

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI  
DEGEO - DEPARTAMENTO DE GEOCIÊNCIAS**

**AVALIAÇÃO SISMOGRÁFICA DE UMA ZONA DE AMPLIAÇÃO  
DE MINERAÇÃO DE CALCÁRIO VISANDO A INTEGRIDADE  
ESTRUTURAL DE FEIÇÕES CÁRSTICAS ADJACENTES.**

**Izaias Claudio Mendes de Oliveira**

**SÃO JOÃO DEL-REI/MG**

**2016**

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI  
DEGEO - DEPARTAMENTO DE GEOCIÊNCIAS

**AVALIAÇÃO SISMOGRÁFICA DE UMA ZONA DE AMPLIAÇÃO  
DE MINERAÇÃO DE CALCÁRIO VISANDO A INTEGRIDADE  
ESTRUTURAL DE FEIÇÕES CÁRSTICAS ADJACENTES.**

Monografia apresentada para obtenção do título de Bacharel, na disciplina Trabalho de Conclusão de Curso II, do Curso de Bacharel em Geografia da UFSJ. Professor orientador: Dr. Múcio Figueiredo do Amaral

Izaias Cláudio Mendes de Oliveira

SÃO JOÃO DEL-REI/MG

2016

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI  
DEGEO - DEPARTAMENTO DE GEOCIÊNCIAS

PARECER DA COMISSÃO EXAMINADORA  
DE DEFESA DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE  
Izaias Cláudio Mendes de Oliveira

**AVALIAÇÃO SISMOGRÁFICA DE UMA ZONA DE AMPLIAÇÃO  
DE MINERAÇÃO DE CALCÁRIO VISANDO A INTEGRIDADE  
ESTRUTURAL DE FEIÇÕES CÁRSTICAS ADJACENTES.**

A comissão examinadora composta pelos professores abaixo, sob a presidência do primeiro, considera o Izaias Cláudio Mendes de Oliveira, aprovado.

São João del Rei, 25 de novembro de 2016

---

Prof. Dr. Múcio Figueredo do Amaral  
Orientador  
Departamento de Geociências  
Universidade Federal de São João del-Rei

---

Prof. Dr. Leonardo Cristian Rocha  
(Titular)  
Departamento de Geociências  
Universidade Federal de São João del-Rei

Dedicado aos meus pais, Pedro e Hilda (*in memoriam*) e  
aos meus filhos Karen e Izaias Júnior.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus pelo equilíbrio, ao meu orientador prof. Dr. Múcio Figueiredo do Amaral pela paciência, a Holcim (Brasil) S.A. na pessoa do gerente da unidade de Barroso, Juliano Menezes de Melo pela liberação das informações divulgadas neste trabalho, a toda equipe técnica envolvida nas etapas de prospecção espeleológica Spelayon Consultoria, na pessoa da Mariana Barbosa Timo e sismográfica Geoprime engenharia e meio ambiente, na pessoa do engenheiro Eduardo Togoro, ao Vicente Eugênio Neto e ao Fabiano Deusdeth Ferreira companheiros na realização dos trabalhos de campo para o levantamento de dados para a análise nesse trabalho, e por último e nem por isso menos importante a minha família, principalmente a minha mãe D. Hilda (*in memoriam*) recentemente eternizada na lembrança dos bons momentos vividos.

## **RESUMO**

Grandes são as preocupações com as consequências das vibrações geradas durante o processo de detonação com a utilização de explosivos, sejam em áreas de mineração ou obras civis, este trabalho vem propor parâmetros para carga máxima por espera e distância escalonada na ampliação da mina de calcário denominada Mata do Ribeirão, através da análise de dados sismográficos e a delimitação da área de proteção das cavidades, a fim de garantir que os efeitos das vibrações geradas, estejam dentro dos limites preconizados na NBR ABNT 9653, preservando assim a integridade estrutural das cavidades cársticas adjacentes.

### **Palavras-chave:**

Monitoramento sismográfico, curva de atenuação, carga por espera, mineração calcário.

## **ABSTRACT**

There are great concerns about the consequences of the vibrations generated during the detonation process with the use of explosives, whether in mining areas or civil works, this work proposes parameters for maximum load per standby and step distance in the expansion of the limestone mine called Mata do Ribeirão, through the analysis of seismographic data and the delimitation of the cavity protection area, in order to guarantee that the effects of the generated vibrations are within the limits recommended in NBR ABNT 9653, thus preserving the structural integrity of the adjacent karstic cavities .

### **Keywords:**

Seismic monitoring, attenuation curve, waiting load, limestone mining.

## **LISTA DE FIGURAS**

Figura 1 – Caminhamento e Pontos de Controle, conforme Timo et al (2016).

Figura 2 - Diferença entre caverna, abrigo e abismo (Fonte: CECAV, 2012).

Figura 3 - Delimitação do entorno protetivo e programa de monitoramento sismográfico proposto das cavernas existentes no entorno do empreendimento. Conforme Timo et al (2016).

Figura 4 - Perfuratriz pneumática – fonte internet acessado em 05/12/2016.

Figura 5 - Carregamento dos furos com explosivos - fonte internet acessado em 05/12/2016.

Figura 6 - Elementos do plano de fogo de uma detonação - fonte internet acessado em 05/12/2016.

Figura 7 - Detalhe de uma detonação - fonte internet acessado em 05/12/2016.

Figura 8 - Unidades Espeleológicas e Potencialidade de ocorrência de cavernas na área de estudo (fonte: base de dados CECAV).

Figura 9 - GPS Garmim – Etrex Vista HCx.

Figura 10 - Equipamento da GeoSonics. Fonte: GeoSonics.

Figura 11 - Equipamento da Instancel. Fonte: Instancel.

Figura 12 - Pontos de monitoramento e de detonação sobre imagem orbital do Google Earth (Relatório de Monitoramento Ambiental da Consultoria GEOPRIME, inédito).

Figura 13 - Modelo de sismograma emitido para cada monitoramento sismográfico.

Figura 14 - Registros de velocidade de partícula encontrados nas campanhas sismográficas comparados com o limite estipulado pela NBR 9653.

Figura 15 - Gráfico de regressão linear segundo critério quadrático.

Figura 16 - Gráfico de regressão linear segundo critério cúbico.

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1: Informações sobre os pontos de monitoramento.

Tabela 2 - Registros obtidos na campanha sismográfica realizada em 08/03/2016.

Tabela 3 - Registros obtidos na campanha sismográfica realizada em 02/06/2016.

Tabela 4 - Registros obtidos na campanha sismográfica realizada em 02/09/2016.

## **LISTA DE SIGLAS**

CECAV – Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas;

ICMBio – Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade;

NBR – Norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas;

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>01</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>02</b>
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>06</b>
<b>3.1</b>	<b>GEOSONICS</b>	<b>09</b>
<b>3.2</b>	<b>INSTANTEL</b>	<b>09</b>
<b>3.3</b>	<b>PARÂMETROS DO SISTEMA</b>	<b>09</b>
<b>3.4</b>	<b>PROCEDIMENTOS ADOTADOS</b>	<b>09</b>
<b>3.4.1</b>	<b>FASE 1 - LABORATÓRIO</b>	<b>09</b>
<b>3.4.2</b>	<b>FASE 2 - CAMPO</b>	<b>09</b>
<b>4</b>	<b>APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS</b>	<b>10</b>
<b>5</b>	<b>RESUMO DOS REGISTROS OBTIDOS NO MONITORAMENTO SISMOGRÁFICO</b>	<b>11</b>
<b>6</b>	<b>CURVA DE ATENUAÇÃO</b>	<b>14</b>
<b>6.1</b>	<b>EQUAÇÃO DA ATENUAÇÃO PARA A DE SEGUNDO O MODELO QUADRÁTICO.</b>	<b>16</b>
<b>6.2</b>	<b>EQUAÇÃO DA ATENUAÇÃO PARA A DE SEGUNDO O MODELO CÚBICO.</b>	<b>16</b>
<b>7</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	<b>17</b>
<b>8</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>18</b>



## 1 - INTRODUÇÃO

O aumento na capacidade de produção para atender as constantes necessidades de consumo da população, tem exigido uma maior intervenção antrópica no meio ambiente, através da apropriação e transformação de recursos naturais, muitas vezes causando alterações ambientais irreversíveis, mas, podendo ser compensadas através de outras formas de intervenções ou apoios em outros lugares que os necessitem.

A Geografia como disciplina dedicada ao estudo das interações homem-meio, pode proporcionar significativa contribuição com propostas que visem soluções dos eventuais conflitos existentes. O grande desafio é propor medidas de relação entre as partes para a eliminação, mitigação e/ou minimização dos impactos causados pelas intervenções no ambiente.

A mineração é um dos setores sócio-econômicos que mais necessitam de intervenções no ambiente, pois, os corpos minerais estão dispostos na natureza de tal maneira, que não podem ser deslocados. Ou seja, a atividade de extração mineral é realizada onde a natureza dispôs a jazida mineral, não sendo possível alterar o local de implantação das atividades correlatas. Isso é denominado de rigidez locacional. Daí podem ser gerados conflitos com a população humana do entorno, bem como com componentes da fauna e da flora locais.

A mineração de calcário, utilizado numa infinidade de produtos derivados (agricultura, construção civil, indústria química, indústria alimentícia, etc), como a mineração de outros recursos minerais, também causa alterações no ambiente, e, em alguns casos, junto a populações humanas do entorno das minas. Além disso, há uma peculiaridade, nos litoambientes calcários, ocorrem cavidades, originadas por reações químicas decorrentes da interação da água pluvial com o carbonato de cálcio abundantemente existente nestas rochas.

O resultado, ao longo do tempo geológico, é o aparecimento dos denominados sistemas cársticos, caracterizados por morfologias específicas, criando ambientes únicos, cuja manifestação máxima são as cavidades cársticas, também conhecidas por grutas e cavernas.

Ao explorar o calcário, as empresas mineradoras de deparam com a ocorrência de cavernas nas jazidas. Para que não ocorra a total supressão das mesmas, algumas medidas de ordem técnica e metodológica são necessárias. Entre elas, o estudo do volume de vibrações originados dos processos de denotações para o avanço da frente de lavra sobre as cavernas do entorno a serem preservadas.

Para definição da área de delimitação do raio de proteção das cavidades cársticas, a microbacia, área de infiltração, processos espeleogenéticos, integridade estrutural e avaliações sísmicas devem ser estudadas, para que, com o cruzamento desses resultados, possa ser encontrado um ponto de equilíbrio entre a preservação e o processo de desmonte de rocha para o avanço da lavra de calcário.

Nesse caso específico, a propagação das ondas sísmicas das detonações será maior em corpos rochosos sãos, que não apresentem descontinuidades, como fraturas, falhas, etc. Nos corpos rochosos que apresentem tais descontinuidades, as ondas sísmicas propagarão de forma mais atenuada. O corpo rochoso calcário objeto de estudo desta investigação, encaixa-se nesse último contexto, conforme será discutido ao longo deste trabalho.

As descontinuidades ocasionadas pela modelagem do relevo tornam-se barreiras naturais de proteção contra os efeitos das ondas de vibração geradas durante o processo de desmonte de rochas para o desenvolvimento de frentes de lavra.

O presente estudo propõe uma análise sobre os dados obtidos durante a investigação sísmográfica relativa ao avanço da frente de lavra de calcário na Mina Mata do Ribeirão, localizada no município de Prados (MG) para garantir a integridade estrutural das feições cársticas localizadas no empreendimento.

## 2- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A área de trabalho, corresponde a metalcários inseridos na Sequência Barroso, Megassequência Carandaí. Espeleologicamente, está inserida na Província Espeleológica São João Del Rei (ICMBio-CECAV, 2016), encontrada na Base de Dados Geoespacializados das Cavernas do Brasil do CECAV (código CECAV\_MG\_4957), onde apenas uma caverna encontra-se cadastrada até então, a denominada Gruta Casa da Pedra.

Sena et al., 2011 faz uma descrição dos aspectos físicos da Gruta Casa da Pedra. Segundo os autores, seu interior apresenta uma grande variedade de espeleotemas. As estalactites e os escorrimentos de calcita são os mais comuns, porém também ocorrem represas de travertinos e cortinas. O piso é plano, com poucas irregularidades e o teto é alto na maior parte. Ainda segundo os autores: “a Gruta Casa da Pedra mostra-se rica em fatos e lendas, que incrementam sua beleza natural, atraindo turistas e estudiosos da área da espeleologia em geral” (Sena et al., 2011, p.10).

Timo et al. (2016) descreve dentro da Área Indiretamente Afetada (AIA) para à ampliação da mina Mata do Ribeirão 28 cavernas e 15 feições espeleológicas como abrigo, reentrância, dolina e fenda (Figura 5).

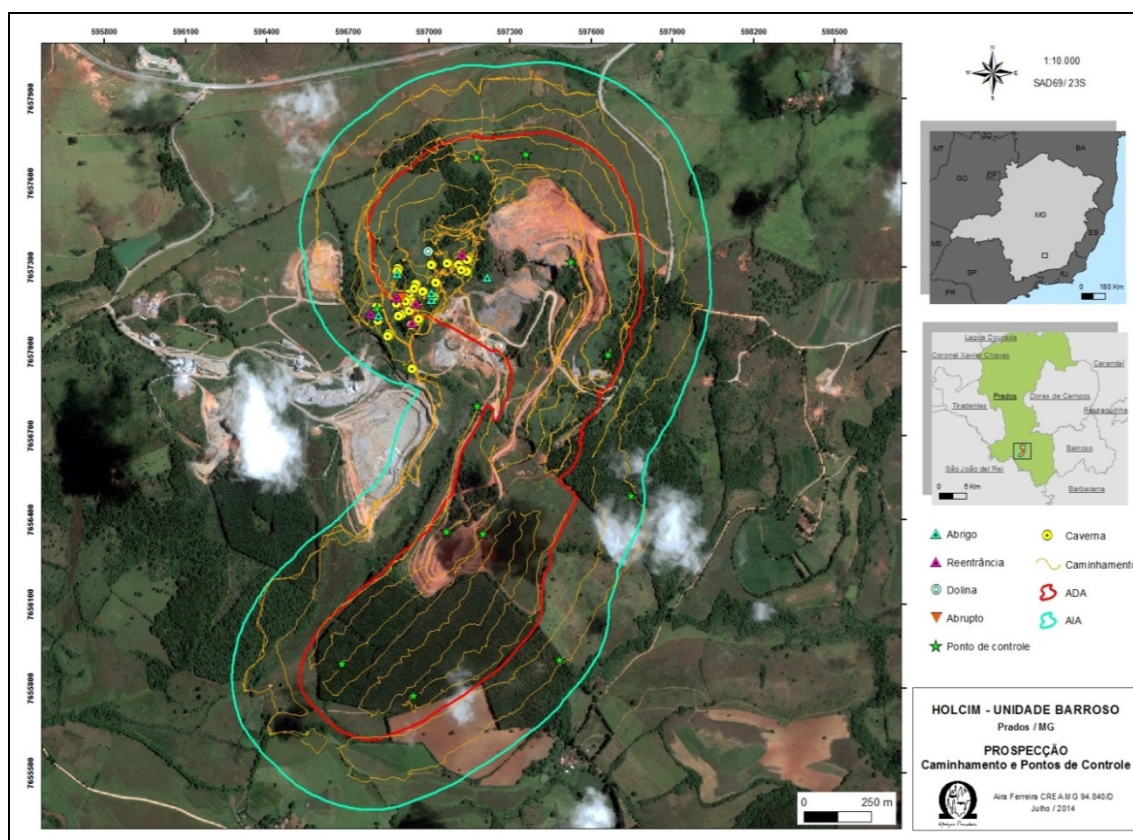


Figura 1 - Caminhamento e Pontos de Controle, conforme Timo et al (2016).

Timo et al (2016) classifica as feições espeleológicas encontradas tendo como base a experiência da equipe de espeleólogos em consonância com a bibliografia utilizada.

Considerando que as feições espeleológicas da área alvo deste trabalho estão inseridas no domínio de rochas carbonáticas, no âmbito deste trabalho são considerados:

Caverna: feição com projeção horizontal superior que a altura da entrada.

Abrigo: feição com altura da entrada maior que a projeção horizontal, e com ausência de zona afótica;

Abismo: caverna com desenvolvimento predominantemente vertical.

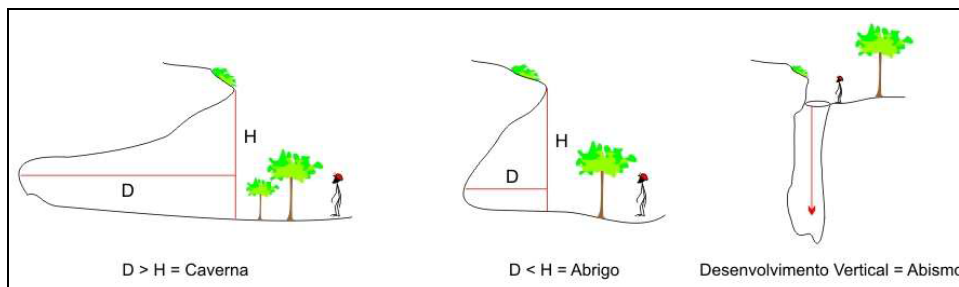


Figura 2 - Diferença entre caverna, abrigo e abismo (Fonte: CECAV, 2012).

Detalhes do relevo e solo locais podem ser consultados em Timo et al. (2016).

Com o intuito de garantir a preservação da integridade estrutural das feições cársticas adjacentes à área de ampliação da mineração de calcário da mina Mata do Ribeirão, no município de Prados (MG), foi delimitada uma área de influência para as cavernas encontradas.

A área de proteção das cavernas foi definida a partir de preceitos básicos para garantir a dinâmica evolutiva das cavernas e do ecossistema subterrâneo, preservar a integridade estrutural das feições cársticas, assim como o contexto natural e cênico do meio externo, conforme preconizado pelo CECAV-ICMBio.

Atendendo aos preceitos citados acima, a definição da área de influência das cavernas considerou estudos realizados acerca da microbacia, área de infiltração, processos espeleogenéticos, integridade estrutural e avaliação sismográfica. Como resultado do cruzamento de todas estas informações Timo et al (2016) definiu a seguinte área de influência (Figura 6).



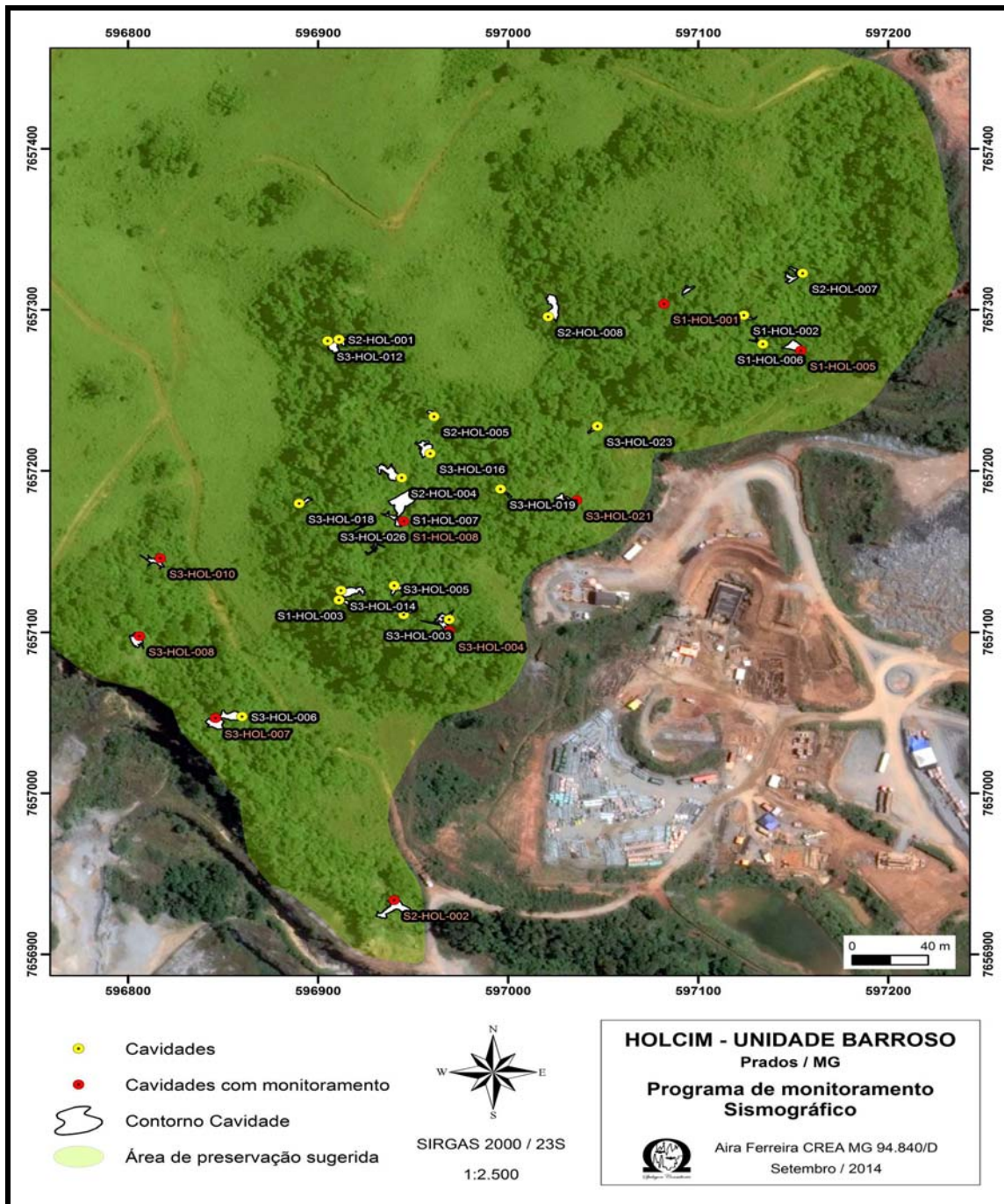


Figura 3 - Delimitação do entorno protetivo e programa de monitoramento sismográfico proposto das cavernas existentes no entorno do empreendimento. Conforme Timo et al (2016).

Para o avanço da frente de lavra do calcário as bancadas são perfuradas com a utilização de perfuratrizes pneumáticas (fig. 04), os furos são preenchidos com explosivos (Fig. 05), de acordo com as características do plano de fogo programado (Fig. 06), a carga de explosivos confinadas nos furos, durante a detonação, produz altas pressões e temperaturas em seu processo termodinâmico de em gases e expansão (Fig. 7)



Figura 4 - Perfuratriz pneumática – fonte internet acessado em 05/12/2016.



Figura 5 - Carregamento dos furos com explosivos - fonte internet acessado em 05/12/2016.



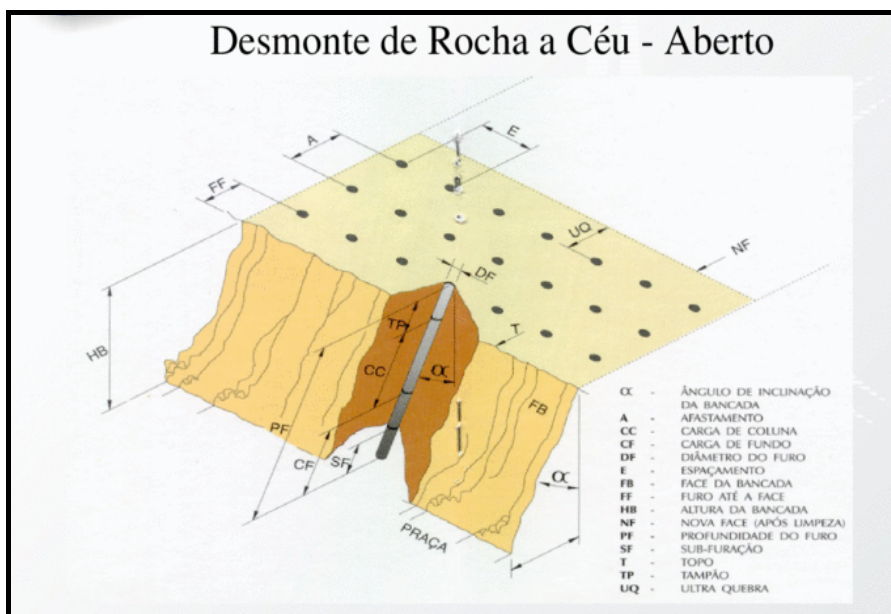


Figura 6 - Elementos do plano de fogo de uma detonação - fonte internet acessado em 05/12/2016.



Figura 7 - Detalhe de uma detonação - fonte internet acessado em 05/12/2016.

### 3 - MATERIAIS E MÉTODOS

O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é o subtropical moderado úmido, também chamado tropical de altitude (Silva et al., 2004). A região possui temperatura média variando entre 22° e 15°C, duas estações bem definidas (verão quente e úmido e inverno frio e seco); precipitação média anual de 1.337mm; estação seca de abril a setembro e chuvosa de outubro a março (Dias, 2009).

A área de estudo está inserida na Bacia Hidrográfica do Rio Grande, na sub-bacia do Rio das Mortes, cujas nascentes encontram-se a cerca de 40 km a leste de Barroso, na Serra da Mantiqueira.

Segundo Saadi (1991), a área de estudo se localiza no Planalto de Madre de Deus de Minas. No município de Barroso (MG) as cotas altimétricas variam de cerca de 900 metros, junto às margens do Rio das Mortes, até cerca de 1.100 metros nos pontos mais

elevados a sul e leste da área. A leste da cidade ocorrem escarpas de rocha granito-gnáissica, que constituem encostas íngremes. Ao sul, as encostas estão instaladas em xistos e se elevam de forma marcante, exibindo um relevo acidentado. As áreas cársticas aparecem como faixas rebaixadas com ondulações suaves.

A cidade de Barroso e suas redondezas estão inseridas em um contexto geológico onde o embasamento é constituído de granitóides e gnaisses arqueanos. Tal embasamento está sotoposto a rochas metassedimentares proterozóicas do Grupo São João Del Rei, sendo a Formação Barroso de composição carbonática (calcários) e idade proterozóica (Ebert, 1967 apud Dias, 2009).

Os calcários da formação Barroso se estendem de oeste para leste, abrangendo tanto o município de Barroso como o município de São João Del Rei, onde as reservas calcárias são estimadas em torno de 170 milhões de toneladas. (Fonseca et al., 1979, apud Baptista et al., 1984).

Segundo o mapa de potencialidade de ocorrência de cavernas na região (Fig. 8), elaborado pelo Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas-CECAV (Jansen, 2009), toda a área de estudo apresenta potencial muito alto de ocorrência de cavernas.

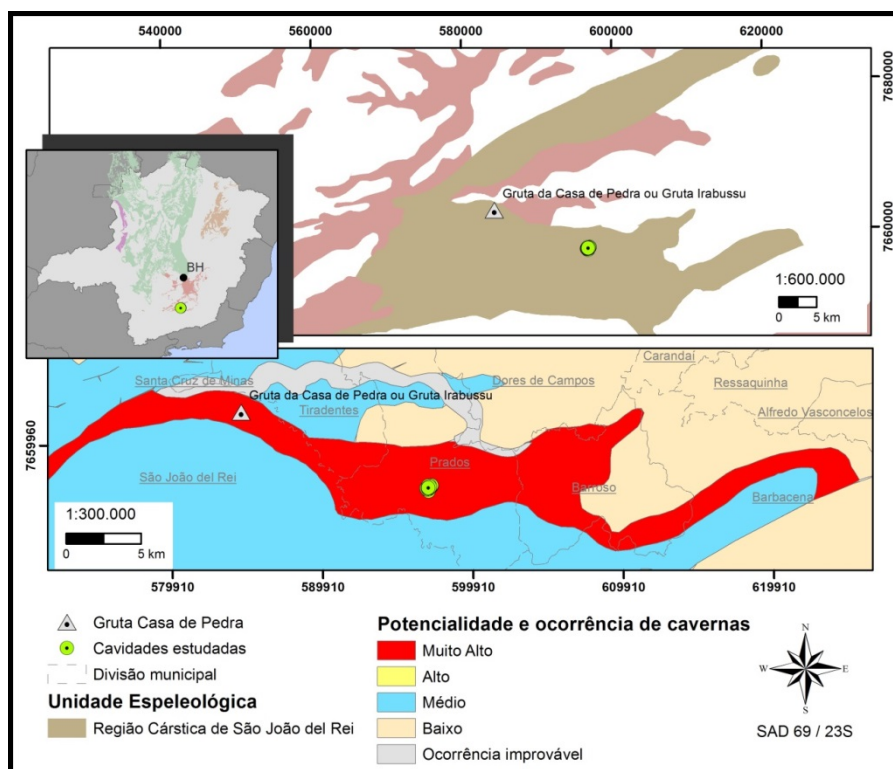


Figura 8 - Unidades Espeleológicas e Potencialidade de ocorrência de cavernas na área de estudo (fonte: base de dados CECAV).

O presente trabalho tem o intuito de avaliar os impactos físicos que as ondas de vibração geradas durante o processo de detonação para avanço das frentes de lavras possam estar causando no ambiente cavernícola local.

Para esse acompanhamento foi proposto um programa de monitoramento sismográfico, trimestral, com avaliação em 09 cavidades pré definidas com o propósito de criar uma curva de atenuação podendo assim estabelecer a carga máxima por espera a ser adotada em função da distância da frente de lavra até as feições cársticas, garantindo assim a integridade estrutural das feições cársticas.

As operações de desmonte com explosivos na frente de lavra, objeto deste estudo de monitoramento sismográfico, ocorreram nos dias 8 de março, 2 de junho e 2 de setembro de 2016 na Mina Mata do Ribeirão, município de Prados (MG).

Para isso, foram utilizados os seguintes equipamentos:

- Aparelho GPS marca GARMIN, modelo Etrex Vista HCx (Figura 9);



Figura 9 - GPS Garmim – Etrex Vista HCx.

- Sismógrafos de engenharia da marca GeoSonicos com número de série 8819 e 8963 (Figura 10) e



Figura 10 - Equipamento da GeoSonic. Fonte: GeoSonic.

- Sismógrafos da marca InstanTEL com número de série 5295, 5509, BE 16550, BE 16551, BE 16552, BE 17396, BE 21372, BE 21398 e BE 21399 (Figura 11).



Figura 11 - Equipamento da InstanTEL. - Fonte: InstanTEL.



### **3.1 - GEOSONICS**

O equipamento é um sismógrafo de engenharia digital, compostos de um corpo receptor que capta, processa e registra os sinais recebidos, além de um geofone externo com três canais de registro sísmicos, dispostos tri ortogonalmente; e um microfone para registro de sobrepressão atmosférica. O aparelho é dotado de resposta de frequência de 2 a 250 Hz e capacidade de processamento padrão de 2000 amostras por segundo por canal. As amplitudes limites de registro de velocidade de partícula variam entre 0,254 mm/s a 130 mm/s, com resolução de 0,06 mm/s. Dispõem de microfone para registro de sobrepressões atmosféricas em amplitudes que variam de 78 a 142 dB.

### **3.2 - INSTANTEL**

O equipamento é um sismógrafo de engenharia digital, compostos de um corpo receptor que capta, processa e registra os sinais recebidos, além de um geofone externo com três canais de registro sísmicos, dispostos tri ortogonalmente; e um microfone para registro de sobrepressão atmosférica. O aparelho é dotado de resposta de frequência de 2 a 250 Hz e capacidade de processamento padrão de 2000 amostras por segundo por canal. As amplitudes limites de registro de velocidade de partícula variam entre 0,127 mm/s a 254 mm/s, com resolução de 0,127 mm/s. Dispõem de microfone para registro de sobrepressões atmosféricas em amplitudes que variam de 100 a 148 dB. Todas as especificações de ambos aparelhos atendem ou superam as especificações mínimas necessárias recomendadas pela norma NBR 9653 para o monitoramento de ruídos e vibrações provocados pelo uso de explosivos em ambientes urbanos.

Foi utilizado nas três campanhas de monitoramento um total de onze sismógrafos de engenharia sendo que para cada dia de monitoramento foram utilizados nove sismógrafos sendo instalado um equipamento para cada ponto de medição.

### **3.3 - PARÂMETROS DO SISTEMA**

Os sismógrafos utilizados no monitoramento funcionaram com a seguinte configuração:

- Sensor de Ativação: Geofone ou Microfone;
- Método de Registro: Contínuo;
- Janela Temporal para Registro: 5s;
- *Trigger Source* – Geo: 0,445 mm/s;
- *Trigger Source* – Mic: 112dB(L).

### **3.4 - PROCEDIMENTOS ADOTADOS**

#### **3.4.1 - FASE 1 – LABORATÓRIO:**

- O *setup* do equipamento foi preparado no laboratório com a inclusão das configurações para o evento específico, além dos dados da empresa. Este *setup* foi realizado com a utilização do *software* das empresas fabricantes dos equipamentos.

#### **3.4.2 - FASE 2 – CAMPO:**

- Foram registradas as referências dos locais de instalação e de detonação para cada dia de monitoramento, bem como as coordenadas UTM, através de um GPS de mão, da marca GARMIN;

- O aparelho foi instalado no campo de acordo com o posicionamento da cavidade a ser avaliada, sendo o geofone e microfone orientado para o local da detonação;
- Após o desmonte, o técnico confere o registro do evento e recolhe o equipamento para transferência dos dados em laboratório.

Durante a instalação do sismógrafo, foi anotado no registro de campo do operador uma descrição sumária de cada ponto de medição.

A medição foi realizada através da fixação do geofone com gesso diretamente nas estruturas das cavidades, buscando desta forma, avaliar os níveis de vibrações a que estas estruturas estão sendo submetidas.

#### 4 - APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Para monitorar os efeitos das vibrações geradas nos processos de detonações para avanço da frente de lavra nas cavidades cársticas, estão sendo realizados monitoramentos trimestrais em 9 cavidades pré definidas.

Foram realizados 3 campanhas de monitoramentos sismográficos, nos dias 8 de março, 2 de junho e 2 de setembro de 2016, onde são apresentadas algumas informações de cada ponto de monitoramento, como as coordenadas UTM e cota altimétrica (Tab. 1), além de localização dos pontos de desmonte e dos nove pontos de monitoramento sismográfico (Fig. 12).

Tabela 1: Informações sobre os pontos de monitoramento

<b>Referência</b>	<b>Coordenada</b>	<b>Altitude</b>
S1-HOL-001	597089 / 7657363	1023
S1-HOL-005	597199 / 7657317	1003
S1-HOL-008	596993 / 7657211	1001
S2-HOL-002	597089 / 7657363	971
S3-HOL-004	597021 / 7657146	984
S3-HOL-007	596908 / 7657087	994
S3-HOL-008	596871 / 7657142	995
S3-HOL-010	596865 / 7657190	997
S3-HOL-021	597076 / 7657226	994



Figura 12 - Pontos de monitoramento e de detonação sobre imagem orbital do Google Earth (Relatório de Monitoramento Ambiental da Consultoria GEOPRIME, inédito).

## 5 - RESUMO DOS REGISTROS OBTIDOS NO MONITORAMENTO SISMOGRÁFICO

Dos 27 registros obtidos durante as três campanhas de monitoramento sísmográfico, 15 tiveram respostas pelo geofone, 10 pelo microfone e 02 apresentaram problemas, esses resultados estão descritos nas tabelas de 2 a 4.

Tabela 2 - Registros obtidos na campanha sísmográfica realizada em 08/03/2016.

DATA	EVENTO									
	08/03/16	08/03/16	08/03/16	08/03/16	08/03/16	08/03/16	08/03/16	08/03/16	08/03/16	08/03/16
Cavidade	S1-HOL-001	S1-HOL-005	S1-HOL-008	S2-HOL-002	S3-HOL-004	S3-HOL-007	S3-HOL-008	S3-HOL-010	S3-HOL-021	S3-HOL-021
Sismógrafo (Nº. Série do aparelho)	BE16550	BE 21399	8963	5295	8819	5509	BE 16552	BE 16551	BE 21398	BE 21398
CME (Kg)	35,71	35,71	35,71	35,71	35,71	35,71	35,71	35,71	35,71	35,71
Cota (m)	1023	1003	1001	971	984	994	995	997	994	994
Distância (m)	325	230	465	325	475	600	605	590	385	385
Fonte de gatilho	Mic	Geo	Mic	Mic	Mic	Mic	Mic	Mic	Mic	xxx
Registro no aparelho	11:32	11:32	11:33	11:32	11:38	11:32	11:32	11:32	11:32	xxx
PPV – Transversal (mm/s)	0,0794	0,365	0,06	0,127	0,13	0,254	0,0794	0,0635	xxx	xxx
Frequência – Transversal (Hz)	57	39	20,0	14	8,6	2,0	20	> 100	xxx	xxx
PPV – Vertical (mm/s)	0,0952	0,460	0,06	0,0635	0,13	0,127	0,0635	0,0635	xxx	xxx
Frequência – Vertical (Hz)	10	12	26,3	N/A	55,6	N/A	32	> 100	xxx	xxx
PPV – Longitudinal (mm/s)	0,0476	0,365	0,13	0,0635	0,13	0,0635	0,0635	0,0635	xxx	xxx
Frequência – Longitudinal (Hz)	> 100	17	41,7	N/A	50,0	N/A	57	85	xxx	xxx
Resultante (mm/s)	0,102	0,498	0,13	0,159	0,13	0,286	0,0825	0,0809	xxx	xxx
Pressão Acústica Linear (dB(L))	123,7	119,8	117	118,1	119	116,9	113,8	113,3	xxx	xxx

PPV: Velocidade de Partícula de Pico  
 CME: Carga Máxima por Espera  
 xxx: Erro de leitura/gravação

Tabela 3 - Registros obtidos na campanha sísmográfica realizada em 02/06/2016.

DATA	EVENTO								
	02/06/16	02/06/16	02/06/16	02/06/16	02/06/16	02/06/16	02/06/16	02/06/16	02/06/16
Cavidade	S1-HOL-001	S1-HOL-005	S1-HOL-008	S2-HOL-002	S3-HOL-004	S3-HOL-007	S3-HOL-008	S3-HOL-010	S3-HOL-021
Sismógrafo (Nº. Série do aparelho)	BE 21399	BE 21398	5509	8819	5295	BE 16552	BE 16550	BE 16551	BE 17396
CME (Kg)	56,14	56,14	56,14	56,14	56,14	56,14	56,14	56,14	56,14
Cota (m)	1023	1003	1001	971	984	994	995	997	994
Distância (m)	366	265	494	618	496	623	633	622	411
Fonte de gatilho	Geo	Geo	Geo	Mic	Geo	Geo	Mic	Geo	Geo
Registro no aparelho	11:13	11:13	11:13	11:13	11:13	11:13	11:13	11:13	11:13
PPV – Transversal (mm/s)	1,89	2,54	3,43	0,06	0,699	0,444	0,238	0,365	0,952
Frequência – Transversal (Hz)	> 100	47	N/A	83,3	30	11	16	> 100	10
PPV – Vertical (mm/s)	1,08	2,16	1,97	0,19	0,953	0,317	0,460	0,810	0,841
Frequência – Vertical (Hz)	> 100	85	N/A	5,4	47	15	> 100	73	14
PPV – Longitudinal (mm/s)	0,841	1,29	2,03	0,13	0,826	0,365	0,429	0,381	0,698
Frequência – Longitudinal (Hz)	> 100	57	N/A	22,7	32	32	26	57	13
Resultante (mm/s)	2,03	3,26	3,71	0,19	1,00	0,479	0,574	0,861	1,06
Pressão Acústica Linear (dB(L))	129	126,5	133,4	126	126,8	124,7	124,9	122,3	127,5

PPV: Velocidade de Partícula de Pico  
CME: Carga Máxima por Espera

Tabela 4 - Registros obtidos na campanha sismográfica realizada em 02/09/2016.

DATA	EVENTO								
	02/09/16	02/09/16	02/09/16	02/09/16	02/09/16	02/09/16	02/09/16	02/09/16	02/09/16
Cavidade	S1-HOL-001	S1-HOL-005	S1-HOL-008	S2-HOL-002	S3-HOL-004	S3-HOL-007	S3-HOL-008	S3-HOL-010	S3-HOL-021
Sismógrafo (Nº. Série do aparelho)	BE 21372	BE 17396	5509	8819	5295	BE 16550	BE 16551	BE 16552	BE 21398
CME (Kg)	56,59	56,59	56,59	56,59	56,59	56,59	56,59	56,59	56,59
Cota (m)	1023	1003	1001	971	984	994	995	997	994
Distância (m)	328	222	450	574	450	579	589	578	367
Fonte de gatilho	Geo	Geo	Geo	Geo	Geo	Mic	Geo	Geo	Geo
Registro no aparelho	11:24	11:24	11:25	11:25	11:25	11:24	11:24	11:24	11:24
PPV – Transversal (mm/s)	0,730	2,461	---	0,32	0,699	0,079	0,0635	0,302	0,651
Frequência – Transversal (Hz)	> 100	43	---	41,7	32	85	43	85	22
PPV – Vertical (mm/s)	1,048	1,918	---	0,51	1,080	0,095	0,381	0,524	0,857
Frequência – Vertical (Hz)	> 100	57	---	31,3	34	5,3	43	64	20
PPV – Longitudinal (mm/s)	1,270	1,143	---	0,44	0,762	0,079	0,444	0,333	0,587
Frequência – Longitudinal (Hz)	> 100	47	---	25	32	73	47	85	13
Resultante (mm/s)	1,438	2,741	---	0,64	1,143	0,106	0,762	0,594	0,985
Pressão Acústica Linear (dB(L))	126,4	126,4	128	120	127,6	120,3	118,7	117,2	120,2

PPV: Velocidade de Partícula de Pico  
CME: Carga Máxima por Espera  
--- Erro no sensor

Para cada evento registrado no sismógrafo é emitido um relatório com as interpretações de ondas de vibração (Longitudinal, Vertical e Transversal) conforme figura 13.

Data/Time Vert at 11:24:58 Setembro 2, 2016  
 Gatilho de disparo Geo: 0.440 mm/s, Mic: 112 dB(L)  
 Escala Geo: 31.7 mm/s  
 Tempo de Gravação 6.75 seg (Automatico=5Seg) at 1024 sps  
 Notas  
 Local: Barroso - MG  
 Cliente: LafargeHolcim - Unidade Barroso  
 Empresa: Geoprime Engenharia e Meio Ambiente  
 Operador: Monitoramento Ambiental

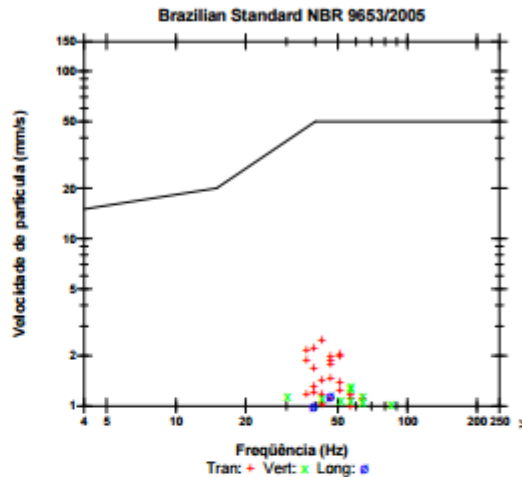
Numero do Serial BE17396 V 10.72-1.1 Minimate Blaster  
 Nivel da Bateria 6.3 Volts  
 Unit Calibration Outubro 10, 2014 by Geoinstruments  
 Nome do arquivo S396GJ19.1M0  
 Postar notas do evento  
 Tecnicos: Douglas Martins  
 Medicao: Ponto S1 - HCL - 005.  
 Coordenada do fogo: 23K0597415 / UTM7657364.  
 Coordenada do sismografo: 23K0597199/ UTM7657317.

**Extended Notes**  
 Monitoramento de ruido e vibrações gerados por desmonte de rocha com uso de explosivos.

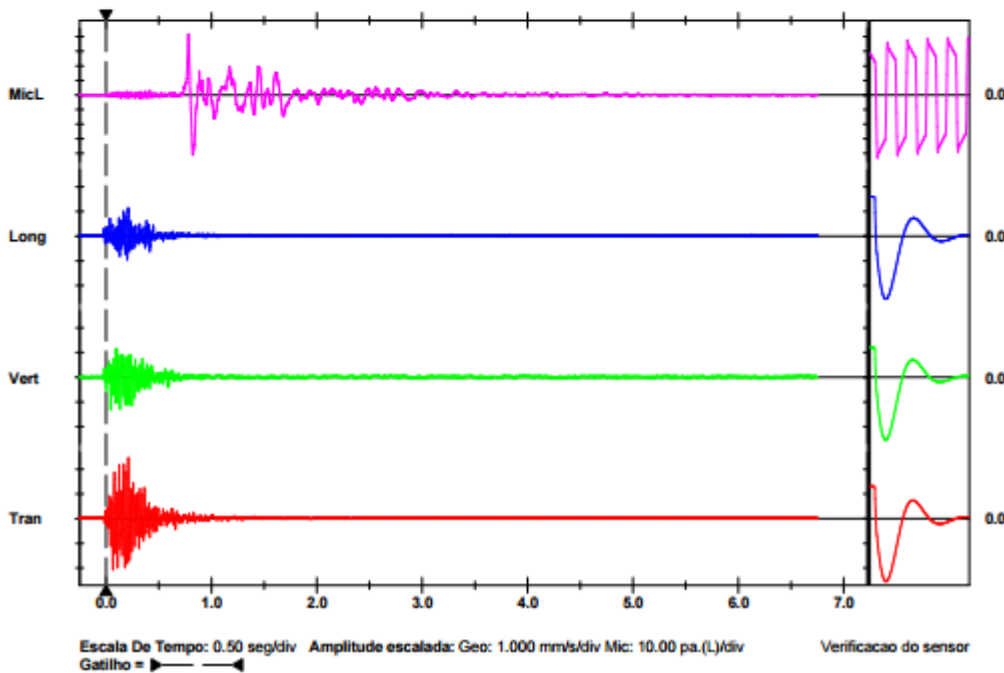
**Microfone**  
 PSPL 126.4 dB(L) 41.8 pa.(L) at 0.783 seg  
 ZC Freq 6.3 Hz  
 Teste do canal Passado (Freq = 20.1Hz Amp = 540mv)

	Tran	Vert	Long	
PPV	2.46	1.32	1.14	mm/s
ZC Freq	43	57	47	Hz
Time (Rel. to Trig)	0.212	0.043	0.210	seg
Pico de aceleracao	0.0895	0.0630	0.0563	g
Pico do deslocamento	0.00919	0.00543	0.00436	mm
Verificacao do sensor	Passado	Passado	Passado	
Frequency	7.4	7.5	7.4	Hz
Overswing Ratio	3.5	3.6	3.5	

Sumario do Pico de Vetor 2.74 mm/s at 0.212 seg



Para freq. < 4 Hz, deslocamento de pico de no máximo 0,6 mm (de zero a pico)



Escala De Tempo: 0.50 seg/div Amplitude escalada: Geo: 1.000 mm/s/div Mic: 10.00 pa.(L)/div  
 Gatilho = <math>\blacktriangleleft</math>

Imprimido: Setembro 8, 2016 (V 10.10 - 10.10)

Format Copyrighted 1996-2007 Instantel a division of VeriChip Corporation

Figura 13 - Modelo de sismograma emitido para cada monitoramento sismográfico.

Os registros obtidos nas três campanhas foram comparados com a NBR 9653 – Guia para avaliação dos efeitos provocados pelo uso de explosivos nas minerações em áreas urbanas de 31/10/2005.

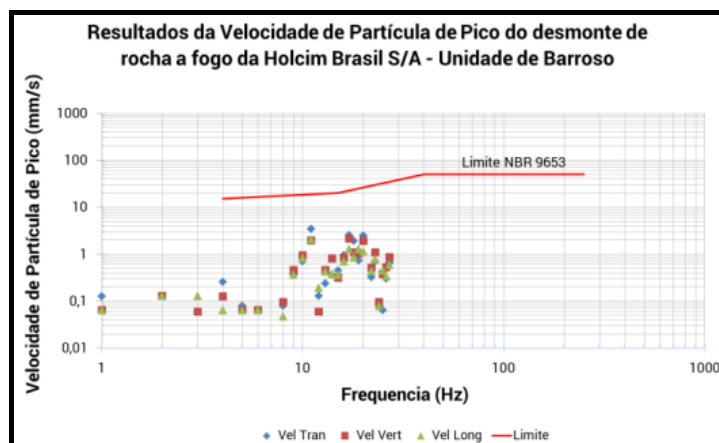


Figura 14 - Registros de velocidade de partícula encontrados nas campanhas sismográficas comparados com o limite estipulado pela NBR 9653.

Diante dos dados levantados propomos a construção uma curva de atenuação que servirá para estabelecer a carga máxima por espera a ser adotada em função da distância da frente de lavra até a feição cárstica mais próxima permitindo assim assegurar a integridade estrutural das feições cársticas em relação aos efeitos das vibrações geradas no processo de detonação das frentes de lavra de calcário na Mina Mata do Ribeirão no município de Prados.

## 6 - CURVA DE ATENUAÇÃO

Assim, uma vez conhecidas a distância da frente de detonação ao ponto de interesse e a velocidade de vibração máxima a ser respeitada, pode-se estimar a carga máxima a ser detonada por retardo, ou seja, a carga máxima por espera.

Ao possibilitar a previsão dos níveis de vibração a ser atingida nos pontos considerados sensíveis a partir da carga máxima por espera, a equação permite adequações ao plano de fogo, dentro de critérios técnicos e econômicos, de modo a serem respeitadas as limitações estabelecidas pelas normas vigentes.

A equação serve, assim, como referencial à adoção de medidas preventivas tanto no que se refere à manutenção da integridade estrutural dos locais a que se deseja preservar como à redução de possíveis incômodos causados à população vizinha das áreas de mineração onde são realizados desmontes de rocha.

Os dados para a elaboração da curva de atenuação da onda foi realizada a partir da utilização de 27 medições sismográficas realizadas em três campanhas de monitoramento (março, junho e setembro de 2016) com a utilização simultânea de 9 sismógrafos de engenharia. De forma a se elaborar uma curva mais fiel da propagação das ondas vibratórias dos desmontes no maciço rochoso, os dados foram filtrados e analisados apenas aqueles que tiveram resposta da detonação em si. Desse modo, foram analisados apenas os registros que foram iniciados pelo gatilho do geofone, registros estes que possuem o registro completo da onda vibratória da detonação. Ainda, em virtude da ocorrência de problemas em duas medições, estas foram descartadas na elaboração da curva de atenuação. A equação, portanto foi elaborada com base em 15 medições.

A equação de atenuação foi obtida, por meio do uso do *software Blastware* fornecido pela fabricante dos sismógrafos Instantel. Os dados coletados pelo sismógrafo são alimentados no programa (resultados da velocidade da partícula de pico das



componentes vertical, horizontal e transversal e da sobrepressão atmosférica) e com os dados de dados de carga por espera e distância entre os pontos de detonação e monitoramento é possível realizar o cálculo da distancia reduzida.

Estes cálculos foram realizados no módulo *Scaled Distance* que é utilizado para se obter o gráfico logarítmico da distância escalonada versus o logarítmo da velocidade de pico máximo das três componentes ortogonais. Juntamente com a equação, são fornecidos os parâmetros estatísticos do ajuste (coeficiente de determinação, desvio padrão e confiança estatística).

A variação dos resultados é justificada pela mudança da posição do banco e das características da detonação, como por exemplo, o número de minas e a quantidade de explosivo utilizada. Outros fatores que podem interferir na intensidade de propagação das ondas é a energia liberada pelos explosivos, o grau de confinamento do explosivo, geometria do plano de fogo, tipo de explosivo, distância, características intrínsecas do meio, tipo de onda, frequência, ângulo de incidência com interface entre meios distintos, discontinuidades existentes entre a fonte e o ponto de monitoramento dentre outros fatores.

Como resultado, o software apresenta a equação de Regressão Linear obtida do modelo Quadrático (Figura 15) e Cúbico (Figura 16), a partir dos dados obtidos das campanhas de monitoramento sismográfico.

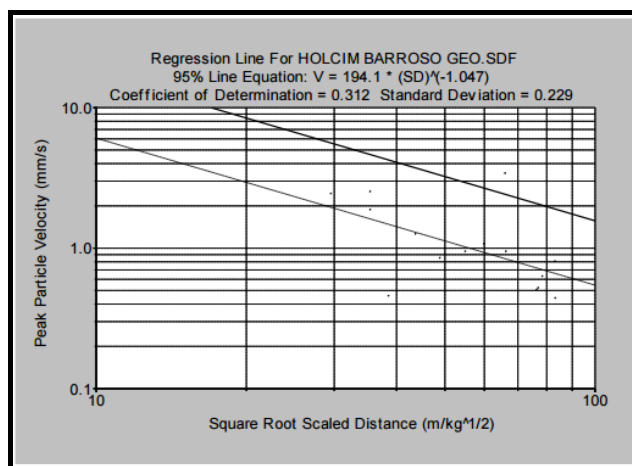


Figura 15 - Gráfico de regressão linear segundo critério quadrático

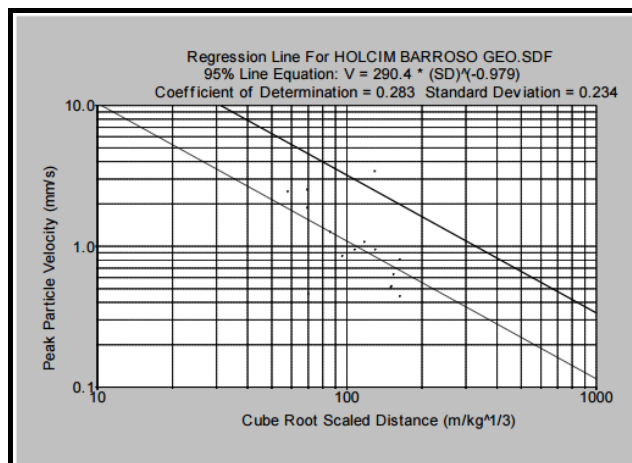


Figura 16 - Gráfico de regressão linear segundo critério cúbico

Realizando uma retro análise de forma a definir o modelo de distância escalonada (DE) a ser utilizado, de maneira a evitar possíveis danos nas estruturas das cavidades, foram realizados os cálculos apresentados a seguir.

Neste estudo, para tornar os cálculos mais conservadores, utilizou-se o maior valor de carga por espera dentre todas as detonações que foram monitoradas e arredondou-se este valor para cima. Neste caso, sendo o maior valor de carga por espera utilizada de 56,59 kg de explosivos, na detonação do dia 02 de setembro de 2016, foi adotada, assim, a razão de carga por espera de 60 kg de explosivo.

### 6.1 - EQUAÇÃO DA ATENUAÇÃO PARA A DE SEGUNDO O MODELO QUADRÁTICO.

A velocidade da onda de vibração (V) para este modelo, produzida pela detonação, é expressa da seguinte maneira:

$$V = 194,1 * (DE)^{-1,047}$$

Onde,

$$DE = \frac{d}{Q^{\frac{1}{2}}}$$

#### Memória de Cálculo:

**Distância de 200 metros:**

$$\text{Velocidade} = 194,1 \times \left( \frac{200}{60^{\frac{1}{2}}} \right)^{-1,047} \quad V = 6,45 \text{ mm/s.}$$

Foi utilizada no cálculo, a distância de 200 m (considerando como distância mínima entre o ponto de detonação e a cavidade localizada mais próxima – S1- HOL-005) e o valor de carga máxima por retardo de 60 kg.

Desta forma, utilizando os dados apresentados na fórmula acima, obtém-se uma velocidade de partícula de pico esperada para o ponto mais próximo da área de lavra de 6,45 mm/s, dentro dos limites estabelecidos pela NBR ABNT 9653. Esta medida mostrou-se adequada como garantia para a não ocorrência de danos estruturais às cavidades cársticas adjacentes.

### 6.2 - EQUAÇÃO DA ATENUAÇÃO PARA A DE SEGUNDO O MODELO CÚBICO.

A velocidade da onda de vibração (V) para este modelo, produzida pela detonação, é expressa da seguinte maneira:



$$V = 290,4 * (DE)^{-0,979}$$

Onde,

$$DE = \frac{d}{Q^{\frac{1}{3}}}$$

#### **Memória de Cálculo:**

##### **Distância de 200 metros:**

$$\text{Velocidade} = 290,4 \times \left( \frac{200}{60^{\frac{1}{3}}} \right)^{-0,979} \quad V = 6,17 \text{ mm/s.}$$

Foi utilizada no cálculo, a distância de 200 m (considerando como distância mínima entre o ponto de detonação e a cavidade localizada mais próxima – S1- HOL-005) e o valor de carga máxima por retardo de 60 kg. Desta forma, utilizando os dados apresentados na fórmula acima, obtém-se uma velocidade de partícula de pico esperada para o ponto mais próximo da área de lavra de 6,17 mm/s, dentro dos limites estabelecidos pela NBR ABNT 9653. Esta medida mostrou-se adequada como garantia para a não ocorrência de danos estruturais às cavidades cársticas adjacentes, segundo o modelo cúbico.

De acordo com os cálculos determinados pelas equações da curva de atenuação, para que ocorram vibrações que danifiquem estruturalmente as cavidades cársticas adjacentes à área de ampliação de lavra da Mina Mata do Ribeirão, recomenda-se que seja utilizado o limite de 60 kg como carga máxima por retardo (carga por espera), considerando a distância mínima de 200m da cavidade mais próxima para uma velocidade de partícula de pico esperada de 6,45 mm/s, tomando como referência o modelo quadrático de DE.

## **7 - CONSIDERAÇÕES FINAIS**

A partir das informações constantes no trabalho, pode-se apontar as seguintes considerações:

- Levando-se em consideração a norma específica da ABNT (NBR 9653), os valores praticados no plano de fogo das detonações estão adequados em relação à distância do avanço da frente de lavra;
- A delimitação da área de proteção das cavidades em 200m, mostrou-se eficaz quanto à manutenção da integridade estrutural das cavidades cársticas monitoradas;
- O modelo quadrático de DE mostrou-se o mais adequado para cálculo da velocidade partícula da onda de vibração gerada durante as detonações realizadas para o avanço da frente de lavra;
- Dessa forma, tomando como referência os parâmetros utilizados, as cavidades cársticas monitoradas não apresentaram danos estruturais relativos às detonações realizadas durante o período de investigação.

## 8- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BAPTISTA, M.B.; BRAUN, O.P.G.; CAMPOS, D.A. (orgs.). *Léxico Estratigráfico do Brasil*. Brasília: DNPM/CPRM, 1984. 560 p.

CECAV. *Orientações básicas aos órgãos licenciadores de meio ambiente para a realização de estudos espeleológicos*. Brasília: CECV/ICMBio. 2009. Disponível em: <[http://www4.icmbio.gov.br/cecav/index.php?id\\_menu=256](http://www4.icmbio.gov.br/cecav/index.php?id_menu=256)>. Acesso em: 11/2016.

CECAV. *Procedimentos Associados à Coleta de Dados Relativos à Localização de Cavidades*. Disponível em:

<[http://www.icmbio.gov.br/cecav/images/download/Rotina%20de%20procedimentos%20associados%20%C3%A0%20coleta%20de%20dados%20relativos%20%C3%A0%20localiza%C3%A7%C3%A3o%20de%20cavidades%20Jun\\_2012.pdf](http://www.icmbio.gov.br/cecav/images/download/Rotina%20de%20procedimentos%20associados%20%C3%A0%20coleta%20de%20dados%20relativos%20%C3%A0%20localiza%C3%A7%C3%A3o%20de%20cavidades%20Jun_2012.pdf)>. Acesso em: 11/2016.

DIAS, F. S. *Estudo do Aquífero Carbonático da Cidade de Barroso (MG): uma Contribuição à Gestão do Manancial Subterrâneo*. 84p. Tese de Doutorado - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 2009.

GEOPRIME. *Relatório de Monitoramento Ambiental – Ruídos e Vibrações – Março, Junho e Setembro de 2016 – Holcim Brasil S/A*, inédito.

SAADI, A. *Ensaio sobre a Morfotectônica de Minas Gerais*. 1991. 300p. Tese para admissão ao cargo de Professor Titular - UFMG/IGC-Depto Geografia, Belo Horizonte, 1991.

SENA, I.S.; ANDRADE, J.M.; ROCHA, L.C.; FIGUEIREDO, M.A. Considerações Sobre a Geologia e História da Gruta Casa da Pedra, São João Del-Rei – MG. *Caderno de Geografia*, v.21, n.36, 2011.

SPELAYON CONSULTORIA. *Estudo de delimitação da área de influência de cavidades naturais subterrâneas- Agosto de 2014 – Holcim Brasil S/A*.

TIMO, M. B. et al. Levantamento do patrimônio espeleológico nas minas Fazenda Invernada e Mata do Ribeirão, Prados (MG). **Rev. Bras. Espeleologia**, v.1, n.6, p.18-35, 2016.