

RISCO DE FRATURAMENTO DOS TALUDES DEVIDO ÀS VIBRAÇÕES GERADAS POR DESMONTES DE ROCHAS

Gabriel Alves da Costa LIMA ¹ & Valdir COSTA e SILVA ²

(1) Departamento de Geologia e Recursos Naturais, Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Rua João Pandiá Calógeras, 51. Cidade Universitária Zeferino Vaz. CEP 13084-970. Campinas, SP. Endereço eletrônico: gabriel@ige.unicamp.br e gabriel.costa.lima@gmail.com. (2) Departamento de Engenharia de Minas, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto. Campus Universitário do Morro do Cruzeiro. CEP 35400-000. Ouro Preto, MG. Endereço eletrônico: valdir@demin.ufop.br.

Introdução
Teoria da Geração de Vibrações e Integridade dos Taludes
Estabilidade de Taludes
Considerações sobre Fraturamento dos Maciços
Estudo de Caso da Mina de Timbopeba
Metodologia da Pesquisa de Campo
A Lei de Atenuação das Vibrações
Relação entre Níveis de Vibrações e Danos à Integridade dos Taludes
Medida do Risco de Fraturamento do Talude
Conclusões
Agradecimentos
Referências Bibliográficas

RESUMO – Este trabalho analisa o efeito dos impactos das vibrações geradas pelos desmontes por explosivos na estabilidade do talude da mina de minério de ferro de Timbopeba, que pertence à Companhia Vale do Rio Doce (CVRD). Foram monitorados cerca de 30 desmontes, sendo estes realizados em frentes de produção e desenvolvimento. As distâncias entre os desmontes e os pontos de monitoramento encontravam-se na faixa entre 88 a 550 metros, respectivamente. Os valores que foram registrados da velocidade de vibração da partícula do talude foram muitos pequenos quando comparados àquele mínimo para causar fraturamento na matriz de quartzito. Por outro lado, a análise de risco de fraturamento realizada por simulação de Monte Carlo mostra que há possibilidade de ocorrer este fraturamento, embora esta seja pequena. Não se obteve indicadores confiáveis para a regressão da lei de atenuação das vibrações.

Palavras-chave: Detonações, vibrações, danos, simulação.

ABSTRACT – *G.A. da C. Lima & V. Costa e Silva – Risk of fresh rock cracking due to vibrations generated by rock blasting.* This paper analyzes the effect of vibrations generated by rock blasting on the slope of the Timbopeba iron mine, which belongs to Companhia Vale do Rio Doce (CVRD). 30 records of blasting was obtained in fronts of production and development. The distance of the blasting and monitoring points ranged from 88 to 550 meters, respectively. Recorded results show that vibrations levels are low in comparison to the minimum necessary to crack the fresh rock (quartzite). On the other hand, a risk analysis was carried out using Monte Carlo simulation indicating possibility of occurrence of slope fracturing, but with low probability. In addition, significant indicators was not obtained for the regression of the law of attenuation of the vibrations.

Keywords: Detonations, vibrations, damage, simulation.

INTRODUÇÃO

A mina de Timbopeba pertence à Companhia Vale do Rio Doce (CVRD), produz minério de ferro e se localiza no município de Ouro Preto, Estado de Minas Gerais. Seu talude final possui atualmente cerca de 380 m de altura e aumentará com o prosseguimento das operações de lavra.

O projeto dos taludes se constitui num elemento importante do planejamento mineiro, podendo interferir na lucratividade das minas. Taludes pouco inclinados são tecnicamente mais seguros, mas os custos de produção das operações aumentam pela maior relação estéril-minério. Por outro lado, os taludes mais íngremes são tecnicamente mais instáveis, mas permitem menores custos de produção. Além disso, ao estimar o

talude ótimo deve-se considerar que o impacto das vibrações pode enfraquecer o fator de segurança dos taludes e causar sua ruptura, sobretudo nos taludes mais íngremes.

Nas minas em que ocorrem desmontes de rochas, as vibrações podem causar danos à integridade dos seus taludes seja por meio de fraturamento superficial e/ou instabilidade local ou global. Para isso, os níveis de vibrações devem superar os valores máximos suportados pela massa rochosa, enquanto baixos níveis de vibrações causam apenas deformações.

Os níveis de vibrações críticos suficientes para fraturar o talude podem ser estimados matematicamente a partir das propriedades da rocha

(Downing, 1985; Zhou et al., 2000). Conseqüentemente, parte da tarefa dos engenheiros de minas consiste em controlar os níveis de vibrações gerados pelos desmontes de rochas abaixo da desses valores críticos.

Este trabalho tem por objetivos analisar o impacto das vibrações geradas por desmonte de rocha na estabilidade do talude da mina de ferro de Timbopeba e quantificar o risco de ocorrência de rupturas.

TEORIA DA GERAÇÃO DE VIBRAÇÕES E INTEGRIDADE DOS TALUDES

GERAÇÃO DE VIBRAÇÕES

Segundo Atchinson (1972), a detonação de uma carga explosiva consiste numa reação química exotérmica, rápida (até 7000 m/s), com altas temperaturas (1.500 a 4.000°C) e pressões cuja intensidade pode variar de 2 a 10 GPa. Essas características dependem das propriedades do explosivo (densidade e composição química) e das condições em que a reação ocorre (pressão, confinamento, umidade etc.). A energia liberada na explosão submete o material rochoso a ondas de pressão ou choque, que se dissipa de diversas formas à medida em que se afasta da fonte de detonação.

Na área próxima à detonação da carga, geralmente as pressões aplicadas no maciço rochoso superam as suas resistências à tração e compressão, causando trituração, fragmentação e lançamento de fragmentos. À medida em que se afasta da fonte, as tensões tornam-se insuficientes para superar as resistências à tração e compressão da rocha, mas suficientes para deformá-la, devido à sua elasticidade natural, e causar vibrações no terreno. A outra parte da energia se dissipa em forma de calor, luz, ruídos e vibrações atmosféricas.

As ondas geradas pelos desmontes podem ser superficiais ou internas. As internas podem ser longitudinais ou cisalhantes. As superficiais podem ser as descritas por Rayleigh e Love. Como o objetivo é analisar as interações entre os níveis de vibrações resultantes que são efetivamente aplicados no talude e os seus possíveis danos (fraturamentos, rachaduras, gretas etc.), aqui apenas o pico da velocidade de vibração da partícula foi considerado, cuja magnitude é o resultado da interação dos diversos tipos de ondas que chegam à superfície.

ESTABILIDADE DE TALUDES

A estabilidade dos taludes pode requerer ações como mudança na geometria (ângulo de inclinação, altura etc.), reforço do maciço, drenagem das águas e controle das vibrações. Neste artigo apenas o último item é analisado.

Em termos gerais, a estabilidade dos taludes (rochosos e solos) depende da relação entre as ações das forças desestabilizadoras (D) e as reações das forças de resistência ou coesão (R). Se $D > R$, pode ocorrer colapso nas formas comuns de blocos, cunha ou

circular. Por outro lado, se $D < R$, configura-se uma condição de estabilidade. O fator de segurança é relacionado pela razão R/D .

Crosby (1998) mostrou que, para ocorrer uma falha e deslocamento de blocos superficiais, deve haver um plano de fraqueza na superfície para permitir o deslocamento. Esta falhas superficiais ocorrem quando forças desestabilizadoras (por exemplo, cisalhantes) de natureza estática ou dinâmica excedem as forças de resistência que ocorrem ao longo deste plano de falha. Em condições estáticas, apenas atua a força da gravidade.

Por outro lado, em situações dinâmicas (como no caso das vibrações), o fator de segurança é enfraquecido devido ao efeito das acelerações horizontais. Como mostrou Lima (2000), as acelerações horizontais geram forças que modificam e se somam às forças induzidas pela aceleração da gravidade (g), enquanto as verticais apenas causam alterações na intensidade de g, mas não altera a sua direção. As forças horizontais desestabilizadoras são o produto da massa do bloco pela componente horizontal da aceleração. Portanto, controlar os níveis de vibrações pode contribuir para a estabilidade dos taludes.

CONSIDERAÇÕES SOBRE FRATURAMENTO DOS MACIÇOS

O fraturamento do maciço rochoso ocorre, teoricamente, se a velocidade de vibração da partícula superar a velocidade crítica de vibração da partícula (VCP). De acordo com Calder & Bauer (1971), o grau dos danos à integridade dos taludes depende dos níveis de vibrações, podendo variar desde fraturamento superficial a colapso. Estes autores afirmaram que se a velocidade de vibração da partícula for maior que 650 mm/s, pode haver fraturamento das rochas sãs. Também, mesmo que a velocidade de vibração da partícula seja acima de 25 mm/s pode haver alargamento das gretas preexistentes.

Scherpenisse et al. (1999) mostraram que a velocidade de vibração da partícula capaz de fraturar a massa rochosa sã é dada por:

$$VCP \geq \frac{RT * V_L}{E} \quad (1)$$

onde RT é o valor médio da resistência à tração da rocha do talude (Pa), V_L é o valor médio da velocidade de propagação das ondas longitudinais no talude (m/s) e E é o valor médio do módulo de elasticidade da rocha do talude (Pa).

Para aplicar a equação (1) deve-se conhecer os valores locais da resistência da rocha à tração, a veloci-

dade de propagação das ondas longitudinais e o módulo de elasticidade da rocha em cada ponto do talude. Como geralmente se tem apenas os valores médios, na verdade, a equação (1) leva a uma estimativa da VCP verdadeira. Logo, há um risco associado, isto é, possibilidade de que a VCP real seja menor que a estimada. Este risco pode ser estimado pela simulação de Monte Carlo.

ESTUDO DE CASO DA MINA DE TIMBOPEBA

A Mina de Timbopeba localizada-se na borda SE do Quadrilátero Ferrífero, município de Ouro Preto, distante 130 km de Belo Horizonte. Suas reservas de minério de ferro constituem-se principalmente de itabiritos silicosos e hematita (até 63% de Fe). O talude final da mina se encontra no Grupo Caraça, sendo composto por quartzitos bem estratificados de coloração creme da Formação Moeda e pelos filitos crenulados de coloração cinza-prateada da Formação Batatal.

A Foto 1 mostra o panorama geral da mina, incluindo o talude, bem como as operações cotidianas.

O talude tem inclinação média de 55 graus, altura atual é de cerca de 380 m, mas poderá alcançar 500 m com o prosseguimento das operações. A superfície do talude encontra-se alterada e fraturada, inclusive alguns bancos estão ausentes. Há fragmentos apenas dispostos em função do atrito, mas sem coesão. Não obstante, as operações mineiras prosseguem. Pode-se observar o talude final e a localização dos pontos de monitoramento. Estes pontos encontram-se o mais próximo possível das zonas mais fraturadas do talude, respeitando os limites mínimos de segurança para os equipamentos e pesquisadores.



FOTO 1. Panorama geral das operações da mina de Timbopeba.

METODOLOGIA DA PESQUISA DE CAMPO

No estudo do impacto dos níveis de vibrações gerados pelos desmontes de rocha no talude da mina de Timbopeba, foi realizado o acompanhamento das operações de perfuração e carregamento com o objetivo de verificar as dimensões da malha, carga, dimensões dos furos, acessórios utilizados e amarrações, seguido da escolha dos pontos de medição das

vibrações na superfície do talude. Foram escolhidos dois pontos de monitoramento (Foto 1): eles consideram a distância do desmonte e tipo de rocha e se situam o mais próximo possível das zonas mais fraturadas do talude, respeitando os limites mínimos de segurança para os equipamentos e pesquisadores.

Em todos os desmontes, foram analisadas três informações fundamentais: a carga por espera (Q), a

distância entre o ponto de medição e um ponto médio da frente de desmonte (D) e as formações rochosas detonadas. Depois, para cada desmonte foi calculado o pico da velocidade de vibração da partícula (PVP) considerando as suas componentes principais:

$$PVP = \sqrt{(VL)^2 + (VT)^2 + (VV)^2} \quad (2),$$

onde VL, VT e VV se referem às velocidades de vibração da partícula segundo as direções longitudinal, transversal e vertical.

As heterogeneidades da mina são capturadas pela grande variabilidade do PVP, evidenciando a complexidade geológica e operacional da mina. Os resultados dos monitoramentos foram analisados visando encontrar a lei de atenuação das vibrações da mina, determinação da VCP (valor de PVP mínimo para causar fraturamento do talude) e análise de risco para medir a variabilidade espacial da VCP.

A LEI DE ATENUAÇÃO DAS VIBRAÇÕES

Foram monitorados 30 desmontes. Os valores encontrados para o PVP variaram de 0,622 mm/s a 46,7 mm/s. O desmonte mais próximo foi realizado a 87 m do sismógrafo, enquanto o mais distante foi a 550 m. As acelerações horizontais médias foram de 0,2 Hz e a resultante foi de 0,33 Hz.

A correlação entre os níveis de vibrações e os danos à integridade de taludes e estruturas encontra-se em estudos, por exemplo, de Calder & Bauer (1971), Berta (1994), Crosby (1998) e Pilar et al. (2003). O modelo tradicional para investigar a lei de atenuação das vibrações é baseado numa análise de regressão entre os valores do pico de velocidade da partícula (PVP) em mm/s, distância entre a frente do desmonte em metros (D) e a carga detonada por retardo em kg (Q) por meio de:

$$PVP = K * \left(\frac{D}{\sqrt{Q}} \right)^m \quad (3)$$

Os parâmetros m e K são constantes e dependem das características do material por onde as ondas se propagam tais como diáclases, fraturas, presença de fluidos, materiais intrusivos, dentre outras. Portanto, K e m são valores específicos para cada área em estudos e são obtidos a partir das equações de regressão. O termo entre parênteses da equação 3 chama-se distância escalonada, pois relaciona a distância das frentes de desmontes com a carga detonada.

A lei de atenuação das vibrações possui aplicação prática por permitir dimensionar as cargas em função da distância e níveis de vibrações máximos suportáveis por taludes, estruturas, encostas etc. Manipulando a equação (3) pela aplicação de logaritmos, chega-se a:

$$\log (PVP) = \log (K) + m \log \left(\frac{D}{\sqrt{Q}} \right) \quad (4)$$

A Figura 1 mostra a regressão da lei de atenuação das vibrações para a mina de Timbopeba utilizando-se a equação (4).

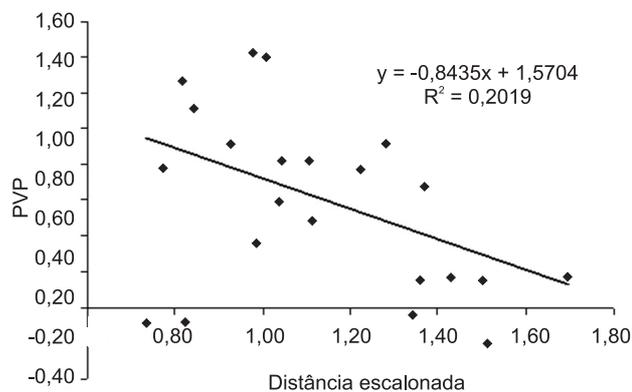


FIGURA 1. Lei de atenuação das vibrações.

O valor de m é - 0,8435 e k é 35,15 e refletem as características do meio. O coeficiente de ajuste é 0,2019, ou seja, somente 20,19% da média das variações no PVP são satisfatoriamente explicados por meio de uma relação linear envolvendo a média das oscilações da distância escalonada. O coeficiente de correlação foi de - 0,45% e significa que PVP e distância escalonada não se movimentam juntos, e reforça a hipótese da heterogeneidade da mina.

Deste modo, não se obtém uma boa relação para a lei de atenuação das vibrações para a mina de Timbopeba. Isto pode estar relacionado aos seguintes fatores: (a) grande distância entre o desmonte e o ponto de monitoramento, em que a menor distância foi 88 m e a maior, 550 m; (b) presença de diferentes rochas no meio transmissor (hematita, itabirito, lentes de solo etc.), que afetam a propagação das ondas e os níveis de vibrações, mas o seu efeito combinado não é claro; (c) erros de medida tanto de operação como instrumentação, além da possibilidade de erros na fase de processamento; (d) realização de desmontes diferentes dos projetados; (e) o número de pontos, que pode ter sido insuficiente para diluir os efeitos dos valores dispersos.

RELAÇÃO ENTRE NÍVEIS DE VIBRAÇÕES E DANOS À INTEGRIDADE DOS TALUDES

A equação 1 permite calcular a VCP suficiente para causar danos físicos à integridade dos taludes rochosos. Segundo Silva (1999), os valores médios das propriedades do talude de quartzito da mina de Timbopeba são: o módulo de elasticidade (E) é 71,572 GPa; a velocidade de propagação das ondas longitudinais (V_L) é 6.338,3 m/s; a resistência à tração da rocha (RT) é 8,2 MPa. Portanto, tem-se:

$$VCP \geq \frac{8,2Mpa * 6.338,3m/s}{71,572Gpa}$$
$$VCP \geq 726 \text{ mm/s}$$

O resultado da equação 1 mostra que só velocidades de vibração da partícula acima de 726 mm/s são capazes de causar fraturamento nas porções sãs do talude. No entanto, dentre os 30 monitoramentos realizados na mina de Timbopeba, o valor da média aritmética do PVP foi de 9 mm/s. No entanto, este valor corresponde a apenas 1,24% da velocidade crítica da partícula para ocasionar danos aos taludes. Mesmo o maior valor do PVP encontrado, que foi 46,7 mm/s, corresponde a apenas 6,43% da VCP. Assim, em princípio, conclui-se que segundo esta análise estática os níveis de vibrações gerados não causam novos fraturamentos no talude.

Por outro lado, a VCP de 726 mm/s deve ser interpretada com cuidado por ser obtida a partir de valores médios. Sabe-se que o talude é heterogêneo (por exemplo, pela presença de água ou ação de intemperismo superficial) e, portanto, o valor encontrado para a VCP só seria válido em pontos superficiais em que E, RT e VL forem iguais os valores médios. Para os demais pontos da superfície do talude não se pode afirmar qual o valor exato da VCP.

Ademais, também não se sabe qual o efeito desses níveis de vibrações sobre a estabilidade de blocos que se encontram soltos sobre a superfície do talude, nem sobre os de baixa coesão.

MEDIDA DO RISCO DE FRATURAMENTO DO TALUDE

Sabe-se que os valores reais de E, RT e V_L variam, principalmente próximo à superfície do talude. Embora a distribuição espacial destes parâmetros não seja conhecida, pode-se inferir o risco da VCP abaixo de 726 mm/s em qualquer ponto. Primeiramente, atribuem-se distribuições de probabilidades para E, RT e V_L . Ao atribuir estas distribuições de probabilidades deve-se

respeitar regras como: (a) estas variáveis não assumem valores negativos e (b) não assumem valores infinitos. No entanto, E pode assumir grandes valores quando o material for bastante rígido. A Tabela 1 mostra as distribuições de probabilidades escolhidas para as diversas variáveis mecânicas do talude.

TABELA 1. Modelagem probabilística das variáveis.

Variável	Distribuição
Resistência à tração (MPa)	Triangular (0; 8,2; 12,3)
Elasticidade (GPa)	Triangular (35,75; 71,57; 107,25)
Velocidade de propagação (m/s)	Triangular (0; 6,338; 12,676)

As distribuições triangulares se justificam porque já se tem o valor provável (média) e se conhece os limites físicos das propriedades do material do talude (quartzito). Esta é uma abordagem mais simples, pois a distribuição real pode ser diferente; todavia, neste caso a distribuição triangular pode ser uma boa aproximação.

Os valores da RT serão derivados de uma distribuição triangular, com as seguintes hipóteses: (1) o valor mínimo é zero (caso de fraturamento); (2) o valor máximo é 12,3 MPa (rocha altamente resistente). Isso significa que o valor mais provável é 8,2 MPa, mas a RT pode apresentar valores dentro deste intervalo que se distribuem espacialmente de forma incerta.

Os valores de E são positivos. A elasticidade é modelada segundo distribuição triangular com mínimo de 35,75 MPa, o valor mais provável é 71,57 MPa e o valor máximo é 107,25 MPa. Esta faixa de variação é bastante ampla para o mesmo material e permite considerar tanto as heterogeneidades das rochas, bem como os erros de amostragem, aferição de equipamentos, dentre outros.

O valor da V_L das ondas depende de propriedades do material como coeficientes de elasticidade e de Poisson. Esta variável é também modelada por meio de uma distribuição triangular cujos valores vão de zero (caso em que não ocorre transmissão) a 12.676 m/s.

Para obter os valores de VCP para milhares de combinações de valores de E, RT e VL, foi realizada uma simulação de Monte Carlo com cerca de 10.000 iterações. Assim, pode-se medir o risco de ocorrer danos à integridade dos taludes (fraturamento, deformações etc.) pelo cálculo das probabilidades de os valores espaciais da VCP se encontrarem próximos aos encontrados nos monitoramentos.

A Figura 2 mostra a distribuição de probabilidade acumulada crescente da velocidade crítica da partícula na superfície do talude.

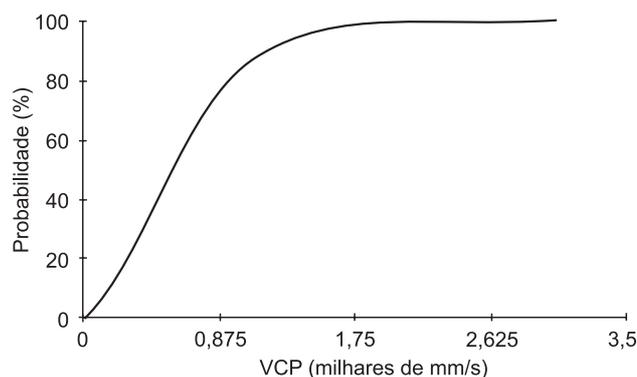


FIGURA 2. Distribuição de frequência acumulada para a VCP.

O valor esperado para a VCP resultante das 10.000 simulações é próximo a 726 mm/s. O menor valor da VCP é 3,34 mm/s e o maior igual a 3045,16 mm/s, evidenciando um desvio padrão em torno de 397 mm/s.

Embora o valor da VCP, segundo a análise estática da equação (1), seja muito superior aos níveis de vibração da partícula registrados, vê-se que há cerca de 0,051% de chance de em algum ponto do talude a VCP ser menor ou igual a 9 mm/s e cerca de 1,11% de VCP ser menor que 46 mm/s. Assim, a partir deste modelo simples para quantificar o risco de fraturamento, pode-se constatar que há possibilidade de ocorrer fraturamentos em porções do taludes onde as propriedades mecânicas do talude se encontrem enfraquecidas, muito embora ela seja pequena.

CONCLUSÕES

A lei de atenuação das vibrações apresentou um baixo coeficiente de ajuste na mina de Timbopeba em virtude de fatores como complexidade litológica da área (hematita, quartzito, solos etc.), grande distância entre o desmorte e o ponto de monitoramento (88 m e a maior 550 m), possíveis erros na operação e processamento e realização de desmontes diferentes dos projetados.

O valor médio dos registros do monitoramento do

pico de velocidade da partícula foi de 9 mm/s. Este valor é muito baixo quando comparado ao valor de 726 mm/s estimado para a velocidade crítica de vibração da partícula. No entanto, por meio da análise de risco estima-se que há pequena probabilidade de 0,05% de a velocidade crítica de vibração da partícula ser inferior a 9 mm/s e de 1,11% de ser menor que 46 mm/s. Embora esta probabilidade seja pequena, ela existe e o evento pode acontecer.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Pesquisa (CNPq) pelo suporte financeiro e à Companhia Vale do Rio Doce pelo apoio logístico para a realização desta pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ATCHINSON, T.C. **Fragmentation principles in surface mining**. New York Publishers. 1972.
2. BERTA, G. Blasting-induced vibration in tunnelings. **Tunneling and underground space technology**, v. 9, n. 2, p. 175-187, 1994.
3. CALDER, P.N & BAUER, A. The influence and evaluation of blasting on stability. In: C.O. BRAUNER & V. MILLIGAN (Eds.), **Stability in open pit mining**. New York: Society of Mining Engineers, American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers, p. 83-94, 1971. (Proceedings of the First International Conference on Stability in Open Pit Mining, 1970, Vancouver).
4. CROSBY, W.A. **International blasting, drilling and explosives technology course**. Ouro Preto: Mining and Research Engineering Limited (MREL), v. 1 e 2, 1998.
5. DOWDING, C.H. **Blast Vibration Monitoring and Control**. Prentice-Hall, 1985.
6. LIMA, G.A.C. **Análise das vibrações geradas por desmontes de rochas nos taludes e edificações das minerações**. Ouro Preto, 2000. 107 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Universidade Federal de Ouro Preto.
7. PILAR, G.B.; JIMENO, E.L.; JUMENO, C.L. **Manual de perforacion y voladura de rocas**. Madri: Instituto Geominero de España, 784 p., 2003.
8. SCHERPENISSE, C.R.; ADAMSON, W.R.; DÍAZ, J.C. Monitoreo y consideraciones generales de modelamiento de vibraciones para la evaluación y optimización de las tornaduras de desarrollo horizontal. In: SIMPOSIUM DE INGENIERIA DE MINAS, 10, 1999, Santiago do Chile. **Proceedings...** Santiago do Chile: Departamento de Ingenieria en Minas, Universidad de Santiago de Chile, p. 61-83, 1999.
9. SILVA, V.C. **Variáveis que interferem nos problemas ambientais gerados durante os desmontes de rochas**. São Paulo, 1999. 135 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mineral) – Universidade de São Paulo.
10. ZHOU, Y.; HAO, H.; MA, G. Assessment of structure damage to blasting induced ground motions. **Engineering Structures**, v. 22, p. 1378-1389, 2000.

*Manuscrito Recebido em: 7 de julho de 2006
Revisado e Aceito em: 18 de outubro de 2006*