

ESTUDO DAS VIBRAÇÕES GERADAS POR DETONAÇÕES FEITAS NA OBRA CIVIL DA ECLUSA 2 DE TUCURUÍ (PA)

George Sand França¹, Marcos Alberto Rodrigues Vasconcelos²,
Cristiano Naibert Chimpliganond¹ e Sidinei Sebastião Tomás¹

Recebido em 8 janeiro, 2010 / Aceito em 4 fevereiro, 2011
Received on January 8, 2010 / Accepted on February 4, 2011

ABSTRACT. The construction of the Tucuruí dam in the decade of 80, situated in the River Tocantins, interrupted the navigation in this stretch of the watercourse. To give continuity to the passage of the fluvial transports the Eletronorte and Camargo Corrêa S.A., initiated the construction of two canals in the neighborhoods of the city of Tucuruí/PA. Floodgate 1 is connected to the axis of the dam, and Floodgate 2 will be situated near the city of Tucuruí, in the left edge of the Tocantins River. The dismantling of the rocks caused discomfort to the population which complained about damages in the residences. In this way, the Seismological Observatory of the University of Brasília monitored the vibrations generated by blasting, with the aim to make a diagnosis and see if there is a relation between the detonations and the residences cracks. The velocity records of the particle vibration were obtained by engineering seismometer installed near the damaged residences. Records of 27 distinct points were analysed, and these information were intercorrelated with geological, pedological and geotechnical data, to understand its effects and to obtain the equation of seismic attenuation for this region. The 42 values of the particles velocity obtained were below the recommended value of 15 mm/s defined by the Brazilian norms as the upper level to avoid damages to the nearby residences. Regarding the sound pressure only one single measured value was beyond the intensity established by the Brazilian norms.

Keywords: removal of rock, seismograph monitoring, vibration, equation of attenuation.

RESUMO. A construção da barragem de Tucuruí na década de 80, situada no Rio Tocantins, interrompeu a navegação neste trecho da hidrovia. Para dar continuidade ao trajeto dos transportes fluviais a Eletronorte, por meio da Camargo Corrêa S.A., iniciou a construção de duas eclusas nas proximidades da cidade de Tucuruí/PA. A Eclusa 1 localiza-se conectada ao eixo da barragem, e a Eclusa 2 localizar-se-á nas proximidades da cidade de Tucuruí, na margem esquerda do Rio Tocantins. Esta proximidade fez com que o desmonte das rochas relacionado à sua construção provocasse desconforto à população e reclamações quanto a danos às residências. Desta maneira, o Observatório Sismológico da Universidade de Brasília realizou o monitoramento das vibrações geradas pelas detonações, com o fito de se diagnosticar se há relação entre as detonações executadas e as fissuras residenciais. Os registros das velocidades de vibração de partícula foram obtidos utilizando sismômetros de engenharia instalados nas proximidades das residências teoricamente prejudicadas. Foram analisados registros de 27 pontos distintos e essas informações foram interseccionadas a informações geológicas, pedológicas e geotécnicas, de forma a se entender seus efeitos e se obter a equação de atenuação das ondas para esta região. Os 42 valores de velocidade da partícula obtidos mostraram-se inferiores ao valor recomendado pela norma ABNT de 15 mm/s para que não ocorram danos às residências proximais. No que diz respeito à intensidade sonora, somente um valor apresentou-se superior ao limite estabelecido pela norma.

Palavras-chave: desmonte de rocha, monitoramento sismográfico, vibrações, equação de atenuação.

¹SG 13, Campus Universitário Darcy Ribeiro, Asa Norte, Observatório Sismológico, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, DF, Brasil. Tel.: +55 (61) 3107-1298; Fax: +55 (61) 3274-5927 – E-mails: georgesand@unb.br; naibert@unb.br; sidinei@unb.br

²SG 13, Campus Universitário Darcy Ribeiro, Asa Norte, Observatório Sismológico, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, DF, Brasil. Endereço atual: Instituto de Geociências, Universidade de Campinas. Tel.: +55 (19) 3521-5151 – E-mail: vasconcelos@ige.unicamp.br

INTRODUÇÃO

A Usina Hidrelétrica (UHE) Tucuruí/PA situa-se no Rio Tocantins, a 250 quilômetros de sua foz, distando aproximadamente 300 quilômetros da cidade de Belém. Sua construção foi iniciada em 1976 pela Eletronorte, sendo que sua operação comercial teve início em 1984. A construção da barragem seccionou a hidrovia, impondo a realização de uma obra de navegação de grande porte capaz de vencer o desnível de 72 metros criado. Dessa forma, o aproveitamento de Tucuruí compreende, também, um sistema de transposição localizado na margem esquerda do Rio Tocantins e constituído por duas eclusas e um canal intermediário. O objetivo precípuo é dar continuidade à navegação no trecho da hidrovia interrompido com a construção da barragem.

A Eclusa 1 se conecta pela Cabeça de Montante ao eixo da Barragem de Terra da Margem Esquerda, através de quatro blocos de muros de ligação. A Eclusa 2 está localizada junto à margem esquerda do Rio Tocantins, próximo à cidade de Tucuruí/PA. Está posicionada de tal forma que dois terços de sua estrutura estão encaixados em rocha e tem a finalidade de redirecionar o fluxo do Rio Tocantins.

Com o início das obras relativas à Eclusa 2 (Fig. 1), iniciou-se o desmonte de rochas com emprego de explosivos gerando vibrações no solo em áreas urbanas. Em muitos países existem normas limitando os níveis de vibração como forma de proteção às propriedades vizinhas de acordo com o tipo de construção edificada. No Brasil, a norma que mais diz respeito aos limites de vibração e de pressão acústica aceitáveis é a Norma Brasileira (NBR) 9653 (ABNT, 2005).

Para que os níveis de vibração atingidos durante as detonações sejam controlados e/ou atenuados, é necessário o monitoramento sismográfico. As informações sismológicas coletadas, processadas e apresentadas neste trabalho foram interseccionadas a informações geológicas e pedológicas. Todas essas informações, também, se fizeram importantes para o planejamento dos locais em que se fariam as medições, somadas às queixas dos moradores e informações pedológicas, para posterior entendimento e correlação com a equação matemática de atenuação a ser obtida.

Desta maneira, este trabalho concerne à apresentação dos dados coletados em duas etapas de campo (27.10.2007 a 30.10.2007, e 10.02.2008 a 25.02.2008), baseada na análise e interpretação dos valores obtidos, pretende-se diagnosticar se houve inerente relação das detonações executadas para a construção da Eclusa 2 da UHE Tucuruí com as fissuras existentes em algumas residências da cidade. Para isso foram moni-

toradas 14 detonações, sendo 10 a céu aberto e 4 subterrâneas, em 27 pontos distintos, que contribuirão para a análise de sinais sísmicos triaxiais e da componente sonora.

CONTEXTO GEOLÓGICO-PEDOLÓGICO DA REGIÃO DE MONITORAMENTO

A região de Tucuruí situa-se entre as rochas pré-cambrianas do Complexo Xingu e as rochas metamórficas do Grupo Tocantins. As rochas do Grupo Tocantins, localizadas nas margens leste e oeste do Rio Tocantins, são separadas por uma falha de empurrão ao longo da qual o rio se desenvolveu (Camargo Corrêa S.A., 2002a). Na margem esquerda, mais especificamente, distinguem-se três unidades estratigráficas como metabasalto e metassedimentos da Formação Tucuruí, além de sedimentos quaternários (Fig. 2).

O basalto ocorre na forma de derrames que constituem camadas maciças com variação de espessura de poucos metros a mais de 40 metros. É uma rocha de baixo grau metamórfico, e apresenta metassedimentos de até 3 metros de espessura entre os derrames e brecha basáltica nos contatos com os derrames. O conjunto total dos derrames apresenta cerca de 150 metros de espessura superpostos por um pacote de metassedimentos com dezenas de metros de espessura. Coluviões e aluviões são os representantes dos sedimentos quaternários, e que estão nas camadas mais superficiais da área de estudo. O colúvio distribui-se amplamente por toda área com cerca de 6 metros de espessura, enquanto os aluviões ocorrem nas proximidades do Rio Tocantins, nas regiões com relevo mais plano.

A área correspondente ao túnel da Eclusa 2 é caracterizada por um horizonte espesso de solo silto-arenoso sobreposto à camada saprolítica pouco espessa. A rocha é um metassiltito fraturado que se encontra próximo à cota de 23 metros, de forma que as fraturas são preenchidas por epidoto e/ou calcita. Cerca de 7 metros abaixo deste ponto observa-se o contato do metassiltito com o metabasito (Camargo Corrêa S.A., 2002b).

Caracterização geológica-pedológica da região monitorada

A partir de uma análise associativa das seções geológico-geotécnicas apresentadas nos mapas ST-TUC/04-3027, ST-TUC/04-3003, ST-TUC/00-0002, ST-TUC/04-2002, ST-TUC/04-2003, ST-TUC/04-3005, ST-TUC/04-3008, do relatório Camargo Corrêa S.A. (2002a) e nos mapas 46-MT-GEO-A1-E-003-011 e 46-MT-GEO-A1-E-003-015 do relatório Camargo Corrêa S.A. (2002b), nota-se que as mesmas tendem a apresentar, de forma

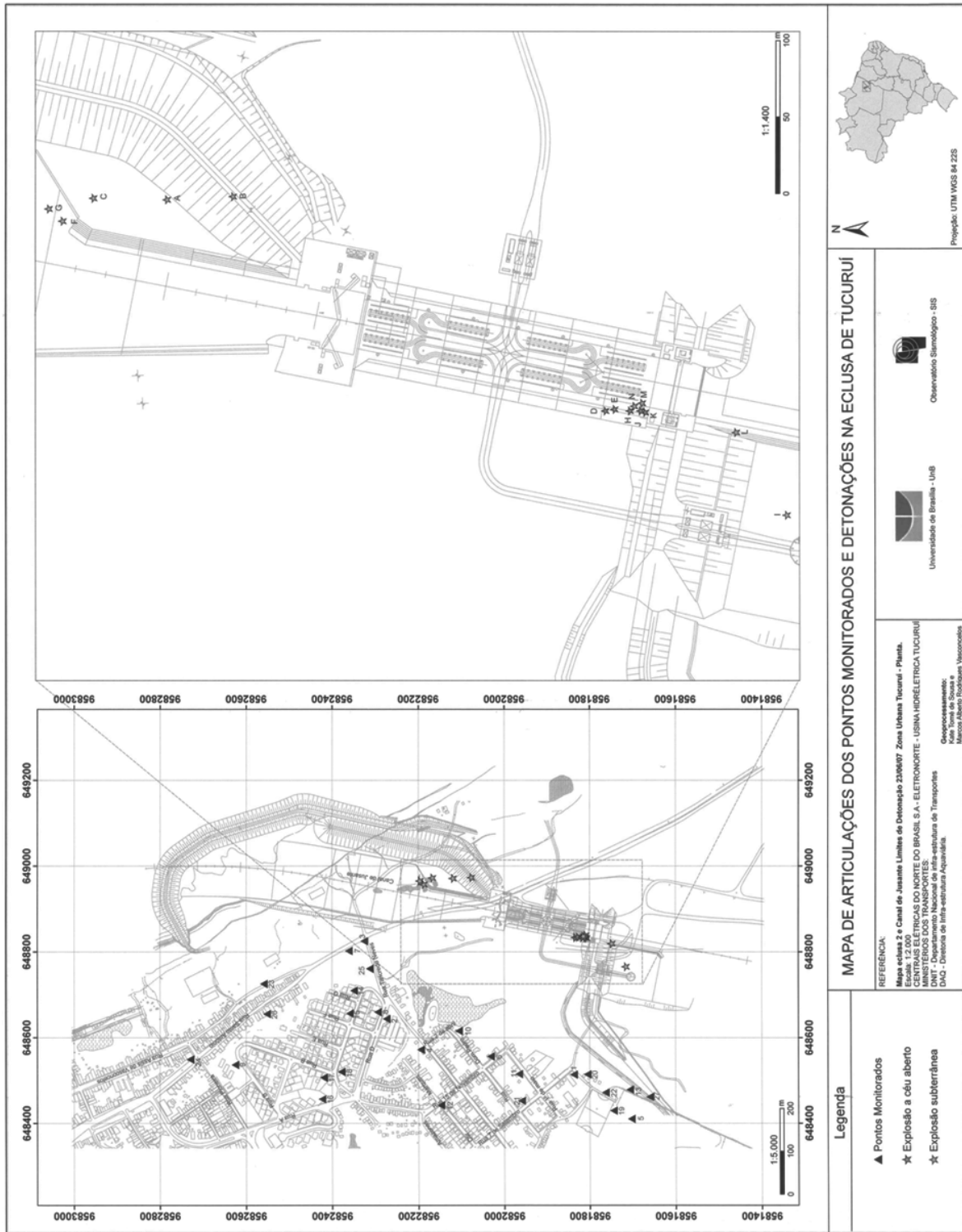


Figura 1 – Localização dos sismômetros de engenharia utilizados para monitoramento das detonações realizadas para a construção da Eclusa 2 da Hidrelétrica de Tucuruí/PA.

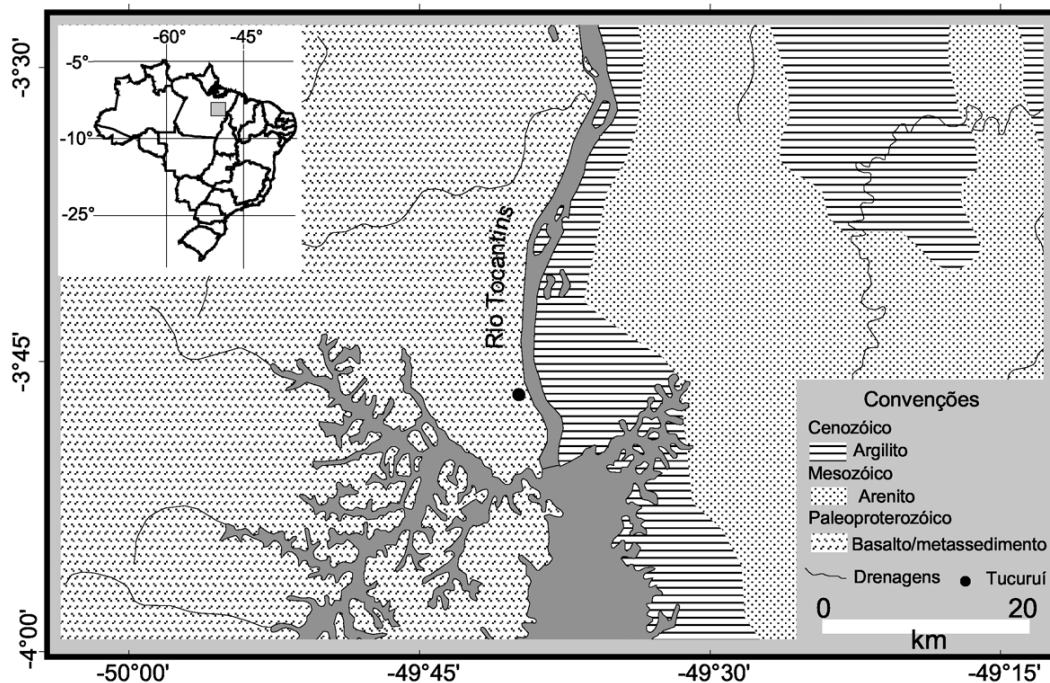


Figura 2 – Mapa geológico característico da região de estudo.

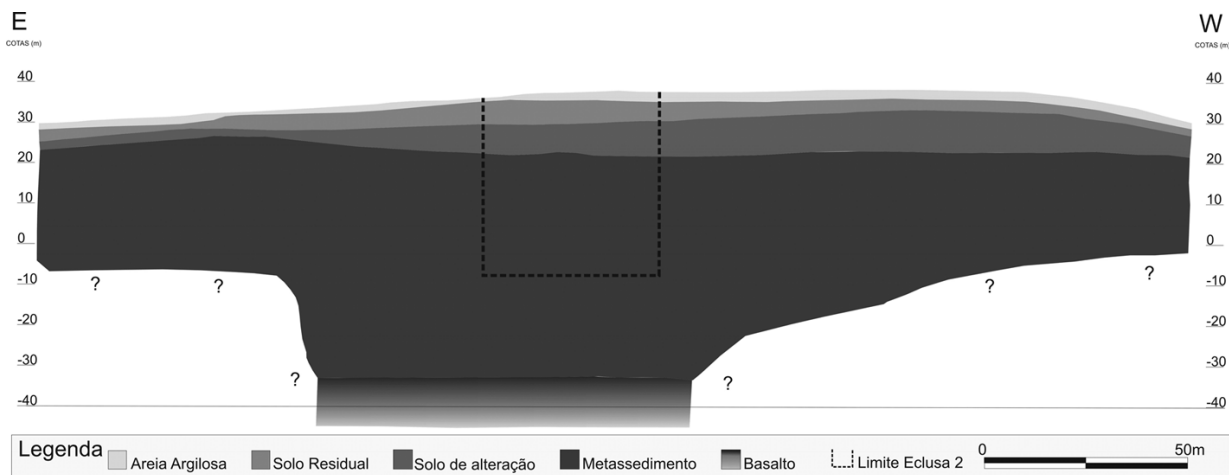


Figura 3 – Modelo de seção geológica para a região de estudo, extraído do mapa ST-TUC/04-3005 (Camargo Corrêa S.A., 2002a).

geral, camadas com espessuras relativamente homogêneas com pouca variação faciológica. Um exemplo geral desta assertiva é apresentado na Figura 3, que mostra o basalto como camada inferior sobreposto por metassedimentos, solo de alteração, solo residual, e uma camada de areia argilosa na porção mais externa.

Com o auxílio destas informações, entende-se que não haja variações bruscas sob os pontos em que foram fixados os sismômetros de engenharia. Nas regiões em que os perfis geológicos

alcançam as proximidades da margem do rio, ainda é descrito um pacote aluvionar, sobreposto ao solo de alteração, com espessura de aproximadamente 5 metros, não discriminado na Figura 3.

Como consideração inicial, ressaltamos que o solo areno-argiloso (colúvio) é o que apresenta amplo domínio na região monitorada e estes estratos geológicos e pedológicos associados são os principais responsáveis pela atenuação das ondas ao longo de seu trajeto até atingirem as residências proximais.

BASE DE DADOS

Aquisição dos dados

Para a coleta dos dados utilizaram-se quatro sismômetros de engenharia (1 sismômetro Blastmate III™ e 3 sismômetros Minimate Plus™, Instantel Inc.), instalados em regiões próximas de construções que aparentemente mostram-se prejudicadas pelas detonações ou mesmo na base da residência. Estes sismômetros são dotados de resposta de frequência de 2 a 250 Hz e capacidade de processamento padrão de 1.024 amostras por segundo por canal. As amplitudes limites para registro de velocidade de partícula variam entre 0,127 mm/s e 254 mm/s, com resolução de 0,127 mm/s. O sismógrafo foi configurado em modo de disparo para os seguintes níveis: 100 dB para a onda sonora captada pelo microfone e 0,2 mm/s para o sinal sísmico do geofone.

Um dos parâmetros, segundo a NBR 9653 (ABNT, 2005), que deve ser monitorado para a análise dos efeitos provocados por detonações é a velocidade de vibração de partícula de pico. É reconhecido como um parâmetro bastante significativo no que tange à avaliação de danos causados às estruturas (Koppe et al., 2001).

Pela análise da velocidade vibração de partícula de pico, referida como PPV (*Peak Particle Velocity*), a NBR 9653 (ABNT, 2005) recomenda que os danos induzidos sejam avaliados levando-se em consideração a magnitude e a frequência de vibração de partícula, os limites para velocidade de vibração de partícula de pico acima dos quais podem ocorrer danos como visto na Figura 4. Também nesse trabalho usamos o 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 decorrido após a detonação em cada um desses eventos. Esse valor é calculado conforme a Equação (1):

$$V_R = \sqrt{V_L^2 + V_V^2 + V_T^2} \quad (1)$$

A velocidade resultante VR corresponde ao maior valor resultante obtido entre as resultantes de cada momento.

Para a coleta de todos os dados foram realizados dois trabalhos de campo: um primeiro, no mês de outubro de 2007, e um segundo, no mês de fevereiro de 2008, que totalizam 27 pontos (Tab. 1). Os dados obtidos foram agrupados com as distâncias entre as frentes detonadas e os pontos de monitoramento.

Para cada ponto de coleta de dados, os sismômetros de engenharia foram instalados, tomando como precaução a orientação dos sensores e microfones na direção do foco da explosão. Estes sensores foram locados na base das construções monitoradas, conforme recomendação da ABNT, ou na região de solo mais próxima. Quando instalado em solo a fixação é realizada

com pinos, observadas as recomendações existentes (Instantel Inc., 1998a, b). Quando locado na base da estrutura, utilizou-se gesso para sua fixação.

A área designada para os estudos de vibração situa-se na margem oeste do Rio Tocantins, mais precisamente na zona residencial da cidade de Tucuruí, na qual os moradores mostram-se preocupados com a segurança de suas moradias. Os pontos de monitoramento foram escolhidos com de acordo com as informações dos moradores, local de ocorrência das detonações e informações geológicas e pedológicas (Fig. 1).

Análise e interpretação dos dados

Os riscos de ocorrência de danos induzidos por vibrações do terreno devem ser avaliados levando-se em consideração a magnitude e a frequência da velocidade de vibração de partícula de pico. Como cada tipo de estrutura apresenta uma frequência natural de vibração, pode-se estabelecer um limite de velocidade de vibração de partícula de pico (mm/s) aceitável em áreas residenciais para que não ocorram danos às mesmas. A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), por meio da NBR 9653 (ABNT, 1986), e posteriormente em sua revisão na NBR 9653 (ABNT, 2005), estabelece os limites de velocidade de vibração de partícula de pico para cada intervalo de frequência em áreas residenciais iniciando em 15 mm/s na frequência de 4 Hz e crescendo até 50 mm/s nas frequências superiores a 40 Hz (Fig. 4). Isso porque a faixa de frequência natural de vibração de muitas construções varia entre 5 e 15 Hz (e.g. Koppe et al., 2001), o que, também, se enquadra no intervalo de frequência apresentado em normas internacionais para habitações e construções.

Após o registro das detonações, os respectivos dados foram coletados do equipamento e acessados com o programa Blastware 8.12 (Instantel Inc., 2006, 2007). A oscilação do chão medida pelo sismômetro é transformada em velocidade de vibração de partícula (mm/s), variável frequentemente utilizada no estudo de casos de vibração próxima a áreas urbanas.

Além do valor da velocidade de vibração de partícula, obtém-se com as medidas o registro dos eventos nas três componentes do sensor, e uma componente que faz a medição da pressão acústica (Fig. 5b).

É possível também obter os gráficos dos espectros das frequências para cada componente (Fig. 5c). Desta maneira, torna-se facilmente legível o conhecimento da frequência que atinge os maiores valores de amplitude. Este tipo de análise torna-se importante no que pese o conhecimento da frequência de vibração da estrutura estudada, como foi mencionado acima no trabalho de Koppe et al. (2001).

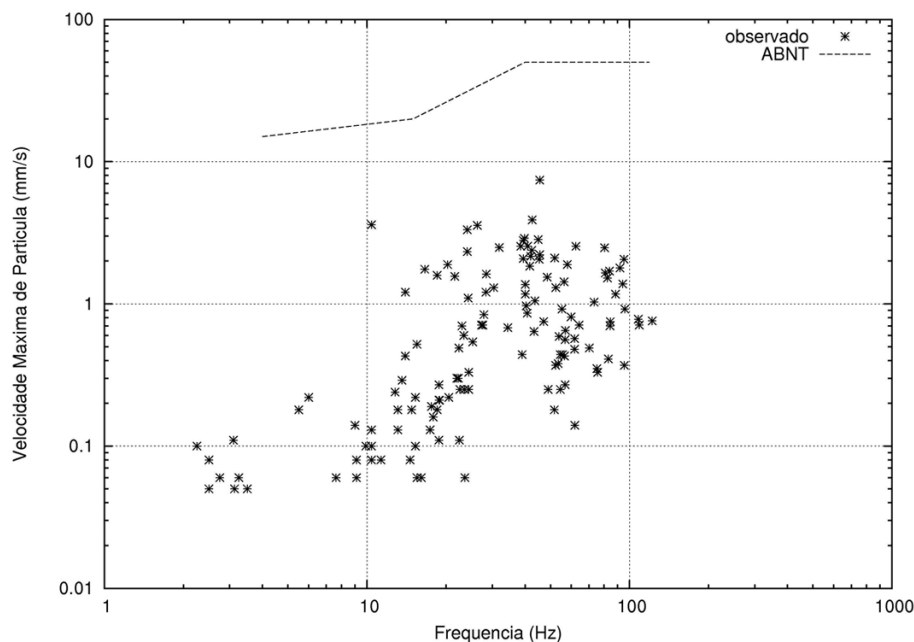


Figura 4 – Representação gráfica dos limites de velocidade de vibração de partícula por faixas de frequências aceitáveis para detonações que ocorrem próximas a áreas urbanas (ABNT, 2005).

Tabela 1 – Descrição e coordenadas geográficas dos 27 pontos monitorados.

Ponto	Endereço	Lat.	Long.
1	Rua 7 de setembro esquina com Travessa 1° de maio	-3,78195	-49,66249
2	Escola Municipal Plácido de Castro	-3,77817	-49,66146
3	Rua Santo Antônio esquina com Rua Tancredo Neves	-3,77759	-49,65898
4	Rua Tancredo Neves, N° 61	-3,77898	-49,66197
5	Travessa São Pedro, Qd. 2, Lt. 15, Bairro Liberdade	-3,78334	-49,66356
6	Rua 15 de novembro, N° 118	-3,78056	-49,66219
7	Rua Santo Antônio, N° 1585, Bairro Matinha	-3,77739	-49,65974
8	Rua D, N° 30, Bairro Pioneira	-3,77799	-49,66132
9	Escola Municipal Maestro João Leite	-3,77499	-49,66243
10	Rua Dom Pedro I, N° 197, Bairro Liberdade	-3,77952	-49,66151
11	Rua 1° de maio, N° 177	-3,78070	-49,66210
12	Rua 15 de novembro, N° 91, esquina com Rua Ofir Marques	-3,77905	-49,66210
13	Rua São Clemente, N° 3	-3,78331	-49,66294
14	Rua G, N° 2	-3,77749	-49,66087
15	Rua F, N° 2	-3,77740	-49,66135
16	Rua A, N° 7	-3,77682	-49,66315
17	Rua B, N° 30	-3,77693	-49,66248
18	Escola Municipal Ursinho Feliz	-3,77710	-49,66243
19	Travessa São Benedito, Qd. 1, Lt. 10	-3,78292	-49,66311
20	Travessa 1° de maio, N° 26	-3,78292	-49,66311
21	Rua 7 de setembro esquina com Rua Dom Pedro I, N° 136	-3,78102	-49,66292
22	Travessa 1° de maio, N° 14	-3,78293	-49,66309
23	Rua Assis Vasconcelos, N° 669 A	-3,77559	-49,66073
24	Avenida Pioneira esquina com Rua Santo Antônio	-3,77405	-49,66280
25	Rua Tancredo Neves, N° 60	-3,77782	-49,66041
26	Rua Santo Antônio, N° 1239, Bairro Matinha	-3,77551	-49,66119
27	Rua São Clemente, Qd. 2, Lt. 6	-3,78373	-49,66309

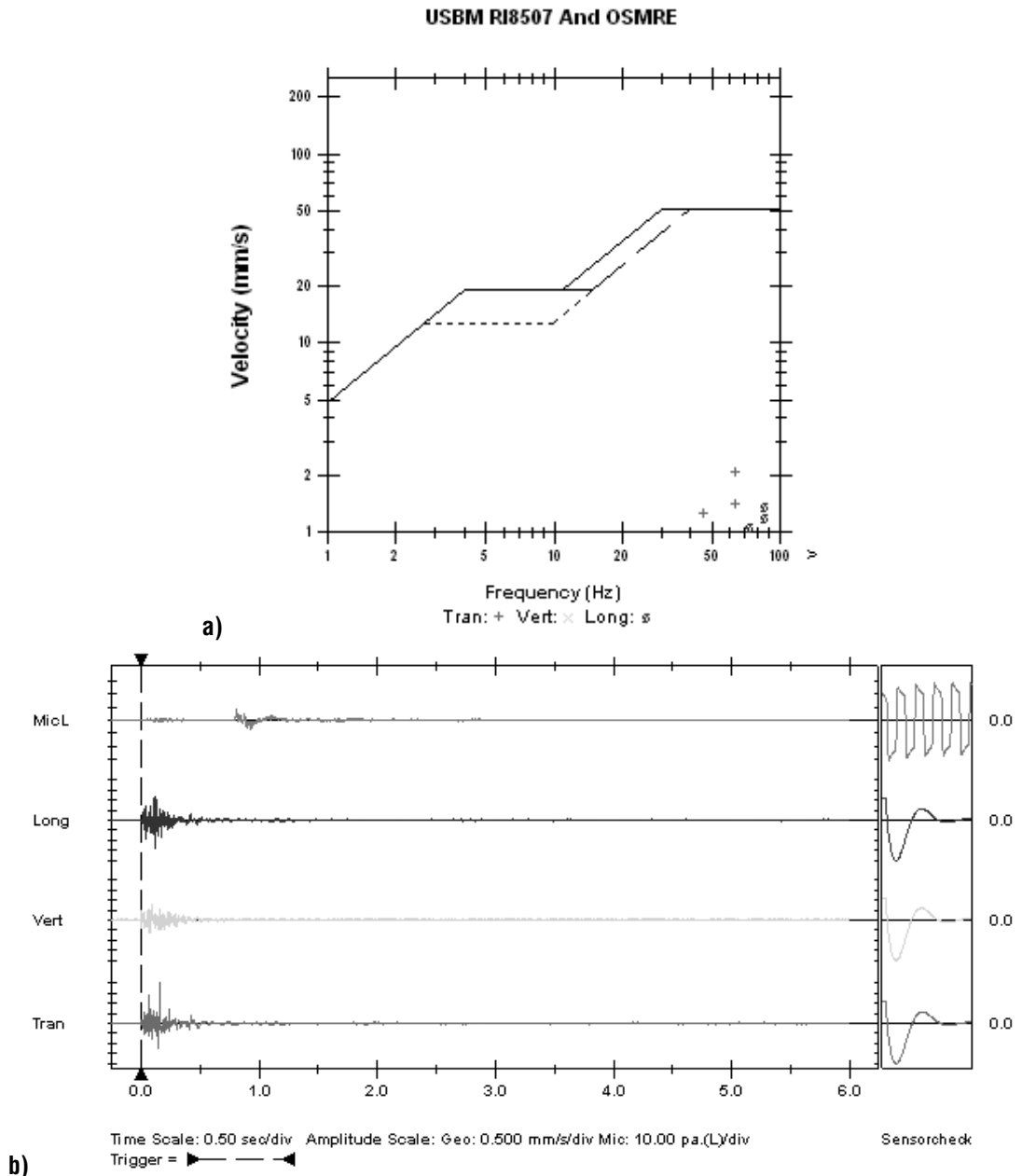


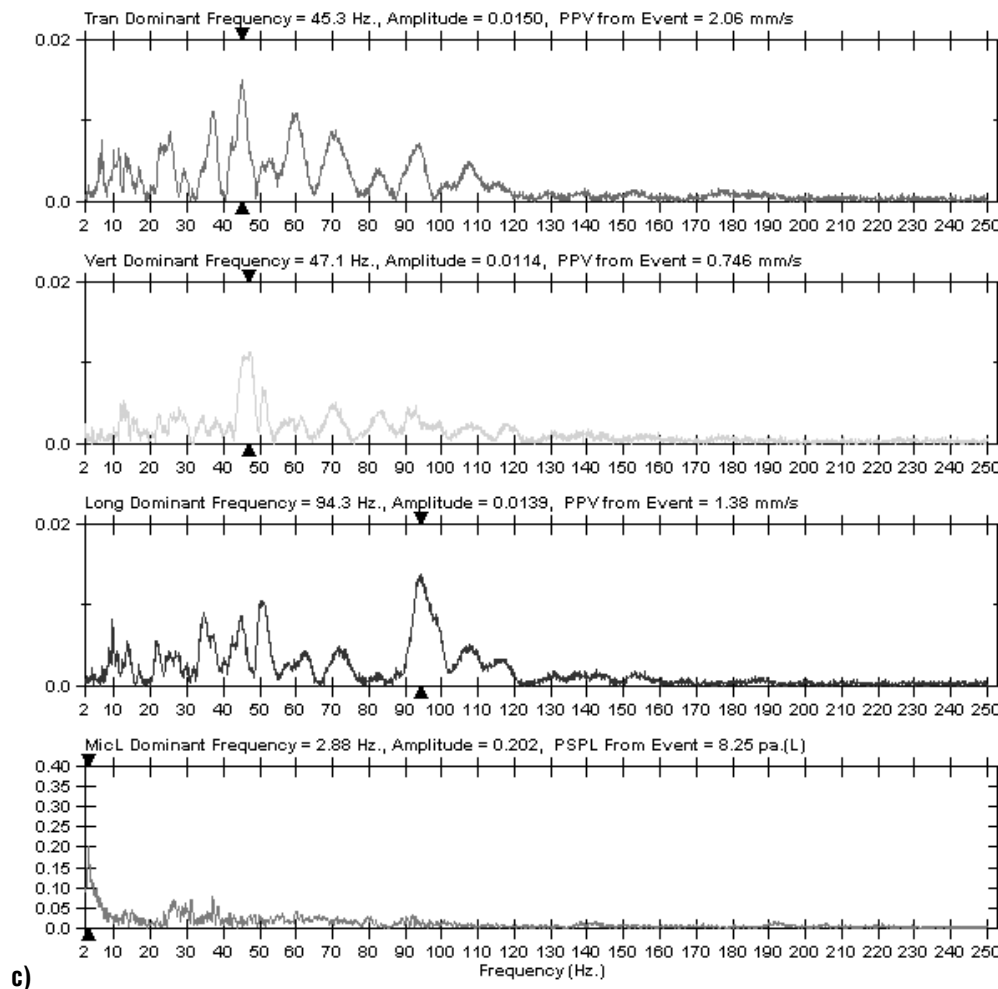
Figura 5 (continua) – Interfaces gráficas geradas pelo programa Blastware 8.12 (Instantel Inc., 2006, 2007). Em (a) gráfico da frequência *versus* velocidade da partícula; (b) registro da velocidade de partícula para cada uma das componentes transversal, vertical e longitudinal e sinal sonoro, de baixo para cima.

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:

- I. velocidade de vibração máxima de partícula de pico e vibração máxima (VR),
- II. duração da vibração no solo, e

III. frequência de vibração.

Os dois trabalhos de campo envolveram o monitoramento de 10 detonações a céu aberto e 4 subterrâneas, e seus locais de ocorrência estão concentrados no Canal de Jusante, Túnel de Enchimento e Tomada D'água, conforme as informações que constam nos planos de fogo. A Tabela 2 apresenta os dados referentes aos registros obtidos e demais informações necessárias para



c) **Figura 5** (conclusão) – Interfaces gráficas geradas pelo programa Blastware 8.12 (InstanTel Inc., 2006, 2007). Em (c) espectro da frequência para cada uma das componentes transversal, vertical e longitudinal e sinal sonoro, de cima para baixo.

este trabalho. Os dados concernentes à carga máxima por espera (Q), dada em quilogramas, e as coordenadas das detonações necessárias para cálculo das distâncias entre o ponto de monitoramento e a detonação (Tab. 2).

Nota-se que os valores das velocidades da vibração de partículas de pico máximas da partícula mostram-se que todos os inferiores ao valor de 15 mm/s na frequência de 4 Hz, valor limite mínimo, segundo a norma brasileira, para que possa ocorrer danos induzidos por vibrações do terreno em estruturas urbanas. O histograma apresentado na Figura 6 mostra que de fato, a maior parte dos dados está concentrada na região de valores de velocidade da partícula menores que 1 mm/s, atingindo valor máximo de aproximadamente 7 mm/s.

Um histograma para análise da intensidade sonora produzida pelas detonações também foi elaborado (Fig. 7). Ressalta-se

que a maioria das observações está concentrada em regiões de valores inferiores a 115 dB. No entanto, três valores encontram-se substancialmente acima do limite estipulado pela NBR 9653 (ABNT, 2005), de 134 dB, e apenas uma observação merece atenção, chegando a 147 dB, alcançando níveis perniciosos às edificações proximais e/ou ao bem-estar da população, mas não o suficiente para provocar fissuras.

A reunião dos dados de velocidade máxima de partícula e a resultante (VR) busca estabelecer uma relação das possíveis regiões mais e/ou menos afetadas pelas detonações. Obviamente que esta relação depende de alguns fatores como: a carga máxima por espera utilizada e a distância do ponto onde se concentra esta carga para o ponto monitorado. De forma geral, a região sul apresenta valores de velocidade de partícula próximos a 3 mm/s, enquanto na porção norte há proximidade destes

Tabela 2 (continua) – Especificações das explosões monitoradas no período entre 27.10.07 e 25.02.08.

Fogo	Data Hora local	Tipo da Explosão	Ponto Monitorado	Descrição do ponto	Sismógrafo	*Q (kg)	Distância (m)	Componente transversal		Componente vertical		Componente longitudinal		Pressão Acústica (dB)	Velocidade Resultante (mm/s)
								Velocidade (mm/s)	**F.D. (Hz)	Velocidade (mm/s)	F.D. (Hz)	Velocidade (mm/s)	F.D. (Hz)		
A	27/10/07 12:11h	Céu aberto	Ponto 1	Solo	Minimale Obsis	25,08	458	0,968	40,40	0,714	64,30	0,683	34,40	---	1,0300
			Ponto 3	Solo	Minimale Obsis		220	3,690	42,60	1,590	18,50	2,380	42,40	---	4,2500
B	29/10/07 13:04h	Céu aberto	Ponto 1	Solo	Blastmate Obsis	25,24	436	2,690	39,80	1,030	73,30	1,520	82,40	---	2,9400
			Ponto 2	Solo	Minimale Obsis		298	2,790	39,40	2,540	40,90	2,080	39,40	---	3,5700
			Ponto 3	Solo	Minimale Elektronorte		262	2,220	45,50	1,840	41,70	2,540	62,50	125	2,7900
C	29/10/07 17:47h	Céu aberto	Ponto 1	Solo	Blastmate Obsis	43,56	488	1,370	40,10	1,170	40,10	1,700	83,90	---	2,0400
			Ponto 2	Solo	Minimale Obsis		245	3,600	10,40	2,100	51,90	2,160	42,10	---	4,0300
			Ponto 3	Solo	Minimale Elektronorte		176	7,430	45,50	2,540	38,50	3,560	26,30	123	7,4900
D	30/10/07 19:59h	Subterrânea	Ponto 1	Solo	Blastmate Obsis		234	1,650	80,90	0,444	39,00	0,810	59,90	---	1,6600
			Ponto 2	Solo	Minimale Obsis	24,53	451	0,365	95,60	0,746	84,50	0,698	84,30	---	0,9300
			Ponto 3	Solo	Minimale Obsis		500	0,349	75,10	0,206	18,80	0,270	18,80	---	0,4600
			Ponto 4	Residência	Minimale Obsis		409	0,779	108,00	0,190	17,60	0,714	109,00	---	0,7800
E	10/02/08 12:59h	Céu aberto	Ponto 1	Residência	Blastmate Obsis		236	2,480	80,30	1,170	88,50	0,714	27,30	118	2,6300
			Ponto 5	Residência	Minimale Obsis		443	0,302	22,30	0,286	13,60	0,302	22,00	118	0,4200
			Ponto 22	Residência	Minimale Obsis	13,79	365	< 0,200	-	< 0,200	-	< 0,200	-	< 100	< 0,2000
			Ponto 6	Residência	Minimale Obsis		272	0,857	40,80	0,762	122,00	0,603	23,40	< 88	1,0800
F	12/02/08 18:23h	Céu aberto	Ponto 1	Residência	Minimale Obsis		568	1,430	56,40	0,921	55,30	0,651	57,00	110	1,7300
			Ponto 8	Residência	Minimale Obsis		315	0,587	53,90	0,381	53,50	0,365	52,30	110	0,6960
			Ponto 9	Residência	Blastmate Obsis	10,56	606	0,429	14,00	0,429	56,60	0,444	55,50	114	0,5590
			Ponto 4	Residência	Minimale Obsis		387	0,476	61,80	0,111	3,10	0,175	5,50	101	0,4840
G	13/02/08 18:27h	Céu aberto	Ponto 1	Residência	Minimale Obsis		568	2,630	44,90	2,060	95,30	1,560	21,60	117	3,2800
			Ponto 8	Residência	Minimale Obsis		315	2,060	45,30	0,750	47,10	1,380	94,30	112	2,1500
			Ponto 9	Residência	Blastmate Obsis	23,76	606	1,210	14,00	1,050	43,60	1,540	48,60	112	1,8500
			Ponto 4	Residência	Minimale Obsis		387	0,571	61,80	0,254	49,00	0,921	96,00	101	0,9370

Tabela 2 (conclusão) – Especificações das explosões monitoradas no período entre 27.10.07 e 25.02.08.

Fogo	Data Hora local	Tipo da Explosão	Ponto Monitorado	Descrição do ponto	Sismógrafo	*Q (kg)	Distância (m)	Componente transversal		Componente vertical		Componente longitudinal		Pressão Acústica (dB)	Velocidade Resultante (mm/s)
								Velocidade (mm/s)	**F.D. (Hz)	Velocidade (mm/s)	F.D. (Hz)	Velocidade (mm/s)	F.D. (Hz)		
H	14/02/08 18:54h	Subterrânea	Ponto 7	Residência	Minimate Obsis		540	0,206	18,90	0,111	18,80	0,127	17,40	113	0,2210
			Ponto 9	Residência	Blastmate Obsis		860	0,111	22,50	0,222	15,30	0,175	18,50	113	0,2360
			Ponto 18	Residência	Minimate Obsis	10,34	640	0,079	14,80	0,095	15,30	0,095	9,90	114	0,1030
			Ponto 2	Residência	Minimate Obsis		490	0,064	7,63	0,079	9,13	0,064	9,13	111	0,0855
I	18/02/08 18:53h	Céu aberto	Ponto 12	Residência	Minimate Obsis		698	0,095	2,25	0,222	6,00	0,048	3,50	< 88	0,2230
			Ponto 13	Residência	Blastmate Obsis	36,96	287	2,330	24,10	3,320	24,10	1,890	20,30	147	3,3700
			Ponto 11	Residência	Minimate Obsis		337	1,750	16,60	2,490	31,90	1,300	30,40	138	2,5900
			Ponto 10	Residência	Minimate Obsis		427	1,620	28,50	1,100	24,30	1,210	28,40	134	1,9700
			Ponto 14	Residência	Minimate Obsis		551	0,127	10,40	0,143	9,00	0,222	20,50	114	0,2320
			Ponto 17	Residência	Blastmate Obsis	10,34	690	0,064	15,50	0,064	16,10	0,064	3,25	109	0,0778
J	19/02/08 11:51h	Subterrânea	Ponto 15	Residência	Minimate Obsis		574	0,079	10,40	0,095	10,40	0,079	11,30	107	0,1140
			Ponto 16	Residência	Minimate Obsis		718	0,064	2,75	0,079	2,50	0,064	23,60	109	0,0809
			Ponto 11	Residência	Minimate Obsis		318	0,127	13,10	0,333	24,40	0,524	15,50	116	0,5580
			Ponto 13	Residência	Blastmate Obsis	10,34	368	0,254	24,40	0,254	23,50	0,159	17,90	115	0,2720
K	21/02/08 10:35h	Subterrânea	Ponto 10	Residência	Minimate Obsis		370	0,413	83,10	0,492	70,30	0,333	75,60	114	0,5850
			Ponto 12	Residência	Minimate Obsis		697	0,175	51,70	0,238	12,80	0,175	13,10	110	0,2520
			Ponto 26	Residência	Minimate Obsis	7,92	825	0,048	2,50	0,048	3,13	0,143	61,90	100	0,1470
			Ponto 13	Residência	Blastmate Obsis		375	0,270	56,90	0,175	14,80	0,556	56,90	121	0,5640
M	22/02/08 12:43h	Céu aberto	Ponto 23	Residência	Minimate Obsis	3,01	750	< 0,200	-	< 0,200	-	< 0,200	-	< 100	< 0,2000
			Ponto 24	Residência	Minimate Obsis		960	< 0,200	-	< 0,200	-	< 0,200	-	< 100	< 0,2000
			Ponto 25	Residência	Minimate Obsis		510	< 0,200	-	< 0,200	-	< 0,200	-	< 100	< 0,2000
			Ponto 27	Residência	Blastmate Obsis		414	0,714	27,60	9,524	25,30	0,841	27,90	138	0,9240
N	25/02/08 18:38h	Céu aberto	Ponto 19	Residência	Minimate Obsis	3,88	420	0,698	23,00	0,635	43,30	0,492	22,40	131	0,7690
			Ponto 20	Residência	Minimate Obsis		330	1,890	58,00	1,790	92,00	1,300	52,40	137	2,3100
			Ponto 21	Residência	Minimate Obsis		413	0,444	54,50	0,254	54,50	0,254	22,60	128	0,4790

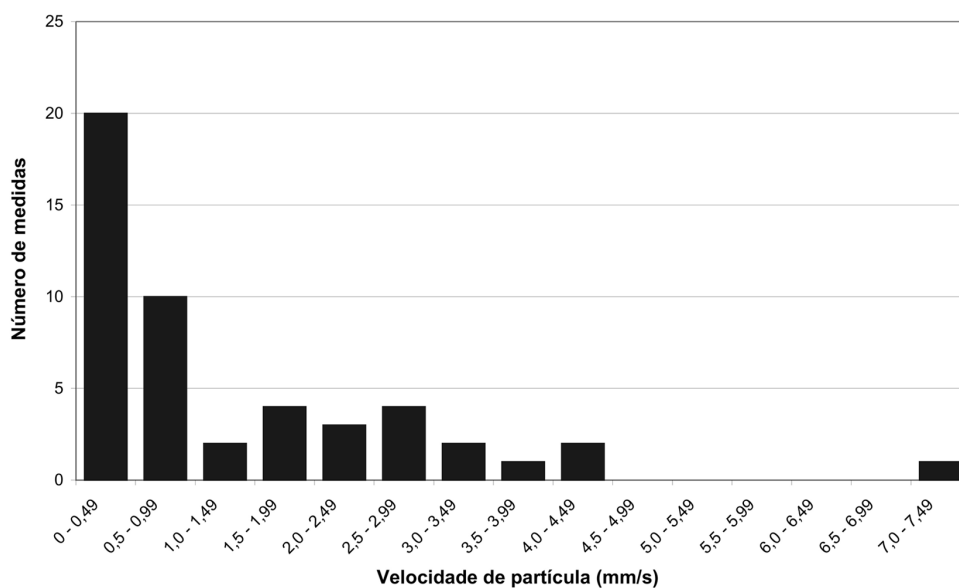


Figura 6 – Histograma dos 45 valores de velocidade da partícula resultante (mm/s) registrados nos 27 pontos de monitoramento. Nota-se que a maior parte dos valores concentra-se abaixo de 1 mm/s, o que se enquadra dentro dos limites estipulados pela ABNT.

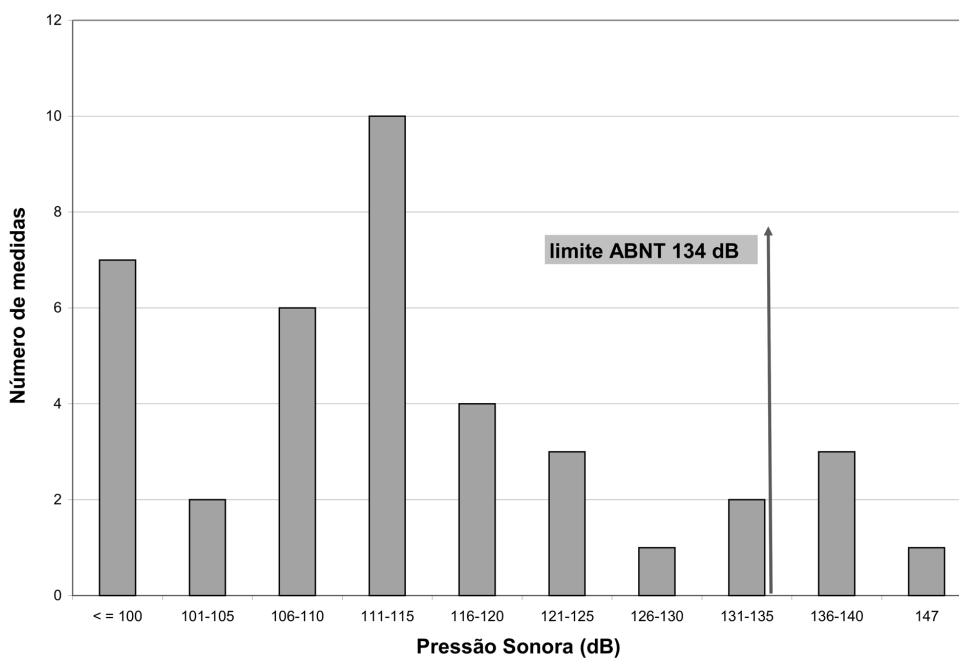


Figura 7 – Histograma dos valores de intensidade sonora obtidos para os pontos monitorados. Alguns valores superam o limite estipulado pela ABNT.

Tabela 3 – Intervalos de movimentação do chão para a intensidade Mercalli Modificada (MM).

MM	I	II-III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
Aceleração Máxima (%g)	<0,17	0,17-1,4	1,4-3,9	3,9-9,2	9,2-18	18-34	34-65	65-124	>124
Velocidade Máxima (mm/s)	<1	1-11	11-34	34-81	81-160	160-310	310-600	600-1160	>1160

valores com um ponto centrado em 7 mm/s, correspondente ao ponto 3, demonstrando contraste de velocidade máxima de partícula na região.

Outra análise factível diz respeito à frequência de vibração das construções. Toda estrutura apresenta um intervalo de frequência de vibração natural, e todo corpo reage a uma vibração em virtude de sua inércia. Quando uma fonte externa vibra com frequência igual à frequência natural de certo sistema, este passa a vibrar com grande intensidade, e é dito estar em ressonância com a fonte. O fator desestabilizador de estruturas civis perante a propagação de ondas sísmicas, naturais ou artificiais, possui estreita relação com a frequência de ressonância. A NBR não faz nenhuma referência a este tipo de análise, e somente a título de comparação, a norma alemã DIN 4150 (Deutsche Norm, 1986) estabelece que, para habitações que possuem frequência entre 10 e 50 Hz, o nível máximo de vibração admitido seria de 5-15 mm/s.

Estudos como o de Ahmad et al. (2005) fazem uma análise do período de oscilação para edifícios de diversos andares. De acordo com este estudo, uma residência baixa (sem andares superiores) possuiria um período natural de vibração típico de 0,1 segundo, ou seja, este tipo de estrutura possuiria uma frequência natural de aproximadamente 10 Hz, o que se enquadra no intervalo citado pela norma alemã, e, também, no trabalho de Koppe et al. (2001). A maioria das frequências registradas nas três componentes apresenta valores muito superiores à frequência em questão (Tab. 2). Apesar de alguns valores de frequência estarem dentro desse intervalo (ver fogos C, E, F, G, H, J e K, da Tab. 2), os registros de frequência destas detonações mostram que seus valores de amplitude as exime de quaisquer efeitos prejudiciais às estruturas.

Uma última análise que pode ser feita diz respeito ao intervalo de movimentação do chão de acordo com a intensidade Mercalli Modificada (Tab. 3). O intervalo de velocidade de partícula resultante obtido pelos sismômetros de engenharia foi de 0,007 a 7,49 (mm/s), o qual se enquadra nos intervalos de I-III graus na escala Mercalli Modificada. Os respectivos efeitos descritos para este intervalo de intensidade são: *“Sentido dentro de casa. Alguns objetos pendurados oscilam. Vibração parecida à da passagem de um caminhão leve. Duração estimada. Pode não ser reconhecido como um abalo sísmico”*. A partir desta análise pode-se ter uma noção dos efeitos ocorridos nas habitações dos moradores da cidade de Tucuruí, o que de fato coincide com as descrições dos moradores. Entretanto, esta análise trata-se de uma observação qualitativa, na qual não se tem controle da real relação da intensidade Mercalli Modificada com as fissuras existentes nestas habitações.

Equação de atenuação

Da energia liberada pelas detonações por explosivos, cerca de 90% é transferida ao ambiente circundante sob a forma de calor, de ruído e de vibrações. (Dinis da Gama, 1998). As vibrações ou ondas sísmicas atenuam-se fundamentalmente ao longo do seu percurso por dois mecanismos: o geométrico e o de dissipação (Schiappa de Azevedo & Patrício, 2001). Na prática, as ondas não se atenuam sempre com a distância. Em meios estratificados e sua geometria o favorecer, as ondas podem concentrar-se ou sobrepor-se a outras refletidas, podendo medir-se maiores valores de vibração em pontos mais afastados.

Desta maneira, as propriedades geológicas, geotécnicas e consequentemente físicas de um maciço estão estritamente relacionadas às suas propriedades de atenuação de vibrações, de forma a produzir trens de ondas vibratórias característicos ao longo da trajetória de propagação. Assim, com a 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 (Dallora Neto & Ferreira, 2006).

Nessa determinação dos fatores locais de atenuação buscase estabelecer uma correlação entre as amplitudes das vibrações, quantificadas através da velocidade da vibração de partícula de pico [Eq. (1)], e os fatores relacionados à fonte de energia sobre os quais se tem controle, como a massa de explosivos detonada e a distância entre ela e o ponto monitorado.

A forma geral da equação que correlaciona essas três variáveis é do tipo:

$$V = a(DE)^b, \quad (2)$$

sendo o parâmetro DE denominado distância escalonada e definido pela NBR 9653 (ABNT, 2005) como:

$$DE = D/Q^{1/3}; \quad (3)$$

D é a distância horizontal entre ponto de medição e a detonação (metros) e Q é a carga máxima de explosivos a ser detonado por espera (kg).

É muito comum a detonação apresentar diversos valores de carga máxima por espera de acordo com a localização do furo. Neste caso, o valor considerado neste estudo é o maior dos valores de carga máxima por espera da detonação em questão. Como a Equação (2) é uma função de potência, não pode advir de um ajuste linear simples. Destarte, aplica-se a transformação logarítmica de forma a torná-la linear, obtendo-se então:

$$\log(V) = \log(a) + b * \log(DE), \quad (4)$$

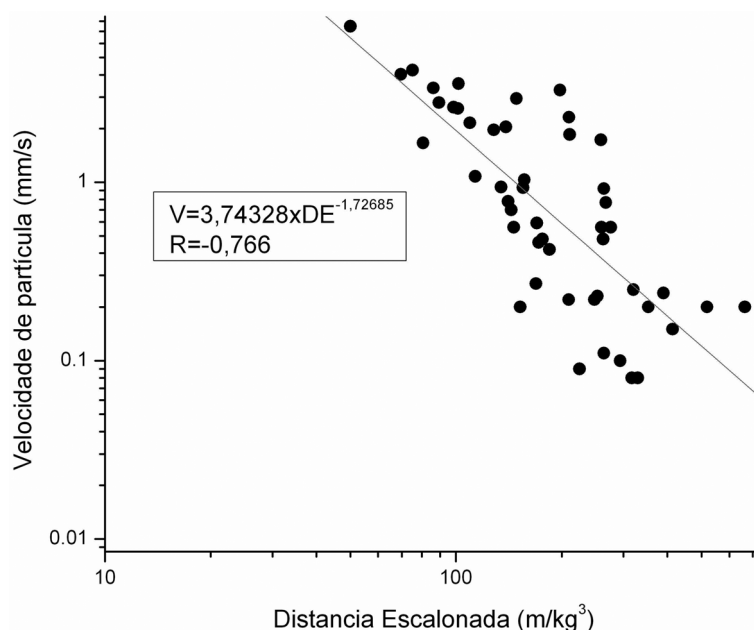


Figura 8 – Ajuste linear da reta referente à equação de atenuação das ondas obtida a partir dos registros sismográficos das detonações e da distância escalonada.

possibilitando a obtenção dos coeficientes linear (a), e angular (b) através de uma regressão linear simples.

De posse dos planos de fogo, de seus respectivos registros sismográficos e das distâncias, foi possível obter a equação de atenuação para a região, que apresenta a seguinte forma:

$$V = 3,74328 \pm 0,48048 \times DE^{-1,72685 \pm 0,21143}, \quad (5)$$

com $R = 0,76593$.

A Figura 8 mostra o gráfico da equação de atenuação [Eq. (5)], obtido a partir dos registros sismográficos das detonações com um ajuste linear. Em uma análise geral, o gráfico mostra a relação praticamente direta entre a distância entre a explosão e o ponto monitorado maior e a dissipação de energia da frente de onda pelo meio de propagação. Desta maneira, as medidas mostram que o trajeto explosão-ponto de medição, percorrido pela onda, apresenta características geológicas e pedológicas suficientes para atenuação das ondas de forma a não comprometer as residências nas proximidades das obras ao menos para a carga máxima por espera utilizada nestas detonações. Considerando a menor distância de 176 metros implica que seria necessário, de acordo com a Equação (5), uma carga com valor aproximadamente 8 vezes maior do que o máximo utilizado. A dispersão dos valores em relação à reta pode estar relacionada à pequena diferença dos pontos de referência que foram extraídos dos planos de fogo e utilizados para o cálculo das distâncias.

CONCLUSÕES

Os valores de velocidade da partícula resultante para os 42 registros sismográficos mostram-se bem inferiores ao valor máximo aceitável, segundo as recomendações da ABNT (15 mm/s), para que não ocorra danos às residências próximas à obra de construção da Eclusa 2 da UHE de Tucuruí. Estes valores não apresentaram nenhuma correlação de acordo com o tipo de detonação realizada, a céu aberto ou subterrânea, e se enquadram em I-III graus da escala Mercalli Modificada.

A análise da intensidade sonora também mostra que a maioria dos valores está abaixo do limite estipulado pela ABNT. No entanto, a explosão ocorrida no dia 18.02.08, às 18h53min, alcançou níveis muito superiores aos estipulados pela NBR 9653. Desta maneira, não é descartada a possibilidade de explosões dessas dimensões causarem, não somente alerta à população, como pequenos danos estruturais às residências mais próximas. De fato, este pode ser o principal fator causador do alerta dos moradores, superando a expectativa dos efeitos causados pela velocidade de partícula. De acordo com a análise dos dados, recomenda-se que, ou carga máxima por espera seja reduzida, ou que seja modificada e/ou aperfeiçoada a proteção de atenuação das ondas sonoras, ou que os focos das explosões estejam a uma distância mínima de 450 metros das residências para que os danos por intensidade sonora sejam mitigados.

A partir do exposto, é necessário que devido à baixa resistência das edificações próximas às detonações, seja realizado um estudo mais detalhado baseado nos materiais constituintes das residências, para conhecimento do máximo grau de vibração suportado pelas mesmas. A NBR 9653 não faz referência a este tipo de estudo e não leva em consideração a qualidade das residências.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Eletronorte e Camargo Corrêa S.A. pelo apoio e execução do trabalho, ao técnico Mucélio (Eletronorte) pelo apoio ao campo, Kate Tomé de Souza pela confecção e produção dos mapas e das imagens. GSF agradece a Bolsa de produtividade do CNPq (302398/2007-4).

REFERÊNCIAS

ABNT. 1986. NBR 9653. Guia para avaliação dos efeitos provocados pelo uso de explosivos nas minerações em áreas urbanas (Procedimento). 2 ed. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 8 p.

ABNT. 2005. NBR 9653. Guia para avaliação dos efeitos provocados pelo uso de explosivos nas minerações em áreas urbanas (Procedimento). 2 ed. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 11 p.

AHMAD Z, AHMAD I, AKHTAR G & ASIM S. 2005. Seismotectonics and Seismic Hazard Analysis in selected area of Margala Hills, Islamabad. Pakistan Journal of Hydrocarbon Research, 15: 65–72.

CAMARGO CORRÊA S.A. 2002a. Condições geológicas da área de implantação das obras. Eclusas de Tucuruí-Projeto Executivo. Relatório N. 46-MT-GEO-RT-E-01B-217.

CAMARGO CORRÊA S.A. 2002b. Relatório das investigações geo-

lógico-geotécnicas. Eclusas de Tucuruí-Projeto Executivo. Relatório N. 46-MT-GEO-RT-E-003-010.

DALLORA NETO C & FERREIRA GC. 2006. Controle de vibrações geradas por desmonte de rocha com explosivos. Estudo de caso: Calcário Cruzeiro, Limeira (SP). UNESP, Geociências, 25(4): 455–466.

DEUTSCHE NORM. 1986. DIN 4150. Erschütterungen im Bauwesen: Einwirkungen auf bauliche Anlagen. (Structural vibration: effects of vibration on structures).

DINIS DA GAMA. 1998. Ruídos e vibrações ligados à utilização dos explosivos e equipamentos. In: 1º Seminário de Auditorias Ambientais Internas, Divisão de Minas e Pedreiras do Instituto Geológico e Mineiro, Portugal, 16 p.

INSTANTEL INC. 1998a. Operator manual – Blastmate III. Ontário, Canadá. 62 p.

INSTANTEL INC. 1998b. Operator manual – Minimate Plus. Ontário, Canadá. 37 p.

INSTANTEL INC. 2006. Software Blastware 8.12. Ontário, Canadá.

INSTANTEL INC. 2007. Software Blastware 8.12. Ontário, Canadá.

KOPPE JC, SALVADORETTI P, MUNARETTI E & COSTA JFCL. 2001. Monitoramento geofísico de desmonte de rocha com utilização de explosivos em condições de risco elevado em zona urbana. Revista Escola de Minas, 54(4): 273–280.

REIL JP. 1998. Why people complain about blasting. Rock Products. p. 40–44

SCHIAPPA DE AZEVEDO F & PATRÍCIO J. 2001. Vibrações ambientes. Critérios de danos e de incomodidade. Atualidade e perspectivas futuras. Revista Técnica Acústica. 9 p.

NOTAS SOBRE OS AUTORES

George Sand França. Bacharel em Física pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte, doutor em Geofísica, pela Universidade de São Paulo, atualmente é o professor do Observatório Sismológico, UnB. Área de pesquisa: sismicidade natural e induzida, estudo da estrutura da crosta e manto, divulgação em Geofísica e instrumentação para o ensino em Geociências. Líder do grupo de pesquisa Sismicidade Induzida e Natural e é bolsista de produtividade do CNPq.

Marcos Alberto Rodrigues Vasconcelos. Geólogo formado pela Universidade de Brasília e mestre em Geofísica pela Universidade de São Paulo. Atualmente, doutorando da Universidade Estadual de Campinas com foco principal em petrografia, geologia estrutural e geofísica de estruturas de impacto de meteorito.

Cristiano Naibert Chimpliganond. Geólogo formado pela Universidade de Brasília e mestre em Geologia pela Universidade de Brasília. Atualmente, doutorando na mesma universidade com foco em sismicidade natural. Atua no Observatório Sismológico desde 1995 na análise de dados sísmicos. Área de interesse é sismicidade brasileira natural e induzida.

Sidinei Sebastião Tomás. Engenheiro Eletricista pela Universidade de Brasília, trabalha atualmente na instalação e manutenção de estações sismográficas e na instrumentação para o ensino em Geofísica. Área de pesquisa é tratamento de sinais e instrumentação.