

CONTROLE DE VIBRAÇÕES GERADAS POR DESMONTE DE ROCHA COM EXPLOSIVOS. ESTUDO DE CASO: CALCÁRIO CRUZEIRO, LIMEIRA (SP)

Caetano DALLORA NETO ¹ & Gilda Carneiro FERREIRA ²

(1) Rua Tibiriçá, 1094/403. CEP 14010-090. Ribeirão Preto, SP. Endereço eletrônico: cdallora@directnet.com.br.

(2) Departamento de Geologia Aplicada, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Campus de Rio Claro. Avenida 24-A, 1515, Bela Vista. CEP 13506-900. Rio Claro, SP. Endereço eletrônico: gildacf@rc.unesp.br.

Introdução
Área de Estudo
Atividades de Lavra
Monitoramento Sismográfico
 Dados Obtidos
 Dados Obtidos na Primeira Etapa de Monitoramento
 Dados Obtidos na Segunda Etapa de Monitoramento
Obtenção de Equação de Atenuação
Análise e Interpretação dos Dados
Conclusões
Referências Bibliográficas

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 de atenuação das vibrações 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 obtidos utilizando sismógrafos de engenharia, concentrando-se em área localizada a 300 m a sudoeste do empreendimento mineiro, no Bairro Belinha Ometto. Os trabalhos foram realizados em duas etapas. Na primeira foi gerada uma equação de atenuação que foi utilizada pela empresa e reduziu os incômodos causados à população pelas operações de detonação. Os valores obtidos na etapa seguinte indicaram que o principal fator na dispersão das velocidades de partícula seria a variação, em relação aos nominais, dos tempos de retardo dos acessórios de detonação que foram utilizados durante os trabalhos. Nas condições encontradas, considera-se 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 ms quando da utilização de acessórios de iniciação da coluna de explosivos dotados de tempo de retardo superior a 200 ms.

Palavras-chave: Desmonte com explosivos, vibrações do terreno, monitoramento sismográfico.

ABSTRACT – C. Dallora Neto & G.C. Ferreira – Ground vibrations originated by rock blasting with use of explosives. Case study: calcareous quarry of Cruzeiro, Limeira (SP). This study performs a ground vibrations monitoring generated by blasting in a calcareous and clay quarry in the Municipality of Limeira, State of São Paulo. The main objective is to develop a scaled distance equation and verify the existence of ground vibration levels variation in blasting of different lithological and stratigraphical layers. Peak particle and frequency registrations were measured by engineering seismographs in an area named Bairro Belinha Ometto located 300 meters southwest from the mining site. The data acquisition had been carried in two stages. A scaled distance equation was generated in the first one and was used by the Company in ulterior blasting, reducing population annoyance. PPv values obtained in successive stage of monitoring have indicated that the deviation of the nominal time delay in blasting accessories is the main factor for the dispersion of the PPv resultant. Blasting design with MS delay intervals lesser than 25 ms between holes or between rows and MS delays higher than 200 ms in the initiation system (explosive column) was considered improper in this study.

Keywords: Blasting, ground vibrations, monitoring seismographic.

INTRODUÇÃO

A coexistência entre empreendimentos produtivos e núcleos habitacionais próximos a eles nem sempre se dá de forma pacífica. A animosidade entre a comunidade e os empreendimentos decorrem de ações poluidoras dos últimos e também de restrições dos moradores à sua existência na proximidade de suas residências – síndrome de NIMBY (Not In My Back Yard) (Marchetti, 2005).

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 consequências 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 são 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 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 de atenuação das vibrações para o local.

A equação baseia-se nos dados constantes em

registros sismográficos e dos parâmetros dos planos de fogo a eles vinculados no período de dezembro de 1999 a dezembro de 2000. Ela 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, e contempla as possíveis variações nos níveis de vibração gerados pelo desmonte em diferentes níveis litológicos e estratigráficos.

A verificação da efetividade de tal equação de atenuação foi feita por meio de novos monitoramentos sismográficos, realizados no período de abril a novembro de 2003, considerando os limites impostos pelo órgão ambiental estadual, a Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental.

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, a equação permite adequações ao plano de fogo, dentro de critérios técnicos e econômicos, de modo a serem respeitadas as limitações estabelecidas pelas normas vigentes.

Essa equação serve, assim, 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.

ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo compreende uma mineração de calcário dolomítico e argilito e um bairro residencial a ele lindeiro (Belinha Ometto), posicionados a oeste da cidade de Limeira e distantes entre si aproximadamente de 300 m na direção nordeste-sudoeste (Figura 1). 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. O acesso à área dá-se pela estrada municipal Limeira-040, situando-se a área administrativa do empreendimento no km 3.

ATIVIDADES DE LAVRA

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. São denominadas de acordo com terminologia local para fins de lavra, da base para o topo:

- Calcário: calcário dolomítico, ocorrendo na base da jazida com uma altura média de 3,70 m. 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 m, é constituída por alternâncias de folhelho e calcário da Formação Irati, sendo parcialmente aproveitado, quando é maior a participação de calcário.

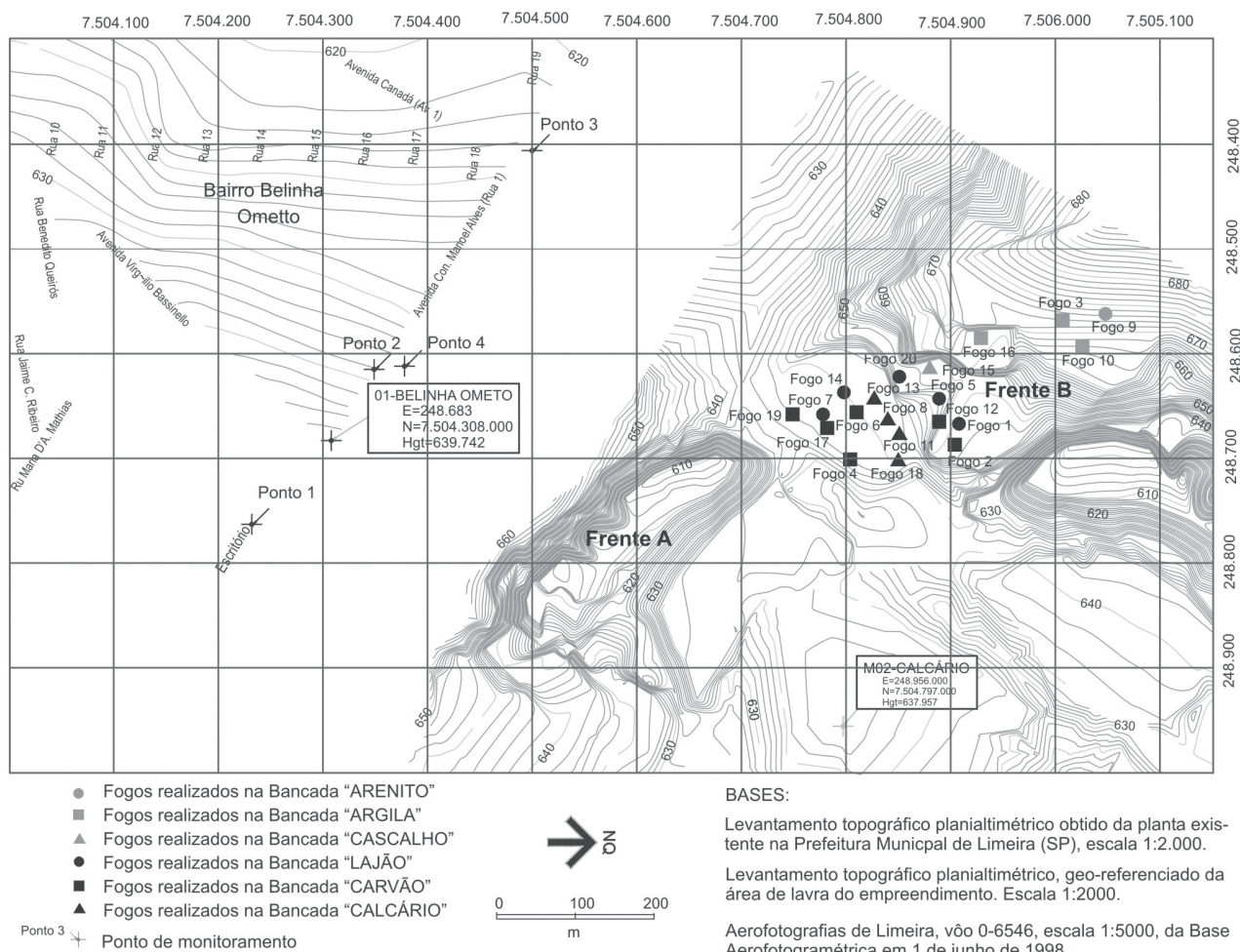


FIGURA 1. Mapa de localização das detonações e pontos de monitoramento sismográfico.

- Lajão: com altura média de 7,5 m é constituída por siltito compacto de coloração acinzentada da Formação Corumbataí. Em sua base apresenta três camadas de aproximadamente 0,4 m de espessura de calcário silicoso, intercaladas por duas delgadas camadas de siltito.
- Cascalho: com altura média de 11 m é constituída também por siltito acinzentado da Formação Corumbataí. Distingue-se da anterior por apresentar incidência maior de fraturamento.
- Argila b1: com 12,5 m de altura, em média, é composta por siltito acastanhado em sua base, em altura aproximada de 4 m, e argilito marrom arroxado da Formação Corumbataí.
- Argila b2: com 16 m de altura é constituída de argilito amarronzado da Formação Corumbataí.
- Arenito: da Formação Corumbataí, constitui o topo do material consolidado e apresenta altura média de 10 m.

Essa sequência é recoberta por camada de solo com espessura média de 2 m.

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 milissegundos 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 ms e 25 ms. A iniciação do fogo dá-se a partir de conjunto dotado de estopim hidráulico e espoleta simples.

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 e geofones a eles acoplados, fabricados pela empresa canadense Instantel Inc., modelos BlastMate Series III e MiniMate Plus, de propriedade do Departamento de Geologia Aplicada do IGCE/UNESP (Instantel Inc., 1998 a, b, c). São as seguintes as características técnicas dos equipamentos:

- BlastMate Series III – 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 – 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 1.024 amostras por segundo por canal, com opções de 2.048 e 4.096 amostras por segundo com a utilização de quatro canais. As amplitudes limites 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. Dispõem de microfones para registro de sobrepressões atmosféricas em amplitudes que variam de 88 dB(L) a 148 dB(L).

Os monitoramentos sismográficos foram realizados em dois períodos distintos, de dezembro de 1999 a dezembro de 2000 e de abril a novembro de 2003.

No primeiro, os registros obtidos foram da área habitada. 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. A distância entre os 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.

No 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.

Os dados obtidos foram agrupados com aqueles constantes dos planos de fogo praticados nos eventos que os originaram (carga por espera, retardos, forma de ligação) 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 de atenuação obtida com os dados de monitoramentos anteriores.

DADOS OBTIDOS

Com os monitoramentos dos níveis de vibração do terreno no período de dezembro de 1999 a novembro de 2003, foram obtidos 45 registros sismográficos provenientes de 30 detonações, ou fogos, em duas etapas distintas.

Dados Obtidos na Primeira Etapa de Monitoramentos

A primeira etapa, realizada entre 17 de dezembro de 1999 e 8 de dezembro de 2000, deu-se com o monitoramento de dez fogos detonados na frente A e dois fogos detonados na frente B, e a obtenção de 14 e 3 registros, respectivamente (Figura 1). Em sua maioria, esses fogos foram executados na bancada Cascalho, constituída pela mesma formação litológica em que se apoia a porção nordeste do conjunto habitacional Belinha Ometto, região onde foram realizados os respectivos monitoramentos.

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 admitidos pela CETESB (1992), que adota como velocidade resultante de partícula o valor máximo de 4,2 mm/s nos limites da área da mineração. Os dados referentes aos registros obtidos encontram-se na Tabela 1.

Dados Obtidos na Segunda Etapa de Monitoramentos

Os monitoramentos realizados na segunda etapa de aquisição de dados tiveram o objetivo de analisar o comportamento da equação obtida na primeira fase de monitoramento, procurando verificar sua aplicabilidade em relação aos fogos praticados, abrangendo diversas bancadas com diferentes litologias.

TABELA 1. Registros referentes aos monitoramentos obtidos no período de 17/12/1999 a 08/12/2000.

Fogo	Data	Frente de lavra	Bancada	Descrição local de monitoramento	Sismógrafo	Carga por espera (kg)	Distância do fogo (m)	Número do registro	Registros obtidos						Resultado mm/s
									Componente transversal		Componente vertical		Componente longitudinal		
									Velocidade mm/s	Frequência Hz	Velocidade mm/s	Frequência Hz	Velocidade mm/s	Frequência Hz	
1301	17/12/1999	A	Cascalho	escritório	BlastMate	40,11	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	11/1/2000	A	Lajão	escritório	BlastMate	20,12	300	3	3,170	21	1,400	34	1,900	32	3,240
1309	19/1/2000	A	Argila	escritório	MiniMate	80,18	450	4	2,290	35	0,508	18	1,270	N/A	2,510
1336	23/2/2000	A	Cascalho	Rua 1 c/ Av V. Bassinello	BlastMate	55,17	250	5	4,830	24	1,780	34	2,920	13	4,850
1352	23/3/2000	A	Cascalho	cont. da R. M. J. D'A. Mathias	BlastMate	67,90	500	6	1,270	15	0,889	13	1,020	28	1,630
1365	13/4/2000	A	Cascalho	Rua 16, 30	BlastMate	27,25	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	17/5/2000	A	Carvão	Rua 1 c/ Av V. Bassinello	BlastMate	30,08	270	9	4,950	34	1,400	39	4,830	34	6,400
1394	25/5/2000	A	Cascalho	área mineração	BlastMate	29,21	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	25/5/2000	A	Cascalho	área mineração	BlastMate	29,40	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	18/7/2000	A	Cascalho	Rua 1 c/ Rua 16	BlastMate	25,08	270	14	4,830	27	1,270	34	2,030	30	4,840
1505	18/10/2000	B	Cascalho	área mineração	BlastMate	84,16	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	8/12/2000	B	Cascalho	Rua 17 c/ Av. 1	BlastMate	50,06	550	17	1,520	12	1,520	64	1,780	57	1,890

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, 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 Avenida 17 (248.612 m E; 7.504.378 m N) (Ponto 4).

A fixação dos sensores ao solo foi feita com pinos, observadas as recomendações existentes (Instatel Inc., 1998 a, b, c) quanto a sua orientação e nivelamento nas duas etapas de monitoramento. Os dados referentes aos registros obtidos encontram-se na Tabela 2.

OBTENÇÃO DE EQUAÇÃO DE ATENUAÇÃO

Os mecanismos de atenuação de vibrações relacionados às propriedades do maciço tendem a produzir trens de ondas vibratórios 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.

Nesta 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.

TABELA 2. Registros referentes aos monitoramentos obtidos no período de 24/04/2003 a 25/11/2003.

Fo-go	Data	Bancada	Ponto de moni-tora-men-to	Descrição local de moni-tora-men-to	Sismó-grafo	Carga por espera (kg)	Distân-cia do fogo (m)	Núme-ro do registro	Componente transversal		Componente vertical		Componente longitudinal		Resul-tante mm/s
									Veloci-dade mm/s	Fre-qüên-cia Hz	Veloci-dade mm/s	Fre-qüên-cia Hz	Veloci-dade mm/s	Fre-qüên-cia Hz	
1	24/4/2003	Lajão	Ponto 1	Escritório mineração	BlastMate	48,29	683	18	0,508	12	0,635	28	0,635	27	0,696
			Ponto 3	Cerca bairro	MiniMate		484	19	1,140	34	0,762	>100	1,650	57	1,750
2	13/5/2003	Carvão	Ponto 1	Escritório mineração	BlastMate	36,11	677	20	1,520	19	1,400	28	1,270	15	1,620
			Ponto 3	Cerca bairro	MiniMate		492	21	3,560	51	3,680	57	3,170	24	4,750
3	14/5/2003	Argila b2	Ponto 1	Escritório mineração	BlastMate	55,56	799	22	1,270	20	0,762	32	1,140	20	1,370
			Ponto 3	Cerca bairro	MiniMate		533	23	1,900	37	0,762	85	1,650	39	2,010
4	15/7/2003	Carvão	Ponto 2	Residência	BlastMate	36,00	464	24	1,520	21	1,020	24	1,780	22	1,840
			Ponto 2	Residência	MiniMate		464	25	1,520	18	1,270	14	1,520	24	1,870
5	12/8/2003	Lajão	Ponto 2	Residência	BlastMate	26,11	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
6	13/8/2003	Carvão	Ponto 2	Residência	MiniMate	39,58	463	28	1,650	32	1,140	64	1,520	47	1,830
			Ponto 2	Residência	BlastMate	26,32	431	29	1,900	11	1,020	20	1,900	22	2,110
7	15/8/2003	Lajão	Ponto 1	Escritório mineração	MiniMate		556	30	2,410	16	0,762	24	1,400	16	2,440
			Ponto 2	Residência	BlastMate	22,00	494	31	1,140	37	0,508	85	1,020	34	1,360
8	11/9/2003	Calcário	Ponto 1	Escritório mineração	MiniMate		617	32	0,635	51	0,508	43	0,127	N/A	0,648
			Ponto 2	Residência	BlastMate	37,50	702	33	1,140	26	0,381	34	0,889	27	1,450
9	12/9/2003	Arenito	Ponto 1	Escritório mineração	MiniMate		841	34	1,020	21	0,508	37	0,762	23	1,200
			Ponto 2	Residência	MiniMate	63,57	678	35	0,762	19	0,508	43	0,889	34	0,933
10	15/9/2003	Argila b2	Ponto 2	Residência	MiniMate	63,57	678	35	0,762	19	0,508	43	0,889	34	0,933
11	17/9/2003	Calcário	Ponto 1	Escritório mineração	MiniMate	19,20	626	36	0,508	28	0,508	47	0,508	51	0,648
12	19/9/2003	Carvão	Ponto 4	Cerca bairro	MiniMate	39,64	514	37	1,270	37	0,635	47	1,520	26	1,660
13	23/9/2003	Calcário	Ponto 2	Residência	MiniMate	22,00	480	38	1,650	37	1,020	64	1,140	64	1,690
14	29/9/2003	Lajão	Ponto 2	Residência	MiniMate	26,43	450	39	1,400	34	0,635	64	1,020	32	1,650
15	30/9/2003	Cascalho	Ponto 2	Residência	MiniMate	42,78	531	40	1,520	23	0,889	27	2,030	24	2,550
16	1/10/2003	Argila b1	Ponto 2	Residência	MiniMate	46,18	581	41	2,540	24	0,889	30	2,790	26	2,830
17	2/10/2003	Carvão	Ponto 2	Residência	MiniMate	78,18	437	42	2,920	15	1,400	21	2,160	13	2,960
18	3/10/2003	Calcário	Ponto 2	Residência	MiniMate	21,43	509	43	0,635	26	0,508	73	0,635	23	0,741
19	10/10/2003	Carvão	Ponto 2	Residência	MiniMate	39,00	403	44	3,560	21	1,270	24	0,254	>100	3,580
20	25/11/2003	Lajão	Ponto 2	Residência	MiniMate	96,25	502	45	1,65	16	0,762	57	1,520	14	1,88

A forma geral de uma equação que correlaciona estas três variáveis, com a velocidade de partícula como variável dependente é do tipo: $v = a \cdot Q^b \cdot D^{-c}$, onde: v = velocidade de partícula; Q = massa de explosivo detonada instantaneamente; D = distância entre a detonação e o local de interesse, ou $v = a \cdot (Q/D^{c/b})^b$. 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 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 1.000 m, 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 J. F. Devine (1962, segundo Dozzi et al., 1984). Ambrasseys & Hendron (1968, segundo Chapot, 1981; Dozzi et al., 1984) adotam como distância escalonada a relação $D/Q^{1/3}$.

Dinis da Gama (1998) 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.”

A partir da elaboração de um diagrama bilogarítmico contendo número razoável de pontos que tenha

na abscissa valores da distância escalonada e na ordenada velocidades de partícula obtidas em monitoramentos, é possível, através 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 & Kihlström (1978).

É interessante reproduzir outra observação de Dinis da Gama (1998), esta a respeito da carga de explosivos detonada: *“Tais diagramas podem ser obtidos em função ou do peso total de explosivo detonado, ou do peso detonado 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 1.000 m 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.

ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DOS DADOS

Conforme referido anteriormente, de posse dos registros sismográficos, dos planos de fogo e das distâncias entre os locais das detonações e os pontos de monitoramento, é possível obter a equação local de atenuação das vibrações. Em outras palavras, torna-se factível o estabelecimento de fórmula empírica que interprete a relação funcional entre as variáveis velocidade de partícula, distância e carga máxima por espera.

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 (segundo Dozzi et al., 1984), $D/Q^{1/2}$; Langefors & Kihlström (1978), $Q/D^{3/2}$; e Ambrassey & Hendron (segundo Chapot, 1981 e Dozzi et al., 1984), $D/Q^{1/3}$.

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

$$v = 58.434,495 \times DE^{-2,10464} \quad (\text{equação 1}),$$

sendo DE , ou distância escalonada, obtida através do critério de Ambrassey & Hendron, uma vez que os coeficientes de correlação encontrados foram: critério de Devine: -0,837; critério de Langefors & Kihlström: 0,744; critério de Ambrassey & Hendron: -0,906.

A envoltória de máxima energia (Dias, 1985), assim considerada como o deslocamento da equação obtida para a situação mais desfavorável, nos moldes sugeridos por Langefors & Kihlström (1978), é expressa como:

$$v_{\max} = 104.253,99 \times DE^{-2,10464} \quad (\text{equação 2}),$$

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

A Figura 2A permite a visualização dos registros obtidos e das equações de atenuação e de máxima energia em gráfico de dispersão.

Na segunda etapa de monitoramentos foram obtidos oito registros no Ponto 1, dezesseis registros no Ponto 2, três registros no Ponto 3 e um registro no ponto 4 (Figura 2B).

Aqui, os registros de velocidade resultante de partícula apresentaram elevada dispersão em seus valores, quando comparados com aqueles oriundos na etapa anterior, conforme mostram os coeficientes de correlação obtidos segundo os diferentes critérios: critério de Devine, -0,635; critério de Langefors & Kihlström, 0,604; critério de Ambrassey & Hendron, -0,654.

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. (Figura 2C, D).

Uma vez que na obtenção dos registros da primeira etapa 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 se originaram 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

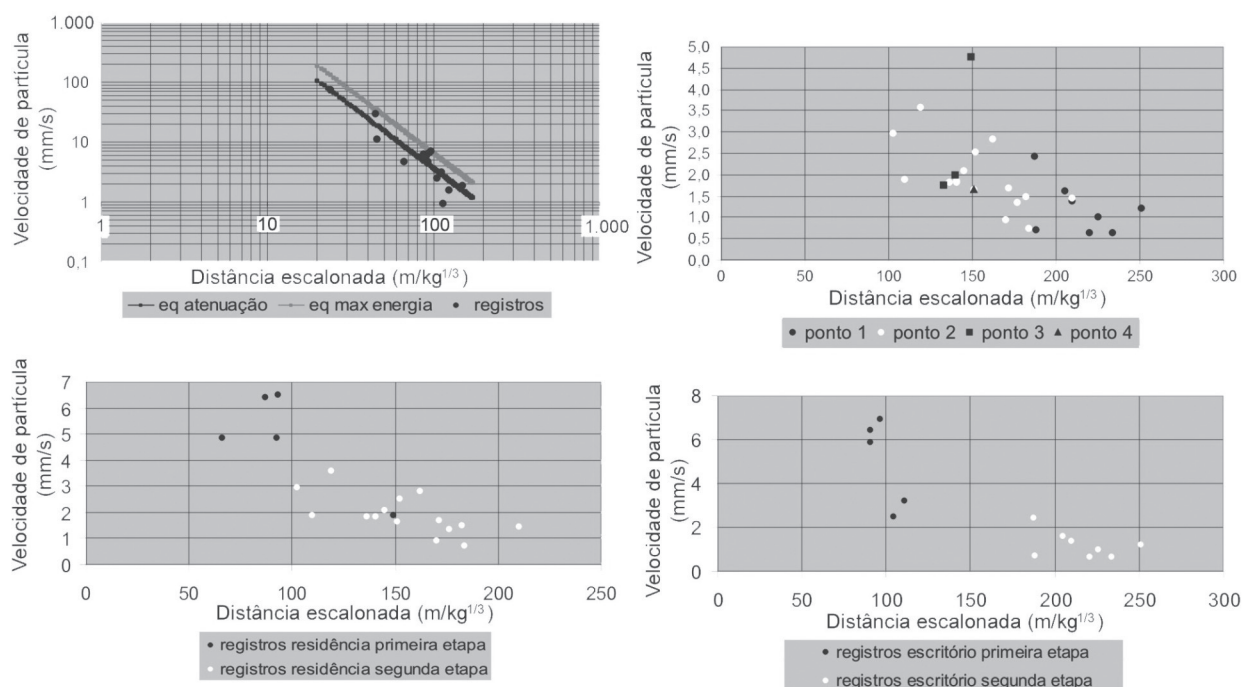


FIGURA 2. (A): Registros obtidos na primeira etapa de monitoramentos e equações de atenuação e de máxima energia. (B): Registros obtidos na segunda etapa de monitoramentos. (C): Registros obtidos em residências situadas na Rua 16, nº 35, na primeira e segunda etapas de monitoramento. (D): Registros obtidos no escritório da empresa na primeira e segunda etapas de monitoramento.

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

A Figura 3A apresenta os resultados obtidos, nela podendo-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 ms, indicando seu vínculo aos tempos nominais de retardo 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.

Análise similar foi realizada para os dados obtidos na primeira etapa de monitoramentos. Os resultados obtidos podem ser visualizados na Figura 3B. Nela é

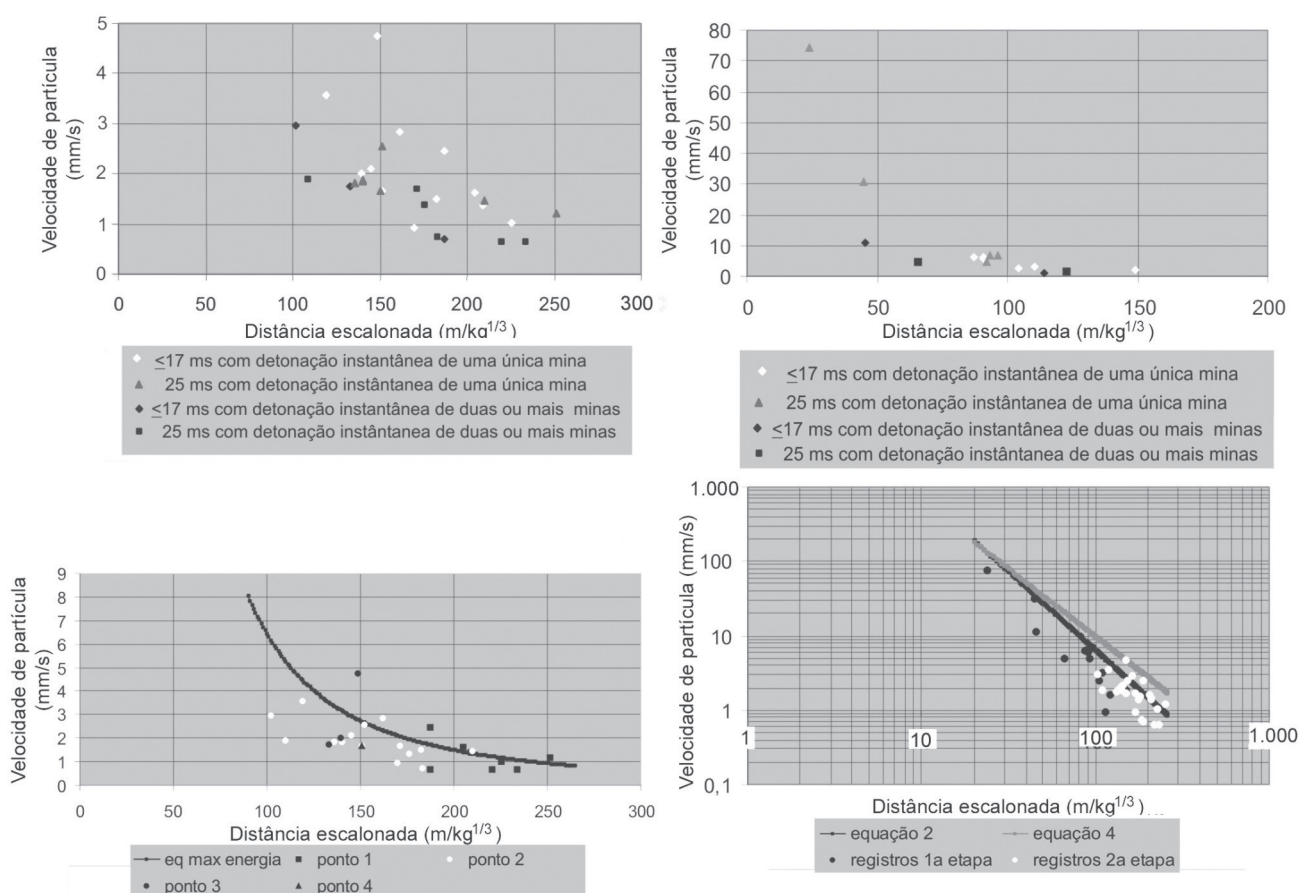


FIGURA 3. (A): Registros obtidos na segunda etapa de monitoramentos, agrupados segundo características dos planos de fogo. (B): Registros obtidos na primeira etapa de monitoramentos, agrupados segundo características dos planos de fogo. (C): Registros obtidos na segunda etapa de monitoramentos e equação de máxima energia desenvolvida a partir dos registros provenientes da primeira. (D): Registros das duas etapas de monitoramento e equações 2 e 4.

possível observar condição análoga àquela encontrada a partir dos dados obtidos na segunda etapa de monitoramentos para os menores valores de velocidade de partícula.

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 (equação 1) em sete situações distintas, representadas pelos registros números 20, 21, 22, 30, 33, 34 e 41 (Figura 3C). 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.

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, a partir dos critérios anteriormente citados, considerando todos os registros, assim expressas:

- equação de atenuação:
$$v = 17.419,848 \times DE^{-1,82254} \quad (\text{equação 3}),$$
- equação de máxima energia:
$$v_{\max} = 43.357,871 \times DE^{-1,82254} \quad (\text{equação 4}),$$

com v e $v_{\max}$ em milímetros por segundo; distância em metros; carga máxima de explosivos por espera em quilogramas. Esta equação de máxima energia é mais restritiva que aquela obtida anteriormente, considerando-se sua faixa de utilização (Figura 3D).

Sendo DE, ou distância escalonada, obtida através do critério de Ambrasseys & Hendron, uma vez que os coeficientes de correlação encontrados foram: critério de Devine, -0,863; critério de Langefors e Kihlström, 0,814; critério de Ambrasseys & Hendron, -0,899.

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

Como forma de viabilizar tal intento, realizou-se, 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 à área urbanizada (Dallora Neto, 2004; Scarpari, 2004).

Como resultado desta parceria, encontram-se as alterações promovidas pela empresa aos planos 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 nos limites considerados toleráveis pelo órgão estadual de controle de poluição, de 4,2 mm/s na resultante e de 3 mm/s na componente vertical.

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 mm/s na resultante.

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. Ensaios objetivando a determinação de tempos de retardo de tais acessórios com a utilização de sismógrafos de engenharia apontaram desvios que atingem, em relação aos tempos nominais, 22,35% nos acessórios de 17 ms, 17,20% nos de 25 ms e 4,12% naqueles de 250 ms (Dallora Neto, 2004).

A partir de tais dados, o arranjo de elementos de retardo utilizado na iniciação da coluna de explosivos, com tempos nominais de 250 ms, disposto de forma a detonar 2 minas instantaneamente, tem probabilidade de 62,5% de o fazerem em intervalo igual ou superior a 7 ms. 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 ms, existe a possibilidade de ocorrência de superposição de efeitos de detonação de minas e mesmo a de inversão na sequência de detonação em relação àquela esperada. Uma vez que cinco 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, nas condições observadas, a utilização conjunta de elementos de retardo com tempos nominais de 17 ms na conexão entre minas e de 250 ms 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 ms nestas condições. Sugere-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 ms, por outros de 200 ms.

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, além do incremento do risco de ultralanchamentos, 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 consequência, 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 sua adulteração, 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 consequências 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 (equação 4) no intuito de atender aos parâmetros estabelecidos pela CETESB 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 ms. Em situação que minimiza os efeitos dos desvios dos tempos dos elementos de retardo, compreende três planos de fogo monitorados na primeira etapa e cinco na segunda, com 6 e 7 registros sismográficos, respectivamente, tais equações são assim expressas:

- equação de atenuação:

$$v = 36.003,11 \times DE^{-1,936} \quad (\text{equação 5}),$$
- equação de máxima energia:

$$v_{\max} = 53.153,35 \times DE^{-1,936} \quad (\text{equação 6}),$$

com DE, ou distância escalonada, obtida através do critério de Ambrasseys & Hendron, uma vez que os coeficientes de correlação encontrados foram: critério de Devine, -0,971; critério de Langefors & Kihlström, 0,975; critério de Ambrasseys & Hendron, -0,977.

Os valores de v e $v_{\max}$ são expressos em milímetros por segundo, da distância em metros e da 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, é recomendado.

O gráfico da Figura 4, construído a partir das equações de máxima energia, equações 2, 4 e 6, 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.

A manutenção do programa de monitoramentos sismográficos por parte da empresa, com a utilização em seus planos de fogo de acessórios de detonação

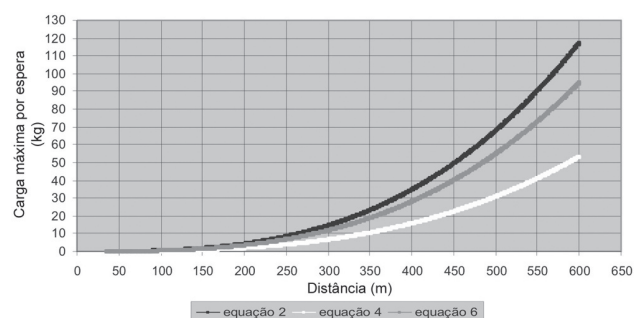


FIGURA 4. Gráfico equação de carga-distância.

com os tempos sugeridos, permitirá a sua validação, além de propiciar o aperfeiçoamento de suas operações com a análise de eventuais variações no comportamento das vibrações, considerando os diferentes litotipos em que as perturbações foram geradas, bem como as direções de propagação.

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, é de fundamental importância para o aprimoramento das operações de desmonte de rocha ali desenvolvidas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. CETESB – COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **Projeto de Norma D 7.013: Mineração por explosivos**. São Paulo, 7 p., 1992.
2. CHAPOT, P. **Etude des vibrations provoquées par les explosifs dans les massifs rocheux**. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, 57 p., 1981.
3. DALLORA NETO, C. **Análise das vibrações resultantes do desmonte de rocha em mineração de calcário e argilito posicionada junto à área urbana de Limeira (SP) e sua aplicação para minimização de impactos ambientais**. Rio Claro, 2004, 82 p. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista.
4. DIAS, M.J.D. **Relatório de controle de vibrações nº 1/85**. Curitiba: Britanite Indústrias Químicas Ltda., 76 p., 1985.
5. 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, 16 p., 1998.
6. 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**. Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, Comunicação Técnica, n. 259, 12 p., 1984.
7. FONSECA, J.S.; MARTINS, G.A.; TOLEDO, G.L. **Estatística aplicada**. São Paulo: Ed. Atlas, 267 p., 1986.
8. INSTANTEL INC. **Operator manual – BlastWare III**. Kanata (Ontario, Canada), 62 p., 1998. (a).
9. INSTANTEL INC. **Operator manual – MiniMatePlus**. Kanata (Ontario, Canada), 37 p., 1998. (b).
10. INSTANTEL INC. **BlastWare III and MiniMate Plus-Interface handbook**. Kanata (Ontario, Canada), 12 p., 1998. (c).
11. LANGEFORS, U. & KIHLESTRÖM, B. **Rock blasting**. Stockholm: Almqvist & Wiksel Förlag AB, 438 p., 1978.
12. MARCHETTI, N. **Les conflits de localisation: le syndrome NIMBY**. Québec, Rapport Bourgogne-CIRANO, 36 p., 2005.
13. SCARPARI, A.C.S. **Relação entre litologia e os valores de velocidade de vibração de partícula. Estudo de caso: Calcário Cruzeiro**. Rio Claro, 2004. 59 p. Trabalho (de Conclusão do Curso de Geologia) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista.
14. 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**. Washington: United States Bureau of Mines, 74 p., 1980.

Manuscrito Recebido em: 5 de agosto de 2006

Revisado e Aceito em: 22 de dezembro de 2006