos. Envolvendo riscos consideráveis, por vezes com conseqüências fatais, associados ao lançamento de fragmentos, tais operações geram vibrações, transmitidas pelo terreno ou através da atmosfera, causando incômodos e, em alguns casos, danos a edificações.

No presente estudo serão enfocadas questões relacionadas a vibrações transmitidas pelo terreno, provocadas pelo desmonte de rochas com uso de explosivos em mineração produtora de calcário e argilito situada no município de Limeira, SP, e a seus efeitos sobre os habitantes e edificações existentes em conjunto habitacional situado em sua proximidade, adotando-se como referência limites estabelecidos em norma técnica ou adotados como recomendação.

A partir de considerações teóricas básicas necessárias à compreensão do fenômeno, que envolvem conceitos de elasticidade, propagação de ondas, desmonte de rochas, mecanismos de detonação, impactos ambientais associados e variáveis que atuam na atenuação das vibrações geradas, descreve-se o método de obtenção de uma equação probabilística de atenuação para o local.

Obtida a partir de dados constantes em registros sismográficos e dos parâmetros dos planos de fogo a eles vinculados, tal equação correlaciona níveis de vibração, por meio da grandeza velocidade de partícula, com a carga de explosivos e distância entre o local da detonação e o ponto de interesse.

Ao possibilitar a previsão dos níveis de vibração a serem atingidos nos pontos considerados sensíveis a partir da carga máxima de explosivos a ser detonada instantaneamente em determinado local da área de lavra, permite adequações ao plano de fogo, dentro de critérios técnicos e econômicos, de modo a serem respeitadas as normas vigentes. Essa equação servirá, portanto, como referencial à adoção de medidas preventivas tanto no que se refere à manutenção da integridade física das edificações existentes em conjunto habitacional próximo como à redução dos incômodos causados à população por tais operações.

1.2 - Objetivos

Os objetivos deste estudo podem ser sintetizados em:

- desenvolvimento de equação probabilística de atenuação de vibração a partir de registros provenientes de monitoramentos sismográficos de eventos de desmonte de rocha realizados no local, no período de 17 de dezembro de 1999 a 08 de dezembro de 2000.
- verificação da efetividade de tal equação de atenuação, por meio de novos monitoramentos sismográficos, realizados no período de 24 de abril a 25 de novembro de 2003, considerando os limites impostos pelo órgão ambiental estadual - Cia. de Tecnologia de Saneamento Ambiental.
- verificação da existência de variações nos níveis de vibração gerados pelo desmonte em diferentes níveis litológicos e estratigráficos.

1.3 - Localização da área de estudo

A área de estudo abrange uma mineração de calcário e argilito denominada Calcário Cruzeiro, de propriedade de Abílio Pedro Indústria e Comércio Ltda., localizada na estrada municipal Limeira 040, quilômetro 03, e o bairro Belinha Ometto, situado a aproximadamente 300 m a sudoeste do empreendimento, no município de Limeira (SP).

1.4 – Materiais e métodos

a) Revisão bibliográfica

Essa etapa norteou as etapas subseqüentes da pesquisa, propiciando acesso às bases teóricas que versam sobre o tema e a estudos similares desenvolvidos.

b) Representação gráfica da área de estudo

Resultou na elaboração de planta com representação planialtimétrica do local da pesquisa, englobando a área de lavra e aquela onde está situado o conjunto habitacional, o que possibilitou o posicionamento dos locais onde foram realizadas as detonações e dos pontos onde foram obtidos os registros dos monitoramentos sismográficos.

c) Caracterização geológica

Nessa etapa procedeu-se à descrição dos aspectos geológicos locais, englobando litologias existentes, visando análise de possível interferência de fatores geológicos na propagação das perturbações decorrentes das detonações.

d) Monitoramento sismográfico

Os registros das vibrações geradas nas operações de desmonte de rochas com a utilização de explosivos desenvolvidas no empreendimento foram obtidos com a utilização de sismógrafos de engenharia fabricados pela empresa canadense InstanTel Inc., modelos BlastMate Series III e MiniMate Plus, de propriedade do Departamento de Geologia Aplicada do IGCE/UNESP.

Provenientes de monitoramentos sismográficos realizados em dois períodos distintos, os registros obtidos no primeiro deram-se, na área habitada, a partir de locais de onde provinham mais insistentes reclamações, complementados por outros em área de propriedade da empresa, com a obtenção de dados que possibilitassem o desenvolvimento de equações probabilísticas de atenuação.

Na segundo, com o objetivo de reduzir o número de variáveis envolvidas, foram fixados três pontos para monitoramento, em locais considerados mais críticos, sendo um o escritório da empresa, e dois outros na região limítrofe entre o bairro Belinha Ometto e a área da mineração, também em locais de onde provinham as mais freqüentes reclamações por parte de habitantes do conjunto habitacional.

e) Análise e interpretação dos dados obtidos

Nessa etapa os dados obtidos através dos registros sismográficos foram agrupados com aqueles constantes dos planos de fogo praticados nos eventos que os originaram (carga por espera, retardos, forma de ligação, etc...) e com as distâncias entre as frentes detonadas e os pontos de monitoramento.

A partir daí encaminhou-se a análise em relação a outros pares ordenados de dados (velocidade de partícula e distância escalonada) e em relação à equação probabilística de atenuação obtida com os dados de monitoramentos anteriores.

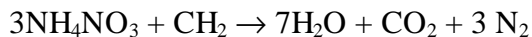
2 - Impactos ambientais associados a desmontes de rochas com explosivos

Os principais impactos ambientais decorrentes de desmontes de rochas com explosivos estão associados à dissipação da fração de energia liberada pelo explosivo na detonação que não é transformada em trabalho útil. Tal fração de energia dissipa-se, em sua maior parte, através do maciço circundante sob a forma de vibrações, e da atmosfera sob a forma de sobrepressão atmosférica. Gera, complementarmente, poeira, podendo ainda ocasionar danos ao maciço remanescente e ultralanchamentos. Outro efeito indesejável na detonação é a geração de gases tóxicos. Eston (1998) cita ainda como efeitos deletérios relacionados aos desmontes de rocha a possibilidade de contaminação de águas subterrâneas pelo escoamento de produtos químicos contidos nos furos e incômodos visual e psicológico decorrentes da não familiaridade do cidadão comum com a atividade.

2.1 - Poeiras e gases tóxicos

Poeira, ou material particulado em suspensão, é gerada em operações de desmonte de rochas durante a perfuração do maciço pela ação das ferramentas de corte, aliado à limpeza do furo com o uso de ar comprimido, e durante a detonação com a ejeção de material constituinte do tampão e de fragmentos gerados. Equipamentos de perfuração dotados de coletores de pó ou a realização de perfuração a úmido são medidas de contenção. Detonações em condições atmosféricas que facilitem a dispersão da poeira minimizam seus efeitos sobre a população.

Em condições ideais os gases gerados na detonação de explosivos constituiriam-se de vapor d'água, gás carbônico e nitrogênio, conforme mostrado pela reação de detonação de mistura de nitrato de amônio e óleo combustível - ANFO (Gregory, 1973).



Formulações inadequadas dessa mistura provocam a geração de gases sob a forma de NO_x e CO , considerados tóxicos. Dias (2001) cita ainda a possibilidade de ocorrência de gases sob a forma de SO_x decorrente da utilização de óleo combustível contendo enxofre em sua composição. A geração de fuligem está associada ao excesso de óleo combustível.

2.2 – Ultralaçamento

A Associação Brasileira de Normas Técnicas, em sua norma NBR 9653, define ultralaçamento como o “arremesso de fragmentos de rocha de diâmetro superior a 1000 µm além da área de operação decorrentes do desmonte de rocha com uso de explosivos” (ABNT, 1986) .

Dele decorrem os maiores riscos pessoais e materiais passíveis de ocorrer em um desmonte de rochas com explosivos. Sua prevenção dá-se na elaboração de um bom plano de fogo, não sendo, entretanto, suficiente para evitá-los.

Silva et al (2000) citam as seguintes causas de ultralaçamentos:

- afastamento insuficiente ou excessivo
- impróprio alinhamento dos furos
- iniciação instantânea de furos em filas consecutivas
- ocorrência de anomalias geológicas
- tampão inadequado
- ultraquebras ou fragilização da face livre, decorrentes de detonações anteriores

2.3 - Danos ao maciço remanescente

A ação do explosivo sobre o maciço remanescente ao desmonte pode ocasionar a fragmentação e/ou deslocamento de material além da última linha de perfurações, podendo acarretar a ocorrência de ultralaçamentos em desmontes subseqüentes.

Pode ser causa também de instabilidade de taludes (Cerele et al, 1987).

2.4 - Ruído e sobrepressão atmosférica

Definindo sobrepressão atmosférica como toda propagação de uma onda elástica pelo ar, Eston (1998) considera ruído como a sobrepressão situada na faixa de frequências entre 20 Hz e 20.000 Hz e considerada desagradável segundo algum critério humano. Às sobrepressões com frequências inferiores a 20 Hz denomina-se infra-sons; àquelas com frequências superiores a 20.000 Hz, ultra-sons. Considera ainda conceitualmente equivocada a utilização do termo 'sopro de ar' por avaliar que tal terminologia implica em deslocamento de matéria.

Sanches (1995), por sua vez, define "sobrepessão atmosférica ou sopro de ar como um termo que se refere à propagação pelo ar de ondas de choque provenientes da detonação de cargas explosivas".

Ambos consideram, entretanto, que as principais fontes de sobrepressão - uma vez que definem ruído como uma sobrepressão em faixa de frequência audível - em um desmonte de rochas com explosivos estão relacionadas a:

- liberação de gases através de fraturas e da parte superior da coluna de explosivos, com ejeção do tampão;
- detonação de explosivos não confinados;
- deslocamento da fração do maciço rochoso sujeita ao desmonte;
- refração das ondas sísmicas através da atmosfera.

Suas condições de dispersão dependem das condições atmosféricas existentes no local no momento do desmonte, como direção e intensidade do vento, presença de inversões térmicas, nebulosidade, temperatura e pressão.

Seus efeitos vão de incômodos à população vizinha a danos em edificações. Segundo Silva et al (2000) as ações mitigadoras possíveis dão-se por meio de:

- verificação das condições meteorológicas existentes, evitando a detonação em situações desfavoráveis;
- execução de malhas de perfuração perfeitamente demarcadas e perfuradas;
- não direcionamento da frente de detonação para o local a ser preservado;
- detonações em horário de maior ruído;
- implantação de obstáculos entre a fonte e o local a ser preservado;
- adoção do maior tampão possível e material adequado;
- recobrimento de acessórios de detonação explosivos;
- colocação de tampão intermediário em fraturas;
- redução da carga máxima de explosivo a ser detonada instantaneamente;
- adequação do tempo de retardo, fazendo $t = 2.s/v$, onde t - tempo de retardo, s o afastamento em metros e v a velocidade de propagação do som em metros por segundo;
- iniciação do fogo na extremidade mais próxima do local a ser preservado;
- redução da frequência de detonações por período produtivo através de acréscimo no número de furos por detonação.

O limite de pressão acústica admitido pela ABNT é de 134 dB(L) pico no ambiente externo à área de operação da mina, assim entendida como aquela sujeita a concessão, licenciamento ou área de propriedade da empresa. A CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental - recomenda, com base no projeto de norma D7.013: Mineração por Explosivos, de 1992, limite máximo de 128 dBL linear- pico de sobrepressão do ar, medido fora dos limites da propriedade da mineração ou da área por ela ocupada sob qualquer forma, como posse, arrendamento, servidão, concessão, etc.

2.5 Vibrações propagadas pelo terreno

A fração da energia liberada pela detonação de cargas explosivas, transmitida ao maciço e não absorvida na fragmentação e lançamento de sua parcela sujeita ao desmonte provoca perturbações que se manifestam pela movimentação de suas partículas constituintes em torno de sua posição de equilíbrio, que será tão acentuada quanto maior for a intensidade da perturbação, dentro dos limites elásticos do meio. Essa movimentação de partículas é transmitida àquelas situadas em seu entorno, e assim sucessivamente, causando a propagação da onda através do maciço (princípio de Huygens).

Manifesta-se inicialmente como ondas compressivas, às quais se seguem ondas secundárias ou cisalhantes; sua interação em interfaces com o ar gera ondas de superfície Rayleigh e Love, denominadas genericamente ondas sísmicas.

A propagação dessas ondas sísmicas é afetada, em sua intensidade, pela energia liberada na fonte, distância percorrida, características do meio, tipo de onda, frequência, ângulo de incidência com interfaces entre meios distintos e discontinuidades existentes no meio.

Vibrações são, portanto, decorrentes da resposta do maciço a tais perturbações, e são quantificadas através das grandezas deslocamento, aceleração e velocidade de partícula, assim denominada para diferenciá-la da velocidade de propagação da onda. Dadas as características da fonte, essas vibrações são classificadas como transientes.

São, provavelmente, a principal causa de conflitos envolvendo empreendimentos que empregam em sua atividade produtiva o desmonte de rochas com a utilização de explosivos e sua vizinhança.

Langefors e Kihlström (1978) sustentam que também deveriam ser feitas considerações sobre como tais vibrações são entendidas, já que parte considerável desta animosidade decorre de um falso conceito de risco de danos por parte de leigos, os quais consideram, ainda, que o empreendimento não disponibiliza informações quando ocorre algo desagradável.

Neste sentido, Stagg et al. (1984; in Sanches, 1995) estudaram a origem e o processo de fissuração em residências e chegaram à conclusão de que a atividade humana e as variações de temperatura e umidade provocam deformações em paredes equivalentes a movimentos vibratórios de elevada amplitude.

Desde a década de 30 estudos vêm sendo realizados no sentido de estabelecer critérios de danos e desconforto a pessoas, decorrentes de vibrações ocasionados em desmontes de rochas por explosivos. Ainda segundo Sanches (1995), desde aquela época trabalha-se em busca de uma relação empírica entre alguma medida de energia da vibração e a possibilidade de danos à residência e outras estruturas existentes na cercania; de uma relação empírica entre a carga detonada e a energia de vibração, em função da distância; limites máximos admissíveis de vibração e de medidas economicamente viáveis a serem tomadas para evitar que as vibrações ultrapassem esses limites máximos, além de equipamentos capazes de captar as vibrações de maneira precisa, confiável e reproduzível.

3 – Vibrações no terreno decorrentes de desmontes de rochas com explosivos

3.1 – Conceitos básicos aplicados no estudo de vibrações

3.1.1 - Elasticidade

Segundo Timoshenko e Goodier (1980), se as forças externas que produzem deformação em um corpo homogêneo e isotrópico não excederem um certo limite, a deformação desaparece quando tais forças deixarem de atuar. A propriedade de um corpo em resistir a esta deformação e sua capacidade para retornar à forma original irá definir sua elasticidade particular – que será expressa por suas constantes elásticas.

A Lei de Hooke estabelece relações lineares entre as componentes de tensão e as componentes de deformação. Imaginando-se um paralelepípedo retângulo elementar com as faces paralelas aos eixos coordenados triortogonais, submetido à ação da tensão normal σ_x , uniformemente distribuída sobre duas faces opostas, o alongamento unitário do elemento, até o limite de proporcionalidade, é dado por:

$$\varepsilon_x = \sigma_x / E \dots\dots (eq. 3.1.1.1)$$

onde E é o módulo de elasticidade longitudinal na tração ou módulo de Young.

Esse alongamento do elemento na direção x é acompanhado por componentes laterais de deformação (contrações):

$$\varepsilon_y = - \nu \cdot \sigma_x / E \dots\dots\dots (eq. 3.1.1.2)$$

$$\varepsilon_z = - \nu \cdot \sigma_x / E \dots\dots\dots (eq. 3.1.1.3)$$

em que ν é uma constante chamada coeficiente de Poisson. O módulo de elasticidade longitudinal e o coeficiente de Poisson na compressão são os mesmos que ocorrem na tração.

Se o elemento acima estiver submetido simultaneamente à ação de tensões normais σ_x , σ_y e σ_z , uniformemente distribuídas sobre as faces, as componentes de deformação

resultantes podem ser obtidas das equações acima. Se forem superpostas as componentes de deformação produzidas por cada uma das três tensões obtêm-se:

$$\varepsilon_x = [\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)] / E \dots\dots\dots (\text{eq 3.1.1.4})$$

$$\varepsilon_y = [\sigma_y - \nu(\sigma_x + \sigma_z)] / E \dots\dots\dots (\text{eq 3.1.1.5})$$

$$\varepsilon_z = [\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)] / E \dots\dots\dots (\text{eq. 3.1.1.6})$$

Se tensões cisalhantes atuam sobre todas as faces de elemento cúbico com faces paralelas aos eixos coordenados, a distorção do ângulo entre duas faces quaisquer que se interceptem depende da correspondente componente da tensão cisalhante. A relação entre a deformação angular e a tensões cisalhantes aplicadas a um corpo é definida por:

$$\gamma_{xy} = \tau_{xy} / G \dots\dots\dots (\text{eq 3.1.1.7})$$

$$\gamma_{yz} = \tau_{yz} / G \dots\dots\dots (\text{eq. 3.1.1.8})$$

$$\gamma_{zx} = \tau_{zx} / G \dots\dots\dots (\text{eq. 3.1.1.9})$$

com

$$G = E / 2.(1 + \nu) \dots\dots\dots (\text{eq. 3.1.1.10})$$

Sendo a constante G denominada módulo de elasticidade transversal, módulo de rigidez ou módulo de elasticidade ao cisalhamento.

As letras subscritas para a tensão cisalhante τ indicam, a primeira, a direção da normal ao plano em consideração, e a segunda, a direção da componente de tensão. Assim, se forem consideradas as faces perpendiculares ao eixo x, a componente de tensão na direção y é designada por τ_{xy} . A notação subscrita para a deformação angular é aquela associada à tensão cisalhante que a provocou.

Somando as equações 3.1.1.4, 3.1.1.5 e 3.1.1.6 e fazendo

$$\theta = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z$$

$$e = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z \quad (\text{a})$$

obtêm-se a seguinte relação entre a expansão volumétrica ou dilatação volumétrica unitária \underline{e} e a soma das tensões normais:

$$e = (1 - 2\nu) \cdot \theta / E \quad \dots\dots\dots \text{(eq. 3.1.1.11)}$$

No caso de uma pressão hidrostática uniforme de valor \underline{p} temos:

$$\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = -p$$

E a equação 3.1.1.11 fornece:

$$e = -p \cdot [3 \cdot (1 - 2\nu) / E] \quad \dots\dots\dots \text{(eq. 3.1.1.12)}$$

que representa a relação entre a expansão volumétrica unitária \underline{e} e a pressão hidrostática \underline{p} .

A relação $E / 3 \cdot (1 - 2\nu)$ é denominada módulo de expansão volumétrico ou módulo de elasticidade volumétrico ou módulo de compressibilidade e é representada por K .

Usando as notações (a) e resolvendo as equações 3.1.1.5, 3.1.1.6 e 3.1.1.7, vem:

$$\sigma_x = [e \cdot \nu \cdot E / (1 + \nu)(1 - 2\nu)] + \epsilon_x \cdot E / (1 + \nu) \quad \dots\dots\dots \text{(eq. 3.1.1.13)}$$

$$\sigma_y = [e \cdot \nu \cdot E / (1 + \nu)(1 - 2\nu)] + \epsilon_y \cdot E / (1 + \nu) \quad \dots\dots\dots \text{(eq. 3.1.1.14)}$$

$$\sigma_z = [e \cdot \nu \cdot E / (1 + \nu)(1 - 2\nu)] + \epsilon_z \cdot E / (1 + \nu) \quad \dots\dots\dots \text{(eq. 3.1.1.15)}$$

Fazendo $\lambda = \nu \cdot E / (1 + \nu)(1 - 2\nu)$:

$$\sigma_x = \lambda \cdot e + 2 \cdot G \cdot \epsilon_x \quad \dots\dots\dots \text{(eq. 3.1.1.16)}$$

$$\sigma_y = \lambda \cdot e + 2 \cdot G \cdot \epsilon_y \quad \dots\dots\dots \text{(eq. 3.1.1.17)}$$

$$\sigma_z = \lambda \cdot e + 2 \cdot G \cdot \epsilon_z \quad \dots\dots\dots \text{(eq. 3.1.1.18)}$$

sendo λ denominado constante de Lamé.

3.1.2 - Propagação de ondas elásticas

A ação de uma força aplicada a um corpo não é transmitida instantaneamente a todas as suas partes, sendo irradiada a partir da região carregada com velocidades finitas de propagação. Essa perturbação em propagação constitui uma onda. Como no caso da propagação do som no ar, não existe perturbação em um ponto até que a onda tenha tempo de alcançá-lo. No caso de sólidos elásticos, entretanto, existem mais de uma onda e mais de uma velocidade característica de onda.

Se uma perturbação é produzida em um ponto de um meio elástico, irradiam-se ondas deste ponto em todas as direções. A uma grande distância em relação ao centro de perturbação tais ondas podem ser consideradas como ondas planas, e pode-se supor que todas as partículas movem-se paralelamente à direção de propagação da onda - ondas longitudinais -, ou perpendicularmente a esta direção - ondas transversais -.

Para as ondas longitudinais, ou compressionais, ou primárias, sua velocidade de propagação é obtida a partir das seguintes relações (Timoshenko e Goodier, 1980):

$$v_L = [(\lambda + 2G)/\rho]^{1/2} \dots\dots\dots \text{(eq. 3.1.2.1)}$$

$$v_L = \{[E.(1 - \nu)]/[(1 + \nu).(1 - 2\nu).\rho]\}^{1/2} \dots\dots\dots \text{(eq. 3.1.2.2)}$$

$$v_L = [(K + 4/3.G)/\rho]^{1/2} \dots\dots\dots \text{(eq. 3.1.2.3)}$$

onde:

λ - constante de Lamé

G - módulo de rigidez

ρ - densidade do meio

E - módulo de Young

ν - coeficiente de Poisson

K - módulo de compressibilidade

Considerando-se o eixo x de um sistema de eixos coordenados triortogonais coincidente com a direção de propagação de uma onda longitudinal, tem-se:

$$\sigma_x = - \rho. v_L. v \dots\dots\dots \text{(eq. 3.1.2.4)}$$

onde:

σ_x - tensão no sentido da propagação

ρ - densidade do meio

v_L - velocidade de propagação das ondas longitudinais.

v - velocidade de partícula; velocidade adquirida pelas partículas na zona submetida à perturbação.

Ao produto da velocidade de propagação pela densidade do meio denomina-se impedância acústica.

Para as ondas transversais, cisalhantes ou secundárias, sua velocidade de propagação é obtida a partir das seguintes relações:

$$v_T = (G/\rho)^{1/2} \dots\dots\dots (\text{eq. 3.1.2.5})$$

$$v_T = \{E/[2\rho(1+\nu)]\}^{1/2} \dots\dots\dots (\text{eq. 3.1.2.6})$$

onde:

G - módulo de rigidez

ρ - densidade do meio

E - módulo de Young

ν - coeficiente de Poisson

K - módulo de compressibilidade

As ondas longitudinais e transversais são denominadas ondas de corpo. A relação entre suas velocidades de propagação pode ser obtida através de:

$$v_T = v_L \cdot [(1 - 2\nu)/2 \cdot (1 + \nu)]^{1/2} \dots\dots\dots (\text{eq. 3.1.2.7})$$

Para um material com coeficiente de Poisson igual a 0,25 tem-se: $v_T = v_L / 3^{1/2}$.

A propagação de perturbações em meio homogêneo isotrópico obedecendo à Lei de Hooke foi representada como uma superposição de ondas longitudinais de velocidade v_L e ondas transversais de velocidade v_T . Mesmo quando existem discontinuidades na velocidade das

partículas e nas tensões nas frentes de onda, v_L e v_T são as únicas velocidades de onda possíveis no meio infinito quando a perturbação inicial é confinada a uma região interna finita.

Quando existem contornos livres (ou interfaces entre dois meios) são possíveis outras velocidades de propagação. As "ondas de superfície" podem aparecer, envolvendo movimento essencialmente em uma fina camada superficial. Foi Lord Rayleigh quem pela primeira vez chamou a atenção para sua existência, assinalando que:

"Não é improvável que as ondas de superfície aqui estudadas exerçam papel importante em terremotos e colisões de corpos elásticos. Propagando-se somente em duas dimensões, estas ondas devem adquirir, a grandes distâncias da fonte, uma importância continuamente crescente." (Timoshenko e Goodier, 1980).

As ondas Rayleigh caracterizam-se por um movimento elíptico e retrógrado das partículas num plano vertical ao sentido de propagação. Para $\nu = 0,25$ sua velocidade de propagação, v_R , é dada por:

$$v_R = 0,9194 (G/\rho)^{1/2} \dots\dots\dots (\text{eq. 3.1.2.8})$$

onde:

G - módulo de rigidez

ρ - densidade do meio

As ondas Love desenvolvem-se na própria superfície, provocando deformações ortogonais à direção de propagação.

Uma vez conhecidas as velocidades de propagação das ondas longitudinais e transversais podem ser determinados os parâmetros elásticos do material a partir das seguintes relações (Dourado, 1984):

Das equações 3.1.2.2 e 3.1.2.6 vem:

$$\nu = [(v_L / v_T)^2 - 2] / [2.(v_L / v_T)^2 - 2] \dots\dots (\text{eq. 3.1.2.9})$$

com ν representando o coeficiente de Poisson dinâmico.

Da equação 3.1.2.2 obtém-se o módulo de Young dinâmico:

$$E = [v_L^2 \cdot \rho \cdot (1-2\nu)(1-\nu)]/(1-\nu) \dots\dots\dots (\text{eq. 3.1.2.10})$$

Da equação 3.1.2.5 obtém-se o módulo de cisalhamento dinâmico:

$$G = \rho \cdot v_T^2 \dots\dots\dots (\text{eq. 3.1.2.11})$$

Das equações 2.2.3 e 2.2.5 obtém-se o módulo de compressibilidade dinâmico:

$$K = (\rho \cdot v_L^2) - [(4 \cdot \rho \cdot v_T^2)/3] \dots\dots\dots (\text{eq. 3.1.2.12})$$

A terminologia **dinâmico** é utilizada nos parâmetros elásticos determinados por meio das velocidades de propagação de ondas longitudinais e transversais e têm o objetivo de diferenciá-los dos parâmetros obtidos por intermédio de ensaios estáticos.

3.1.3 - Partição de energia em uma interface

Uma onda mecânica ao incidir sobre uma superfície de separação entre dois meios com características elásticas distintas terá parte de sua energia transferida através daquela interface e parte será refletida. Essa partição de energia depende principalmente do ângulo de incidência entre a onda e a interface e do contraste de impedância acústica entre os dois meios. Para incidência normal de uma onda longitudinal numa interface, separando meios com velocidades de propagação v_1 e v_2 e densidades ρ_1 e ρ_2 , respectivamente, e considerando que não exista perda de energia na interface, a relação entre as amplitudes, retratadas aqui através das velocidades de partícula das ondas refletida e incidente, é expressa por (Dourado, 2001; Badley, 1985; Fernandes, 1984):

$$k = v_r/v_i = (v_2 \cdot \rho_2 - v_1 \cdot \rho_1)/(v_2 \cdot \rho_2 + v_1 \cdot \rho_1) \dots\dots\dots (\text{eq. 3.1.3.1})$$

Com:

v_{ri} - velocidade de partícula da onda refletida e

v_i - velocidade de partícula da onda incidente.

sendo k denominado coeficiente de reflexão.

Segundo Fernandes (1984), na mesma interface e para o mesmo sentido de propagação, chamando de:

$$E_i = v_i^2 \cdot \nu_1 \cdot \rho_1 \quad \text{o fluxo de energia incidente (eq. 3.1.3.2)}$$

$$E_{ri} = v_{ri}^2 \cdot \nu_1 \cdot \rho_1 \quad \text{o fluxo de energia refletida e (eq. 3.1.3.3)}$$

$$E_{tr} = v_{tr}^2 \cdot \nu_2 \cdot \rho_2 \quad \text{o fluxo de energia refratada, ou transmitida.(eq. 3.1.3.4),}$$

sendo:

v_{tr} - velocidade de partícula da onda refratada.

Uma vez que os fluxos de energia vibratória - ou intensidade acústica - (energia por unidade de tempo e por unidade de área de seção transversal ao sentido de propagação) são proporcionais ao quadrado das respectivas amplitudes e às impedâncias acústicas dos meios, tem-se:

$$E_i = E_{ri} + E_{tr} \quad \text{..... (eq. 3.1.3.5)}$$

Ou

$$v_i^2 \cdot \nu_1 \cdot \rho_1 = v_{ri}^2 \cdot \nu_1 \cdot \rho_1 + v_{tr}^2 \cdot \nu_2 \cdot \rho_2 \quad \text{..... (eq. 3.1.3.6)}$$

$$E_{ri} / E_i = (v_{ri} / v_i)^2 = k^2 \quad \text{..... (eq. 3.1.3.7),}$$

sendo k denominado coeficiente de reflexão.

e

$$E_{tr} / E_i = 1 - k^2 \quad \text{..... (eq. 3.1.3.8)}$$

ou

$$(v_{tr}^2 \cdot v_2 \cdot \rho_2) / (v_i^2 \cdot v_1 \cdot \rho_1) = 1 - k^2 \dots\dots\dots (eq. 3.1.3.9)$$

$$(v_{tr}/v_i)^2 = (1 - k^2) \cdot (v_1 \cdot \rho_1 / v_2 \cdot \rho_2) \dots\dots\dots (eq. 3.1.3.10)$$

Chamando a impedância acústica de \underline{z} , e fazendo:

$$z_1 = v_1 \cdot \rho_1 \dots\dots\dots (eq. 3.1.3.11)$$

$$z_2 = v_2 \cdot \rho_2 \dots\dots\dots (eq. 3.1.3.12)$$

vem:

$$(v_{tr}/v_i)^2 = 1 - (z_2 - z_1 / z_2 + z_1)^2 (z_1 / z_2) \dots\dots (eq. 3.1.3.14)$$

$$v_{tr}/v_i = 2 \cdot z_1 / (z_2 + z_1) = \Phi \dots\dots\dots (eq. 3.1.3.15),$$

denominando-se Φ coeficiente de transmissão.

Pode-se concluir que $k + \Phi = 1$, ou $v_i = v_{rl} + v_{tr}$

e a relação entre a energia transmitida E_{tr} e a incidente E_i é expressa por:

$$E_{tr}/E_i = 4 \cdot z_1 \cdot z_2 / (z_2 + z_1)^2 \dots\dots\dots (eq. 3.1.3.16)$$

Das definições de \underline{k} e $\underline{\Phi}$, percebe-se que se a impedância acústica do meio 2 for maior que a do meio 1, tanto a onda refletida como a refratada mantém a fase da onda incidente, com amplitudes atenuadas pelos fatores \underline{k} e $\underline{\Phi}$, respectivamente. No caso em que a impedância acústica do meio 2 é menor que a do meio 1, mantido o sentido original de propagação, a onda refletida possui sinal invertido em relação à incidente de modo atenuado, enquanto que a refratada repete a fase da onda incidente de modo amplificado, mantida a condição $E_i = E_{rl} + E_{tr}$.

Para $k = 0$ ($\Phi = 1$), significa que toda a energia incidente é transmitida, indicando a inexistência de contraste de impedâncias entre dois meios, o que não significa, necessariamente, a inexistência de interface separando materiais diferentes.

3.1.4 – Mecanismos de atenuação

A partir de sua fonte e enquanto se deslocam através de um meio, as ondas mecânicas têm sua energia reduzida devido à expansão geométrica da frente de onda e à absorção pelo meio.

Considerando a liberação instantânea de energia em uma fonte pontual imersa em um meio infinito, homogêneo e isotrópico, o lugar geométrico dos pontos submetidos à perturbação dela decorrente em um instante t descreve uma frente de onda esférica de raio r e superfície de área S . O incremento da área desta esfera durante a propagação da frente de onda é proporcional ao quadrado de seu raio. Assim, considerando inexistentes outras perdas, a energia por ela transmitida por unidade de área varia inversamente com o quadrado da distância da fonte. Tendo em vista que sua amplitude é proporcional à raiz quadrada da energia por unidade de área, tem-se que a sua amplitude varia com o inverso da distância da fonte.

Segundo Dourado (2001), chamando de A_0 a amplitude de onda junto à fonte e A a amplitude em um ponto a uma distância r , temos:

$$A = A_0 / r \dots\dots\dots (\text{eq. 3.1.4.1})$$

A componente da atenuação devido à absorção refere-se à perda de energia através de descontinuidades, atrito interno e desvios em seu comportamento elástico em relação àquele considerado ideal, segundo Dourado (2001), é expressa através de:

$$A = A_0 e^{-\alpha \cdot r} \dots\dots\dots (\text{eq. 3.1.4.2})$$

Onde:

α - coeficiente de atenuação inelástica

A - amplitude a uma distância r da fonte

A_0 - amplitude inicial

A combinação dos efeitos da atenuação referentes à expansão geométrica da frente de onda e da inelasticidade do meio fornece (Dourado, 2001):

$$A = (A_0 e^{-\alpha.r})/r \dots\dots\dots (\text{eq. 3.1.4.3})$$

De acordo com Dinis da Gama (2001), em rochas, o fator de transmissibilidade Q é utilizado como indicador de seu desvio em relação ao comportamento considerado ideal. Normalmente rochas sãs, consolidadas, não fraturadas, possuem valores de Q elevados e exibem excelentes características de propagação de ondas. Rochas fraturadas, pouco consolidadas e porosas apresentam baixos valores de Q. Define-se Q através da relação:

$$Q = 2. \pi.(W / \Delta W) \dots\dots (\text{eq. 3.1.4.4})$$

onde W representa a energia fornecida à rocha através de um ciclo dinâmico e ΔW a fração de energia dissipada neste ciclo.

O fator de transmissibilidade Q correlaciona-se com o coeficiente de atenuação α através de (Jaeger & Cook in Diniz da Gama, 2001):

$$Q = \pi.f / v.\alpha \quad \text{ou} \quad \alpha = \pi.f / v.Q \dots\dots\dots (\text{eq. 3.1.4.5})$$

onde;

f - frequência dominante da vibração

v - velocidade de propagação da onda no meio

Assim, em um determinado meio de propagação o coeficiente de atenuação será tanto maior quanto o for a frequência dominante da perturbação.

3.1.5 - Vibrações

Thomson (1978) estabelece que o estudo das vibrações diz respeito aos movimentos oscilatórios de corpos e às forças que lhes estão associadas.

As vibrações podem ser divididas em duas classes gerais, as livres e as forçadas. Vibração livre acontece quando um sistema oscila sob a ação de forças que lhe são inerentes e na ausência da ação de qualquer força externa. Neste caso o sistema pode vibrar com uma ou mais das suas frequências naturais, que são peculiares ao sistema dinâmico estabelecido pela distribuição de sua massa e rigidez.

Denomina-se vibração forçada quando ela ocorre sob a excitação de forças externas. Quando a excitação é oscilatória, o sistema é obrigado a vibrar na frequência da excitação. Se essa frequência coincide com uma das frequências naturais do sistema forma-se um estado de ressonância, podendo resultar em amplas e perigosas oscilações.

Os sistemas de vibração são todos eles sujeitos a um certo grau de amortecimento, em face da absorção de energia pelo atrito e outras resistências.

O movimento oscilatório pode repetir-se regularmente ou apresentar irregularidade considerável, como em terremotos. Quando o movimento repete-se a intervalos iguais de tempo é denominado movimento periódico. O tempo de repetição é denominado período da oscilação e sua recíproca é denominada frequência.

A forma mais simples de movimento periódico é o movimento harmônico, representado através de:

$$s = A_0 \text{ sen } 2.\pi.t/ T \text{ (eq. 3.1.5.1)}$$

Onde:

A_0 - amplitude de oscilação, medida a partir da posição de equilíbrio;

T - período de oscilação;

s - deslocamento da massa no instante t.

Considerando-se um ponto que se move em uma circunferência a velocidade constante e designando-se por ω a velocidade angular, em radianos por segundo, a representação da projeção do deslocamento s em uma linha reta é expresso por:

$$s = A_0 \cdot \text{sen } \omega \cdot t \dots\dots\dots (\text{eq. 3.1.5.2})$$

Uma vez que o movimento repete-se a cada $2 \cdot \pi$ radianos, tem-se a relação:

$$\omega = 2 \cdot \pi / T = 2 \cdot \pi \cdot f$$

onde T e f são o período e a frequência do movimento harmônico, medidos em segundos e ciclos por segundo, ou Hertz, respectivamente.

A velocidade do movimento harmônico pode ser determinada pela diferenciação da equação 2.4.2, enquanto a aceleração pode ser obtida pela diferenciação da equação da velocidade.

$$v = \omega \cdot A_0 \cdot \text{cos } \omega \cdot t = \omega \cdot A_0 \cdot \text{sen } (\omega \cdot t + \pi/2) \dots\dots\dots (\text{eq. 3.1.5.3})$$

$$a = -\omega^2 \cdot A_0 \cdot \text{sen } \omega \cdot t = \omega^2 \cdot A_0 \cdot \text{sen } (\omega \cdot t + \pi) \dots\dots\dots (\text{eq. 3.1.5.4})$$

Movimentos irregulares, que aparentam não possuir período definido, podem ser considerados como a soma de um número muito grande de movimentos regulares de frequências variadas e suas propriedades podem ser definidas estatisticamente.

3.2 - Desmonte de rochas com explosivos

Uma vez que o objetivo do presente estudo restringe-se a desmontes executados no processo produtivo de mineração a céu aberto, considera-se desnecessária a abordagem de técnicas especiais de desmonte, como desmonte escultural e detonação amortecida, bem como aquelas que dizem respeito a aberturas subterrâneas.

As operações de desmonte de rocha por meio de métodos convencionais dão-se através de processos cíclicos que compreendem a perfuração do maciço rochoso em diâmetro e

distâncias predeterminadas, da introdução de explosivos nos furos, da detonação desse explosivo e da remoção da rocha assim fragmentada.

Procura-se conferir ao maciço, ao longo da realização daqueles processos, uma configuração que forneça o maior número possível de faces livres de modo a possibilitar a realização simultânea de operações distintas do ciclo, de forma que as atividades desenvolvam-se sem interrupções. Tal configuração permite, acessoriamente, mas não com menor importância, que o explosivo empregado possa atingir sua máxima intensidade e efeito, agindo em direção a tais faces livres. Com esse objetivo são desenvolvidas "bancadas", blocos cujas superfícies são delimitadas por dois planos horizontalizados, denominados "praça", o de cota inferior e "topo", onde se desenvolvem os trabalhos, e uma vertical ou verticalizada, denominada "face livre".

Os parâmetros necessários à realização das operações de desmonte de rocha são estabelecidos através dos "planos de fogo" e dele constam os tipos, quantidades e disposição de explosivos e acessórios de detonação a serem utilizados, o diâmetro com que as perfurações devem ser realizadas, seu posicionamento, inclinação e profundidade.

A destinação do produto do desmonte é fator fundamental na elaboração de um plano de fogo. Assim, tratamentos distintos são dados a materiais que se destinam a engenho de beneficiamento ou a pilhas de material estéril. Os fatores limitantes do material destinado a engenho de beneficiamento são as dimensões máximas dos blocos admissíveis pelo equipamento de britagem primária. No segundo caso, a fragmentação está vinculada à capacidade do equipamento de carregamento.

Outros fatores que devem ser considerados na elaboração de um plano de fogo são a conformação da pilha de material desmontado, sua compatibilidade com o equipamento de carregamento utilizado na sua remoção e a preservação, tanto quanto possível, da integridade do maciço remanescente.

3.2.1 - Plano de fogo

Muitos estudos teóricos, apoiados em experiências de campo, foram desenvolvidos para se determinarem valores aos elementos componentes do plano de fogo. A aplicação prática desses estudos requer informações muitas vezes de difícil obtenção e que demandam um tempo relativamente prolongado. Por outro lado, a experiência de muitos desmontes de rocha gerou regras

práticas que permitem estabelecer valores para aqueles elementos com margem de êxito razoável. A partir dos resultados obtidos procede-se ao seu ajuste até a obtenção de condição de desmonte considerada ótima.

Os elementos que compõem o plano de fogo para um determinado maciço rochoso são:

a) Diâmetro dos furos

De uma maneira genérica pode-se dizer que o diâmetro dos furos correlaciona-se com:

- produção necessária
- equipamento de perfuração
- altura da bancada
- capacidade de caçamba do equipamento de carregamento
- equipamento de britagem primária

b) Altura da bancada

Diferença de cotas entre o topo e a praça da bancada.

c) Afastamento

Definido como a distância entre a face da bancada e a primeira linha de furos, ou entre duas linhas sucessivas de furos.

d) Espaçamento

Corresponde à distância entre furos consecutivos de uma mesma linha de furos.

e) Tampão

Tampão ou “ataque” são os nomes que se dá ao material inerte usado para preencher o “colar” (parte vazia do furo, acima do explosivo) após colocação da carga explosiva. Tem a finalidade de confinar a carga explosiva para obter melhor eficiência na detonação, confinar os gases da detonação de forma a que se obtenha um melhor aproveitamento da energia do explosivo e proteger a carga explosiva de uma eventual detonação provocada por agente externo.

f) Subperfuração

Corresponde ao valor em metros de que deve ser aumentada a profundidade do furo, além do piso da bancada, a fim de assegurar o arranque da região do maciço que apresenta maior engastamento.

g) Inclinação dos furos

Representa o ângulo segundo a vertical com que são realizados os furos. Normalmente varia de zero a até 15°. São comumente empregadas inclinações maiores em rochas que tendem a apresentar “repés” após as detonações. Propiciam também maiores lançamentos.

h) Explosivos e acessórios utilizados

A escolha de explosivos adequados é um dos principais fatores para o sucesso do desmonte. Deve-se levar em consideração as propriedades dos explosivos, principalmente velocidade e densidade, correlacionando-as ao tipo de rocha a ser desmontada. Resistência à água é outro dos fatores a ser analisado caso o furo apresente água. Normalmente em um furo são utilizados explosivos dispostos em duas cargas:

- Carga de fundo: onde são empregados explosivos de maior energia. Colocada no fundo do furo atua na região onde o maciço apresenta maior engastamento.

- Carga de coluna: onde são empregados explosivos de menores energia e custo.

No dimensionamento dos parâmetros geométricos que compõem um plano de fogo que se correlacionam intimamente, de modo a atingir os objetivos propostos, são consideradas, ainda, as peculiaridades geológicas locais, como características de planos de aleitamento, fraturamento, presença de água, etc.

3.2.2 - Explosivos e acessórios de detonação

a - Explosivos

Conceituam-se explosivos como aquelas substâncias que, quando submetidas a estímulo adequado, sofrem reação extremamente rápida e fortemente exotérmica, com liberação de grande volume de gases.

Explosivos podem ser deflagrantes ou detonantes. Um explosivo detonante é aquele em que sua reação de decomposição dá-se a velocidade superior à velocidade sônica. Caracteriza-se detonação como a descrição do processo de propagação de uma onda de choque através de um explosivo, acompanhada por uma reação química que fornece energia suficiente para manter tal reação de forma estável. Pólvora negra é uma boa ilustração de explosivos deflagrantes, enquanto explosivos comerciais são representativos de explosivos detonantes (Gregory, 1973).

Na seleção do(s) explosivo(s) a ser(em) utilizado(s) em um desmante de rochas uma análise criteriosa deve ser feita de forma a se obter condições de segurança, confiabilidade e economicidade para que sejam atingidos os resultados desejados.

As principais características a serem observadas na seleção dos explosivos utilizados em um desmante de rochas são:

- força (ou potência): designação pouco apropriada que se dá à quantidade de energia liberada pelo explosivo na detonação. Calculada através de técnicas que utilizam princípios da química e da termodinâmica pode ser expressa tanto em peso quanto em volume de explosivo e indicam as "forças absolutas" em peso ou volume - Absolute Weight Strenght e Absolute Bulk Strenght-. Também pode ser obtida através de comparação com outro explosivo e expressa através das "forças relativas" em peso ou volume - Relative Weight Strenght ou Relative Bulk Strenght -.
- velocidade de detonação: velocidade com que a onda de choque desloca-se através do explosivo. Constante para um determinado explosivo, nele varia com o grau de confinamento a que está submetido e com seu diâmetro.
- massa específica: relação entre a massa e o volume do explosivo.
- pressão de detonação: é a pressão na região de reação que sucede à onda de choque.
- resistência à água: capacidade do explosivo em manter suas características após sua exposição à água.

- sensibilidade: propriedade dos explosivos de detonarem por simpatia quando próximos de uma carga detonada. Refere-se à distância máxima de propagação da detonação através do ar, em condição não confinada, entre dois cartuchos de um determinado explosivo, sendo um iniciado propositadamente.
- iniciador mínimo requerido: quantidade mínima de explosivo iniciador para sua detonação.
- resistência ao choque: capacidade do explosivo em resistir às solicitações mecânicas a que está sujeito nas operações de transporte e manuseio.
- resistência ao armazenamento: tempo que o explosivo pode ficar armazenado sem perder suas características.
- gases tóxicos gerados: volume de gases CO, NO_x e SO₂ gerados na detonação. São classificados em classes 1, 2 e 3, de acordo com o volume crescente de gases tóxicos gerados.

b - Acessórios de detonação

São assim denominados aqueles componentes utilizados na iniciação dos explosivos. Os acessórios de detonação de emprego usual são:

- estopim: filamento de pólvora revestido por algodão e materiais impermeabilizantes. Sua principal característica é a queima a velocidade constante e conhecida. Utilizado na iniciação da espoleta simples.
- espoleta simples: cápsula de alumínio contendo uma carga primária sensível à iniciação térmica (comumente azida de chumbo) e uma secundária de PETN (tetrinitrato de pentaeritritol).
- espoleta elétrica simples: semelhante à espoleta simples, utiliza a energia elétrica como fonte de energia para sua iniciação. Em seu interior a energia elétrica é convertida, através de uma resistência elétrica, em calor que inicia a carga primária.
- espoleta elétrica de retardo: difere da anterior pela interposição entre a carga primária e a resistência elétrica de um dispositivo pirotécnico de queima que provoca um intervalo de tempo determinado entre sua iniciação e a da carga primária.

- cordel detonante: composto por um filamento de PETN revestido por várias camadas têxteis e impermeabilizantes. Sensível à iniciação pelas espoletas simples e elétrica, sua velocidade de detonação é de aproximadamente 7.000 m/s.
- elementos de retardo para cordel detonante: disponíveis em várias configurações, possuem em suas extremidades duas cargas de PETN que são intercaladas por substância pirotécnica de queima com tempo controlado. Os tempos dos elementos de retardo empregados em atividades a céu aberto variam de 5 ms a 250 ms.
- sistema não elétrico: composto por um tubo plástico flexível contendo material reativo que transmite energia térmica, após iniciado, a velocidade constante, à espoleta simples ou de retardo situada em sua extremidade. É sensível à espoleta simples e ao cordel detonante.

Recentemente e ainda em caráter experimental tem sido utilizado no país o detonador eletrônico. Semelhante a uma espoleta elétrica de retardo, dela difere por conter um sistema eletrônico de retardo em lugar do dispositivo pirotécnico de queima. De concepção sofisticada, proporciona grande precisão nos tempos de retardo.

Tais elementos de retardo permitem que se divida a carga total de explosivo a ser detonada em várias cargas menores que são iniciadas em uma seqüência predeterminada em intervalos de tempo específicos. Sua utilização permite o incremento do grau de fragmentação do maciço rochoso e o direcionamento de seu movimento, proporcionando a configuração da pilha de material desmontado às necessidades existentes. Possibilitam também a adequação do desmonte a condicionantes geológicos locais, o controle de vibrações e a redução no ultralancamento de fragmentos.

3.2.3 - Mecanismos de fragmentação

Em que pese a grande quantidade de pesquisas sobre o tema conduzidas nas últimas décadas, não foi desenvolvida uma teoria que explicasse adequadamente o mecanismo primário de

fragmentação em todas as condições de desmonte e tipos de rochas. Ainda que exista consenso entre diversos autores sobre a sucessão de eventos que ocorrem no processo de fragmentação do maciço rochoso, há divergência em relação ao mecanismo preponderante, ou primário, de fragmentação. Assim, as diversas teorias existentes procuram explicar tal mecanismo atribuindo peso maior ou menor a determinado evento ou combinação deles no processo de fragmentação.

São basicamente quatro os eventos que ocorrem durante e após a completa detonação de uma carga explosiva confinada, ao longo dos quais dá-se a fragmentação e deslocamento da parcela do maciço rochoso a ser desmontado (Atlas Powder Company, 1987), os quais serão a seguir apresentados:

a - Detonação: é a fase inicial do processo de fragmentação. Os componentes do explosivo, sob detonação, são imediatamente convertidos em gases sob alta pressão e temperatura. Uma vez que a velocidade de detonação é superior à velocidade sônica do explosivo, o explosivo situado imediatamente à frente da onda de choque não sofre os efeitos da detonação até ser por ela atingido.

b - Propagação de ondas de compressão: imediatamente após a detonação ocorre a propagação das ondas de compressão. Esta perturbação ou onda compressiva transmitida através do maciço rochoso resulta, em parte, do impacto decorrente da rápida expansão de gases sob alta pressão sobre as paredes do furo. A geometria de sua dispersão depende de vários fatores, podendo ser citados a posição do ponto de iniciação, velocidade de detonação e a velocidade de propagação de onda no maciço circundante.

A pressão próxima às paredes do furo aumenta rapidamente até seu pico, decaindo, a seguir, de forma exponencial. Este rápido decaimento é decorrente tanto da expansão da cavidade do furo quanto do resfriamento do gás. A expansão da cavidade ao redor do furo pode ocorrer através de esmagamento, pulverização e/ou deslocamento de material e é decorrente de esforços compressivos que superam em dezenas de vezes a resistência à compressão da rocha, podendo alcançar de uma a três vezes seu diâmetro, dependendo das características da rocha e do explosivo utilizado. Essa região é denominada zona hidrodinâmica, onde a rigidez elástica da rocha torna-se insignificante.

À medida que a frente de onda afasta-se do furo, esforços cisalhantes associados à variação de volume decorrente de seu efeito compressivo têm intensidade suficiente para provocar fraturas radiais a partir do furo. Progressivamente atenuados, os esforços decorrentes de sua propagação deixam de causar danos ao maciço.

Ao encontrar uma descontinuidade, ou interface, parte da energia é transmitida através dela, parte refletida. Essa partição de energia depende do contraste entre as impedâncias dos meios que se posicionam em cada lado da interface. Quando a onda compressiva que se desloca através do maciço rochoso encontra a face livre, praticamente toda a sua energia é refletida como onda de tração. Uma vez que a relação existente entre a resistência à tração e à compressão nas rochas é da ordem de 1/10 ou menor, há tendência à formação de fraturas decorrentes desses esforços, dependendo da distância entre a face livre e a coluna de explosivo.

c - Expansão dos gases: o evento seguinte é a expansão dos gases gerados na detonação. É durante essa fase que surgem as maiores controvérsias sobre o principal mecanismo de fragmentação. Alguns acreditam que a rede de fraturas por todo o maciço está completa, enquanto outros acreditam que o processo principal de fraturamento está justamente começando, debitando-o principalmente à extensão das fraturas geradas pela expansão dos gases e/ou ao movimento de flexão do maciço dela decorrente. De fato, é a expansão dos gases, através das descontinuidades e fraturas, formadas ou em formação juntamente com o esforço transmitido ao maciço pela detonação, que é responsável pelo deslocamento do material fraturado.

Não é suficientemente claro o exato mecanismo da expansão dos gases através do maciço rochoso, embora haja concordância de que ele venha a ocorrer através das regiões que ofereçam menor resistência. Isso significa que os gases primeiramente migram através de descontinuidades no maciço, decorrentes ou não dos eventos anteriores. Se tais descontinuidades entre o furo e a face livre são suficientemente grandes esses gases sob alta pressão são imediatamente dispersos para a atmosfera, resultando em reduzido deslocamento do material fragmentado.

d - Movimento da massa: último estágio do processo de fraturamento. Alguns autores atribuem a ele parcela significativa da fragmentação do maciço, através do entrecchoque dos fragmentos no ar ou entre eles e o piso.

3.2.4 - Rendimento energético

Definido como a relação existente entre a energia liberada pelo explosivo e aquela efetivamente utilizada na fragmentação do maciço rochoso e seu deslocamento de forma a configurar pilha adequada à operação dos equipamentos de carga.

Sua estimativa é obtida a partir do conceito da transmissão da energia liberada pelo explosivo ao maciço rochoso adjacente ao furo, a partir do contraste de impedâncias existente entre eles, considerando-se a impedância do explosivo como o produto entre sua velocidade de detonação e sua massa específica (Berta, 1985, in Eston, 1988 e Bacci, 2000).

Como nem todo o volume do furo é ocupado pelo explosivo, o conceito de acoplamento é introduzido, e determina-se a relação de acoplamento como a razão entre o diâmetro do furo e o da carga explosiva. Define-se como fator de acoplamento a razão entre a energia gerada pelo explosivo e aquela transmitida ao maciço e é expresso por (Berta, 1985, in Eston, 1988 e Bacci, 2000):

$$\eta_{ac} = 1 / [e^{(1/R_{ac})} - (e - 1)] \dots\dots\dots (eq. 3.2.4.1)$$

Onde:

η_{ac} - fator de acoplamento

R_{ac} - razão de acoplamento

A energia transmitida ao maciço, considerando-se ambos os conceitos, passa a ser expressa como:

$$E_t = E_{ex} \cdot \{ 1 - [(z_r - z_{ex}) / (z_r + z_{ex})]^2 \} / [e^{(1/R_{ac})} - (e - 1)] \dots\dots\dots (eq. 3.2.4.2)$$

ou

$$E_t = E_{ex} \cdot 4 \cdot z_{ex} \cdot z_r / \{ (z_r + z_{ex})^2 \cdot [e^{(1/R_{ac})} - (e - 1)] \} \dots\dots\dots (eq. 3.2.4.3)$$

onde:

E_t - energia transmitida à rocha

E_{ex} - energia gerada pelo explosivo

z_r - impedância acústica da rocha

z_{ex} - impedância acústica do explosivo.

Rolim (1993), citando estudos de Fogelson (1959) e Langefors (1963), e Eston (1998) e Bacci (2000), a partir de estudos de Berta (1985), apresentam valores similares para o balanço energético de uma detonação, a partir da energia transmitida ao maciço:

- fragmentação: 15 ~ 18%
- deslocamento do maciço: 5 ~ 6%
- térmica e ruídos (perdas na atmosfera): 36 ~39%
- vibrações no terreno: 40%
- outros (ultralançamentos, ultraquebra): 2,5 ~3%

4 – Impactos ambientais das vibrações propagadas pelo terreno e formas de mitigação

4.1 – Danos associados a vibrações

Langefors e Kihlström (1978) ao estabelecerem seu critério de danos sobre edificações (tabela 4.1.1) consideram que um fator decisivo para sua ocorrência é, entre outros, a relação existente entre a frequência natural da edificação e a frequência da vibração a que ela será submetida; consideram ainda que danos podem ser causados por alongamento, cisalhamento e torção, sendo que tais deformações podem ser incrementadas pela superposição de tensões estacionárias preexistentes na edificação, o que implica a adoção de critérios de danos mais conservadores. Deve-se observar ainda o estado de conservação da edificação.

Propõem o seguinte critério para o risco de danos em habitações, a partir de diversos tipos de material de apoio de suas fundações:

Tabela 4.1.1: Critério para avaliação do risco de danos a edificações proposto por Langefors e Kihlström (1978).

	material			
	areia e argila saturadas	ardósia calcários	calcários duros, quartzitos, gnaiss, granito, diabásio	
Velocidade de propagação da onda (m/s)	300 a 1500	2000 a 3000	4500 a 5000	Danos possíveis
Velocidade de partícula (mm/s)	4 - 18	35	70	Sem rachaduras
	6 - 30	55	110	Rachaduras insignificantes
	8 - 40	80	160	Rachaduras
	12 - 60	115	230	Rachaduras sérias

Siskind et al. (1980) propõem que o critério de vibrações consideradas seguras em detonações deve observar os seguintes limites (tabela 4.1.2).

Tabela 4.1.2 - Critério para a avaliação de danos a edificações proposto por Siskind et al. (1980).

	Frequência			
	até 4 Hz	4 - 15 Hz	15 - 40 Hz	>40 Hz
Nível máximo de vibração	0,762 mm	19,05 mm/s	0,203 mm	50,8 mm/s

Recomendam ainda que, para as construções habitacionais com paredes revestidas com gesso, o limite máximo nos níveis de vibração considerados seguros para baixas frequências (de 4 a 15 Hz) deva ser de 12,5 mm/s.

Observam também que:

- a amplitude, frequências e durações das vibrações se alteram com a propagação, em função de interações com os vários meios geológicos e interfaces estruturais, e do espalhamento do trem de ondas através de dispersão e/ou absorção, que é tanto maior quanto o for a frequência.
- nas proximidades do fogo as características da vibração são afetadas pelos fatores do plano de fogo, geometria da mina, carga de explosivos detonada por espera, tempo dos retardos, direção de iniciação do fogo em relação ao ponto de captação, afastamento e espaçamento.
- a grandes distâncias do fogo os fatores referentes ao plano de fogo tornam-se menos críticos e o meio de propagação composto pelo maciço e solo de recobrimento prepondera sobre as características da onda.
- as amplitudes de velocidade de partícula são aproximadamente mantidas enquanto a energia sísmica propaga de um meio para outro, isto é, do maciço rochoso para o solo.
- frequência de vibração, deslocamento e aceleração dependem fortemente do meio de propagação.
- espesso recobrimento por solo e grandes distâncias criam trens de onda de baixa frequência e grande duração.

As principais conclusões de seu trabalho são:

- velocidade de partícula é a melhor grandeza para a quantificação de níveis de vibração.
- velocidade de partícula é a grandeza mais prática para a regulação de danos potenciais para a classe de estruturas com bem definidas características de resposta às vibrações.
- o potencial de danos em baixas frequências (<40 Hz) é consideravelmente maior que em altas frequências (>40 Hz).
- todas as edificações podem apresentar, eventualmente, fraturas decorrentes de variações ambientais tais como temperatura, umidade e ventos, acomodação de fundações e mesmo absorção de umidade pelas raízes de árvores.

A norma ABNT 9653 - Mineração em Áreas Urbanas com Uso de Explosivos: Redução de Riscos (ABNT, 1986) - estabelece que para preservar a segurança da população, estruturas e edificações circunvizinhas, a velocidade de vibração de partícula resultante não deve ultrapassar o valor de 15 mm/s, nos limites da área de operação de minerações, assim entendida aquela composta pela união da área de concessão de lavra e/ou licenciada e/ou áreas de propriedade da mineração, conforme definidas no Decreto-Lei nº 227, com a área de segurança própria em torno dos depósitos de explosivos.

A velocidade de partícula resultante, ainda de acordo com a norma ABNT 9653, corresponde à soma vetorial dos valores máximos obtidos nas componentes longitudinal, transversal e vertical, tratando-se, portanto, de um pseudo vetor resultante, uma vez que não considera o instante em que tais picos ocorreram.

Proposta de alteração a tal norma está sendo discutida atualmente por comissão criada pela ABNT para esse fim.

4.2 - Reações humanas às vibrações

Siskind et al. (1980), em suas conclusões e a partir de trabalhos de diversos autores que estudaram reações humanas a vibrações, estabelecem que elas podem representar a principal limitação aos níveis admissíveis de vibração decorrentes da detonação de cargas explosivas. Citam ainda que:

- Níveis de vibração passíveis de serem sentidos são consideravelmente menores que aqueles requeridos para produzir danos.
- A reação humana às vibrações depende da duração do evento para as mesmas amplitudes.
- Velocidades de partícula de 12,5 mm/s de uma detonação típica (vibrações com duração de 1 segundo) seriam toleráveis por aproximadamente 95% das pessoas, que as considerariam como “claramente perceptível” (alguns estudos classificam a percepção humana às vibrações em diversos níveis, como “fracamente perceptíveis”, “distintamente perceptíveis” e “fortemente perceptíveis”).
- Relevante na percepção e reação às vibrações é o grau de interferência que provocam em atividades normais (sono, conversação, assistir televisão, ler), oferecendo riscos à saúde e afetando rendimento operacional.
- Para pessoas em residências, os mais sérios problemas relacionados às vibrações são a movimentação nas estruturas, medo (de danos ou prejuízos, além de ferimentos) e, para alguns, interferência em atividades.

O projeto de norma CETESB D7.013 - Mineração por Explosivos, de 1992, carente de homologação, estabelece que o limite máximo admitido não poderá ser superior a "3,00 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. Em ambos os casos, a medição deve ser feita fora dos limites da propriedade da mineração ou da área por ela ocupada sob qualquer forma, como posse, arrendamento, servidão, concessão, etc."

4.3 - Redução das vibrações que se propagam pelo terreno

O principal fator a ser considerado, objetivando a redução das vibrações que se propagam pelo terreno, é a execução criteriosa de planos de fogo adequadamente dimensionados.

Evitar o excessivo confinamento do explosivo através da minimização do desvio de furos, a eliminação de repés - material "in situ" remanescente da detonação anterior posicionado na interseção da face livre com a praça - ou outros obstáculos que impeçam o deslocamento do material desmontado, redução do tampão - mas não a ponto de incrementar a sobrepressão

atmosférica ou acarretar ultralanchamentos - e da subperfuração, é medida efetiva no controle dos níveis de vibração.

A partir do exposto, e considerando-se as condições de rigidez locacional de empreendimentos minerários, a redução da carga de explosivos detonada instantaneamente é o fator primordial que afeta a amplitude da velocidade de partícula. Tal redução pode ser obtida através da interposição entre grupos de minas - furos carregados com explosivos -, ou mesmo entre minas, de elementos de retardo, que provocarão intervalos de tempo entre suas detonações.

A redução no diâmetro de perfuração, altura das bancadas ou mesmo a intercalação no furo de material inerte entre a carga explosiva podem ser adotadas para a redução da carga explosiva a ser detonada instantaneamente, se as condições locais assim o exigirem, estando sua exequibilidade vinculada a condicionantes técnicos e econômicos.

Outras medidas que favorecem a redução nos níveis de vibração são (Silva et al, 2000):

- Sempre que possível proporcionar a progressão da detonação das minas, ou grupos de minas, do ponto mais próximo para o mais afastado do local onde se pretende obter os menores níveis de vibração.
- Adotar elementos de retardo que proporcionem reduzida dispersão em seus tempos.
- Utilizar tempos de retardo elevados, desde que as condições geológicas em conjunção com o sistema de iniciação o permitirem.

A esse respeito Langefors e Kihlström (1978) sugerem, a partir da constatação de que vibrações causadas por detonação de um único furo apresentam sua máxima amplitude somente após algumas prévias menores deflexões e, em muitos casos, pode-se esperar apenas 3 ciclos completos com amplitudes superiores à metade da máxima, podendo as demais serem mais ou menos ignoradas, a adoção de intervalos de tempo na detonação entre furos superior a $3.T$ (T - período). Dessa forma, uma eventual interferência construtiva entre trens de ondas gerados por minas, ou grupo de minas, detonados consecutivamente a tais intervalos resultaria em reduzidos níveis de vibração quando comparados àqueles obtidos com intervalos de tempo menores. Isso poderia ser obtido a partir da adoção de:

$$n.t = k.T$$

onde :

T - período da vibração. Obtido através da determinação da frequência de pico da vibração.

n - número de intervalos de tempo, ou de elementos de retardo utilizados na detonação.

t - tempo de retardo.

k - número inteiro que satisfaça a relação $k/n = 1,2,3,\dots$

Outras medidas citadas por Silva et al, 2000, estas visando à redução na percepção das vibrações, são:

- Reduzir a frequência de detonações por período produtivo através da adoção de um maior número de furos por detonação.
- Procurar coincidir os horários de detonações com períodos de maior atividade na vizinhança.
- Sempre que possível procurar fazer com que o tempo total de duração da detonação não ultrapasse 1 segundo.
- Adotar um programa de relações públicas.

4.4 - Obtenção de equação de atenuação

A dissipação da energia sísmica em maciços rochosos é atribuída a três mecanismos (Atlas Powder Company, 1987):

- 1 - amortecimento viscoso, um efeito mais pronunciado em altas frequências, acompanhado por uma tendência a menores frequências de vibração com o acréscimo da distância da fonte de energia.
- 2 - absorção da energia por fricção na propagação da onda, maior em rochas com granulação grosseira e alta porosidade.
- 3 - dispersão das ondas sísmicas devido a reflexões em descontinuidades e heterogeneidades no maciço rochoso.

A esses mecanismos pode-se acrescentar aquele advindo da dispersão geométrica.

Sobre os mecanismos anteriormente enumerados, de maior imprevisibilidade teórica, sustentam-se as maiores causas de atenuação dos valores de pico das amplitudes de vibração. Assim, tendo em vista as características de heterogeneidade natural dos maciços rochosos, é impossível fazer uma previsão teórica confiável dos níveis de vibração em um determinado local.

Por outro lado, os mecanismos de atenuação de vibrações relacionados às propriedades do maciço tendem a produzir trens de ondas vibratórias característicos ao longo da trajetória de propagação. Assim, pela determinação dos fatores locais de atenuação em um programa de monitoramento de detonações, os níveis de pico de vibração de detonações futuras no local podem ser previstos com razoável precisão, através de métodos estatísticos.

Na determinação dos fatores locais de atenuação, busca-se estabelecer uma correlação entre as amplitudes das vibrações, quantificadas através de deslocamento, aceleração ou velocidade de partícula, normalmente esta, e os fatores sobre os quais se tem controle, a fonte de energia, através da massa de explosivos detonada, e a distância entre ela e o ponto de interesse.

A forma geral de uma equação que correlaciona essas três variáveis com a velocidade de partícula como variável dependente é do tipo:

$$v = a.Q^b.D^c$$

onde:

v - velocidade de partícula

Q - massa de explosivo detonada instantaneamente

D - distância entre a detonação e o local de interesse.

ou

$$v = a. (Q/D^{c/b})^b$$

O fator $(Q/D^{c/b})$ é denominado distância escalonada.

Langefors e Kihlström (1978) propõem a relação $Q/D^{3/2}$ como distância escalonada (denominando-a de nível de carga), com base em estudos que envolveram "enorme quantidade de dados", a distâncias entre 2 m e 60 m das detonações. Consideram serem questionáveis extrapolações realizadas a partir dos dados analisados para distâncias iguais ou superiores a 1000 metros, tendo obtido resultados satisfatórios a distâncias de centenas de metros.

Siskind et al. (1980) adotam como distância escalonada, em trabalho que envolveu a análise de 239 dados referentes a detonações em diferentes processos produtivos, a relação $D/Q^{1/2}$, proposta por Devine, J. F. (1962). (Dozzi et al.,1984)

Ambrasseys & Hendron (1968) adotam como distância escalonada a relação $D/Q^{1/3}$. (Chapot, 1981 e Dozzi et al., 1984).

Dinis da Gama (2001) dispõe sobre o tema: "Vários especialistas indicam que esta relação ($[Q/D^3]^b$) é válida para a vizinhança imediata das explosões, aceitando-se que a diminuição do expoente de D (de 3 para 2) resulta da modificação de característica de atenuação da onda, ao passar de uma forma instável para uma forma elástica estável, a distâncias maiores da origem da explosão. A experiência também mostra que a lei empírica de propagação é essencialmente baseada em detonações de cargas cilíndricas e a consideração de uma simetria cilíndrica na propagação implica uma lei quadrática de atenuação."

Assim, a partir de um programa de monitoramentos sismográficos que permita a obtenção de um número razoável de dados, é possível, por meio de análise de regressão, desenvolver uma equação probabilística de resposta do maciço às detonações originadas em operações de desmonte de rochas.

Como a equação que se espera obter é uma função potência ($v = a.(DE)^b$), ela não poderá advir de uma regressão linear simples. Adota-se assim um artifício que permite, mediante simples transformação, torná-la linear. Uma transformação logarítmica dupla resultará em:

$$\log v = \log a + b \log DE$$

que é uma equação representativa de uma reta, possibilitando a obtenção dos coeficientes **a** e **b** através de regressão linear simples, e onde:

v - velocidade de partícula

a - ponto de interceptação da reta ajustada no eixo das ordenadas

b - coeficiente angular da reta ajustada.

A qualidade do ajuste de tal reta é obtida através do coeficiente de correlação r, ou correlação momento-produto, introduzido por Karl Pearson (Fonseca et al., 1986). Assim, quanto mais próximo de +1 ou -1 estiver o coeficiente de correlação, maior a qualidade do ajuste da reta

proposta. Adota-se na determinação da equação de atenuação o critério de obtenção de distância escalonada segundo o qual se obtém o melhor coeficiente de correlação momento-produto.

Tratando-se de ajuste de uma reta a partir de pontos de um diagrama de dispersão obtido através de monitoramentos, Siskind et al. (1980) sugerem, como medida de segurança, seu deslocamento de dois desvios padrão do conjunto de dados obtidos, o que seria, segundo eles, suficiente para envolver 97,5% dos dados, ou seu deslocamento para a situação mais desfavorável, o que significaria envolver todos os dados, resultando, todavia, em estimativa mais conservadora dos níveis de vibração. Esta última coincide com recomendação elaborada por Langefors e Kihlström (1978).

É interessante reproduzir outra observação de Dinis da Gama (2001), esta a respeito da carga de explosivos detonada: "Tais diagramas podem ser obtidos em função ou da massa total de explosivo detonado, ou da massa detonada por cada retardo do diagrama de fogo, dependendo da gama de distâncias entre o desmonte e as estruturas a proteger. Com efeito, à medida que esta distância aumenta, tem lugar uma atenuação seletiva de frequências (simultânea com dispersão de velocidades) que origina uma sobreposição dos trens de ondas provenientes dos vários retardos, a qual não permite a distinção entre ondas individuais. Geralmente, para distâncias superiores a 1000 metros é formulada a lei de propagação das ondas resultantes da carga explosiva total e, para distâncias inferiores àquela, utiliza-se a equação das ondas provenientes das cargas detonadas por retardo."

É possível ainda a obtenção de equação de atenuação a partir de outros modelos estatísticos, como a regressão linear múltipla.

5 - Área de estudo

A área de estudo compreende uma mineração de calcário dolomítico e argilito e um bairro residencial a ele lindeiro, posicionados a oeste da cidade de Limeira, SP (Anexo I).

Situando-se em área delimitada pelas coordenadas UTM 248 km E e 249 km E e 7.504 km N e 7505 km N (zona 23) - datum Córrego Alegre – ocorre nesse local uma situação que se repete, independentemente dos motivos: a ocupação do entorno de minerações por conjuntos residenciais, normalmente habitados por população de baixa renda e os conflitos dela decorrentes.

Neste caso específico, os embates vêm dando-se entre a empresa mineradora Abílio Pedro Indústria e Comércio Ltda, que opera no local sob a denominação de Calcário Cruzeiro, e habitantes do conjunto habitacional Belinha Ometto, cujos limites encontram-se a aproximadamente 300 metros a sudoeste daqueles estabelecidos como área de lavra do empreendimento.

O acesso à área dá-se pela estrada municipal Limeira 040, situando-se a área administrativa do empreendimento em seu quilômetro 03.

5.1 - Atividades de lavra e beneficiamento

A empresa de mineração Abílio Pedro Indústria e Comércio Ltda é detentora de títulos minerários que incidem sobre parte da área em estudo, no local denominado Fazenda São Bento. Tais títulos a autorizam a realizar o aproveitamento de calcário dolomítico, utilizado como corretivo de solos.

Está em processo de regularização o aproveitamento econômico de argilito, material que compõe o capeamento do calcário dolomítico. Durante muitos anos considerado como material estéril, foi utilizado principalmente na recuperação de áreas lavradas.

Os trabalhos de lavra são realizados a céu aberto, em cava, dada sua posição em relação ao nível principal dos trabalhos.

As bancadas desenvolvidas apresentam alturas variáveis, acompanhando razoavelmente as variações litológicas existentes e são denominadas de acordo com terminologia local. Assim, da base para o topo, para fins de lavra, são denominadas de:

- **“calcário”**: calcário dolomítico, ocorrendo na base da jazida com uma altura média de 3,70 metros. Integra a Formação Irati e, em função de suas características químicas, tem sido utilizado na agricultura, como corretivo de solo.
- **“carvão”**: com altura média de 11,00 metros, é constituída por intercalação de folhelho e calcário, sendo parcialmente aproveitado, quando é maior a participação de calcário. Formação Irati.
- **“lajão”**: com altura média de 7,5 metros é constituída por siltito compacto de coloração acinzentada. Em sua base apresenta três camadas de aproximadamente 0,40 metros de espessura de calcário silicoso, intercaladas por duas delgadas camadas de siltito. Formação Corumbataí
- **“cascalho”**: com altura média de 11,00 metros é constituída também por siltito acinzentado. Distingue-se da anterior por apresentar incidência maior de fraturamento. Formação Corumbataí.
- **“argila b1”**: com 12,50 metros de altura, em média, é composta por siltito acastanhado em sua base, em altura aproximada de 4,00 metros e argilito marrom arroxeadado. Formação Corumbataí.
- **“argila b2”**: com 16,00 metros de altura é constituída de argilito amarronado. Formação Corumbataí.
- **“arenito”**: constituindo o topo do material consolidado, apresenta altura média de 10,00 metros de altura. Formação Corumbataí.

À tal seqüência sucede camada de solo com espessura média de 2,00 metros.

As operações unitárias de desenvolvimento iniciam-se com a remoção da camada de solo por meio de escavação e carregamento através de pá carregadeira e transporte por caminhões basculantes. O material é transportado até locais situados em áreas anteriormente submetidas a trabalhos de lavra onde são realizadas pilhas de estéril.

Uma vez removida a camada de solo superficial, a etapa seguinte, seja na continuidade do desenvolvimento, através da remoção do material estéril remanescente, ou na lavra da jazida, consiste no desmonte de rocha com uso de explosivos.

A perfuração primária da rocha é realizada através de perfuratriz pneumática, seguindo disposição estabelecida em plano de fogo definido para cada bancada.

O explosivo utilizado é o ANFO em toda a coluna, sendo a escorva realizada através de acessório não elétrico com tempo de retardo de 250 milisegundos e cartucho de 1" x 8" de emulsão explosiva. A ligação entre furos é realizada por intermédio de acessório não elétrico com tempos de retardo de 17 milisegundos e 25 milisegundos. A iniciação do fogo dá-se a partir de conjunto dotado de estopim hidráulico e espoleta simples.

Após as operações de desmonte, os fragmentos de rocha são carregados por pá carregadeira em caminhões basculantes e transportados para disposição em pilhas de estéril ou até a unidade de beneficiamento da empresa.

O beneficiamento do calcário é constituído exclusivamente por operações de cominuição, com britadores de mandíbula em estágios primário e secundário seguida por moagem através de moinhos de martelos, e classificação por peneiramento.

5.2 - Monitoramento sismográfico

5.2.1 - Equipamentos utilizados

Foram utilizados dois sismógrafos de engenharia e geofones a eles acoplados de propriedade do Departamento de Geologia Aplicada do IGCE/UNESP - Rio Claro, com as seguintes características técnicas:

- BlastMate Series III da Instantel Inc. – sismógrafo de engenharia, digital, composto de um corpo receptor que capta, processa e registra os sinais recebidos, contendo uma impressora interna que imprime o sismograma completo do evento; um geofone externo com três canais de registro sísmicos dispostos triortogonalmente; e um microfone para registro de sobrepressão atmosférica.
- MiniMate Plus da Instantel Inc. – sismógrafo de engenharia, digital, composto de um corpo receptor que capta, processa e registra os sinais recebidos; um geofone externo com três canais de registro sísmicos dispostos triortogonalmente; e um microfone para registro de sobrepressão atmosférica.

Ambos são dotados de resposta de frequência de 2 Hz a 300 Hz e capacidade de processamento padrão de 1024 amostras por segundo por canal, com opções de 2048 e 4096 amostras por segundo com a utilização de quatro canais. As amplitudes limite de registro de velocidade de partícula variam entre 0,127 mm/s a 254 mm/s, com resolução de 0,0159 mm/s.

Possuem capacidade de memória RAM de 1 Mb e 6 módulos de registro. Dispõe de microfone para registro de sobrepressões atmosféricas em amplitudes que variam de 88 dB(L) a 148 dB(L). Possibilitam a utilização de sistema automático de disparo tanto através do geofone, a partir de 0,127 mm/s, como através do microfone, a partir de 100 dB(L). Sua precisão é de 3% a 15 Hz para os registros de vibração propagada pelo terreno e 0,2 dB(L), a 30 Hz e 124 dB(L) para os de sobrepressão atmosférica.

Os sismógrafos são dotados de transdutores e de softwares analisadores, fornecendo simultaneamente, por componente, registros de velocidade de vibração da partícula, dados sobre aceleração, deslocamento, frequências e pressão sonora.

O fabricante recomenda a calibração anual dos aparelhos.

5.2.2 - Dados obtidos

Os monitoramentos dos níveis de vibração do terreno provocados pelas operações de desmonte de rocha com uso de explosivos foram realizados por meio de registros de velocidade de vibração da partícula no período compreendido entre dezembro de 1999 e novembro de 2003, com a obtenção de 45 registros sismográficos provenientes de 30 detonações, ou fogos, em duas etapas distintas (Anexos II e III).

5.2.2.1 - Dados obtidos na primeira etapa de monitoramentos

A primeira etapa, realizada entre 17 de dezembro de 1999 e 08 de dezembro de 2000, deu-se com o monitoramento de 10 fogos detonados na frente A e 2 fogos detonados na frente B, e a obtenção de 14 e 3 registros, respectivamente. A maior parte desses fogos foram executados na bancada “cascalho”, constituída pela mesma formação litológica em que se apóia a porção nordeste do conjunto habitacional Belinha Ometto, região onde foram realizados os respectivos monitoramentos .

Seguindo orientação da empresa, a localização dos pontos de monitoramento balizou-se, no conjunto habitacional, por locais de onde provinham queixas dos moradores em relação às vibrações. Os demais pontos posicionaram-se na porção interna da área de mineração,

em locais por ela selecionados, ou em locais que permitissem variações nas distâncias escalonadas, de forma a permitir a obtenção de equação de atenuação local.

Os dados relativos a esses monitoramentos, incluindo a distância dos locais de detonação nas frentes A e B e os pontos de monitoramento, bem como os respectivos planos de fogo, foram fornecidos pela equipe técnica da empresa.

Seu objetivo foi a obtenção de dados que permitissem a adequação dos procedimentos adotados pela empresa de forma a atender os limites máximos de vibração previstos no projeto de norma D7.013 - Mineração por Explosivos (Cetesb, 1992), que admite como velocidade resultante de partícula o valor máximo de 4,2 mm/s nos limites da área da mineração.

Os dados referentes aos planos de fogo monitorados e aos registros obtidos encontram-se nas Tabelas 5.2.2.1.1 e 5.2.2.1.2

Tabela 5.2.2.1.1 - Planos de fogo monitorados no período de 17/12/99 a 08/12/00

fogo	data	frente de lavra	bancada	diâmetro do furo	malha de perfuração (m)	profundidade (m)	altura do tampão (m)	número de furos	carga explosivos por furo (kg)	carga por espera (kg)	
										informada	considerada
1301	17/12/1999	A	cascalho	3 1/2"	3,00 x 5,00	9,00	2,00	9	40,11	40,11	40,11
1303	11/01/2000	A	laje	3 1/2"	3,00 x 5,00	5,50	2,00	10	20,12	20,12	20,12
1309	19/01/2000	A	argila	3 1/2"	2,50 x 4,00	15,00	1,50	11	80,18	80,18	80,18
1336	23/02/2000	A	cascalho	3 1/2"	3,00 x 5,00	8,00	3,00	11	55,17	55,17	55,17
1352	23/03/2000	A	cascalho	3 1/2"	2,50 x 4,00	8,00	3,00	9	33,95	33,95	67,9
1365	13/04/2000	A	cascalho	3 1/2"	3,00 x 5,00	8,00	1,50 e 1,50*	10	27,25	27,25	27,25
1388	17/05/2000	A	carvão inf	3 1/2"	3,00 x 6,00	7,00	2,00	9	30,08	30,08	30,08
1394	25/05/2000	A	cascalho	3 1/2"	3,00 x 5,00	7,50	3,00	10	29,21	29,21	29,21
1394a	25/05/2000	A	cascalho	3 1/2"	3,00 x -	7,50	3,00	1	29,40	29,40	29,40
1434	18/07/2000	A	cascalho	2 1/2"	2,00 x 4,00	10,00	2,00	10	25,08	25,08	25,08
1505	18/10/2000	B	cascalho	3 1/2"	3,00 x 5,00	9,00	2,00	15	42,08	42,08	84,16
1534	08/12/2000	B	cascalho	3 1/2"	3,00 x 5,00	10,00	2,00	8	50,06	50,06	50,06

* furos com tampão intermediário e superior de 1,50 m; tempos de retardo de coluna de 225 ms e 250 ms.

Tabela 5.2.2.1.2 - Registros obtidos no período 17/12/99 a 08/12/00

fogo	data	frente de lavra	bancada	descrição local de monitoramento	sismógrafo	distância do fogo (m)	número do registro	registros obtidos				resultante mm/s		
								componente velocidade mm/s	frequência Hz	componente velocidade mm/s	frequência Hz		componente velocidade mm/s	longitudinal frequência Hz
1301	17/12/1999	A	cascalho	escritório	BlastMate	310	1	4,700	18	2,030	15	3,680	15	5,910
				escritório	MiniMate	310	2	5,590	17	2,030	15	3,680	15	6,460
1303	11/01/2000	A	lajão	escritório	BlastMate	300	3	3,170	21	1,400	34	1,900	32	3,240
1309	19/01/2000	A	argila	escritório	MiniMate	450	4	2,290	35	0,508	18	1,270	N/A	2,510
1336	23/02/2000	A	cascalho	Rua 1 c/ Av V. Bassinello	BlastMate	250	5	4,830	24	1,780	34	2,920	13	4,850
1352	23/03/2000	A	cascalho	cont. da R. M. J. D'A. Mathias	BlastMate	500	6	1,270	15	0,889	13	1,020	28	1,630
1365	13/04/2000	A	cascalho	Rua 16, 30	BlastMate	280	7	6,350	30	1,520	37	4,060	34	6,500
				escritório	MiniMate	290	8	6,100	16	2,540	24	4,320	27	6,960
1388	17/05/2000	A	carvão	Rua 1 c/ Av V. Bassinello	BlastMate	270	9	4,950	34	1,400	39	4,830	34	6,400
1394	25/05/2000	A	cascalho	área mineração	BlastMate	73	10	65,000	73	30,400	64	63,400	43	74,400
				área mineração	MiniMate	138	11	24,300	27	8,890	43	25,300	26	30,700
1394a	25/05/2000	A	cascalho	área mineração	BlastMate	73	12	32,300	73	21,500	57	61,100	43	62,400
				área mineração	MiniMate	138	13	13,200	27	4,440	37	13,800	21	17,400
1434	18/07/2000	A	cascalho	rua 1 c/ rua 16	BlastMate	270	14	4,880	27	1,270	34	2,030	30	4,840
1505	18/10/2000	B	cascalho	área mineração	BlastMate	500	15	0,635	64	0,635	14	0,762	13	0,950
				área mineração	MiniMate	200	16	5,080	15	4,830	20	10,000	17	11,100
1534	08/12/2000	B	cascalho	Rua 17 c/ Av. 1	BlastMate	550	17	1,520	12	1,520	64	1,780	57	1,890

5.2.2.2 - Dados obtidos na segunda etapa de monitoramentos

Os monitoramentos realizados na Segunda etapa de aquisição de dados deram-se com o objetivo de analisar o comportamento da equação anteriormente obtida, procurando verificar sua aplicabilidade em relação aos fogos praticados, abrangendo diversas bancadas com diferentes litologias.

Nessa etapa foram monitorados 20 fogos, no período compreendido entre 24 de abril a 25 de novembro de 2003, todos na frente B, em todas as bancadas, com a obtenção de 28 registros.

Os dados relativos aos planos de fogo foram fornecidos pela empresa, sendo o posicionamento dos locais dos fogos obtidos a partir de GPS de navegação.

Procurando limitar o número de variáveis envolvidas, os pontos de monitoramento foram inicialmente fixados em três:

- ponto 1: escritório da empresa (248.763 m E; 7.504.352 m N)
- ponto 2: fundos da residência situada na rua 16, nº 35 (248.615 m E; 7.504.349 m N);
- ponto 3: estrada municipal Limeira 040, na altura do prolongamento da Av. Canadá (248.406 m E; 7.504.500 m N).

Um único registro foi realizado na estrada municipal Limeira 040, na altura do prolongamento da Av. 17 (248.612 m E; 7.504.378 m N).

A fixação dos sensores ao solo foi feita com pinos, observadas as recomendações existentes quanto a sua orientação e nivelamento nas duas etapas de monitoramento.

Os dados referentes aos planos de fogo monitorados e aos registros obtidos encontram-se nas Tabelas 5.2.2.2.1 e 5.2.2.2.2

Tabela 5.2.2.2.1 - Planos de fogo monitorados no período de 24/04 a 25/11/03

fogo	data	frente de lavra	bancada	coord. do centro do plano de fogo		diâmetro do furo	malha de perfuração (m)	profundidade (m)	altura do tampão (m)	número de furos	carga explosivos por furo (kg)	carga por espera (kg)
				UTM E (m)	UTM N (m)							
1	24/04/2003	B	lajão	248667	7504908	3 1/2"	2,50 x 4,00	7,50	1,50	14	24,14	48,29
2	13/05/2003	B	carvão	248687	7504904	3 1/2"	3,00 x 6,00	11,00	2,00	18	36,11	36,11
3	14/05/2003	B	argila b2	248568	7505007	3 1/2"	2,50 x 4,00	16,00	1,50	9	55,56	55,56
4	15/07/2003	B	carvão	248701	7504804	3 1/2"	3,00 x 6,00	11,00	2,00	14	36,00	36,00
5	12/08/2003	B	lajão	248643	7504889	3 1/2"	2,50 x 5,00	7,50	1,50	18	26,11	26,11
6	13/08/2003	B	carvão	248656	7504810	3 1/2"	3,00 x 6,00	11,00	2,00	12	39,58	39,58
7	15/08/2003	B	lajão	248658	7504778	3 1/2"	2,50 x 5,00	7,50	1,50	19	26,32	26,32
8	11/09/2003	B	calcário	248664	7504840	3 1/2"	3,00 x 4,00	3,70	1,20	11	11,00	22,00
9	12/09/2003	B	arenito	248562	7505048	3 1/2"	3,00 x 3,00	10,00	1,50	14	37,50	37,50
10	15/09/2003	B	argila b2	248593	7505026	3 1/2"	2,50 x 5,00	16,00	1,50	14	63,57	63,57
11	17/09/2003	B	calcário	248678	7504851	3 1/2"	3,00 x 4,50	3,70	1,50	10	9,60	19,20
12	19/09/2003	B	carvão	248665	7504889	3 1/2"	3,00 x 5,00	11,00	2,00	14	39,64	39,64
13	23/09/2003	B	calcário	248644	7504827	3 1/2"	3,00 x 4,50	3,70	1,20	17	11,00	22,00
14	29/09/2003	B	lajão	248637	7504798	3 1/2"	2,50 x 5,00	7,50	1,50	14	26,43	26,43
15	30/09/2003	B	cascalho	248617	7504880	3 1/2"	3,00 x 5,00	11,50	2,00	18	42,78	42,78
16	01/10/2003	B	argila b1	248585	7504929	3 1/2"	3,00 x 5,00	12,50	2,00	17	46,18	46,18
17	02/10/2003	B	carvão	248671	7504782	3 1/2"	3,00 x 6,00	11,00	2,00	11	39,09	78,18
18	03/10/2003	B	calcário	248703	7504850	3 1/2"	3,00 x 4,50	3,70	1,20	14	10,71	21,43
19	10/10/2003	B	carvão	248658	7504749	3 1/2"	3,00 x 6,00	11,00	2,00	10	39,00	39,00
20	25/11/2003	B	lajão	248622	7504851	3 1/2"	2,50 x 5,00	7,50	1,50	16	24,06	96,25

Tabela 5.2.2.2.2 - Registros obtidos no período 24/04 a 25/11/03

fogo	data	bancada	ponto de monitoramento	descrição local de monitoramento	sismógrafo	distância do fogo (m)	número do registro	registros obtidos						resultante mm/s
								componente transversal		componente vertical		componente longitudinal		
								velocidade mm/s	frequência Hz	velocidade mm/s	frequência Hz	velocidade mm/s	frequência Hz	
1	24/04/2003	lajão	ponto 1	escritório mineração	BlastMate	683	18	0,508	12	0,635	28	0,635	27	0,696
2	13/05/2003	carvão	ponto 3	cerca baixo	MiniMate	484	19	1,140	34	0,762	>100	1,650	57	1,750
			ponto 1	escritório mineração	BlastMate	677	20	1,520	19	1,400	28	1,270	15	1,620
			ponto 3	cerca baixo	MiniMate	492	21	3,560	51	3,680	57	3,170	24	4,750
3	14/05/2003	argila b2	ponto 1	escritório mineração	BlastMate	799	22	1,270	20	0,762	32	1,140	20	1,370
			ponto 3	cerca baixo	MiniMate	533	23	1,900	37	0,762	85	1,650	39	2,010
			ponto 2	residência	BlastMate	464	24	1,520	21	1,020	24	1,780	22	1,840
4	15/07/2003	carvão	ponto 2	residência	MiniMate	464	25	1,520	18	1,270	14	1,520	24	1,870
			ponto 2	residência	BlastMate	541	26	0,762	17	0,635	30	1,270	23	1,500
			ponto 1	escritório mineração	MiniMate	668	27	0,889	20	0,635	34	0,762	16	1,020
5	12/08/2003	lajão	ponto 2	residência	MiniMate	463	28	1,650	32	1,140	64	1,520	47	1,830
			ponto 2	residência	BlastMate	431	29	1,900	11	1,020	20	1,900	22	2,110
			ponto 1	escritório mineração	MiniMate	556	30	2,410	16	0,762	24	1,400	16	2,440
6	13/08/2003	carvão	ponto 2	residência	BlastMate	494	31	1,140	37	0,508	85	1,020	34	1,360
			ponto 1	escritório mineração	MiniMate	617	32	0,635	51	0,508	43	0,127	N/A	0,648
			ponto 2	residência	BlastMate	702	33	1,140	26	0,381	34	0,889	27	1,450
7	15/08/2003	lajão	ponto 1	escritório mineração	MiniMate	841	34	1,020	21	0,508	37	0,762	23	1,200
			ponto 2	residência	MiniMate	678	35	0,762	19	0,508	43	0,889	34	0,933
			ponto 1	escritório mineração	MiniMate	626	36	0,508	28	0,508	47	0,508	51	0,648
8	11/09/2003	calcário	ponto 4	cerca baixo	MiniMate	514	37	1,270	37	0,635	47	1,520	26	1,660
			ponto 2	residência	MiniMate	480	38	1,650	37	1,020	64	1,140	64	1,690
			ponto 2	residência	MiniMate	450	39	1,400	34	0,635	64	1,020	32	1,650
9	12/09/2003	arenito	ponto 2	residência	MiniMate	531	40	1,520	23	0,889	27	2,030	24	2,550
			ponto 2	residência	MiniMate	581	41	2,540	24	0,889	30	2,790	26	2,830
			ponto 2	residência	MiniMate	437	42	2,920	15	1,400	21	2,160	13	2,960
10	15/09/2003	argila b2	ponto 2	residência	MiniMate	509	43	0,635	26	0,508	73	0,635	23	0,741
			ponto 2	residência	MiniMate	403	44	3,560	21	1,270	24	0,254	>100	3,580
			ponto 2	residência	MiniMate	502	45	1,65	16	0,762	57	1,520	14	1,88

6. Análise e interpretação dos dados

Conforme referido anteriormente, de posse dos elementos necessários, ou seja, os registros sismográficos obtidos em pontos predeterminados, os planos de fogo cuja execução os originaram e as distâncias entre eles, é possível a obtenção de equações probabilísticas de atenuação de aplicação local através de análise de regressão. Em outras palavras, torna-se factível o estabelecimento de fórmula empírica que interprete a relação funcional entre as variáveis velocidade resultante de partícula, distância e carga máxima de explosivos.

Os dados referentes às velocidades resultantes de partícula, neste caso específico, uma vez que as normas existentes referem-se a tal parâmetro, em milímetros por segundo, constantes dos registros sismográficos, serão analisados em relação às distâncias escalonadas.

A distância escalonada, por sua vez, será adotada a partir do melhor coeficiente de correlação entre os logaritmos das velocidades resultantes de partícula constantes de tais registros e das distâncias escalonadas obtidas nos eventos que os geraram, utilizando-se dos critérios definidos por Devine (In Dozzi et al., 1984), Langefors e Kihlström (1978), e Ambrasseys e Hendron (In Chapot, 1981 e Dozzi et al., 1984).

Assim, a equação probabilística de atenuação determinada a partir de 15 registros sismográficos obtidos na primeira etapa dos monitoramentos realizados, nas frentes A e B, excluídos os de números 12 e 13 - fogo 1394a de 25/05/00 - por tratar-se de detonação em uma única mina e não ser considerado representativo de um fogo rotineiro, pode ser assim escrita:

$$v = 58.434,495 \times DE^{-2,10464} \dots\dots\dots (\text{eq. 6.1})$$

sendo DE, ou distância escalonada, obtida através do critério de Ambrasseys e Hendron (op.cit.), uma vez que os coeficientes de correlação encontrados foram:

critério de Devine (op.cit.): -0,837;

critério de Langefors e Kihlström (op.cit.): 0,744;

critério de Ambrasseys e Hendron (op.cit.): -0,906.

E a envoltória de máxima energia, assim considerada como o deslocamento da equação obtida para a situação mais desfavorável, nos moldes sugeridos por Langefors e Kihlström (1978), é expressa como:

$$V_{\max} = 104.253,99 \times DE^{-2,10464} \dots\dots\dots (\text{eq. 6.2})$$

com

v e v_{\max} em milímetros por segundo;

distância em metros;

carga máxima de explosivos por espera em quilogramas.

A figura 6.1 permite a visualização, em gráfico de dispersão, dos registros obtidos e das equações de atenuação e de máxima energia.

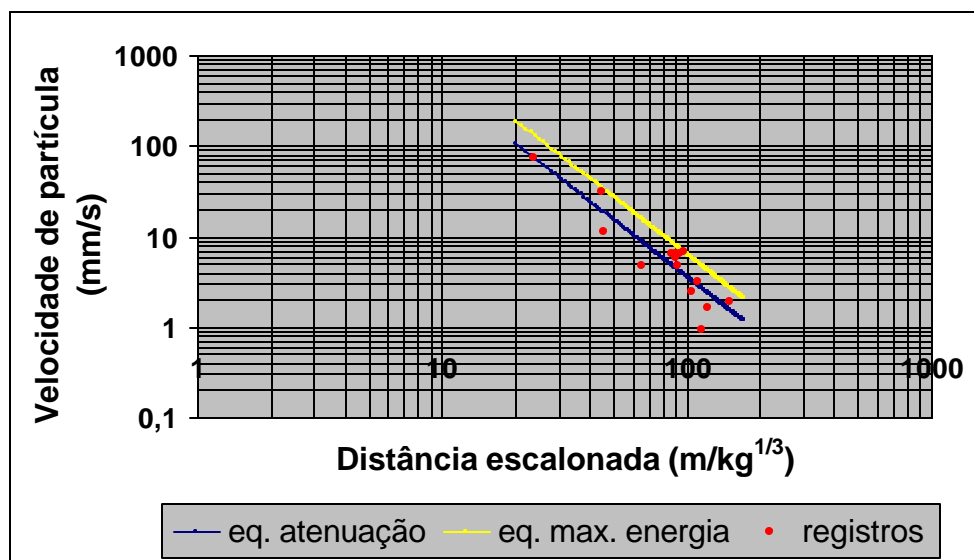


Figura 6.1 - Registros obtidos na primeira etapa de monitoramentos e equações de atenuação e de máxima energia.

Tais equações de atenuação e de máxima energia, tendo em vista as características da coleta dos dados, são consideradas como omnidirecionais e pautaram os desmontes de rocha realizados a partir de sua obtenção.

Na segunda etapa de monitoramentos foram obtidos 8 registros no ponto 1, 16 registros no ponto 2, 3 registros no ponto 3 e um registro no ponto 4 (figura 6.2).

Os registros de velocidade resultante de partícula obtidos na segunda etapa de monitoramentos apresentam elevada dispersão em seus valores, quando comparados com aqueles oriundos na etapa anterior, conforme demonstram os coeficientes de correlação obtidos segundo os diferentes critérios:

critério de Devine (op.cit.): -0,635;

critério de Langefors e Kihlström (op.cit.): 0,604;

critério de Ambrasseys e Hendron (op.cit.): -0,654.

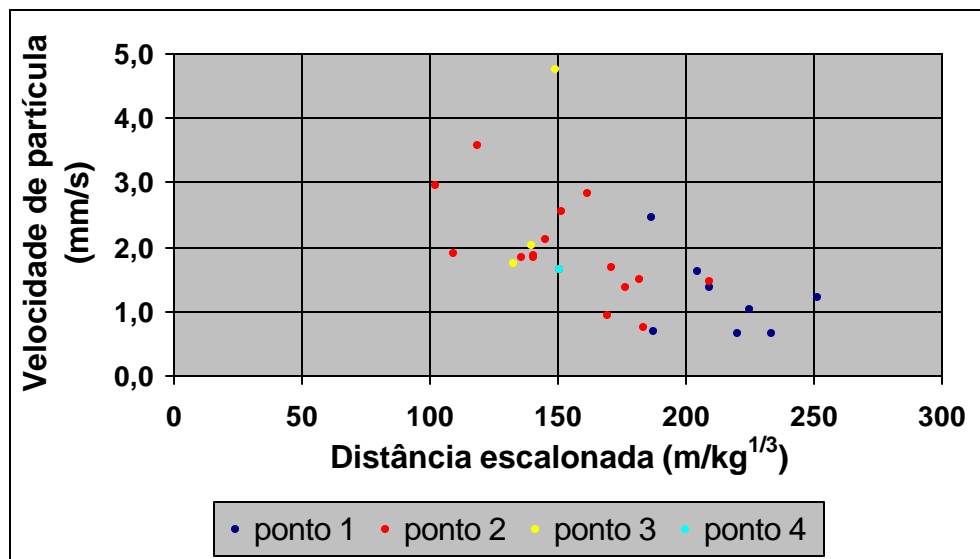


Figura 6.2 - Registros obtidos na segunda etapa de monitoramentos.

Apresentaram também valores de velocidade resultante de partícula sensivelmente inferiores àqueles obtidos na primeira etapa, resultado da adequação, por parte da empresa, das cargas máximas de explosivos detonadas instantaneamente, considerando-se a distância do fogo ao local a ser preservado. (figuras 6.3 e 6.4).

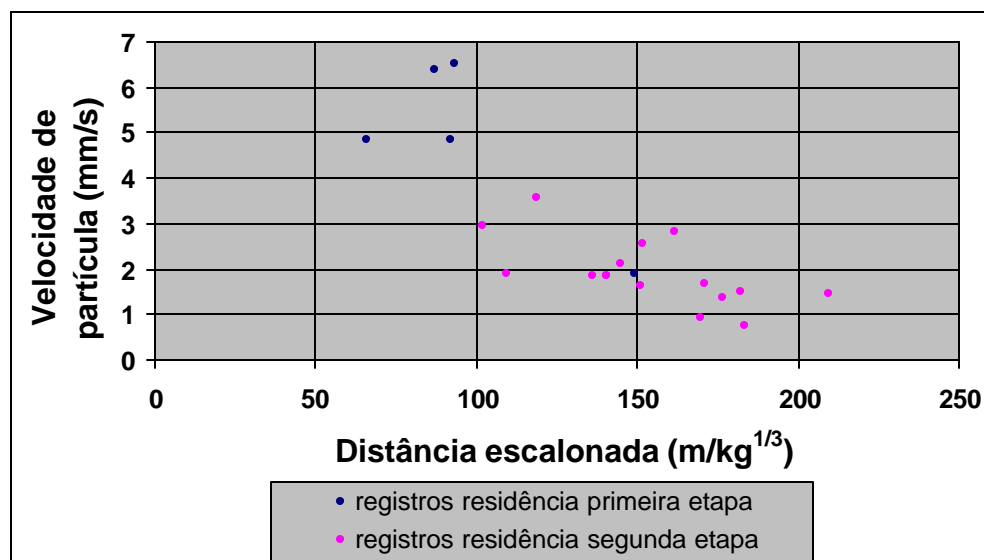


Figura 6.3 - Registros obtidos em residência situada na rua 16 n.º 35, na primeira e segunda etapas de monitoramento.

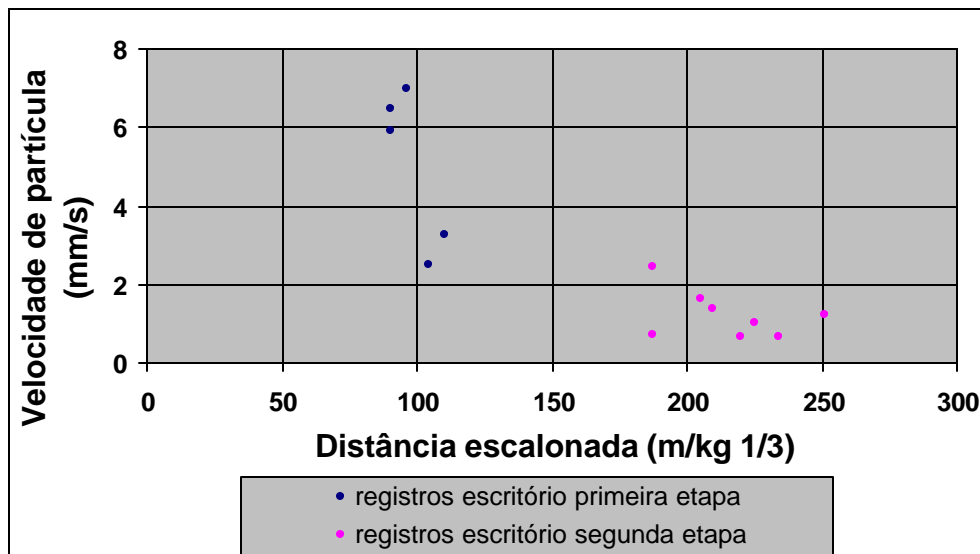


Figura 6.4 - Registros obtidos no escritório da empresa na primeira e segunda etapas de monitoramento.

Uma vez que na obtenção dos registros da primeira etapa de monitoramentos os eventos de detonação concentraram-se na bancada “cascalho”, nas frentes A, principalmente, e B, enquanto aqueles da segunda etapa as detonações distribuíram-se por todas as bancadas, na frente B, aventou-se a possibilidade de que tal dispersão de valores decorresse de fatores associados à litologia onde as perturbações originaram-se e à compartimentação do maciço. Análises dos registros sismográficos obtidos nessa etapa de monitoramentos agrupados segundo as bancadas - equivalente a agrupar por litologias - e pontos de monitoramento - equivalente a agrupar segundo direções de propagação - resultaram inconclusivas.

Variações decorrentes de fatores operacionais relativos à execução dos planos de fogo que pudessem ocasionar tais dispersões foram desconsideradas uma vez que:

- as bancadas são relativamente baixas e o material a ser desmontado não apresenta resistência suficiente à penetração da ferramenta de corte que causasse desvios de furos significativos;
- as faces das bancadas apresentam regularidade;
- os trabalhos de demarcação dos locais a serem perfurados, execução da perfuração e carregamento de explosivos são conduzidos de maneira criteriosa.
- a preparação do explosivo utilizado nos desmontes (ANFO) também é realizada com critério, sendo inclusive submetido a controle de qualidade através de mensuração periódica de velocidade de detonação.

Por outro lado, a análise dos dados obtidos na segunda etapa de monitoramentos, agrupados segundo os intervalos de tempo previstos em planos de fogo para a detonação entre minas, ou grupo delas, consecutivas, sugere estar a principal causa da dispersão verificada associada a desvios em tais tempos. Gráficos de dispersão foram elaborados adotando esse critério, agrupando-se os dados dos desmontes que geraram as perturbações quando se previa, a partir dos planos de fogo:

- detonação instantânea de uma única mina e intervalo de tempo entre a detonação de minas consecutivas menores ou iguais a 17 milisegundos;
- detonação instantânea de uma única mina e intervalo de tempo entre a detonação de minas consecutivas igual a 25 milisegundos;
- detonação simultânea de duas ou mais minas e intervalo de tempo entre a detonação de grupos de minas consecutivos menores ou iguais a 17 milisegundos;
- detonação simultânea de duas ou mais minas e intervalo de tempo entre a detonação de grupos de minas consecutivos igual a 25 ms.

Para tanto foram analisados todos os planos de fogo executados nessa etapa, considerando-se os tempos nominais dos elementos de retardo de superfície deles constantes, uma vez que os tempos dos acessórios de detonação utilizados na iniciação da coluna de explosivos foram todos de 250 ms.

As figuras 6.5 e 6.6 apresentam os resultados obtidos, esta em escala bilogarítmica. Nelas pode-se observar que os maiores valores de velocidade de partícula estão associados às perturbações causadas pelos desmontes em que se previa, nos planos de fogo, a detonação instantânea de uma única mina e intervalo de tempo entre a detonação de minas consecutivas menores ou iguais a 17 milisegundos, indicando seu vínculo aos tempos nominais de retardo de superfície utilizados. É possível ainda observar que os menores valores de velocidade de partícula estão associados àquelas perturbações originadas em desmontes quando se previa a detonação simultânea de duas ou mais minas, independentemente do intervalo de tempo decorrido entre a detonação de grupos de minas consecutivos, sugerindo sua associação a desvios nos tempos de retardo nominais dos acessórios de detonação utilizados na iniciação da coluna de explosivos.

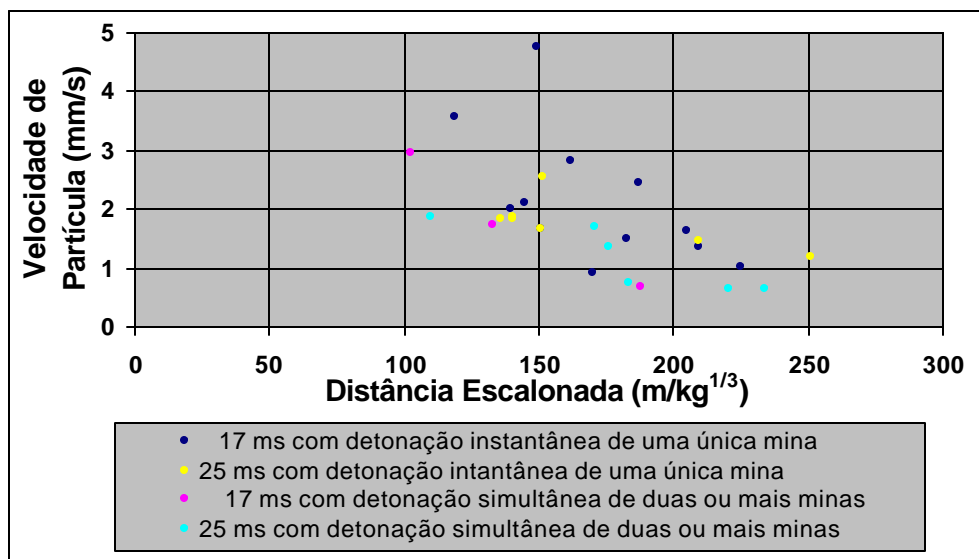


Figura 6.5 - Registros obtidos na segunda etapa de monitoramentos, agrupados segundo características dos planos de fogo.

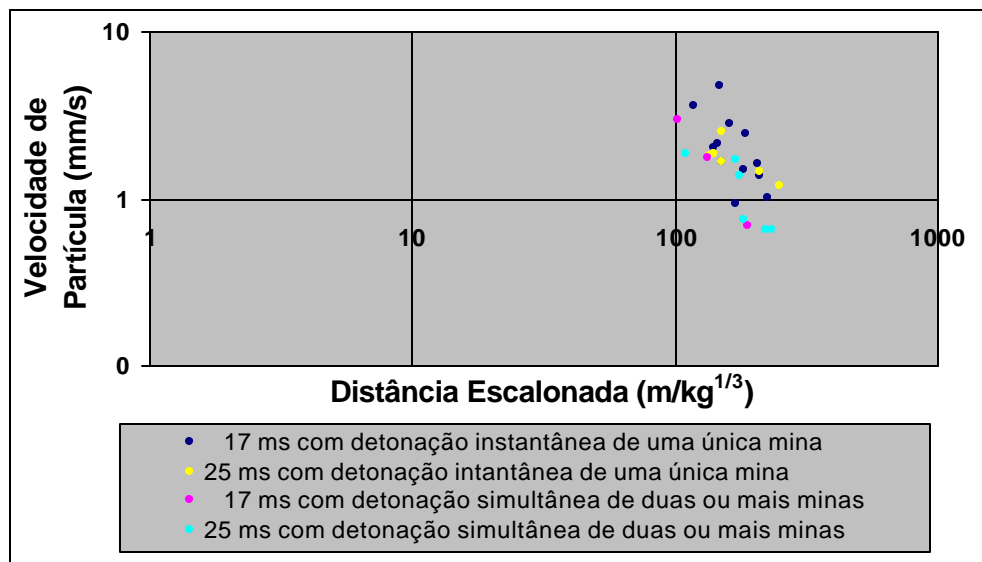


Figura 6.6 - Registros obtidos na segunda etapa de monitoramentos, agrupados segundo características dos planos de fogo, em escala bilogarítmica.

Análise similar foi realizada para os dados obtidos na primeira etapa de monitoramentos. Os resultados obtidos podem ser visualizados através das figuras 6.7 e 6.8. Nelas é possível observar condição análoga àquela encontrada a partir dos dados obtidos na segunda etapa de monitoramentos para os menores valores de velocidade de partícula.

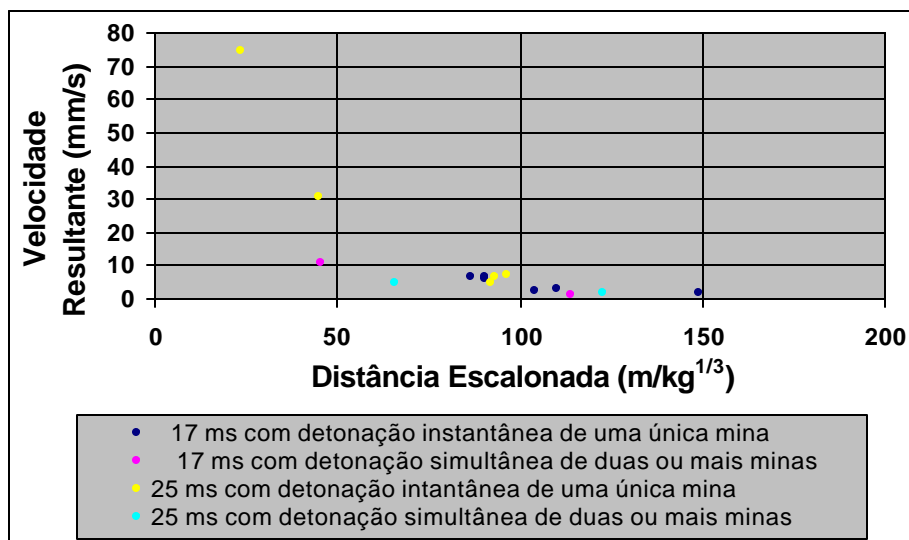


Figura 6.7 - Registros obtidos na primeira etapa de monitoramentos, agrupados segundo características dos planos de fogo.

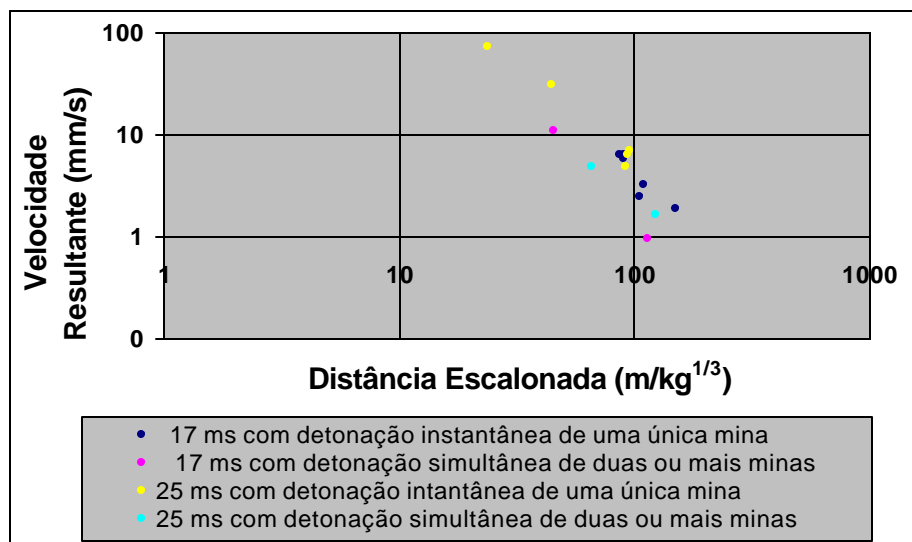


Figura 6.8 - Registros obtidos na primeira etapa de monitoramentos, agrupados segundo características dos planos de fogo, em escala bilogarítmica.

Os registros obtidos na segunda etapa de monitoramentos apresentam, ainda, valores de velocidade resultante de partícula que extrapolam os limites estabelecidos pela equação de máxima energia anteriormente desenvolvida (eq. 6.2) em sete situações distintas, representadas pelos registros números 20, 21, 22, 30, 33, 34 e 41 (figura 6.9). Tal situação demonstra que a extrapolação da equação de atenuação desenvolvida a partir dos dados obtidos na primeira etapa de monitoramentos para a condição mais desfavorável então obtida não atingiu sua finalidade, que seria a indicação da maior velocidade resultante de partícula a ser atingida para uma determinada distância escalonada. Impõe-se, assim, a necessidade de desenvolvimento de nova equação que atenda à situação observada na segunda etapa de monitoramentos.

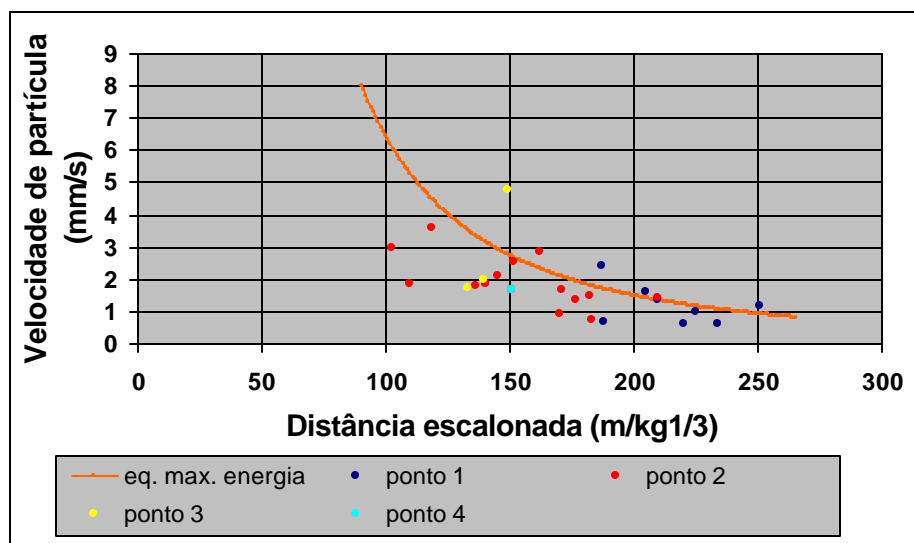


Figura 6.9 - Registros obtidos na segunda etapa de monitoramentos e equação de máxima energia desenvolvida a partir dos registros provenientes da primeira.

Considerando-se os coeficientes de correlação encontrados para os dados obtidos na etapa recente de monitoramentos, bem como a pequena amplitude das velocidades resultantes de partícula, optou-se pelo desenvolvimento de novas equações de atenuação e de máxima energia, omnidirecionais, a partir dos critérios anteriormente citados, considerando todos os registros, assim expressas:

- equação de atenuação $v = 17.419,848 \times DE^{-1,82254}$ (eq. 6.3)

- equação de máxima energia $v_{\max} = 43.357,871 \times DE^{-1,82254}$ (eq. 6.4)

Sendo DE, ou distância escalonada, obtida através do critério de Ambrasseys e Hendron (op.cit.), uma vez que os coeficientes de correlação encontrados foram:

critério de Devine (op.cit.): -0,863;

critério de Langefors e Kihlström (op.cit.): 0,814;

critério de Ambrasseys e Hendron (op.cit.): -0,899;

com:

v e v_{\max} em milímetros por segundo;

distância em metros;

carga máxima de explosivos por espera em quilogramas.

Sendo que esta equação de máxima energia é mais restritiva que aquela obtida anteriormente, considerando-se sua faixa de utilização (figura 6.10).

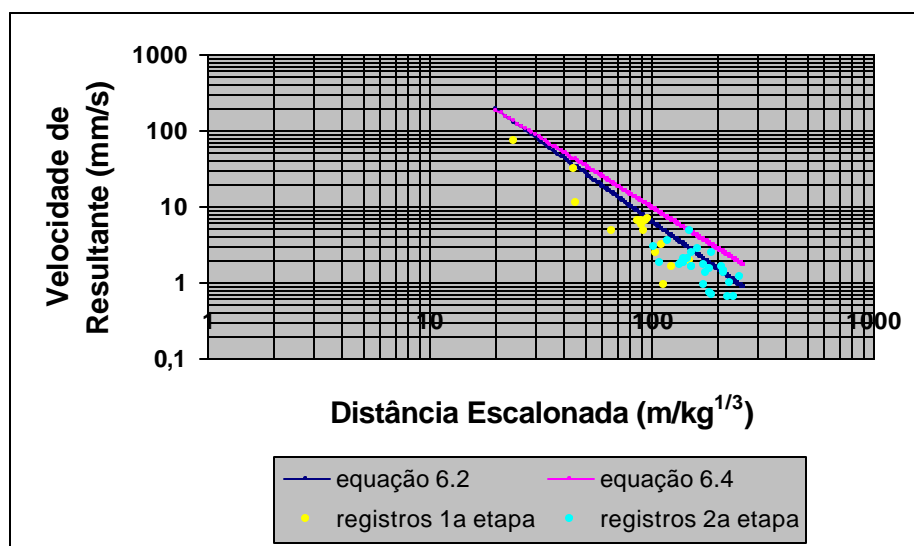


Figura 6.10 - Registros das duas etapas de monitoramento e equações 6.2 e 6.4.

7 - Determinação dos tempos de retardo

Os indicativos de que a dispersão dos valores de velocidade de partícula obtidos em campo pudesse estar associada, ao menos em parte, a desvios nos tempos dos elementos de retardo em relação àqueles apontados pelo fabricante, levaram à concepção de experimentos que possibilitassem sua determinação com os equipamentos disponíveis: os sismógrafos de engenharia Blastmate III e Minimate Plus.

Partindo do princípio de que perturbações geradas em instantes distintos poderiam ser captadas e registradas por tais aparelhos, a realização do experimento vinculava-se à sua operacionalização, que deveria atender aos quesitos de confiabilidade, segurança, praticidade e economicidade.

Deveria contemplar ainda o tipo específico dos elementos de retardo utilizados no empreendimento quando ocorreram os monitoramentos de vibrações. Tais acessórios de detonação são do tipo não elétrico, constituindo-se de conjuntos dotados de tubetes plásticos de comprimentos determinados e espoleta de retardo em uma de suas extremidades, com seu tempo vinculado ao desempenho do conjunto. Os tempos de retardo ali adotados são de 17, 25 e 250 milisegundos.

Concebeu-se uma situação em que seriam realizados dois furos. Em um deles seria inserido um conjunto estopim/espoleta simples com a função de, quando detonada, iniciar o conjunto não elétrico a ela conectado e disparar o equipamento de registro. O outro abrigaria a extremidade do conjunto não elétrico dotado de espoleta de retardo. A instalação do sensor, ou geofone, do sismógrafo de engenharia deveria dar-se de maneira equidistante dos furos. Para minimizar a possibilidade de ocorrência de descontinuidades no meio de propagação que pudessem distorcer os resultados, a distância entre o geofone e os furos deveria ser a menor possível (figura 7.1).

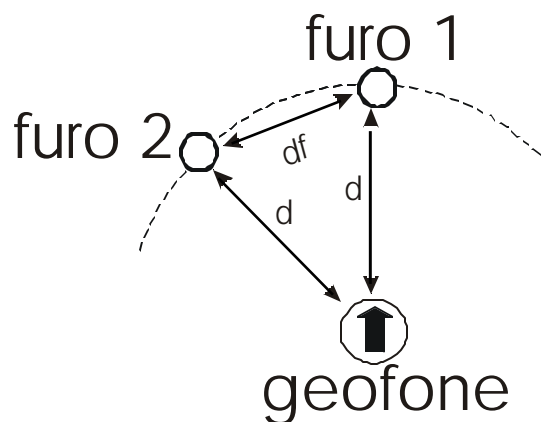


Figura 7.1 – Esquema de montagem do experimento.

Inicialmente tal experimento foi realizado em janeiro de 2004, tendo-se o solo como meio de propagação, pelas facilidades em sua execução. Os furos foram efetuados com trado manual de 1" de diâmetro e trinta centímetros de profundidade. A distância adotada entre furos foi de 1,5 metros e a distância entre eles e o geofone de 3,0 metros. Os retardos utilizados foram de 25 milissegundos. O aparelho utilizado foi o BlastMate III, configurado em modo Normal (amplitude máxima de 254 mm/s) e o processamento de 1024 amostras por segundo. A orientação do geofone deu-se ao furo que iniciaria o processo de registro, e sua fixação deu-se por meio de pinos. O disparador foi configurado para atuar a amplitudes de 0,5 milímetros por segundo.

A possibilidade de danos causados ao tubete plástico do elemento de retardo não elétrico pelo calor liberado na queima do estopim, podendo ocasionar sua falha, levou à sua fixação, com fita adesiva, a distância de aproximadamente um centímetro entre eles.

Após alguns resultados insatisfatórios, decorrentes da superposição dos trens de onda originários das duas perturbações, em razão das características elásticas do meio de propagação, na forma como o experimento foi conduzido, e da baixa resolução dos registros, optou-se por:

- alterar as configurações do sismógrafo para o modo sensível (amplitude máxima de 31,7 mm/s) e processamento de 4096 amostras por segundo.
- solidarizar à espoleta de retardo dos conjuntos não elétricos de ligação espoleta simples. Este procedimento justifica-se pela amplificação do sinal gerado em sua detonação, uma vez que a carga de explosivos das espoletas de retardo dos conjuntos não elétricos é reduzida, quando comparada à das espoletas simples n.º 8 (figura 7.2).

Os demais procedimentos foram mantidos.



Figura 7.2- Esquema de montagem dos conjuntos espoleta/estopim e não elétrico de retardo.

Foram realizados três experimentos em 20 de janeiro de 2004 com conjuntos de espoleta simples e retardo de 25 milissegundos e dois apenas com espoleta simples. Tal procedimento repetiu-se em 22 de janeiro. Em ambos os dias a instalação do geofone deu-se uma única vez, com a reutilização parcial dos furos - procurando recompor sua conformação original, alterada pelas detonações, realizou-se o preenchimento com solo de 2/3 de sua profundidade, gradualmente compactado e reexecução até a profundidade inicial.

Os resultados obtidos em 22 de janeiro podem ser visualizados nas figuras 7.3.a, 7.3.b, e 7.3.c. Tais gráficos de dispersão foram realizados com a importação dos dados de registros de detonação de espoleta simples e de espoleta simples e retardo de 25 ms, do software BlastWare Series III para o Microsoft Excel 97.

Como pode ser constatado, os resultados apresentam similaridade, com registros referentes a dois conjuntos “espoleta simples/retardo” praticamente superpostos e o terceiro apresentando defasagem em relação a eles, indicando a ocorrência de desvios nos tempos de retardos. Resultados semelhantes foram obtidos em 20 de janeiro.

O artifício utilizado para a determinação dos tempos de retardo foi promover a deconvolução do sinal proveniente do registro do conjunto “espoleta simples/retardo” daquele originado pela espoleta. Para tanto serão utilizados os registros obtidos naquela data unicamente pelas espoletas simples (figuras 7.4.a., 7.4.b e 7.4.c).

As figuras 7.5.a, 7.5.b e 7.5.c representam os resultados obtidos a partir dos procedimentos descritos, utilizando-se os dados constantes nos registros "espoleta 2" e "ter retardo" de 22 de janeiro de 2004.

A deconvolução tem o significado de um filtro aplicado ao sinal originado pelo conjunto “espoleta simples/retardo”, dele expurgando o sinal proveniente da espoleta simples, com a obtenção da representação daquele provocado apenas pelo retardo, com poucas distorções, mantidas as referências de tempo.

Os pontos indicados através de setas nas figuras 7.5.a, 7.5.b e 7.5.c indicam pontos homólogos da representação da perturbação causada pela espoleta simples n.º 8 e da representação da perturbação decorrente, exclusivamente, da espoleta de retardo, obtida através de deconvolução. O intervalo de tempo compreendido entre ambos é o considerado como o tempo de retardo.

Os valores obtidos para os acessórios de detonação com tempo de retardo nominal de 25 ms encontram-se na tabela A.1.

Tabela 7.1 - Tempos de retardo - solo (janeiro de 2004).

data	registro	tempo observado (ms)*	desvio (ms)	desvio (%)
20/01/04	prim 25 ms	20,9	-4,1	-16,4
20/01/04	seg 25 ms	26,1	1,1	4,4
20/01/04	ter 25 ms	26,6	1,6	6,4
22/01/04	prim 25 ms	25,1	0,1	0,4
22/01/04	seg 25 ms	21,5	-3,5	-14,0
22/01/04	ter 25 ms	24,9	-0,1	-0,4

*valores arredondados para a primeira casa decimal.

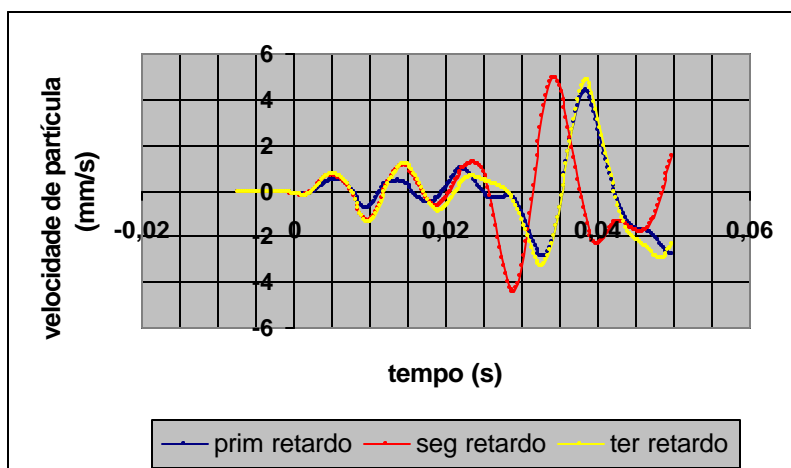


Figura 7.3.a - Registros obtidos na componente transversal; eventos monitorados em 22/01/04 a partir de conjuntos compostos por espoleta simples e de retardo de 25 ms.

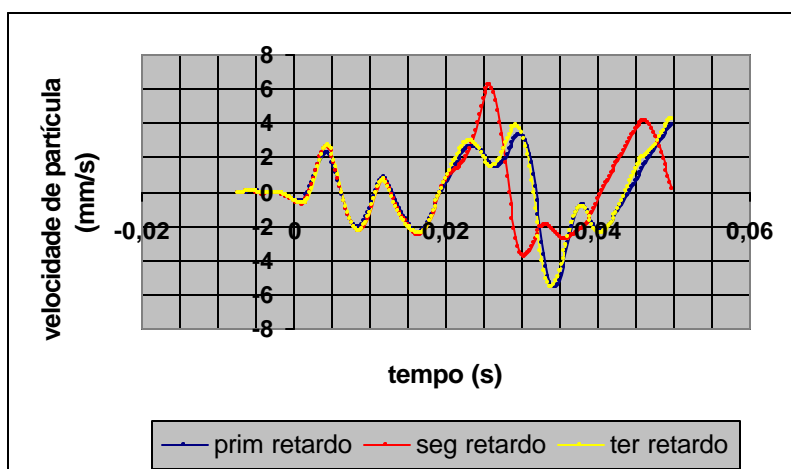


Figura 7.3.b - Registros obtidos na componente vertical; eventos monitorados em 22/01/04 a partir de conjuntos compostos por espoleta simples e de retardo de 25 ms.

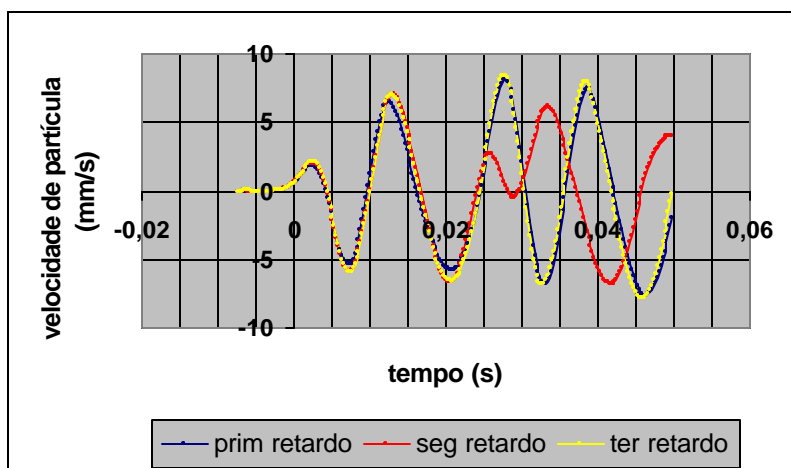


Figura 7.3.c - Registros obtidos na componente longitudinal; eventos monitorados em 22/01/04 a partir de conjuntos compostos por espoleta simples e de retardo de 25 ms.

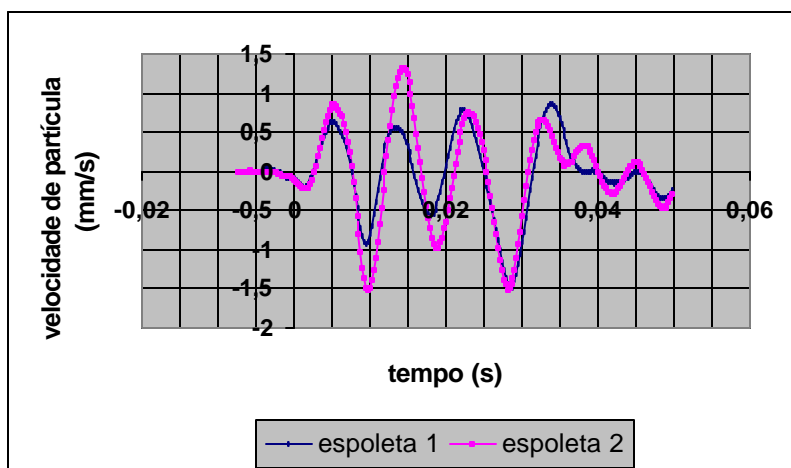


Figura 7.4.a - Registros obtidos na componente transversal; eventos monitorados em 22/01/04 a partir de espoleta simples n.º 8.

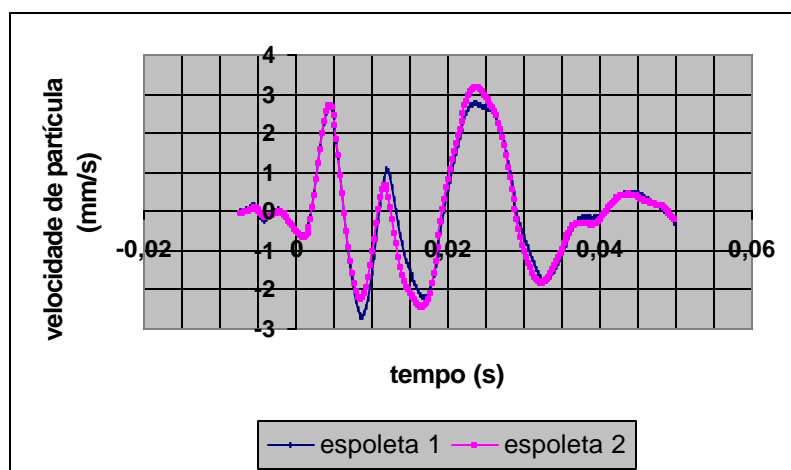


Figura 7.4.b - Registros obtidos na componente vertical; eventos monitorados em 22/01/04 a partir de espoleta simples n.º 8.

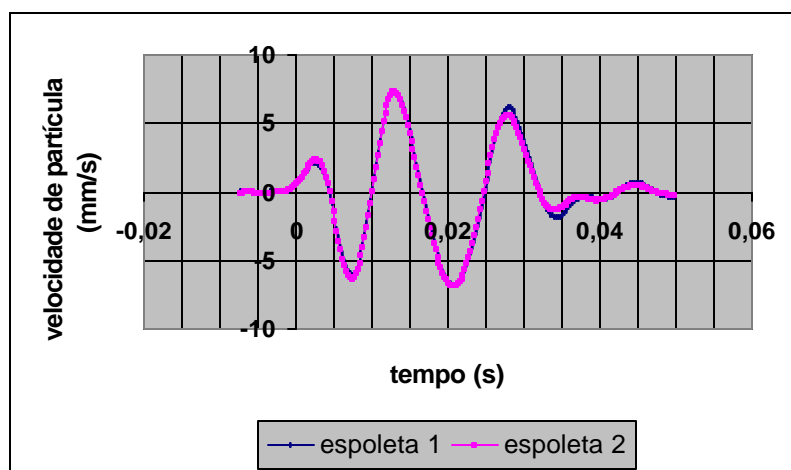


Figura 7.4.c - Registros obtidos na componente longitudinal; eventos monitorados em 22/01/04 a partir de espoleta simples n.º 8.

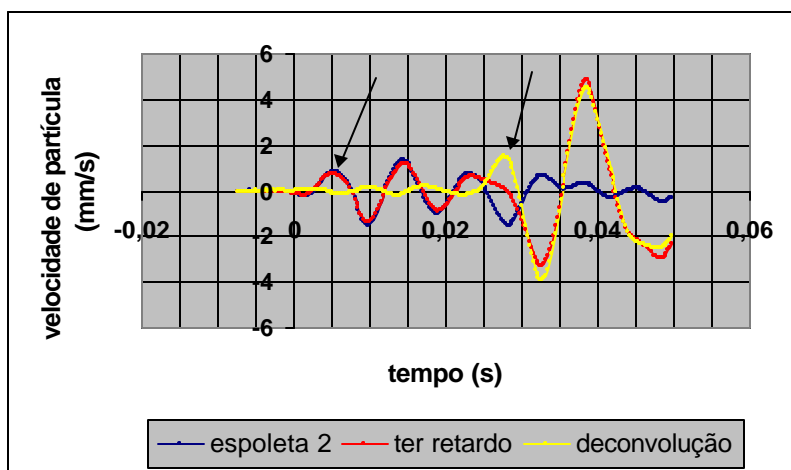


Figura 7.5.a - Registros obtidos na componente transversal; eventos monitorados em 22/01/04 e representação do sinal "ter retardo" deconvolvido do sinal "espoleta 2".

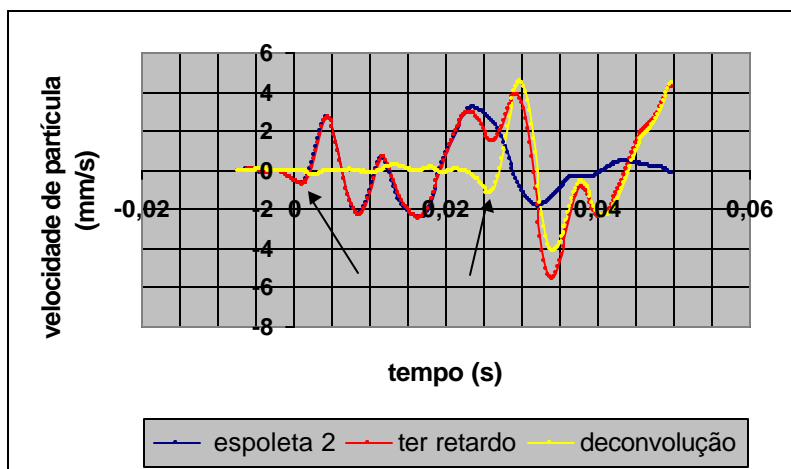


Figura 7.5.b - Registros obtidos na componente vertical; eventos monitorados em 22/01/04 e representação do sinal "ter retardo" deconvolvido do sinal "espoleta 2".

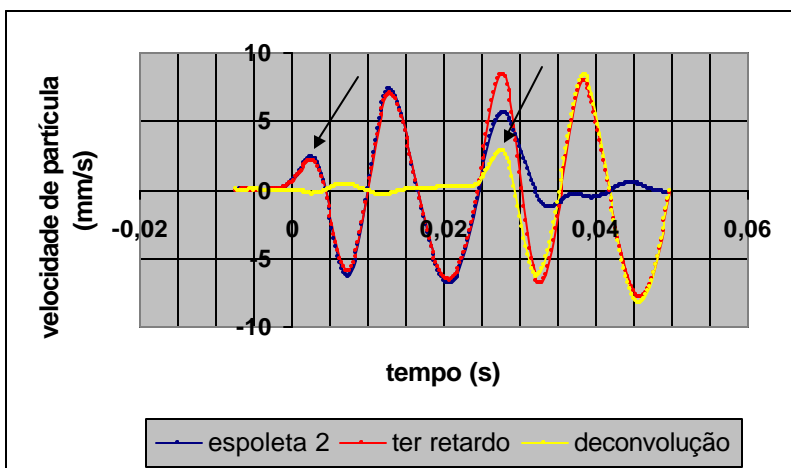


Figura 7.5.c - Registros obtidos na componente longitudinal; eventos monitorados em 22/01/04 e representação do sinal "ter retardo" deconvolvido do sinal "espoleta 2".

Em junho de 2004 novos ensaios foram realizados para a determinação de tempos de retardo em acessórios com tempos nominais de 17 milissegundos e 25 milissegundos, utilizados na ligação entre furos e 250 milissegundos, na iniciação da coluna de explosivos. Tais acessórios de detonação integravam lote obtido através da mesma aquisição daqueles utilizados em janeiro, tendo sido mantidos armazenados para esta finalidade. Uma vez que tais aquisições não contemplam grandes quantidades, não foi possível observar dados como data de fabricação e número de lote, sendo todos de fabricação de Britanite IBQ Indústrias Químicas, fornecedor que supriu as necessidades do empreendimento ao longo do ano de 2003.

Nessa etapa o meio de propagação escolhido foi um maciço basáltico, sendo os furos realizados em um afloramento natural por meio de perfuratriz de impacto elétrica. Com 20 centímetros de profundidade e 19 milímetros de diâmetro tais furos foram realizados à distância de 50 centímetros um do outro. O geofone foi posicionado a 1,3 metros de distância de ambos os furos, fixado ao maciço através de pasta de gesso e orientado ao furo que iniciaria o processo de registro. A fim de melhorar as condições de propagação das perturbações geradas pelas detonações os furos foram preenchidos com água antes de cada evento.

O aparelho utilizado foi o MiniMate Plus, com as mesmas configurações anteriormente descritas. Também foram mantidas as características de montagem dos conjuntos espoleta simples/não elétrico, à exceção daqueles em que foram utilizados não elétricos de coluna, de 250 milissegundos, o que permitiu sua utilização sem que a ele fosse acoplada espoleta simples extra, dada a característica de sua carga explosiva.

Em 08 de junho de 2004 foram realizados seis eventos que contemplaram montagens contendo acessórios de todos os tempos citados, sendo dois de cada tempo. Os resultados foram considerados satisfatórios, com os registros apresentando as perturbações decorrentes da espoleta simples utilizada para a iniciação do evento individualizada em relação à do retardo, possibilitando a leitura direta dos tempos de retardo através do software BlastWare Series III na componente vertical. Nas demais componentes considerou-se que a conjugação da pequena amplitude observada nos registros com intenso ruído de fundo, em relação às amplitudes obtidas, poderia comprometer os resultados. Atribuiu-se tal ruído de fundo a atividades desenvolvidas no entorno do local.

Em 19 de junho foram realizados 19 eventos que contemplaram cinco montagens contendo retardos de 17 milissegundos, oito de 25 milissegundos e seis de 250 milissegundos, sendo

utilizados os mesmos furos anteriormente feitos. As demais condições foram mantidas, inclusive na fixação do geofone. Os resultados obtidos foram similares àqueles de 08 de junho, inclusive em relação ao ruído de fundo, ainda que em menor intensidade, já que nesta ocasião inexistiam atividades em seu entorno.

Tendo em vista que tais ruídos de fundo dificultam, mesmo na componente vertical, a determinação precisa do instante em que iniciam os registros decorrentes das perturbações geradas, adotou-se como referencial na determinação do intervalo de tempo os primeiros picos de cada perturbação. Os resultados obtidos encontram-se na Tabela 7.2.

Tabela 7.2 - Tempos de retardo - basalto (junho de 2004).

data	hora	tempo nominal (ms)	tempo observado (ms) *	desvio (ms)	desvio (%)
08/06/04	17:31	17	16,8	-0,2	-1,18
08/06/04	17:55	17	14,4	-2,6	-15,29
19/06/04	17:02	17	13,7	-3,3	-19,41
19/06/04	17:05	17	16,8	-0,2	-1,18
19/06/04	17:08	17	14,9	-2,1	-12,35
19/06/04	17:12	17	13,2	-3,8	-22,35
19/06/04	17:15	17	16,1	-0,9	-5,29
08/06/04	17:36	25	22,9	-2,1	-8,40
08/06/04	18:13	25	29,3	4,3	17,20
19/06/04	17:20	25	25,4	0,4	1,60
19/06/04	17:24	25	25,4	0,4	1,60
19/06/04	17:34	25	26,4	1,4	5,60
19/06/04	17:36	25	27,1	2,1	8,40
19/06/04	17:39	25	23,4	-1,6	-6,40
19/06/04	17:44	25	22,9	-2,1	-8,40
19/06/04	17:50	25	23,9	-1,1	-4,40
19/06/04	18:31	25	27,6	2,6	10,40
08/06/04	17:41	250	251,4	1,4	0,56
08/06/04	18:21	250	250,9	0,9	0,36
19/06/04	18:00	250	248,8	-1,2	-0,48
19/06/04	18:04	250	260,3	10,3	4,12
19/06/04	18:08	250	259,3	9,3	3,72
19/06/04	18:13	250	242,0	-8,0	-3,20
19/06/04	18:17	250	241,7	-8,3	-3,32
19/06/04	18:22	250	250,5	0,5	0,20

* Valores observados arredondados para a primeira casa decimal.

O método adotado para estimar os tempos de retardo de acessórios de detonação não elétricos redundou em resultados que, ainda que apresentem relativa consistência, carecem de estudos mais aprofundados.

Ensaio sistemático com a utilização conjunta de aparelhos de medição de velocidade de detonação poderão estimar precisão e deficiências do ensaio, influência das características do meio de propagação, bem como as limitações na utilização dos sismógrafos de engenharia com esta finalidade.

Demonstrada sua precisão pode vir a tornar-se ferramenta importante no controle de qualidade de tais acessórios de detonação.

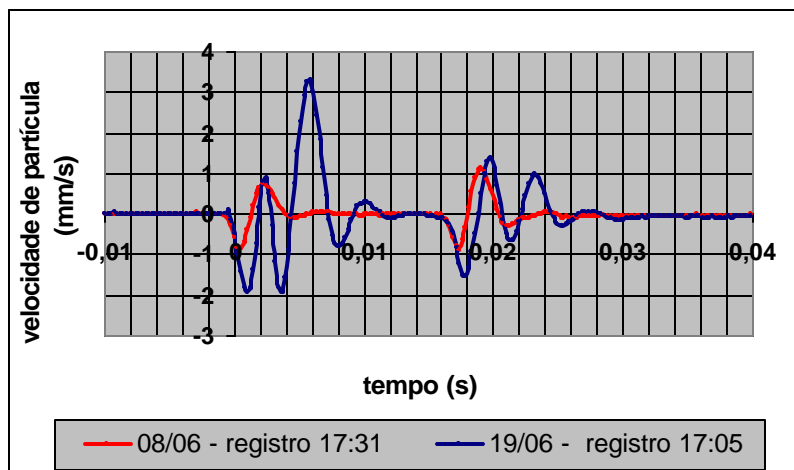


Figura 7.6.a - Comparativo entre os registros 17:31, de 08/06/04 e 17:05 de 19/06/04, na componente vertical, a partir de retardos com tempos nominais de 17 ms. Os valores observados foram de 16,8 ms.

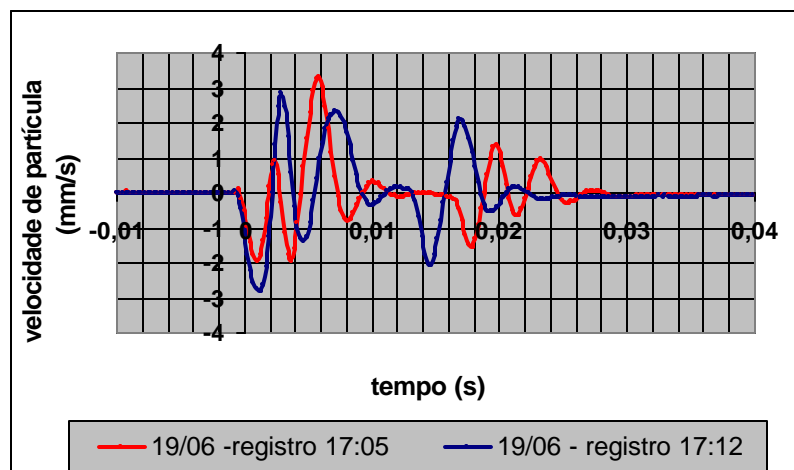


Figura 7.6.b - Comparativo entre os registros 17:05 e 17:12 de 19/06/04, na componente vertical, a partir de retardos com tempos nominais de 17 ms. Os valores observados foram de 16,8 ms e 13,2 ms, respectivamente.

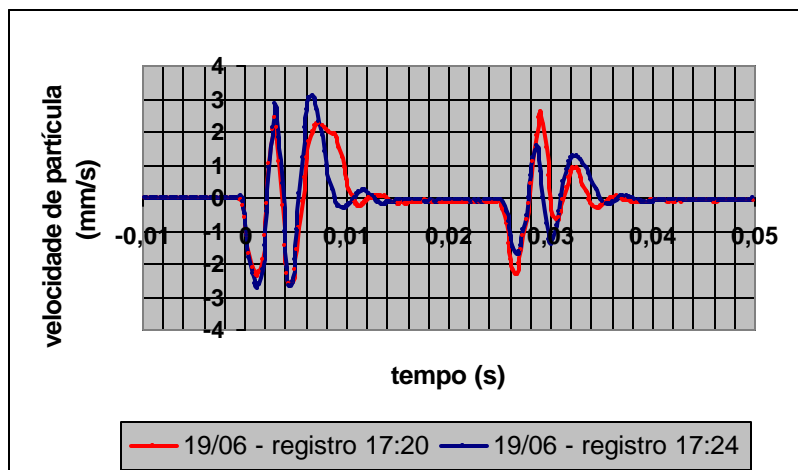


Figura 7.7.a - Comparativo entre os registros 17:20 e 17:24 de 19/06/04, na componente vertical, a partir de retardos com tempos nominais de 25 ms. Os valores observados foram de 25,4 ms.

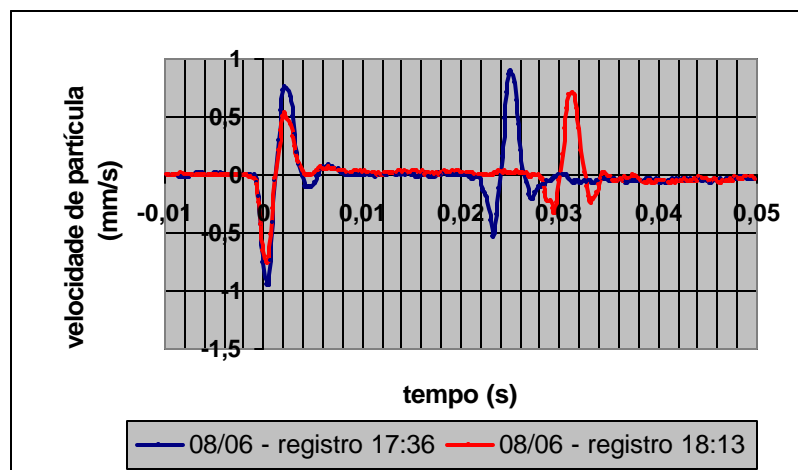


Figura 7.7.b - Comparativo entre os registros 17:36 e 18:13 de 08/06/04, na componente vertical, a partir de retardos com tempos nominais de 25 ms. Os valores observados foram de 22,9 ms e 29,3 ms, respectivamente.

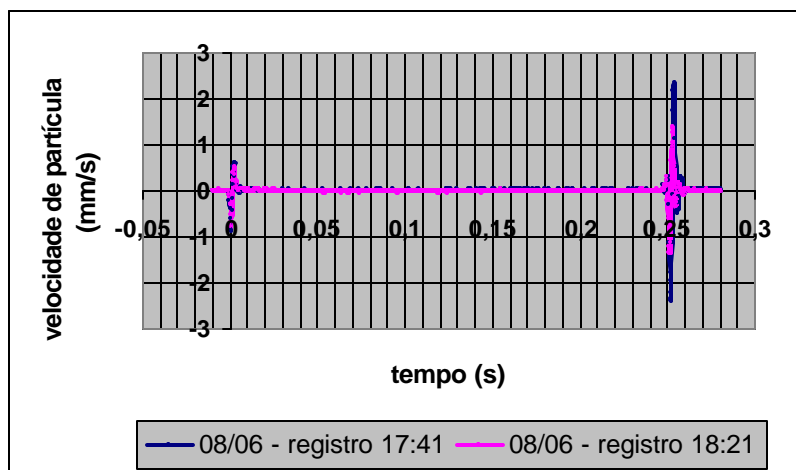


Figura 7.8.a - Comparativo entre os registros 17:41 e 18:21 de 08/06/04, na componente vertical, a partir de retardos com tempos nominais de 250 ms. Os valores observados foram de 251,4 ms e 250,9 ms, respectivamente.

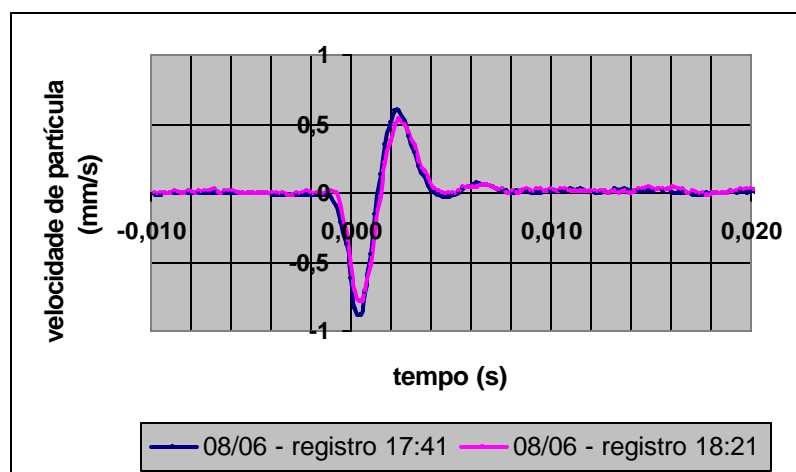


Figura 7.8.b - Detalhe da figura 7.8.a.

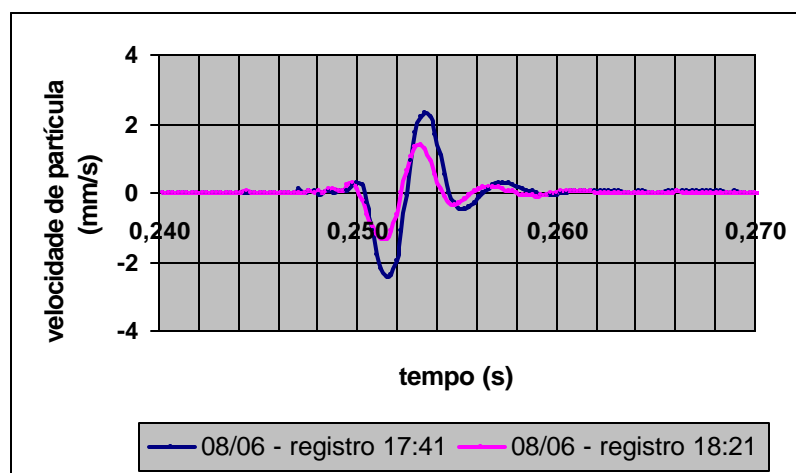


Figura 7.8.c - Detalhe da figura 7.8.a.

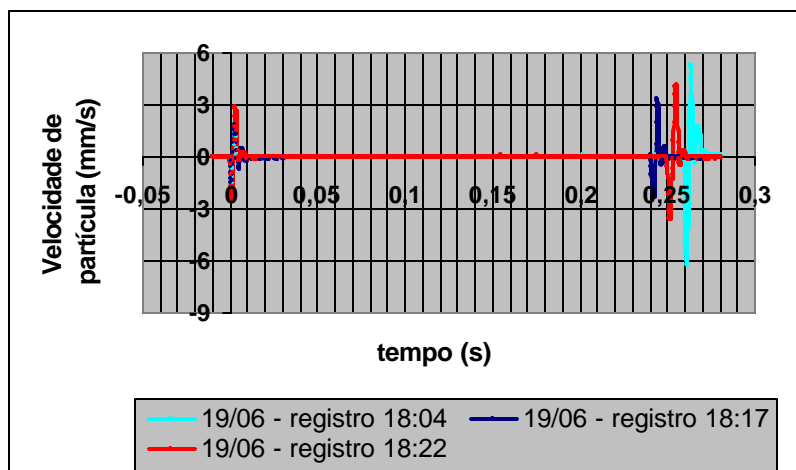


Figura 7.9.a - Comparativo entre os registros 18:04, 18:17 e 18:22 de 19/06/04, na componente vertical, a partir de retardos com tempos nominais de 250 ms. Os valores observados foram de 260,3 ms, 241,7 ms e 250,5 ms, respectivamente.

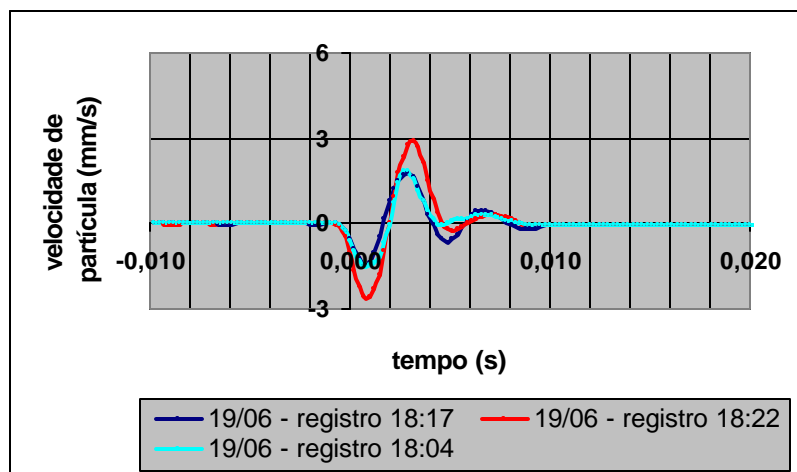


Figura 7.9.b - Detalhe da figura 7.9.a.

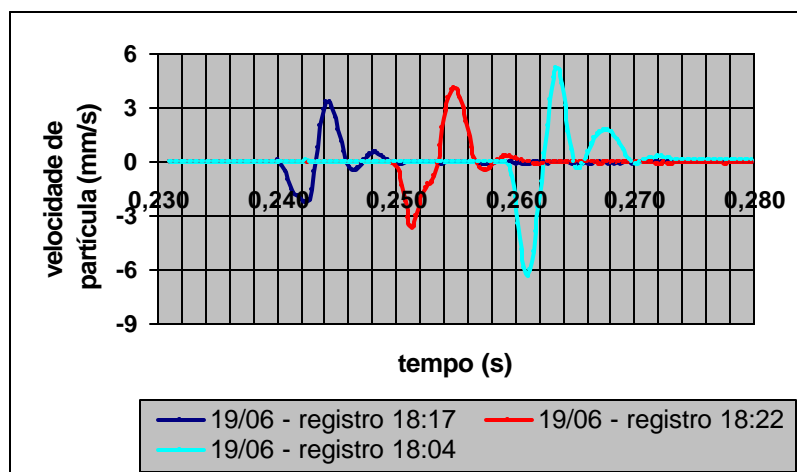


Figura 7.9.c - Detalhe da figura 7.9.a.

8. Conclusões

A continuidade dos trabalhos desenvolvidos pela empresa no local objeto deste estudo, com a manutenção dos benefícios econômicos e sociais ali gerados, vincula-se, entre outros fatores, à qualidade do seu relacionamento com a comunidade que habita seu entorno.

Consciente dessa circunstância, a direção da empresa tem procurado integrar-se à comunidade, participando de iniciativas de cunho social originadas em associação de moradores existente no local.

Paralelamente a tais procedimentos procura adequar as emissões de matéria e energia originadas no empreendimento a níveis considerados aceitáveis pela população e pelo órgão responsável pelo controle de poluição.

Como forma de viabilizar tal intento realizou, no âmbito do controle de vibrações geradas por operações de desmonte de rocha com a utilização de explosivos, parceria com o Instituto de Geociências e Ciências Exatas da UNESP, Campus de Rio Claro. Em contrapartida possibilitou o treinamento de pessoal vinculado ao Instituto nessa atividade, em local a ele próximo e com características consideradas atrativas, dado o seu posicionamento próximo a área urbanizada.

Como resultado desta parceria, encontram-se as alterações promovidas pela empresa aos plano de fogo executados, especificamente aquelas referentes à adequação da carga máxima de explosivos detonada instantaneamente, ou carga máxima por espera, considerando-se a distância entre o local da detonação e aquele a ser preservado, tendo como referência os dados obtidos na primeira etapa de monitoramentos sismográficos. Tais alterações proporcionaram, inegavelmente, melhorias nas condições de conforto ambiental aos moradores do conjunto habitacional Belinha Ometto, ao procurar pautar os níveis de vibração aos limites considerados toleráveis pelo órgão estadual de controle de poluição, de 4,2 mm/s na resultante.

Corroborar tal assertiva o fato de, enquanto na primeira etapa de monitoramentos sismográficos cinco dos seis registros obtidos ultrapassavam tal limite na região habitada mais próxima da área de lavra, na etapa subsequente dos dezessete registros obtidos nas mesmas condições apenas um o ultrapassou, atingindo 4,75 milímetros por segundo na resultante. Com duração inferior a 1 segundo, tais registros da segunda etapa, ainda que indiquem predominância de baixas frequências, assim consideradas aquelas menores que 30 Hertz, apresentam apenas 3 com valores da ordem de 3 mm/s: registros 42 (2,92 mm/s) e 44 (3,56 mm/s), na componente transversal e registro 21 (3,17 mm/s), na componente longitudinal, nesta faixa de frequências.

Por outro lado, os dados obtidos indicam ser o principal fator na dispersão das velocidades resultantes de partícula os desvios nos tempos nominais de retardo dos acessórios de detonação utilizados. Consideradas as observações quanto ao método empregado na determinação dos tempos de retardo de tais acessórios contidas no capítulo 7, foram observados desvios que atingem, em relação aos tempos nominais, 22,35% nos acessórios de 17 milisegundos, 17,20% nos de 25 milisegundos e 4,12% naqueles de 250 milisegundos.

Assim, o arranjo de elementos de retardo utilizados na iniciação da coluna de explosivos, com tempos nominais de 250 milisegundos, dispostos de forma a detonarem 2 minas instantaneamente, tem probabilidade de 62,5% de o fazerem em intervalo igual ou superior a sete milisegundos. Em fogos configurados de forma que suas minas detonem individualmente, utilizando tais acessórios em conjunto com aqueles utilizados na ligação entre minas com tempos nominais de 17 milisegundos, existe a possibilidade de ocorrência de superposição de efeitos de detonação de minas e mesmo a de inversão na seqüência de detonação em relação àquela esperada.

Uma vez que 5 dos sete registros sismográficos obtidos na segunda etapa de monitoramentos que ultrapassaram os valores previstos através da equação de máxima energia definida a partir dos dados provenientes da primeira contemplavam tal configuração, é razoável atribuir sua causa aos desvios nos tempos de retardo.

A partir do exposto, tem-se como imprópria a utilização conjunta de elementos de retardo com tempos nominais de 17 milisegundos na conexão entre minas e de 250 milisegundos na iniciação da coluna de explosivos, bem como a elaboração de planos de fogo que contemplem intervalos de tempo entre a detonação de minas, ou grupo de minas, em intervalos menores que 25 milisegundos nestas condições. Sugerindo-se, ainda, no intuito de minimizar a possibilidade de ocorrência dos efeitos anteriormente descritos, a substituição daqueles acessórios utilizados na iniciação da coluna de explosivos, com tempos nominais de 250 milisegundos, por outros de 200 milisegundos.

Os ônus passíveis de ocorrerem como resultado dos desvios observados nos tempos nominais dos acessórios de detonação dão-se sob os aspectos ambiental e econômico.

Sob o aspecto ambiental provocam a detonação de cargas instantâneas diferentes daquelas calculadas para um determinado plano de fogo, podendo promover níveis de vibração muito superiores ao previsto.

Sua conseqüência, em campanhas de monitoramento sismográfico que objetivem a obtenção de equações que permitam a previsão dos níveis de vibração gerados em tais atividades, decorre da possibilidade de adulteração dessas equações, comprometendo sua aplicação com segurança, já que tais cargas instantâneas constituem, junto com a distância entre o local da detonação e o ponto de interesse, a variável independente de tais equações.

Sob o aspecto econômico, o ônus decorre da possibilidade de ocorrência de fragmentação e lançamento inadequados, podendo ainda causar excessivos danos ao maciço remanescente, com suas conseqüências aos desmontes subsequentes.

No caso específico do local enfocado, a aplicação da equação obtida a partir do conjunto de dados das duas etapas de monitoramento (eq. 6.4) no intuito de atender aos parâmetros estabelecidos pela Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental comprometeria seriamente a continuidade dos trabalhos de lavra nas regiões mais próximas à área habitada, com possível imobilização de parte da reserva mineral nela existente, dadas as restrições dela decorrentes em relação à carga máxima de explosivo a ser detonada instantaneamente.

A partir de tais considerações desenvolveram-se equações de atenuação e de máxima energia, a partir dos dados obtidos em registros sismográficos de operações de desmonte de rocha cujos planos de fogo previam intervalos de detonação entre minas, detonadas isoladamente, de 25 milisegundos. Em situação que minimizam os efeitos dos desvios dos tempos dos elementos de retardo, compreendem-se 3 planos de fogo monitorados na primeira etapa e 5 na segunda, com 5 e 7 registros sismográficos, respectivamente, tais equações são assim expressas:

- equação de atenuação $v = 36.003,11 \times DE^{-1,936}$ (eq. 8.1)

- equação de máxima energia $v_{\max} = 53.153,35 \times DE^{-1,936}$ (eq. 8.2)

Com DE, ou distância escalonada, obtida através do critério de Ambrasseys e Hendron (op.cit.), uma vez que os coeficientes de correlação encontrados foram:

critério de Devine (op.cit.): -0,971;

critério de Langefors e Kihlström (op.cit.): 0,975;

critério de Ambrasseys e Hendron (op.cit.): -0,977;

com v e v_{\max} em milímetros por segundo, distância em metros e carga máxima de explosivos por espera em quilogramas.

A equação de máxima energia é ligeiramente mais restritiva que aquela obtida a partir dos dados da primeira etapa de monitoramentos, considerando-se sua faixa de utilização, e cujo emprego, observadas as sugestões propostas, recomendamos.

O ábaco a seguir, figura 8.1, construído a partir das equações de máxima energia, equações 6.2, 6.4 e 8.2, prevendo velocidade máxima de partícula na resultante de 4,2 mm/s, permite análise comparativa das cargas máximas de explosivos passíveis de serem detonadas instantaneamente, ou carga máxima por espera, considerando-se a distância existente entre o local da detonação e o local a ser preservado.

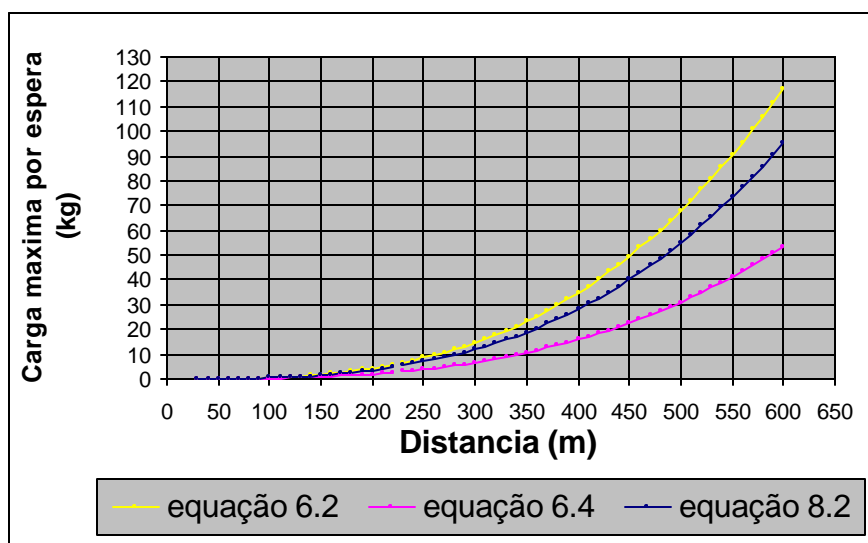


Figura 8.1 - Ábaco distância versus carga máxima por espera.

A manutenção do programa de monitoramentos sismográficos por parte da empresa, com a utilização em seus planos de fogo de acessórios de detonação com os tempos sugeridos permitirão a sua validação, além de propiciar o aperfeiçoamento de suas operações com a análise de eventuais variações no comportamento das vibrações, considerando-se as diferentes litologias em que as perturbações foram geradas, bem como as direções de propagação, sofisticação impraticável nas condições observadas.

Finalmente considera-se que adoção de medidas, por parte da empresa, que visem ao controle de qualidade dos produtos adquiridos, com ênfase aos elementos de retardo, são de fundamental importância para o aprimoramento das operações de desmonte de rocha ali desenvolvidas.

9 - Referências Bibliográficas

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 9653. **Guia para avaliação dos efeitos provocados pelo uso de explosivos nas minerações em áreas urbanas**. 1986. São Paulo, SP, 8p.

Atlas Powder Company. **Explosives and rock blasting**. 1987. Dallas, Texas, USA, 662 p.

Bacci, D.C. **Vibrações geradas pelo uso de explosivos no desmonte de rochas: Avaliação dos parâmetros físicos do terreno e dos efeitos ambientais**. 2000. 211 p. Tese (Doutorado) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas da Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, SP.

Badley, M. E. **Practical seismic interpretation**. 1985. Prentice Hall. Englewood Cliffs, N.J., USA. 266p.

Bureau of Mines. **Surface mine blasting informations Circular 9135**. Bureau of Mines Technology Transfer. United States Bureau of Mines. 1987. Chicago, Ill, USA. 114 p.

Cerelo, L.; Viel, R.S. **Influência das detonações na qualidade de taludes finais em minerações a céu aberto**. Anais do II Congresso Brasileiro de Mineração. 1987. São Paulo (SP). p. 207-226.

Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB) – **Projeto de norma D7.013: Mineração por explosivos**. São Paulo. 1992. 7 p.

Chapot, P. **Etude des vibrations provoquées par les explosifs dans les massifs rocheux**. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées. Paris. 1981. 57 p.

Cintra, B.H. **Emprego de explosivos industriais a céu aberto**. Britanite Indústrias Químicas Ltda., 1987. Curitiba, PR, Apostila. 112 p.

Dias, E.G.C.S. **Avaliação de impacto ambiental de projetos de mineração no Estado de São Paulo: a etapa de acompanhamento.** Tese (Doutorado em Engenharia Mineral). Escola Politécnica, USP, 2001, São Paulo, SP. 303 p.

Dias, M.J.D. **Relatório de controle de vibrações nº 1/85.** Britanite Indústrias Químicas Ltda. 1985, Curitiba, PR. 76 p.

Dinis da Gama, C. **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. Portugal. 1998. 16 p.

Dourado, J.C. **A utilização da sísmica na determinação de parâmetros elásticos de maciços rochosos e terrosos.** São Paulo, SP. Artigo Técnico nº 08 da ABGE. 1984. 12 p.

Dourado, J.C. **Textos didáticos.** 2001, IGCE, Unesp. <http://ns.rc.unesp.br/igce/aplicada>.

Dozzi, L.F.S.; Saad, J.C.; Guapo, L.A.; Fabiani, P.A.A. **Equação de previsão do nível de vibração oriunda da detonação em maciços basálticos da bacia do Alto Paraná.** Comunicação Técnica 259. Instituto de Pesquisas Tecnológicas. 1984. 12 p. São Paulo, SP.

DuPont do Brasil S.A. **Manual para o uso de explosivos.** Rio de Janeiro – RJ. 1969. 652 p.

Eston, S.M. **Uma análise dos níveis de vibração associados a detonações.** 1998. 125 p. + apêndices (Tese de Livre Docência) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo – USP, São Paulo, SP.

Fernandes, C.E. de M. **Fundamentos de prospecção geofísica.** Ed. Interciência. Rio de Janeiro. RJ, 1984. 190 p.

Fonseca, J.S.; Martins, G.A.; Toledo, G.L. **Estatística aplicada.** Ed. Atlas S.A. São Paulo. 1986. 267 p.

Geraldi, J.L.P. **Instrumentação sísmica de detonações, controle do meio ambiente e otimização de planos de fogo**. Coletânea de Trabalhos Técnicos. II Congresso Brasileiro de Mineração. 1987. p. 167-179.

Gregory, C.E. **Explosives for north american engineers**. Trans Tech Publications, Cleveland, Ohio, USA. 1973. 276 p.

Instantel Inc. **Operator Manual**. Kanata, Ontario, Canada. 1998. 44 p.

Jaimin, L. **Literature survey of ANFO, slurries and water-in-oil emulsion explosives**. Center for Explosives Technology Research. New Mexico Institute of Mining and Tecnology. CETR Report A-02-85. Socorro, NM USA. 1985. 58 p.

Langefors, U. e Kihlström, B. **Rock blasting**, Almqvist & Wiksel Förlag AB Stockholm, 1978. 438 p.

Ricardo, H.S.; Catalani, G. **Manual prático de escavação**. Ed. Pini Ltda. 1990. São Paulo, SP. 668 p.

Midea, N.F. e Fabiani, P.A.A. **Propriedades dinâmicas das rochas e maciços rochosos, caracterização, aplicações e exemplos**. II Congresso Sul Americano de Mecânica de Rochas. Porto Alegre, RS, 1986.

Rolim Filho, J.L. – **Considerações sobre desmontes de rochas com ênfase aos basaltos feição entablamento**. 1993. 216 p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos – EESC/USP. São Carlos, SP.

Sanches, L.E. **Curso “Formación en aspectos geológicos de protección ambiental”**. IG Unicamp. Campinas, SP. 1995. p. 179-211.

Silva, V. C.; **Variáveis que interferem nos problemas ambientais gerados durante os desmontes de rocha**. 1998. 135 p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo – USP, São Paulo, SP.

Silva, V.C.; Antonini, A.; Koppe, J.; Floyd, J.; Cerello, L.; Crosby, W.; Hogan, T.; **Problemas gerados pelas detonações**. IGCE. Unesp. Rio Claro, SP. 2000. Apostila. 165 p.

Siskind, D.E.; Stagg, M.S.; Kopp, J.W.; Dowding, C.H. **Structure response and damage produced by ground vibrations from surface mine blasting. Report of Investigations 8507**. United States Bureau of Mines. 1980. 74 p. Washington, U.S.

Siskind, D.E.; Stachura, V.J.; Nutting, M.J. **Low-frequency vibrations produced by surface mining over abandoned underground mines. Report of Investigation 9078**. United States Bureau of Mines. 1987. 195 p. Washington, U.S.

Timoshenko, S.P.; Goodier, J.N. **Teoria da elasticidade**. 1980. Ed. Guanabara Dois, Rio de Janeiro, RJ. 545 p.

Thomson, T.T. **Teoria da vibração com aplicações**. 1987. Editora Interciência. Rio de Janeiro, RJ. 461 p.

ANEXO I

Mapa de Localização das Detonações e Pontos de Monitoramento Sismográfico

ANEXO II
Planos de Fogo

ANEXO III

Registros Sismográficos - Planos de fogo

ANEXO IV

Registros Sismográficos - Tempos de retardo