



Rem: Revista Escola de Minas

versão impressa ISSN 0370-4467

Rem, Rev. Esc. Minas v.54 n.4 Ouro Preto out./dez. 2001

doi: 10.1590/S0370-44672001000400007

Mineração

Monitoramento geofísico de desmonte de rocha com utilização de explosivos em condições de risco elevado em zona urbana

Serviços

- Serviços customizados
- Artigo em XML
- Referências do artigo
- Curriculum ScienTI
- Como citar este artigo
- Acessos
- Citado por SciELO
- Similares em SciELO
- Tradução automática
- Enviar este artigo por email

Jair Carlos Koppe

Departamento de Engenharia de Minas, Universidade Federal do R. G. do Sul, Brasil - E-mail: jkoppe@ufrgs.br

Paulo Salvadorette

Departamento de Engenharia de Minas, Universidade Federal do R. G. do Sul, Brasil

Enrique Munaretti

Departamento de Engenharia de Minas, Universidade Federal do R. G. do Sul, Brasil - E-mail: enrique@umr.edu

João Felipe C. L. Costa

Departamento de Engenharia de Minas, Universidade Federal do R. G. do Sul, Brasil - E-mail: jfelipe@ufrgs.br

Resumo

Esse trabalho introduz uma metodologia baseada na aplicação de métodos geofísicos para avaliação do risco associado ao desmonte de rochas com utilização de explosivos em áreas urbanas com alta densidade demográfica e situação de risco elevada. A utilização de GPR (*ground penetrating radar*) forneceu informações relacionadas com as condições geomecânicas do terreno, tais como densidade de fraturas, enquanto que o monitoramento sismográfico auxiliou no controle de vibrações geradas pelo desmonte, mantendo-se essas vibrações abaixo dos limites estabelecidos na legislação brasileira. Resultados de caracterização geomecânica do subsolo e do monitoramento de vibrações são descritos e discutidos. A metodologia proposta é ilustrada em um estudo de caso.

Palavras-chave: desmonte de rocha, monitoramento geofísico, análise de risco, vibrações.

Abstract

This paper presents an application of geophysical methods to evaluate the risk associated with blasting used during rock excavation at highly populated and risky urban areas. Ground penetration radar provided information related to rock mechanics such as fracture density, whilst seismographic readings helped in maintaining vibration

levels below maximum limits. Results of in situ soil and rock characterization and vibration control are reported and discussed. The methodology proposed is illustrated in case study.

Keywords: *blasting, geophysical survey, risk analysis, vibrations.*

Mineração

Introdução

O desmonte de rochas com emprego de explosivos em áreas urbanas gera como efeito indesejável ruídos e vibrações no solo, os quais podem causar desconforto às populações vizinhas e danos às estruturas construídas. O controle e a minimização desses efeitos é uma prática importante que deve acompanhar o planejamento e a execução dos trabalhos de desmonte de rocha em áreas habitadas (Djordjevic, 1997; Sanchez, 1987).

Em muitos países existem normas limitando os níveis de vibração e ruído como forma de proteção às propriedades vizinhas. No Brasil, o monitoramento de vibrações ainda não é prática freqüente em detonações próximas aos aglomerados urbanos, embora a necessidade e os benefícios originados por esse acompanhamento sejam facilmente perceptíveis (Anon., 1987; Reil, 1998; Munaretti et al., 2000). A prática comum no país ainda é deixar que o técnico responsável defina os parâmetros do desmonte com base na sua habilidade profissional e aguardar as reclamações posteriores sobre danos ambientais, quando houverem.

Considerando esse contexto, apresenta-se um estudo de caso no qual o desmonte de rocha com utilização de explosivos para abertura de valas em zona urbana, em condições de risco elevado, devido à obra localizar-se próxima a um posto de combustível, foi acompanhado de intenso estudo geofísico. Esses estudos envolveram levantamento das condições do terreno com GPR (ground penetrating radar) e monitoramento sismográfico para registrar vibrações e ruídos. A metodologia empregada permitiu o fornecimento de dados aos técnicos responsáveis pelo desmonte de rocha, fazendo com que os níveis de vibração atingidos durante as detonações fossem controlados e atenuados.

Localização da área e caracterização do problema

A área estudada localiza-se na zona sul da cidade de Porto Alegre, capital do Rio Grande do Sul. Em uma obra de complementação da infra-estrutura hídrica/sanitária da cidade, foi necessária a abertura de uma trincheira de aproximadamente 60 metros de comprimento, 1 metro de largura e profundidade variando entre 1,5 e 2,5 metros para a colocação de canalizações de esgoto. A presença de rocha granítica muito próxima à superfície obrigou o uso de explosivos para a abertura da vala.

Devido à proximidade da obra a um posto de combustível e habitações (ver [Figura 1](#)), a Secretaria Municipal de Meio Ambiente - SMAM exigiu, para autorizar a execução da obra, um laudo que evidenciasse não haver risco de explosão ou danos aos tanques de combustível, o que poderia provocar a contaminação do terreno e lençol freático, ou mesmo danos às construções residenciais. Além desse aspecto de proximidade, foi constatado nas imediações do local um vazamento de combustível provindo do posto de abastecimento. O grupo de pesquisa do Laboratório de Pesquisa Mineral e Planejamento Mineiro-LPM do Departamento de Engenharia de Minas da UFRGS foi contatado para realizar o estudo que permitisse a elaboração do laudo de liberação da obra.

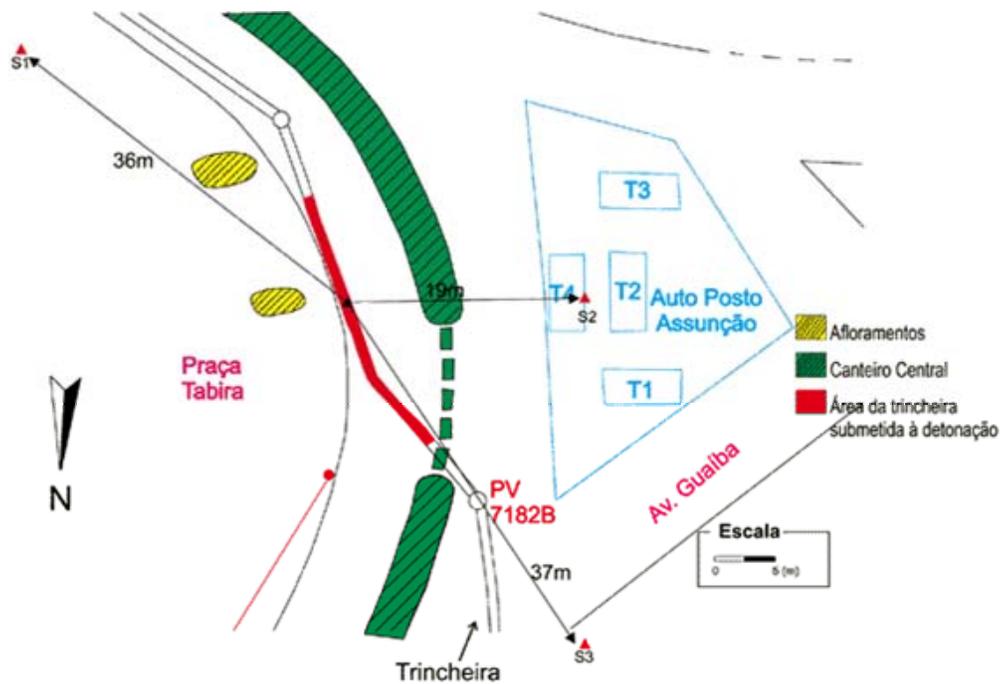


Figura 1 - Planta de localização da trincheira a ser aberta e do posto de abastecimento de combustíveis. O posicionamento dos sismógrafos para o monitoramento do desmonte está indicado pelos pontos S1, S2 e S3.

Com base nas informações disponíveis e particularidades do caso, estabeleceu-se uma metodologia para coletar os dados necessários à elaboração do laudo de liberação da obra e planejar a execução das detonações.

Metodologia adotada

Definido o problema, constatou-se que o Departamento Municipal de Água e Esgotos - DMAE tinha disponível apenas alguns poucos dados de sondagem à percussão nas imediações da obra. Esses dados não eram conclusivos para a compreensão das condições do subsolo, tais como profundidade da rocha, presença de descontinuidades e direção do fluxo de água subterrânea. Para obter informações sobre esses aspectos, estabeleceu-se a seguinte metodologia:

- (i) Levantamento plani-altimétrico do local.
- (ii) Levantamento geofísico com utilização de GPR (Ground Penetrating Radar) para obtenção de informações sobre a profundidade do maciço rochoso e presença de descontinuidades.
- (iii) Modelamento 3D do terreno e subsolo, construção de seções geológicas e topográficas, definição do sentido de fluxo de água subterrânea.
- (iv) Análise e interpretação dos dados.
- (v) Elaboração de laudo técnico informando as condições para o desmonte de rocha com utilização de explosivos.
- (vi) Análise do plano de fogo apresentado pela empresa executora da obra.
- (vii) Modificação do plano de fogo considerando os aspectos de proximidade de construções e dos tanques de combustível.
- (viii) Planejamento do monitoramento sismográfico nos pontos críticos para determinação do nível máximo de vibração no solo.
- (ix) Monitoramento do desmonte de rochas com utilização de micro-sismógrafos.

(x) Orientação para mudanças das cargas de explosivos com base no monitoramento das detonações - quando os valores de velocidade de partícula se aproximavam dos limites definidos pela legislação vigente, no caso a NBR-9653, reduzia-se o valor da carga de explosivo por espera.

(xi) Avaliação visual das estruturas após a execução do desmonte para verificar se foram provocados danos estruturais.

Aspectos geológicos

Localmente, o terreno na área do Auto Posto Assunção é constituído por granitos cobertos por depósitos de material inconsolidado e/ou solo. O sistema aquífero local ocorre em fraturas de granitos com porosidade secundária, sem cobertura de elúvio e/ou colúvios (Kirschheim & Menegat, 1998). O fluxo de água ocorre em direções divergentes ao longo da cobertura de material inconsolidado.

Sondagens realizadas apresentaram espessuras variáveis de aterro (silte com areia fina e média e pedregulhos) e areia (siltosa e argilosa, com granulometria, textura e coloração diversas) sobre o embasamento. O conjunto aterro/sedimentos atinge espessuras que variam entre 1 e 7 m, de acordo com o ponto amostrado. A [Figura 2](#) apresenta um perfil geológico característico da área. O levantamento topográfico permitiu a definição das curvas de nível do terreno ([Figura 3](#)).

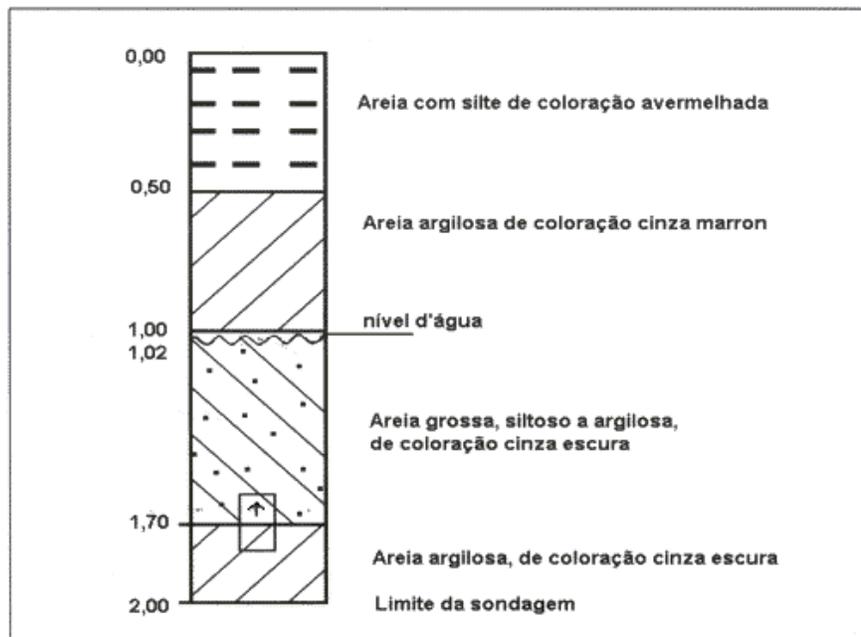


Figura 2 - Perfil geológico característico observado em sondagens na área do posto de combustível. O limite do impenetrável à percussão corresponde ao contato com a rocha granítica.

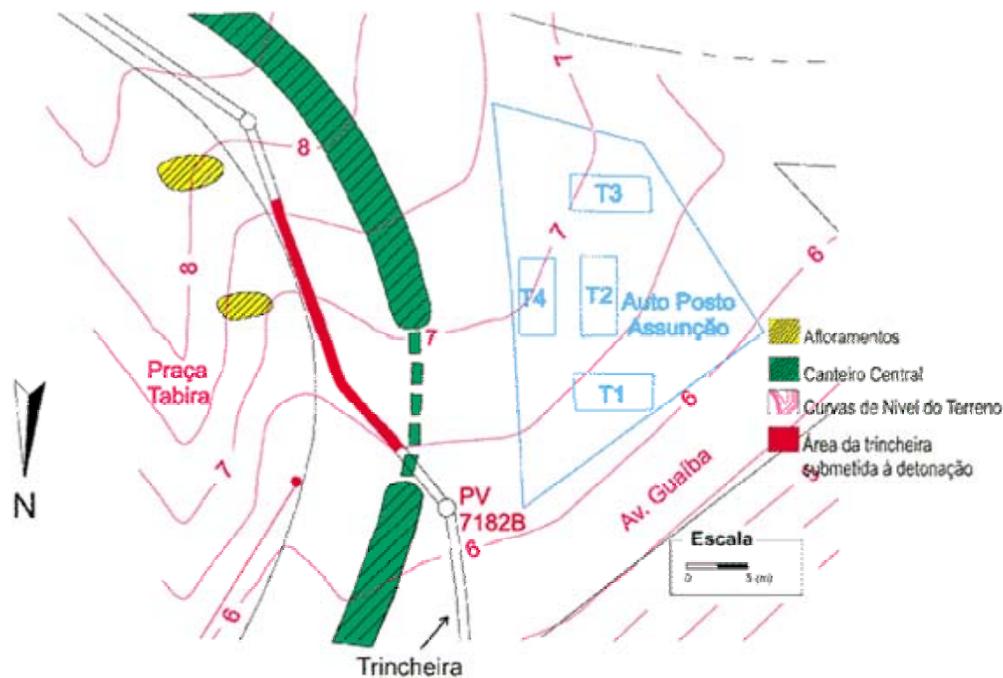


Figura 3 - Curvas de nível do terreno nas proximidades da área de detonação.

Em furos de sondagem em torno do Auto Posto Assunção, o lençol freático exibiu, no período de realização das medidas, níveis entre 1 e 1,6 metros (Anônimo, 1999).

Avaliação do subsolo com geo-radar

A forma convencional de se obterem estimativas de características de materiais em subsolo, tais como espessura do pacote de sedimentos/solo, grau de fraturamento, textura, nível d'água e outras informações é por meio de sondagens. O aspecto puntual (não se tem informação a respeito do que ocorre entre os furos de sondagem) nesse tipo de investigação e os custos associados, normalmente altos para se realizar uma campanha de sondagens adequada, acabam limitando a sua utilização.

O geo-radar (GPR - Ground - penetrating radar) tem-se mostrado muitas vezes adequado para a solução desse tipo de problema, constituindo-se numa forma alternativa de avaliação do subsolo (Davis & Annan, 1989; Sauck, 1997). A técnica de investigação geofísica por geo-radar, quando adequadamente aplicada, permite maior rapidez na aquisição de dados, medidas praticamente contínuas nas seções coletadas e, como consequência, menores custos.

O funcionamento do geo-radar está baseado nos princípios da propagação de ondas eletromagnéticas. Breves pulsos de energia eletromagnética são emitidos e captados por meio de antenas que operam em altas frequências. A onda transmitida penetra no subsolo e é refletida nas interfaces entre estruturas com diferentes propriedades elétricas. Assim, os pulsos emitidos percorrem as estruturas até encontrarem discontinuidades elétricas, como ocorre quando há mudança de constituição dos materiais. A detecção e a interpretação dos pulsos refletidos nas discontinuidades (interfaces) fornecem os subsídios para um diagnóstico a respeito da estrutura em subsuperfície (Casper & Kung, 1996; Xiong & Tripp, 1997).

Descrição do levantamento com geo-radar

Os dados foram colhidos com o equipamento RAMAC (fabricado por MALA GeoScience) e analisados no software que acompanha o equipamento (Versão 2.28). Foram usadas frequências de emissão de 200 MHz (antena convencional) e 250 MHz (antena blindada). Ao serem escolhidas as frequências de operação, procurou-se

minimizar a influência do pavimento (cobertura de asfalto e paralelepípedos, com espesura aproximada de 0.3 m) sobre o sinal do geo-radar.

O levantamento foi conduzido realizando-se perfis com afastamento constante a partir de uma malha de investigação estabelecida por topografia com dimensões aproximadas de 5 x 6,5 metros.

Análise e interpretação dos perfis de geo-radar

A partir das informações da estratigrafia local, esperou-se que houvesse contraste significativo entre as propriedades eletromagnéticas do material de cobertura e da rocha sã, suficiente para provocar reflexões de onda que permitissem detectar essa interface. Uma vez coletados e processados, os perfis de geo-radar mostraram um refletor pronunciado, que foi interpretado como sendo a interface material de cobertura/rocha sã. A determinação da velocidade de propagação de onda eletromagnética no aterro/solo foi feita com ensaios do tipo CMP (Fruhwirth et al, 1996). Os resultados obtidos revelaram uma velocidade de propagação em torno de $0,93 \times 10^8$ m/s. Esse valor foi utilizado nos perfis para a transformação da escala vertical de tempo de propagação de onda em escala de profundidade.

Na área de interesse foram coletadas em torno de 40 seções de geo-radar que serviram de base para a confecção do mapa especificando as estimativas para as cotas do embasamento (Figura 4). Observando-se a Figura 4, é possível concluir que a direção do fluxo d'água e de contaminantes varia de E para W e SE a NW, a partir dos possíveis pontos de vazamento de combustível (tanques de armazenamento). Além disso, a zona com rocha a ser desmontada com explosivos apresenta cotas do embasamento mais altas do que os tanques de armazenamento de combustível.

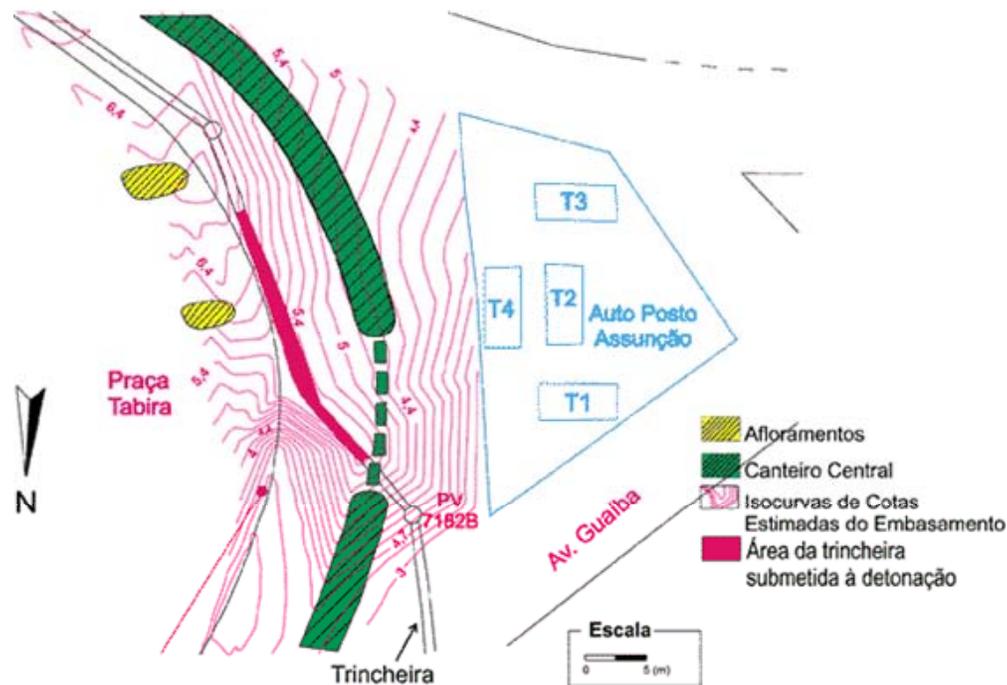


Figura 4 - Cotas do embasamento estimadas a partir dos perfis de geo-radar e de informações de sondagens.

Um exemplo de seção de geo-radar com espaçamento constante realizada próxima ao ponto PV7182A é mostrado na Figura 5. A imagem, coletada com antena blindada de 250 MHz, apresenta um forte refletor oscilando entre 1,5 e 3,0 metros de profundidade, que representa a interface mencionada. Uma feição significativa revelada no perfil é a variação relativamente abrupta de profundidade do refletor (embasamento), o que concorda com as sondagens da área.

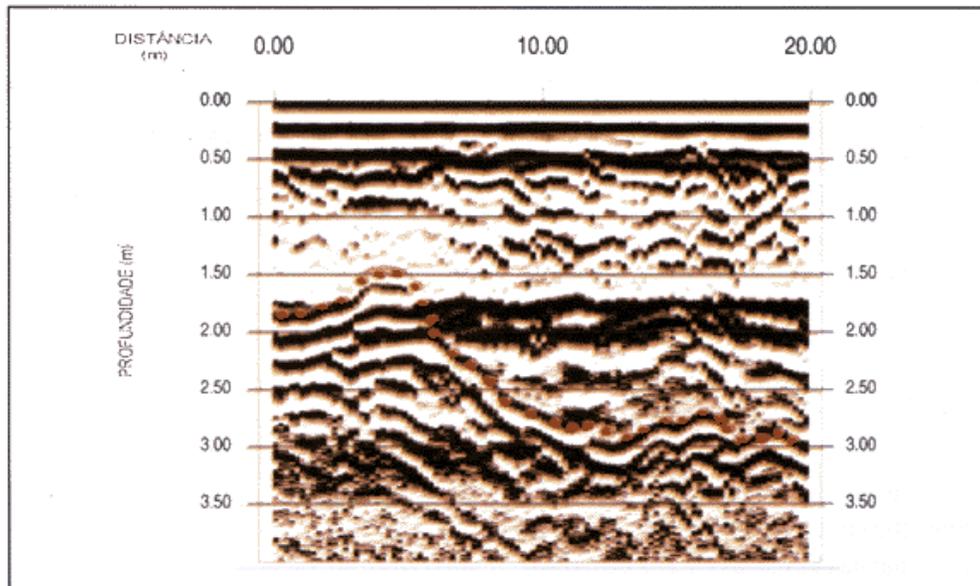


Figura 5 - Seção de geo-radar com 20 m de comprimento, apresentando interface sedimentos/rocha sã (pontilhada). Eixo horizontal: distância percorrida sobre o terreno (m); eixo vertical: profundidade (m).

Escavação e monitoramento

Com base nos dados obtidos nas etapas iniciais, foi possível emitir o laudo de liberação da obra. O risco decorrente da escavação foi considerado como pequeno, desde que o desmonte fosse feito de forma controlada atendendo as modificações sugeridas.

A trincheira foi aberta inicialmente com auxílio de escavadeira que removia a camada superficial de solo e aterro da base do pavimento. Na rocha foi executada uma malha de furação de pequeno diâmetro (1¼") e profundidade variável entre 0,8 m e 1,6 m. Foi utilizado explosivo do tipo emulsão (BRASPEX®), iniciado por tubo de choque (BRINEL®). A carga máxima por espera variou entre 0,3 e 1,1 kg.

As precauções recomendadas para execução da obra consistiram, basicamente, na aplicação de baixas razões de carga, detonando-se apenas três ou quatro furos de cada vez, cobertura da trincheira com areia (para evitar ultralanchamento), isolamento da área até o limite das habitações, esvaziamento dos tanques de combustível do posto e monitoramento com microssismógrafos.

Para os locais onde não se conhece o comportamento sísmico da rocha devido à inexistência de medida sísmica, a norma brasileira NBR 9653 recomenda que se utilize, para cálculo da carga máxima por espera, o critério de Distância Escalonada (DE), ou seja, o valor algébrico calculado pela fórmula abaixo.

$$DE = d / Q^{0,5}$$

Onde:

d é a distância em metros entre o ponto de medição e o ponto de detonação;

Q é a carga máxima por espera de explosivo em kg.

DE deve ser maior ou igual a 40 para se minimizar o risco de dano por vibração nas estruturas vizinhas. Tomando-se a distância mínima de 15 m, chega-se a uma carga máxima por espera de 0,140 kg. Os valores das cargas por espera iniciais foram estimados dessa forma. À medida que dados de velocidade de partícula eram obtidos, procedia-se o cálculo da VR (soma resultante das componentes máximas de velocidade de partícula) e ajustavam-se as cargas de explosivos por espera quando a VR aproximava-se dos valores estabelecidos pela legislação, no caso 15 mm/s.

Para a utilização dos microssismógrafos, foram escolhidos três pontos críticos em termos de pressão acústica e ruído (pontos S1, S2 e S3 da [Figura 1](#)), identificados pela proximidade às detonações. Os pontos S1 e S3 localizaram-se junto à habitações e S2 foi posicionado próximo aos tanques de combustível.

Coleta de dados: VR e ruído

No Brasil, a norma NBR 9653 estabelece que, para análise dos efeitos provocados por detonações, dois parâmetros devem ser monitorados: a velocidade máxima de partícula e a sobrepressão acústica ou ruído. A velocidade máxima de partícula, referida como **PPV** (Peak Particle Velocity), é reconhecida como um parâmetro bastante significativo no que concerne à avaliação de danos causados às estruturas. A PPV é utilizada para avaliação do dano provocado nas estruturas naturais (rocha maciça) ou nas criadas pelo homem adjacentes à detonação. Reil (1998) indica que os três principais fatores relacionados à vibração no solo que determinam o quanto as estruturas construídas vibrarão e, por consequência, poderão sofrer danos e a incidência de reclamações dos moradores vizinhos são (Reil, 1998): i. velocidade máxima de partícula (PPV), ii. a duração da vibração no solo (que é diferente da duração da detonação), iii. a frequência de vibração.

A norma brasileira NBR 9653 recomenda o uso do valor obtido pela soma resultante (VR) das três componentes máximas de PPV: velocidade máxima de partícula no eixo longitudinal (**VL**), vertical (**VV**) e transversal (**VT**), independentemente do tempo após a detonação em que cada um desses eventos possa ter ocorrido. Esse valor algébrico é calculado segundo a fórmula:

$$VR = [(VL)^2 + (VV)^2 + (VT)^2]^{0.5} ,$$

sendo que a **VR** medida no solo não deve ultrapassar 15 mm/s. A pressão acústica tolerada é de até 100 Pa.

A norma brasileira, ao contrário do que ocorre em outros países (Anon., 1987, Sanchez, 1987), ainda não incorpora uma associação entre PPV e frequência no controle das vibrações no solo.

Estimativas das distâncias da trincheira aos pontos de monitoramento são apresentadas na [Figura 1](#). Registros obtidos simultaneamente em uma das detonações para os sismógrafos em S1 e S2 são apresentados na [Figura 6](#).

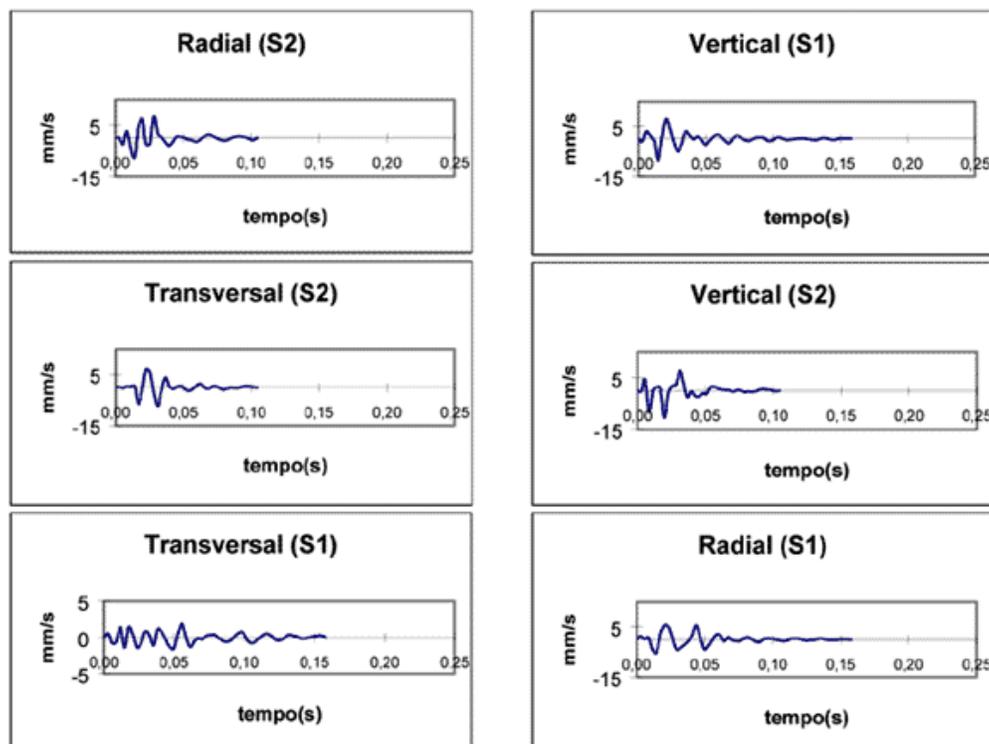


Figura 6 - Registros de vibração no solo obtidos nos pontos S1 e S2 em uma das detonações. O eixo vertical representa a velocidade de partícula em mm/s e o eixo horizontal, o tempo em segundos.

O acoplamento dos sismógrafos foi feito, nos pontos S1 e S3, removendo-se os primeiros 10 cm de solo da superfície e cravando as ponteiros metálicas de fixação dos geofones no terreno. Conforme Armstrong e Sen (1999), esse pode ser considerado um bom modo de acoplamento para VR menores que 100 mm/s. No ponto S2 (posto de combustível), o sismógrafo foi fixado diretamente às placas de concreto do piso e imediatamente acima do tanque de combustível T4.

As detonações foram executadas em dois dias de trabalho, tendo sido registrados 36 eventos sísmicos. Uma síntese dos dados de vibração no solo coletados nas estações de monitoramento encontra-se no histograma da [Figura 7](#). As distâncias estimadas entre as estações de monitoramento e as detonações variaram durante a coleta: de 50 m a 20 m para S1; 40 m a 10 m para S2; 60 m a 20 m para S3. A máxima pressão acústica registrada foi de 41 Pa, abaixo do limite de 100 Pa estabelecido para áreas urbanas.

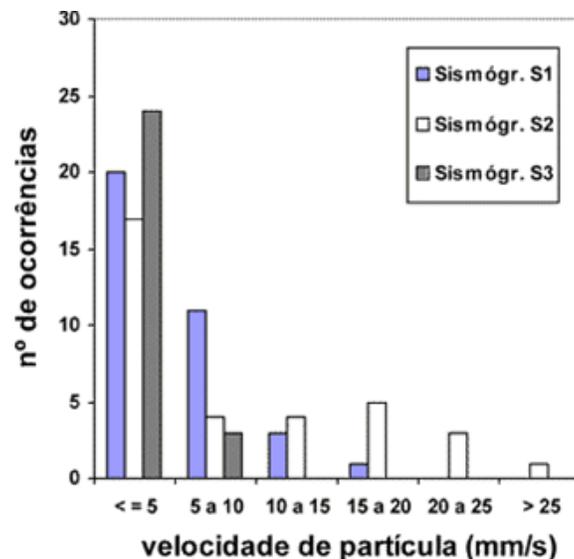


Figura 7 - Síntese dos resultados obtidos quanto à vibração no solo para os três pontos de monitoramento.

Espectros de frequência dos eventos

A estimativa das frequências dominantes na vibração do solo pode ser feita calculando-se o espectro de frequência de Fourier (Djordjevic et al., 1990; Diaz & Balbás, 1997). A [Figura 8](#) apresenta os espectros de amplitude da componente radial obtidos a partir dos registros em S1 e S2 para uma mesma detonação. A tendência dos espectros de potência nos pontos S1 e S3 foi apresentar frequências predominantes mais baixas que em S2 nas três componentes de registro, do mesmo modo como se observa no exemplo da [Figura 8](#). Para o conjunto total de registros, a quantidade de energia, na faixa de frequência entre 5 e 15 Hz (faixa que coincide com a frequência natural de vibração de muitas construções), não é muito significativa.

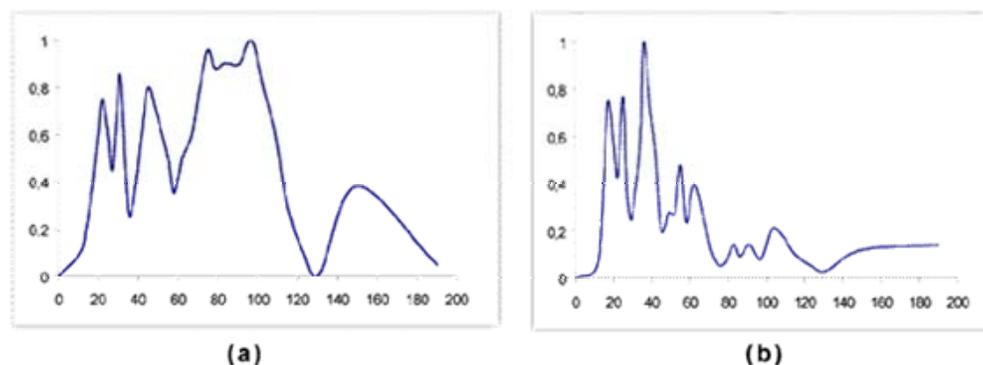


Figura 8 - Espectros de amplitude da componente radial em (a) S1 e (b) S2.

Análise dos resultados

Os valores obtidos de VR durante o acompanhamento das detonações apresentaram-se, na maior parte dos casos, nos limites exigidos pela legislação brasileira. Em vários momentos, no entanto, foi necessária a intervenção dos técnicos responsáveis pelo acompanhamento sismográfico, alertando sobre a magnitude das vibrações. A [Tabela 1](#) apresenta, a título de ilustração, uma seqüência de detonações realizadas no segundo dia de acompanhamento. Em dois momentos (assinalados com asterisco), após o registro elevado de VR no sismógrafo em S2, houve a intervenção dos técnicos alertando sobre a necessidade de redução das cargas por espera. Nesses casos, foi feita inspeção nas estruturas para verificação de possíveis danos. Não foi constatado nenhum dano nas estruturas, quando nos poucos casos a VR ultrapassou o limite permitido.

De modo geral, o ponto S2 esteve sujeito às maiores vibrações no solo, como já se esperava, pela sua maior proximidade às detonações. A [Tabela 2](#) mostra valores médios de VS em S1, S2 e S3, calculados sobre o conjunto total de detonações. Embora alguns valores elevados tenham sido registrados, não foi constatado nenhum dano aparente às estruturas do posto de combustível ou das habitações vizinhas. Testes de estanqueidade, realizados após as detonações, revelaram não ter havido dano nos tanques de armazenamento de combustíveis. Também, não foram verificadas reclamações de qualquer natureza por parte dos moradores próximos, de forma que o acompanhamento sismográfico foi aparentemente efetivo.

Tabela 2 - VR médio do conjunto de dados de monitoramento.

	VR (mm/s) em S1	VR (mm/s) em S2	VR (mm/s) em S3
Média	4.8	8.6	2.6

Conclusões

O controle e a minimização da geração de ruídos e de vibração no solo, provocados por detonações em áreas urbanas, é uma prática importante e essa prática deve ser, também, considerada, tanto quanto a adequada fragmentação da rocha, uma meta a ser atingida no emprego de explosivos em áreas habitadas.

O presente trabalho mostrou, por meio de uma aplicação prática, a importância do acompanhamento de detonações por registros sismográficos e o sucesso da metodologia e procedimentos empregados na solução do

problema. O monitoramento em geral é de fácil implementação e previne tanto os danos às estruturas construídas quanto as reclamações de moradores em áreas próximas aos trabalhos de desmonte de rocha.

Referências bibliográficas

Anônimo. *Relatório: Ensaios de solo e água para avaliação ambiental*, PROJECONSULT ENGENHARIA LTDA, Setembro/1999. [[Links](#)]

ABNT NBR 9653, 1986. *Guia para avaliação dos efeitos provocados pelo uso de explosivos nas minerações em áreas urbanas* (Procedimento). Associação Brasileira de Normas Técnicas, 8 p. [[Links](#)]

Anon., 1987. *Explosives and rock blasting*. Dallas, Texas, USA; Atlas Powder Company, ISBN 0-9616284-0-5. [[Links](#)] ARMSTRONG, L.W., SEN, G.C. The measurement of blast induced vibrations in soil. *Explo'99*, Kalgoorlie, WA, November, 99-104, 1999. [[Links](#)]

DAZ, J.I., BALBÁS, M. Frequency domain processing of mechanical blasting vibrations for environment protection. *Int. J. Surf. Min. Recl. Envir.*, v. 11, p. 155-158, 1997. [[Links](#)]

DJORDJEVIC, N., KAVESTKY, A., Scott, A. Blast design optimization to minimize induced vibrations of structures. *FRAGBLAST'90*, Brisbane, August 26-31, p. 373-380, 1990. [[Links](#)]

DJORDJEVIC, N. Minimizing the environmental impact of blast vibrations. *Mining Engineering*, April, p. 57-61, 1997. [[Links](#)]

MUNARETTI, E., KOPPE, J.C., COSTA, J.F.C.L. Desenvolvimento de agente explosivo a base de nitrato de amônio para mina a céu aberto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MINA A CÉU ABERTO & 1 CONGRESSO BRASILEIRO DE MINA SUBTERRÂNEA. Belo Horizonte: IBRAM - Instituto Brasileiro de Mineração e Departamento de Engenharia de Minas da UFMG, v. CD, p.1-9, 2000. [[Links](#)]

REIL, J.P. Why people complain about blasting. *Rock Products*, July, p. 40-46, 1998. [[Links](#)]

SANCHEZ, L.E. Incidência ambiental das vibrações. *Brasil Mineral*, Jan, v. 38, p.52-61, 1987. [[Links](#)]

SAUCK, W.A. Radar applied to Environmental Problems and Groundwater Prospection, In: INTERNATIONAL CONGRESS OF THE BRAZILIAN GEOPHYSICAL SOCIETY- CISBGf. São Paulo, September 1997. [[Links](#)]

DAVIS, J.L., ANNAN, A. P. Ground-penetrating radar for high resolution mapping of soil and rock stratigraphy, *Geophysical Prospecting*, v. 37, p. 531 - 551, 1989. [[Links](#)]

XIONG, Z., TRIPP, A.C. Ground Penetrating radar responses of dispersive models. *Geophysics*, v. 62, n. 4, p. 1127-1131, July/August 1997). [[Links](#)]

CASPER, D.A., KUNG, K. J. S. Simulation of ground penetrating radar waves in a 2-D soil model. *Geophysics*, v. 61, n. 4, p. 1034-1049, July/August 1996. [[Links](#)]

KIRSCHHEIM, MENEGAT; *Atlas Ambiental de Porto Alegre*. 1998. [[Links](#)]

FRUHWIRTH, R.K., SCHMÖLLER, R., OBERAIGNER, E.R. Some aspects on the estimation of electromagnetic wave velocities. In: INT. CONF. ON GROUND PENETRATING RADAR, 6. Sendai, Japan, 1996. [[Links](#)]

Artigo recebido em 30/07/2001 e aprovado em 12/11/2001



Todo o conteúdo do periódico, exceto onde está identificado, está licenciado sob uma [Licença Creative Commons](#)

Escola de Minas

Praça Tiradentes, 20
35400-000 Ouro Preto MG - Brazil
Tel: (55 31) 3551-4730



editor@rem.com.br