



ORIENTAÇÕES BÁSICAS A REALIZAÇÃO DE ESTUDOS ESPELEOLÓGICOS

1. Essas orientações estabelecem diretrizes básicas para a realização do levantamento espeleológico da área de influência de empreendimentos potencialmente lesivos ao Patrimônio Espeleológico, levando-se em consideração o princípio da precaução.
2. A prospecção exocárstica deverá ser realizada em toda a extensão da área afetada pelo empreendimento, para avaliar a ocorrência ou não de cavidades.
3. Os caminhamentos realizados para a prospecção devem contemplar todas as feições geomorfológicas típicas associadas às cavernas (geomorfologia cárstica), além de serem registrados e comprovados por meio das rotas armazenadas no GPS.
4. Caso ocorram cavidades nessas áreas, elas deverão ser identificadas, com suas características básicas descritas:
 - Coordenadas geográficas das cavidades existentes obtidos com equipamento de GPS, em graus decimais, datum WGS 84 e a partir da captura de sinais advindos de um mínimo de 4 unidades bem distribuídas na constelação dos satélites, no ponto onde localiza-se as bases topográficas “zero” das entradas da cavidade.
 - Denominação local;
 - Município, nome da fazenda ou da região em que se insere;
 - Dados de identificação do proprietário da área onde a caverna está inserida;
 - Altitude;
 - Topografia detalhada da cavidade;
 - Projeção horizontal da área de influência (mínimo 250 metros);
 - Descrição das entradas e formas de acessos;
 - Classificação da caverna quanto aos aspectos hidrológicos e morfológicos;
 - Registro fotográfico.
5. Para a realização do Diagnóstico Ambiental da área de ocorrência de cavernas deverão ser realizados estudos temáticos para os meios bióticos e abióticos como:
 - Caracterização das unidades estratigráficas onde se insere a caverna;
 - Caracterização estrutural, com referência e identificação da ocorrência de falhas, dobras, fraturas e planos de acamamento;
 - Sedimentologia clástica e química da rocha encaixante;

- Identificação de áreas de risco geotécnico, com ênfase nas zonas de ocorrência de blocos abatidos e tetos ou paredes com rachaduras (locais passíveis de monitoramento).
- Identificação de processos erosivos nas áreas próximas ao patrimônio espeleológico e que apresentem potencial de risco à sua integridade;
- Descrição e caracterização dos espeleotemas (frágeis, raros) e demais depósitos sedimentares (aluviais e coluviais);
- Caracterização das feições exocársticas ou pseudo-cársticas;
- Descrição da dinâmica dos processos geomorfológicos ativos na cavidade;
- Caracterização da morfologia endocárstica.
- Descrição da área de ocorrência, tipo, geometria, litologia, estrutura geológica, propriedade física, hidrodinâmica e outros aspectos do(s) aquífero(s);
- Caracterização das áreas e dos processos de recarga, circulação e descarga do(s) aquífero(s);
- Inventário dos pontos de absorção d'água;
- Indicação da direção dos fluxos das águas subterrâneas;
- Descrição e controle altimétrico dos corpos d'água, lago subterrâneo, sumidouro, surgência, ressurgência, com identificação de hipóteses de origem;
- Avaliação das relações existentes entre as águas subterrâneas e superficiais, assim como as de outros aquíferos;
- Identificação dos níveis de poluição e de prováveis fontes poluidoras (locais passíveis de monitoramento).
- Drenagens superficiais identificáveis (perene / intermitente);
- Levantamento de informações fluviométricas;
- Caracterização do sistema hidrodinâmico, identificando: as áreas com diferentes comportamentos frente às enchentes (risco de enchentes, elevação do nível de base).
- Caracterização físico-química e bacteriológica dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos, em cavernas utilizadas para turismo.
- Descrição e caracterização dos jazimentos e respectivos fósseis encontrados no interior e/ou na área de influência da caverna.
- Riscos potenciais à integridade dos fósseis ou jazimentos, principalmente, em relação às atividades hidrelétricas.
- Dados climáticos das áreas externas com dados históricos das estações mais próximas.
- Levantamento fisionômico e florístico na área de influência da caverna, com detalhamento às proximidades das entradas e clarabóias, dolinas.
- Levantamento qualitativo e quantitativo da fauna cavernícola considerando a sazonalidade climática, utilizando técnicas consagradas (busca ativa, puçá e covo);

- Levantamento da quiropterofauna, por amostragem, utilizando, no mínimo, rede de neblina;
- Identificação de espécies migratórias, ameaçadas, raras, endêmicas e nocivas ao ser humano;
- Caracterização das interações ecológicas da fauna cavernícola e desta com o ambiente externo.
- Na existência de uma ou mais comunidades na área de estudo que mantenha inter-relação com as cavidades naturais existentes, deverão ser levantados e analisados de forma integrada os seguintes estudos:
- Apresentar descrição dessa comunidade;
- Descrição das condições atuais de uso e ocupação do solo, das águas superficiais e subterrâneas;
- Descrição do potencial econômico, científico, educacional, turístico e/ou recreativo das cavidades;
- Descrição das manifestações culturais que ocorram nas proximidades e no interior da caverna como: cultos religiosos, vestígios de caça e pesca, visitação turística.
- Na existência de sítios arqueológicos na área de estudo, esses deverão ser caracterizados e descritos, indicando provável dinâmica deposicional, seguindo as normas e diretrizes do Instituto do Patrimônio Histórico e Artístico Nacional – IPHAN.

6. Como produto desse levantamento deverá ser apresentado, em escala de detalhe que permitam uma visualização:

- Mapa de Situação do Empreendimento contemplado no mínimo, os seguintes dados:
- Topografia detalhada da área do empreendimento com indicação das curvas de nível;
- Caminhamentos percorridos;
- Feições geológicas e geomorfológicas (cársticas e/ou pseudo-cársticas) como dolinas, sumidouros, ressurgências;
- Vias de acesso e os corpos d'água;
- Indícios arqueológicos e paleontológicos;
- Cota de máxima de inundação, localização da barragem, da câmara de carga e da casa de força, no caso de empreendimentos hidrelétricos;
- Linha do empreendimento e poligonal da área de estudo; no caso de empreendimentos lineares;
- Lavra atual, pit final, área do polígono do Decreto de Lavra; no caso de empreendimentos minerários;
- Área do receptivo e demais estruturas turísticas como banheiros, estacionamentos, restaurantes, entre outros.

Sismografia Aplicada ao Patrimônio Espeleológico

Contribuição Técnica à Análise de Estudos Ambientais



REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL

Presidente
MICHEL TEMER

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE

Ministro
JOSÉ SARNEY FILHO

Secretaria de Biodiversidade e Florestas
JOSÉ PEDRO DE OLIVEIRA COSTA

INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE

Presidente
RÔMULO JOSÉ FERNANDES BARRETO MELLO

Diretor de Pesquisa, Avaliação e Monitoramento da Biodiversidade
MARCELO MARCELINO DE OLIVEIRA

Ministério do Meio Ambiente
Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade
Diretoria de Pesquisa, Avaliação e Monitoramento da Biodiversidade
Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas

**SISMOGRAFIA APLICADA À
PROTEÇÃO DO PATRIMÔNIO ESPELEOLÓGICO**
Contribuição Técnica à Análise de Estudos Ambientais

ICMBIO

BRASÍLIA, DEZEMBRO DE 2016

©ICMBio 2016.

©dos Autores 2016.

Sismografia Aplicada à Proteção do Patrimônio Espeleológico: Contribuição Técnica à Análise de Estudos Ambientais

Coordenador do Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas do Instituto Chico Mendes

JOCY BRANDÃO CRUZ

AUTORES

Marcos Pinho - Consultor

André Afonso Ribeiro - Cecav

Cristiano Ferreira Fernandes - Cecav

Jocy Brandão Cruz - Cecav

José Carlos Ribeiro Reino - Cecav

REVISÃO TÉCNICA

André Afonso Ribeiro

Cristiano Ferreira Fernandes

José Carlos Ribeiro Reino

FOTO CAPA

Cristiano Ferreira Fernandes

Caverna Santana - Iporanga/SP

Catálogo na Fonte

Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade

I59s	Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade. Sismografia Aplicada à Proteção do Patrimônio Espeleológico: contribuição técnica à análise de estudos ambientais / Marcos Pinho. [et al.] – Brasília: ICMBio, 2016. 47 p. ; Il. Color. ISBN 978-85-61842-63-5
------	--

1. Sismografia. 2. Espeleologia. 3. Estudos ambientais. 4. Licenciamento ambiental. I. Ribeiro, André Afonso. II. Fernandes, Cristiano Ferreira. III. Cruz, Jocy Brandão. IV. Reino, José Carlos Ribeiro. V. Pinho, Marcos. VI. Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade – ICMBio. VII. Diretoria de Pesquisa, Avaliação e Monitoramento da Biodiversidade. VIII. Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas – Cecav. V. Título.

CDU(2.ed.)551.44

A reprodução total ou parcial desta obra é permitida desde que citada a fonte.

INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE

Diretoria de Pesquisa, Avaliação e Monitoramento da Biodiversidade

Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas

SAS QUADRA 05, LOTE 05, BLOCO H, 4º ANDAR

CEP 70070-914 - Brasília/DF - Tel: 61 3035-3467

<http://www.icmbio.gov.br/CECAV>

APRESENTAÇÃO

O documento intitulado “Sismografia Aplicada à Proteção do Patrimônio Espeleológico - Orientações Básicas à Realização de Estudos Ambientais” foi apresentado pelo CECAV com o objetivo de estabelecer diretrizes e apresentar orientações técnicas minimamente necessárias ao controle das emissões de vibração de atividades operacionais com vistas a subsidiar os termos de referência para a elaboração dos estudos no processo de licenciamento ambiental de empreendimentos capazes de afetar o patrimônio espeleológico ou a sua área de influência.

De maneira complementar, este documento se apresenta com o objetivo de prover os órgãos ambientais de subsídios técnicos que os auxiliem na análise dos respectivos estudos de sismografia associados a processos de licenciamento ambiental de empreendimentos.

O presente documento aborda os principais conceitos associados à fundamentação técnica de base associada a vibrações sísmicas no contexto de proteção de cavernas, bem como apresenta orientações quanto aos aspectos a serem avaliados no tocante à simulação projetional sismográfica e ao limite de operação das atividades emissoras de vibração.

Análise sucinta de laudos de sismografia é apresentada, identificando as principais informações para a avaliação de processos de controle de vibração em áreas de ocorrência de caverna. Considerações pertinentes ao critério de segurança estrutural aplicável a cavernas são também apresentadas, tendo como referência a legislação internacional.

Por fim, são trazidas as referências bibliográficas, para a eventual necessidade de interpretações mais aprofundadas sobre os temas abordados.

SUMÁRIO

APRESENTAÇÃO	4
1. FUNDAMENTAÇÃO TÉCNICA DE BASE.....	8
1.1. Elementos de Vibração	8
1.1.1. Amplitude de Vibração.....	8
1.1.2. Frequência de Vibração.....	9
1.2. Cenário do Patrimônio Espeleológico Sujeito a Vibrações	10
1.2.1. Fonte Emissora de Vibração	10
1.2.1.1. Espalhamento Esférico	10
1.2.1.2. Atributos do Terreno	11
1.2.2. Alvo Receptor de Vibração: Caverna.....	12
2. INFORMAÇÕES TÉCNICAS COMPLEMENTARES	13
2.1. Localização de Pontos de Monitoramento	13
2.2. Diferenças entre Monitoramento e Medição.....	13
2.3. Simulação Projecional e Verificação Operacional em Avaliação Sismográfica.....	14
3. CRITÉRIO DE SEGURANÇA DE CAVERNAS	16
4. ANÁLISE DE LAUDOS DE SISMOGRAFIA.....	19
4.1. Características de Medição.....	19
4.2. Resultados Pertinentes ao Processo de Controle Operacional	20
5. ANÁLISE DE ESTUDOS DE SISMOGRAFIA.....	22
5.1. Empreendimentos em Fase de Projeto Conceitual	22
I. Quanto à Identificação do Cenário de Interesse	23
II. Quanto à Caracterização Estrutural das Cavernas de Interesse	24
III. Quanto à Caracterização das Fontes Emissoras de Vibração	24
III.a. Atividade de Cravação de Estacas.....	25
III.b. Atividade de Compactação Dinâmica.....	26
III.c. Tráfego de Veículos	26
III.d. Tráfego Ferroviário.....	27
IV. Quanto à Caracterização da Vibração Emitida.....	28
V. Quanto ao Limite Operacional	28
VI. Quanto à Definição dos Elementos de Controle / Monitoramento Sismográfico	29
5.2. Fase Associada à Operação de Empreendimentos.....	30
VII. Quanto à Verificação e Validação do Controle Operacional.....	30

6. ESTUDOS DE SISMOGRAFIA DE DESMONTES DE ROCHA	32
6.1. Considerações Quanto aos Modelos de Projeção Sismográfica.....	32
6.2. Considerações Quanto ao Limite Operacional	33
6.2.1. Menor Restrição Operacional	35
6.2.2. Maior Restrição Operacional.....	37
6.2.3. Influência do Critério de Segurança da Caverna	38
6.3. Considerações Quanto à Incertezas Associadas à Projeção Sismográfica.....	39
6.4. Considerações Quanto ao Mapeamento da CME	41
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	43
ANEXO.....	44
Exemplo de Laudos de Monitoramento Sismográfico	44

1. FUNDAMENTAÇÃO TÉCNICA DE BASE

Este capítulo apresenta de maneira sucinta a fundamentação técnica de base concernente ao controle de vibração sísmica em área de ocorrência de cavernas com vistas a prover os órgãos ambientais de subsídios técnicos à análise de estudos de sismografia associados a processos de licenciamento ambiental de empreendimentos.

1.1. Elementos de Vibração

“Vibração” consiste em ondas mecânicas que, uma vez geradas, propagam-se em meio específico, conduzindo energia. Quando propagadas no terreno (solo ou rocha) recebem a denominação de “vibrações sísmicas”, ou, apenas, “sísmica”. De forma simplificada, ondas podem ser representadas por dois parâmetros principais (Figura 1.1) definidos por amplitude de propagação (em mm) e frequência de oscilação (em Hz).

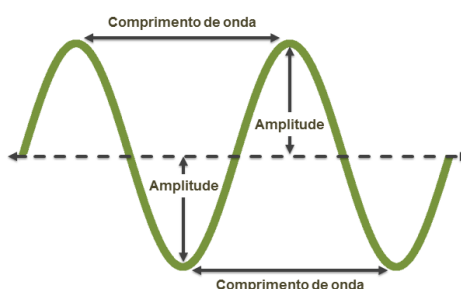


Figura 1.1: Parâmetros principais constituintes da onda sísmica.

“Amplitude” consiste na magnitude da onda de vibração, enquanto que “frequência” está associada ao comprimento de onda, definido pela distância entre dois picos sucessivos.

1.1.1. Amplitude de Vibração

O parâmetro amplitude está associado à quantidade de energia gerada pela fonte emissora, a qual se propaga no meio sob a forma de ondas. Níveis elevados de vibração geralmente associados à potencialidade de danos estruturais são relacionados a grandes amplitudes de onda. A atenuação das ondas sísmicas, muitas vezes indicada em estudos de sismografia sob o enfoque ambiental, consiste no decréscimo de energia conduzida pela onda (Figura 1.2).

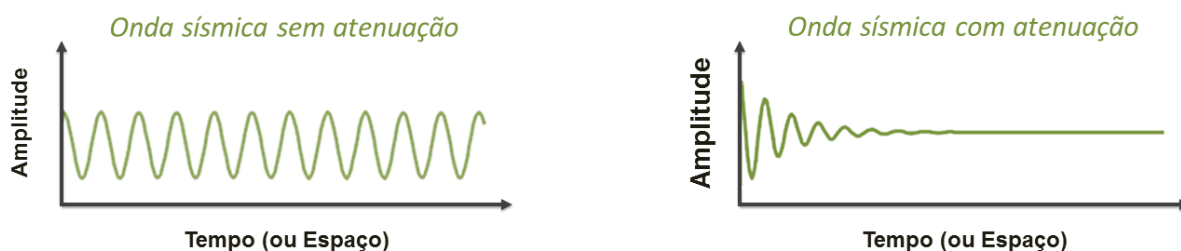


Figura 1.2: Onda sísmica sem atenuação (amplitude constante) e onda sísmica com atenuação (amplitude decrescente).

A atenuação da amplitude de ondas sísmicas pode ser avaliada no domínio do tempo ou do espaço. Como exemplo, segue o caso da vibração, decorrente de desmonte de rocha com uso de explosivos, sentida no entorno de uma cava. Considerando-se um ponto fixo de observação, nos instantes após a detonação de explosivos, a vibração é máxima e tende a sofrer redução de amplitude ao longo dos milissegundos subsequentes, até a vibração se tornar imperceptível no ponto de observação. Nesse caso, tem-se a avaliação no domínio do tempo, visto que o espaço (local de observação) é mantido fixo.

Agora, como exemplo, segue a descrição do cenário do entorno de uma fonte emissora, de vibração contínua, como a proveniente da operação de maquinários existentes em unidades de tratamentos de minério. A amplitude de vibração sentida em um ponto fixo situado na proximidade do maquinário mantém-se inalterada ao longo do tempo de observação, no entanto, ao se distanciar da fonte emissora, a amplitude de vibração tende a se reduzir. Nesse caso, tem-se a análise de vibração no domínio do espaço.

1.1.2. Frequência de Vibração

O parâmetro frequência está associado ao número de ondas em um determinado período de tempo. A Figura 1.3 apresenta um gráfico comparativo de ondas correspondentes a três ordens de frequência: $3f$, $6f$ e $12f$. No primeiro caso, identifica-se a existência de três comprimentos de onda para uma unidade de tempo (ou espaço); de maneira similar, são identificados seis e doze comprimentos de onda respectivamente para o segundo e terceiro caso. A frequência de oscilação da onda $12f$ é duas vezes maior que a frequência de oscilação da onda $6f$, a qual é caracterizada pelo dobro da frequência de oscilação da onda $3f$.

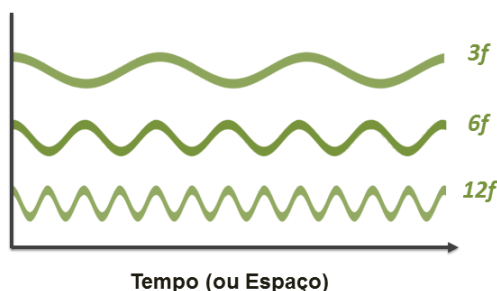


Figura 1.3: Ondas sísmicas de igual amplitude e diferentes frequências de oscilação.

No contexto de proteção de cavernas, é importante conhecer este parâmetro na medida em que ondas de frequência alta são geralmente associadas a vibrações de menor energia e, portanto, tendem a ser mais facilmente atenuadas, enquanto, danos em estruturas (em cavernas, inclusive) estão geralmente relacionados a ondas de baixa frequência, as quais são geralmente associadas à maior quantidade de energia. É por esse motivo que a legislação (nacional e internacional) referente à segurança de estruturas considera limites diferenciados no tocante à frequência de oscilação de ondas de vibração.

1.2. Cenário do Patrimônio Espeleológico Sujeito a Vibrações

Sob o enfoque de proteção da integridade física de cavernas, vibrações sísmicas decorrentes das atividades operacionais devem ser analisadas a partir de três dimensões principais (Figura 1.4): (i) fonte emissora, (ii) propagação das ondas sísmicas pelo terreno e (iii) receptor das ondas sísmicas, no caso, cavernas. Os aspectos principais envolvidos em cada um dos três itens são descritos na sequência.



Figura 1.4: Cenário de sismografia no entorno de local de ocorrência de caverna.

1.2.1. Fonte Emissora de Vibração

Muitas das atividades operacionais identificadas na fase de implantação ou de operação de empreendimentos estão associadas à emissão de vibração sísmica cujas características variam com relação à tipologia da operação. A depender da intensidade da vibração gerada, da periodicidade de ocorrência e, notadamente, da distância com relação ao alvo receptor (cavernas), uma dada atividade pode ser considerada crítica no tocante à emissão de vibração e, se não adequadamente monitorada e controlada, pode vir a exercer interferência na estrutura de uma caverna existente no entorno.

Instantes após a geração de vibração por uma dada atividade, ondas sísmicas se propagam pelo terreno, podendo alcançar os receptores potenciais (cavernas) existentes no entorno. Nesse contexto, dois aspectos principais associados à atenuação ao longo da propagação da onda sísmica pelo terreno devem ser considerados: (i) espalhamento esférico e (ii) atributos do terreno. A seguir, cada um dos dois comportamentos são apresentados.

1.2.1.1. Espalhamento Esférico

Supondo o cenário fictício de terreno homogêneo e isotrópico, a interferência do meio na atenuação da onda sísmica ao longo da propagação pelo terreno seria nula. Neste cenário, a energia sísmica liberada no terreno sofreria atenuação somente pelo efeito do espalhamento esférico da onda. A Figura 1.5 apresenta o diagrama esquemático do efeito de espalhamento esférico na propagação da

onda sísmica para o caso da presença de uma atividade emissora de vibração localizada na proximidade de uma caverna.

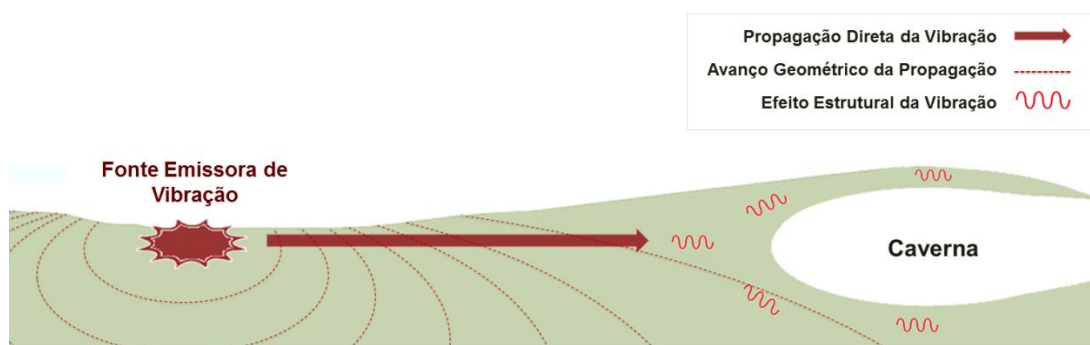


Figura 1.5: Efeito de espalhamento esférico na atenuação da propagação sísmica.

Por este comportamento, a energia inicialmente concentrada torna-se rarefeita ao longo da expansão esférica da frente de onda pelo terreno. À medida que a onda sísmica se propaga, embora a energia permaneça constante, a expansão da área "esférica" de propagação resulta na atenuação natural de amplitude da onda. Este é um dos motivos pelo qual, ao se afastar do local da atividade emissora, o nível de vibração sísmica se reduz.

1.2.1.2. Atributos do Terreno

No cenário real, além do efeito de atenuação sísmica decorrente do espalhamento esférico, a propagação da onda é influenciada pela composição não homogênea e anisotrópica do terreno. A interação dos aspectos geomorfológicos, topográficos e estratigráficos da área de abrangência da propagação da onda sísmica compõe o cenário geomecânico do terreno que exerce influência direta na atenuação da vibração.

A composição geológica e a presença de descontinuidades têm grande potencial de interferência no grau de atenuação devido à tendência a propiciar a dispersão da vibração pelo terreno. A representação esquemática da Figura 1.6 evidencia um exemplo deste efeito decorrente de descontinuidades existentes no terreno, representadas, neste caso, por diferentes camadas estratigráficas. Nota-se que, na presença de descontinuidade, ocorre o efeito de difração da onda, que atua na sua dispersão, contribuindo para a atenuação da vibração sísmica.

A propagação de ondas sísmicas pelo terreno, ou pelo maciço, pode ser caracterizada, portanto, pela atenuação decorrente do espalhamento esférico e pela ação das descontinuidades existentes ao longo do trajeto de propagação.

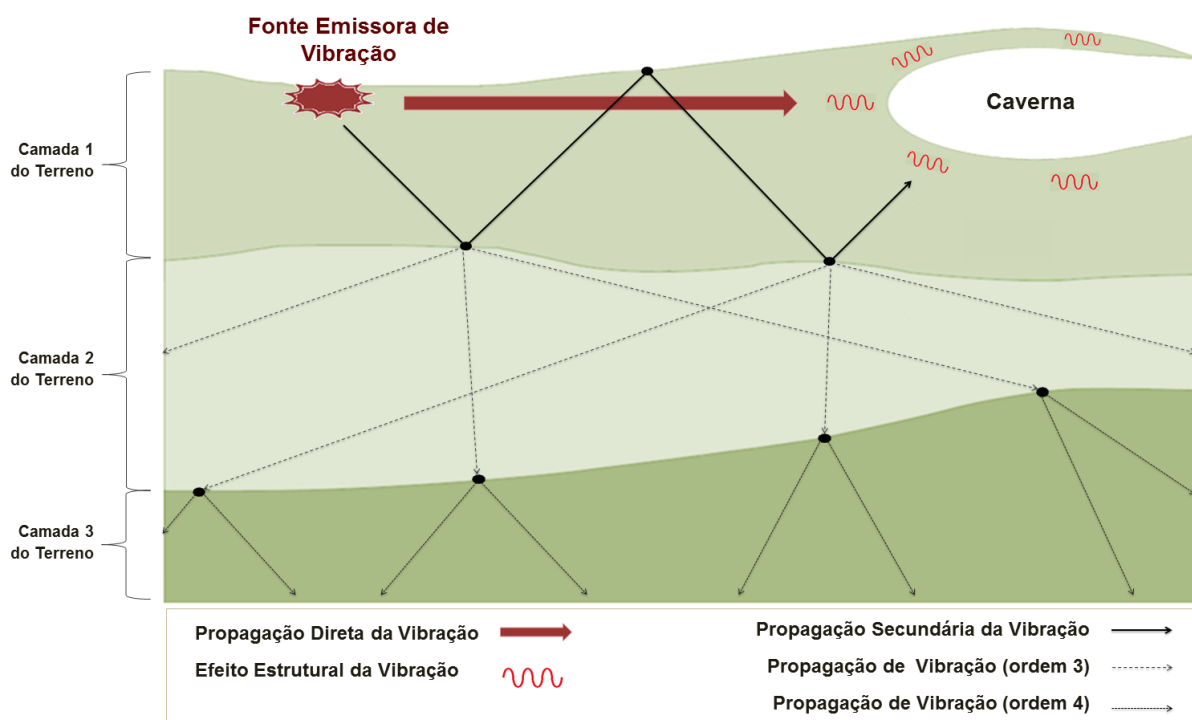


Figura 1.6: Efeito de descontinuidades do solo na propagação da vibração sísmica.

1.2.2. Alvo Receptor de Vibração: Caverna

Cavernas situadas em locais passíveis de serem afetados pelos níveis de vibração gerados por uma fonte emissora são consideradas receptores potenciais. A análise de segurança estrutural de uma caverna pode ser entendida a partir de dois pilares principais: (i) as características estruturais intrínsecas da caverna – as quais determinam as respectivas fragilidades; (ii) as condições (amplitude e frequência) de vibração a que a estrutura estará sujeita – as quais estão associadas às respectivas vulnerabilidades (Figura 1.7).



Figura 1.7: Fragilidade estrutural e a definição do critério de segurança correspondente.

Regiões da caverna sujeitas a níveis elevados de vibração em baixa frequência, e/ou partes da caverna caracterizadas por maior fragilidade, tais como regiões de existência de espeleotemas frágeis ou de locais de ocorrência de dolinas, tendem a ser mais vulneráveis aos efeitos ocasionados pela vibração em suas estruturas.

Níveis elevados de vibração podem resultar em danos estruturais de criticidades diversas, variando em função das fragilidades do tipo de receptor. Dependendo da amplitude e da frequência da vibração que atinge as estruturas da caverna, o efeito sentido pode variar de danos estruturais leves – como surgimento de trincas, aumento de fissuras e/ou quedas de espeleotemas – a danos críticos à segurança da estrutura, podendo resultar até mesmo no colapso parcial ou completo da caverna. O critério de segurança deve, portanto, ser capaz de reproduzir, por meio de métricas, as fragilidades estruturais características de cada caverna.

2. INFORMAÇÕES TÉCNICAS COMPLEMENTARES

O presente capítulo apresenta informações técnicas complementares com vistas a auxiliar na avaliação de estudos de controle de vibração em área de ocorrência de caverna. São apresentadas, na sequência, informações sobre a influência da localização dos pontos de monitoramento nos resultados dos estudos, bem como sobre a diferença existente entre medição e monitoramento, sobre quando é recomendável a análise por meio de simulação projetional e sobre quando apenas a verificação operacional é suficiente para a avaliação sismográfica de um cenário, além das observações sobre a importância da incerteza associada aos resultados de projeção sismográfica.

2.1. Localização de Pontos de Monitoramento

Os atributos do terreno existente entre a fonte emissora de vibração e o local de ocorrência de cavernas podem afetar de maneira significativa o grau de atenuação sísmica resultante da propagação da onda sísmica pelo terreno. Nesse contexto, quando da necessidade da quantificação dos níveis de vibração no terreno por meio de monitoramento os pontos de medição devem estar situados entre a atividade emissora e o local de ocorrência de caverna, estando o mais próximo possível da caverna, conforme ilustrado na Figura 2.1.

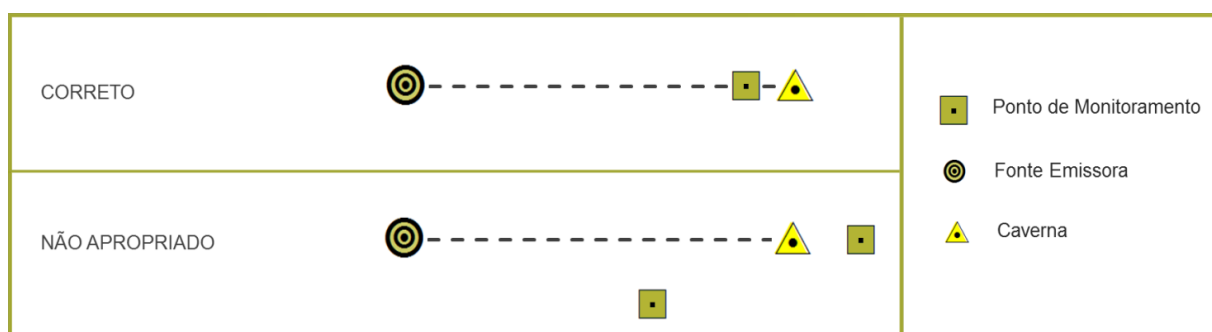


Figura 2.1: Recomendação quanto à localização dos pontos de monitoramento.

Caso os registros de monitoramento sejam realizados em locais diferentes do indicado, pode haver partes do terreno cujos atributos influenciem de maneira diferenciada a propagação de vibração. Nesse caso, os registros obtidos podem não ser necessariamente representativos dos níveis de vibração sentidos pelas estruturas da caverna.

2.2. Diferenças entre Monitoramento e Medição

Em análise de relatórios de sismografia, verifica-se, por vezes, o termo “monitoramento” sendo empregado de maneira equivocada, sendo confundido com a prática de “medição” de vibração. A fim de se evitar tal equívoco, o presente documento aborda, na sequência, a diferença conceitual e metodológica entre os dois termos.

Considerando-se como premissa o emprego de profissional competente e habilitado, de instrumentação adequada e devidamente calibrada, “medição de sismografia” pode ser entendida como a operacionalização de um instrumento durante um intervalo de tempo determinado, de forma a quantificar, em registros numéricos, um dado evento em que se deseja avaliar, no caso, um evento sísmico. O resultado consiste na emissão de um laudo técnico constituído pelos valores medidos, os quais são comparados a níveis de referência especificados por padrões normativos. “Medição” é, portanto, uma tarefa.

“Monitoramento sismográfico” consiste em um processo que resulta da consolidação integrada de diversos aspectos que compõem o cenário no qual está inserida a atividade que se deseja avaliar. Processo este que deve ser elaborado a partir da identificação prévia (i) das fontes emissoras de vibração associadas à atividade específica e (ii) dos receptores (cavernas) localizados no entorno passíveis de serem afetados por esta atividade.

Devem ser consideradas também as características de geração, os atributos do meio físico da região que interagem na propagação das ondas sísmicas, além das fragilidades específicas dos receptores existentes e das ações de controle envolvidas. A consolidação desses aspectos permitirá definir os locais e os intervalos de medição a serem operacionalizados de forma a quantificar os efeitos gerados pelas atividades do empreendimento. “Monitoramento”, portanto, é considerado um processo do qual a medição é parte integrante.

Entende-se, assim, que registros de sismografia apresentados de maneira isolada são considerados como resultados de medições. Para serem considerados como monitoramentos, os registros devem ser contextualizados segundo o cenário de avaliação, e os resultados devem ser analisados de maneira específica e aplicada à finalidade a qual se pretende avaliar.

2.3. Simulação Projecional e Verificação Operacional em Avaliação Sismográfica

A análise de sismografia de cenários envolvendo atividades emissoras de vibração requer, necessariamente, que os níveis de vibração existentes sejam quantificados por meio de monitoramento sismográfico. Os resultados obtidos são geralmente empregados como referência para as análises correspondentes.

A técnica de simulação projecional de sismografia é recomendada quando os resultados de monitoramento sismográfico não são suficientes para avaliar o cenário como um todo, sendo necessário ampliar a abrangência dos resultados, seja no contexto temporal, seja no contexto territorial. Como exemplo, tem-se o caso de eventual necessidade de avaliação da vibração proveniente de um cenário futuro de operação, diferente das condições em que operam as atividades do cenário vigente. Ou o caso em que, a partir de resultados pontuais de vibração, é possível estimar os resultados para toda uma área de abrangência, como o caso de sismografia associada a avanços da frente de lavra.

No entanto, há de se considerar que a técnica de simulação projecional tem um grau de incerteza a ela associado. A depender do modelo de projeção empregado, a variabilidade potencial dos resultados apresentados pode inviabilizar os resultados projetados. Nesse contexto, os resultados de simulação devem ser empregados de maneira orientativa, sendo necessário que os mesmos sejam validados por meio de registros de monitoramento sismográfico (Figura 2.2).

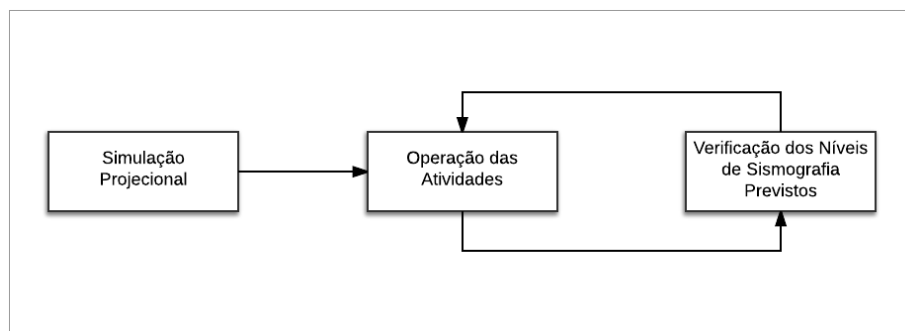


Figura 2.2: Simulação projecional e verificação sismográfica.

Quando a operação de atividades emissoras de vibração do cenário futuro for similar à condição de operação das atividades no cenário vigente, entende-se não ser necessário proceder com a análise por meio de projeção sismográfica, visto que a operação do cenário nas condições atuais é representativa do contexto futuro. Como exemplo, tem-se o caso do tráfego de veículos em vias internas de empreendimentos, em que tanto o *layout* das vias internas como as características do fluxo de veículos de carga se manterão inalterados; ou o caso do tráfego de comboios ferroviários, em que tanto a linha férrea como o fluxo ferroviário do cenário vigente podem ser considerados similares ao do cenário futuro. Em ambos os casos, a avaliação por meio de monitoramento sismográfico tende a ser a mais apropriada.

3. CRITÉRIO DE SEGURANÇA DE CAVERNAS

A vibração emitida por uma dada atividade varia com relação ao período de operação (longa, média ou curta duração), bem como com relação à sua magnitude. A Figura 3.1 apresenta um gráfico representativo do comportamento de cada um dos três grupos de vibração.

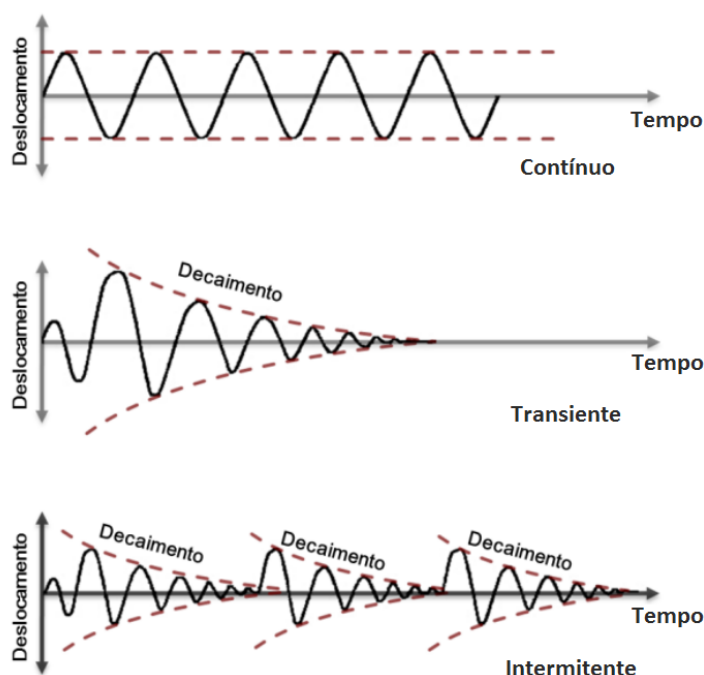


Figura 3.1: Classificação das vibrações sísmicas (adaptado de Sarsby - 2000).

Na ausência de diagnóstico geológico-geotécnico específico da caverna não se pode avaliar o real grau de fragilidade a ela associado. Quando isso ocorre, adota-se o princípio da precaução sendo recomendados limites de vibração que considerem o caso de mais significativa fragilidade.

Para o caso de vibração de caráter intermitente, recomenda-se o nível de 5,0 mm/s como critério de segurança preliminar a cavernas de relevância máxima. O critério recomendado é equivalente a um terço do limite inferior do critério de segurança definido pela norma ABNT NBR 9653 para o caso de edificações localizadas no entorno de mineradoras que realizam desmontes de rocha com uso de explosivos.

Devido à ausência de norma nacional relativa à potencialidade de danos em estruturas associados à incidência de vibração do tipo contínua e do tipo transiente, buscou-se referenciar os critérios empregados por norma internacional correlata.

A norma alemã DIN 4150-3 (1999) apresenta as diretrizes para a avaliação dos efeitos de vibração em edificações e demais estruturas, tendo sido utilizada como referência inclusive para os limites adotados pela Norma Portuguesa NP-2074 e pela Norma Italiana UNI 9916. Os limites de vibração estabelecidos por esta norma apresentam critérios diferenciados para vibrações transientes e contínuas, bem como considera variações quanto à fragilidade estrutural de edificações. A Tabela 3.1 apresenta os limites estabelecidos pela norma alemã para o caso de vibrações de curta duração e na

Tabela 3.2, são dispostos os limites estabelecidos pela norma alemã para o caso de vibrações de longa duração.

Tabela 3.1: Limites de vibração transiente (de curta duração) em edificações - DIN 4150-3.

Tipo da Estrutura	Velocidade de pico da partícula – VPP (Máxima velocidade medida em cada uma das três direções: longitudinal, vertical e transversal)		
	1 Hz a 10 Hz	10 Hz a 50 Hz	50 Hz a 100 Hz
1. Edificações comerciais ou industriais	20,0 mm/s	Variação linear de 20,0 mm/s a 40,0 mm/s	Variação linear de 40,0 mm/s a 50,0 mm/s
2. Edificações residenciais	5,0 mm/s	Variação linear de 5,0 mm/s a 15,0 mm/s	Variação linear de 15,0 mm/s a 20,0 mm/s
3. Edificações frágeis que não se classificam nos itens anteriores (por exemplo, monumentos históricos e demais edificações de fragilidade aparente)	3,0 mm/s	Variação linear de 3,0 mm/s a 8,0 mm/s	Variação linear de 8,0 mm/s a 10,0 mm/s

Tabela 3.2: Limites de vibração contínua (longa duração) em edificações - DIN 4150-3.

Tipo da Estrutura	Velocidade de pico da partícula – VPP (Máxima velocidade medida em cada uma das três direções: longitudinal, vertical e transversal)
1. Edificações comerciais ou industriais	10,0 mm/s
2. Edificações residenciais	5,0 mm/s
3. Edificações frágeis que não se classificam nos itens anteriores (por exemplo, monumentos históricos e demais edificações de fragilidade aparente)	2,5 mm/s

Propõe-se o nível de 3,0 mm/s como critério de segurança preliminar a cavernas de relevância máxima sujeitas a atividades emissoras de vibração transiente (curta duração). O critério proposto tem como referência o limite inferior definido pelo item 3 da norma alemã DIN 4150-3, indicado a estruturas caracterizadas por fragilidade estrutural.

De maneira similar, propõe-se o nível de 2,5 mm/s como critério de segurança preliminar a cavernas de relevância máxima sujeitas a atividades emissoras de vibração contínua (longa duração). O critério

proposto tem também como referência o limite inferior definido pelo item 3 da norma alemã DIN 4150-3, indicado a estruturas caracterizadas por fragilidade estrutural.

Em todos os casos, considera-se ser de caráter preliminar o critério de segurança proposto. Entende-se que os limites de vibração associados ao critério de segurança de uma caverna podem ser alterados desde que seja apresentado diagnóstico geológico-geotécnico específico à caverna, em que seja identificado limite de segurança representativo do seu real grau de fragilidade estrutural.

De maneira complementar, propõe-se que o limite de segurança estrutural definido a cavidades seja periódica e sistematicamente reavaliado por meio de análise comparativa de registros fotográfico de detalhes da caverna, o que deve ocorrer juntamente com a realização de monitoramento da integridade física, de maneira a assegurar que o limite de segurança proposto esteja condizente com as fragilidades da estrutura cavernícola.

4. ANÁLISE DE LAUDOS DE SISMOGRAFIA

O processo de controle das emissões sísmicas recomendado aos estudos de sismografia no contexto de proteção de cavernas tem como elemento chave os resultados de monitoramento sismográfico. A partir dos registros de monitoramento, obtém-se a curva de tendência de comportamento de propagação sísmica no entorno da área de lavra. Os resultados de monitoramento propiciam também que se proceda com a periódica validação e atualização do modelo projetional, além de permitirem a verificação necessária dos cenários de operação de atividades emissoras de vibração existentes no entorno de áreas de ocorrência de cavernas.

Diante da importância dos registros de monitoramento no processo de controle operacional de vibração e considerando que a análise dos laudos de medição nem sempre é trivial, o presente capítulo se destina a identificar e comentar as principais informações disponibilizadas nos laudos de medição pertinentes aos estudos de sismografia no contexto de proteção de cavernas.

4.1. Características de Medição

Os registros de monitoramento sismográfico de atividades operacionais emissoras de vibração são obtidos por meio de equipamento de medição identificado como “sismógrafo de engenharia”, composto por geofone triaxial que permite a aquisição de níveis de vibração de maneira simultânea em três componentes: vertical, transversal e longitudinal ou radial.

Registros de medição podem ser obtidos de maneira contínua (ininterrupta) ou a partir de um determinado nível mínimo de vibração. Neste caso, o equipamento é configurado para manter-se em estado constante de medição, e os registros são armazenados somente quando identificado nível considerado mínimo. O período de tempo de medição é configurado no equipamento de maneira a tornar possível registrar toda a duração do evento sísmico objeto de observação.

Os registros de medição são geralmente apresentados em **velocidade de vibração de partícula**, medidos durante um dado intervalo de tempo, para cada uma das três componentes ortogonais. O máximo valor registrado para cada componente é denominado **pico da componente de velocidade de vibração de partícula**. O maior valor dentre os valores de pico das três componentes de velocidade de vibração de partícula é definido como **velocidade de vibração de partícula de pico (VPP)**¹.

Velocidade de vibração de partícula de pico consiste no parâmetro recomendado pela legislação nacional e internacional, e por normas técnicas em todo o mundo, concernente à avaliação de potencialidade de danos em estruturas. Esse parâmetro consiste no maior nível de vibração, em mm/s, identificado ao longo de todo o período de uma medição.

¹ *Peak Particle Velocity* – PPV.

4.2. Resultados Pertinentes ao Processo de Controle Operacional

No tocante ao controle das emissões sísmicas associado à proteção de cavernas, são identificadas duas informações principais a serem obtidas dos laudos de monitoramento sismográfico: a velocidade de vibração de partícula de pico (VPP) e a duração do evento sísmico objeto de observação.

O valor de vibração a ser considerado nos estudos de sismografia no contexto de proteção de cavernas é somente o VPP (ou PPV). Informação quanto ao pico da componente de velocidade de vibração de partícula pode também ser considerado no sentido de verificar qual das três componentes (vertical, transversal e longitudinal ou radial) originou o nível VPP. A Figura 4.1 apresenta um exemplo de dois laudos de medição gerados por dois modelos de sismógrafos de fabricantes diferentes.

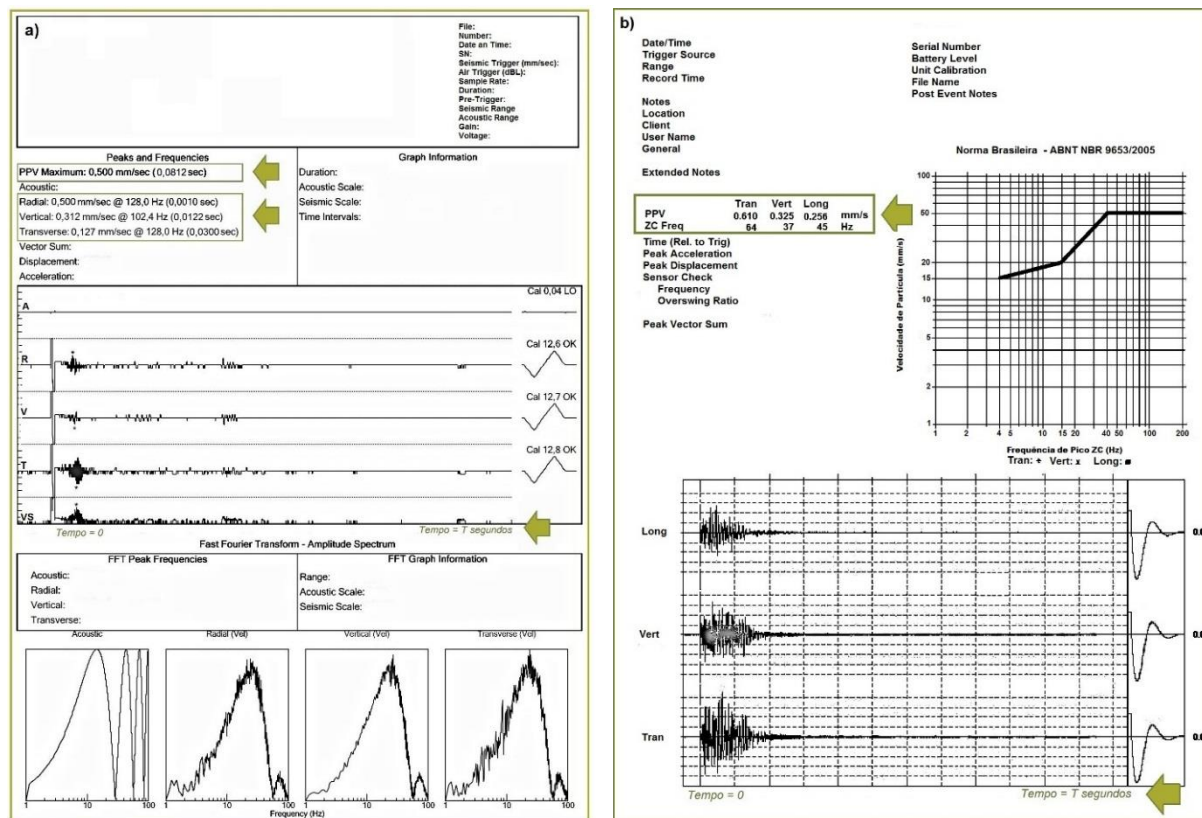


Figura 4.1: Exemplos de laudos de medição gerados por dois modelos de sismógrafos de fabricantes diferentes².

No laudo de sismografia indicado na parte “a”, o resultado de interesse corresponde ao nível de 0,500 mm/s identificado pelo laudo como “PPV Maximum”. A verificação quanto ao pico da componente de velocidade de vibração de partícula das três componentes indica que o nível de PPV foi proveniente da componente radial.

No laudo de sismografia indicado na parte “b”, o resultado de interesse corresponde ao nível de 0,610 mm/s. No modelo do laudo do respectivo fabricante é necessário identificar, dentre as três componentes de velocidade de vibração de partícula, a de maior nível, a fim de se obter o PPV da medição. No caso exemplificado, identifica-se que o nível de vibração de interesse foi proveniente da componente transversal.

² A imagem de ambos os laudos em tamanho expandido encontra-se disponibilizada no Anexo deste documento.

Em ambos os laudos são também apresentados os registros de medição das três componentes de vibração ao longo de todo o período de medição. Nesse caso, é possível identificar a duração do período de medição e se a mesma está condizente com a especificação de tempo de medição indicada à respectiva tipologia de fonte emissora.³

As demais informações presentes nos laudos de sismografia assumem maior relevância quando da necessidade de análises mais específicas dos resultados de medição.

³ Recomendações quanto à duração de tempo de medição de fontes emissoras de vibração podem ser encontradas no item III do Anexo I e do Anexo IV do documento disponibilizado pelo CECAV, intitulado “Sismografia Aplicada à Proteção do Patrimônio Espeleológico - Orientações Básicas à Realização de Estudos Ambientais”.

5. ANÁLISE DE ESTUDOS DE SISMOGRAFIA

Os estudos de sismografia voltados para preservação de cavernas, no contexto de processos de licenciamento ambiental, geralmente consideram as diferenças de abordagens entre a fase de projeto conceitual e a fase associada à operação de empreendimentos. Na prática, os estudos voltados para ambas as fases devem ser avaliados de maneira integrada, conforme apresentado na Figura 5.1. O primeiro estudo (referente à fase de projeto conceitual) deverá antever eventuais cenários críticos de vibração sísmica a cavernas existentes no entorno, e o segundo (fase de operação), proceder com a verificação e validação dos cenários previstos, além de prever (quando necessário) a continuidade do processo de controle das emissões de vibração.

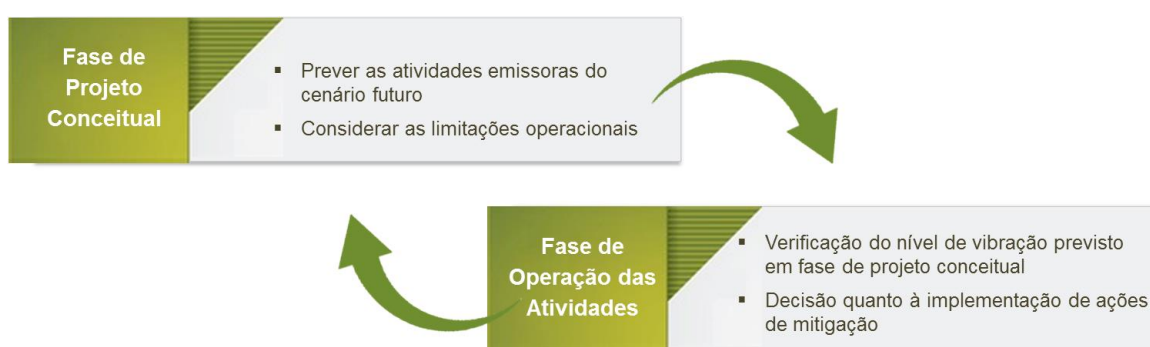


Figura 5.1: Integração entre o estudo da fase de projeto conceitual e o estudo da fase de operação das atividades.

Nesse contexto, a seguir são indicados os elementos principais a serem considerados quando da avaliação dos estudos de sismografia em questão.

5.1. Empreendimentos em Fase de Projeto Conceitual

A importância do estudo de sismografia realizado na fase de projeto conceitual está associada à ciência, por parte do responsável pelo empreendimento, de que as atividades emissoras de vibração a serem realizadas (futuramente) deverão operar de maneira controlada, com vistas a limitar os níveis de vibração nos locais de ocorrência de caverna.

Aliado a isso, considerando-se que a vibração proveniente das futuras atividades operacionais pode eventualmente vir a constituir limitação à máxima operação do empreendimento, o estudo na fase de projeto conceitual permite ao empreendedor obter informações prévias, ou seja, em fase anterior à implantação do empreendimento, que poderão ser de relevada importância ao sucesso do seu plano de negócio. Informações que lhe permitirão conhecer, por exemplo:

- As atividades emissoras passíveis de criticidade no tocante à vibração sentida nos locais de ocorrência de caverna,
- Os procedimentos necessários para verificação de controle dos níveis de vibração;
- As ações de mitigação a serem executadas no caso de evidenciada a necessidade de redução dos níveis de vibração.

A Figura 5.2 apresenta o fluxograma do processo de controle dos níveis de vibração, sentidos em área de ocorrência de cavernas, quando da existência de maquinários ou atividades operacionais emissoras no entorno, fazendo distinção entre a fase de projeto conceitual e a fase associada à operação das atividades emissoras.

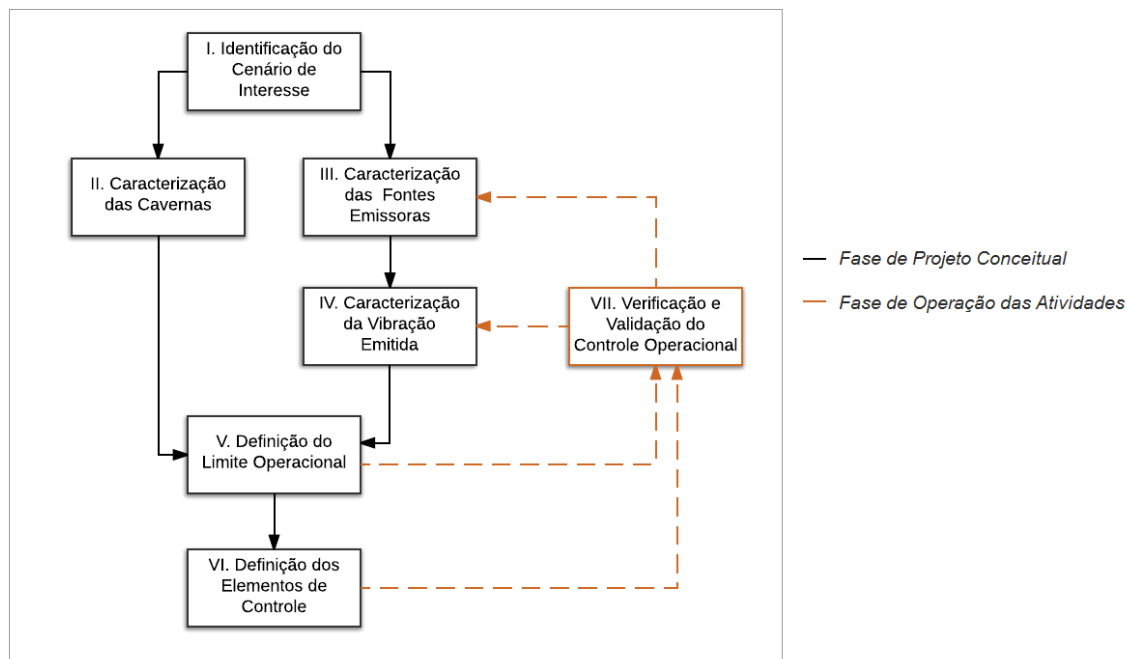


Figura 5.2: Fluxograma de controle das emissões sísmicas em cavernas próximas a fontes emissoras de vibração.⁴

Na sequência, são apresentadas as recomendações gerais a serem consideradas na avaliação dos seis primeiros itens associados à fase de projeto conceitual.

I. Quanto à Identificação do Cenário de Interesse

O cenário de interesse é constituído por toda a área na qual se pretende executar a atividade emissora de vibração a ser objeto de avaliação e pelas cavernas existentes no entorno. Neste contexto, deverão constar do estudo as seguintes informações:

- A identificação dos elementos envolvidos no processo de controle:
 - ✓ Todas as cavidades a serem objeto de proteção;
 - ✓ Todas as fontes emissoras de vibração envolvidas;
- A identificação das distâncias existentes entre as fontes emissoras de vibração e os locais de ocorrência de caverna.

Durante a análise dos estudos de sismografia, deve ser verificado se todas as cavernas presentes no local estão sendo consideradas no estudo; deve ser verificado também se todos os maquinários e atividades emissoras de vibração presentes quando da fase de implantação estão igualmente sendo consideradas no estudo de sismografia.

⁴ Fonte: Sismografia Aplicada à Proteção do Patrimônio Espeleológico - Orientações Básicas à Realização de Estudos Ambientais”, CECAV 2016.

II. Quanto à Caracterização Estrutural das Cavernas de Interesse

A caracterização estrutural das cavernas de interesse é de suma importância na elaboração de estudos de sismografia, uma vez que possibilita a identificação das zonas de maior fragilidade e de locais de relevância espeleológica, bem como permite a identificação de estruturas da caverna que já tenham sido eventualmente impactadas.

O conhecimento dessas informações torna possível a definição do critério de segurança estrutural condizente com as reais condições físicas de cada caverna.

No entanto, entende-se que, por vezes, essas informações não estarão disponíveis de imediato, por necessitarem que estudos específicos sejam elaborados, o que demanda tempo de realização. Considerando-se a ausência temporária dessas informações (até que os estudos de caracterização estrutural das cavernas sejam concluídos), recomenda-se que sejam empregados os critérios de segurança preliminar propostos no documento apresentado pelo CECAV, intitulado “Sismografia Aplicada à Proteção do Patrimônio Espeleológico - Orientações Básicas à Realização de Estudos Ambientais”.

III. Quanto à Caracterização das Fontes Emissoras de Vibração

Da caracterização das fontes emissoras devem constar informações quanto (i) à distância com relação a todas as cavidades envolvidas no estudo, (ii) ao período de realização, (iii) ao descritivo sucinto da operação da atividade no tocante à emissão de vibração; (iv) às ações de mitigação previstas.

Durante a análise dos estudos, deve ser verificado se todas as atividades emissoras, tanto da fase de implantação como da fase de operação, estão sendo consideradas. Ressalta-se que a informação a ser apresentada deverá estar focada apenas nas fontes emissoras de vibração capazes de afetar os locais de ocorrência de cavernas. Fontes emissoras de baixo nível de vibração, ou fontes emissoras distantes do local de ocorrência de cavernas, não devem ser consideradas.

Deve igualmente ser verificada a ordem de grandeza das distâncias, e se as mesmas estão condizentes com as disponibilizadas nos demais itens do estudo.

No tocante ao período de realização, deve-se verificar também se a operação das atividades é duradoura ou esporádica. Quanto maior a duração⁵ da atividade, maior será o período de exposição de vibração à qual a caverna ficará sujeita⁶. Essa informação será importante na avaliação da periodicidade de execução do monitoramento sismográfico, conforme discutido mais adiante, no item VI.

Informações quanto à tipologia do equipamento são importantes no caso dos resultados de monitoramento sismográfico indicarem a necessidade de redução dos níveis de vibração. Nesse caso,

⁵ Considera-se a duração de uma atividade a quantidade estimada de dias de operação vezes a quantidade de horas de operação da atividade por dia.

⁶ Considerando o mesmo nível de vibração gerado, no tocante ao tempo de exposição, uma atividade emissora que atua uma vez por semana durante um período de 1 hora, por exemplo, é menos crítica que uma atividade que atua 5 dias por semana durante 1 hora por dia, assim como ambas são consideradas menos críticas que uma atividade que atua 5 dias por semana de maneira ininterrupta, ao longo, por exemplo, de uma jornada diária de 16 horas de operação.

a alteração do equipamento pode eventualmente ser uma das ações de mitigação conforme indicado mais adiante neste mesmo item.

Durante a avaliação do estudo, deve ser atentamente observado se as ações de mitigação a serem previstas estão apresentadas de maneira executiva, com vistas a efetivamente serem empregadas no caso de os resultados de monitoramento sismográfico evidenciarem essa necessidade, quando da operação das atividades.

Visando a contribuir com a análise das ações de mitigação a serem apresentadas pelos estudos de sismografia, na sequência são apresentados exemplos destas ações relacionadas a algumas atividades identificadas como passivelmente críticas no tocante à emissão de vibração no contexto de proteção de cavernas. Ressalta-se que, devido à complexidade envolvida na caracterização da vibração decorrente de desmontes de rocha com uso de explosivos, a análise desta atividade será objeto de capítulo específico, a ser apresentado na sequência.

III.a. Atividade de Cravação de Estacas

A vibração decorrente da operação da atividade de cravação de estacas está associada à energia despendida pelo equipamento para realizar a penetração da estaca no terreno. A execução da atividade é geralmente realizada por meio de equipamentos denominados bate-estacas, compostos por um martelo suspenso por uma torre de sustentação que, por meio de impactos sucessivos, fornece energia suficiente para a penetração da estaca no terreno até atingir a profundidade definida (Figura 5.3).

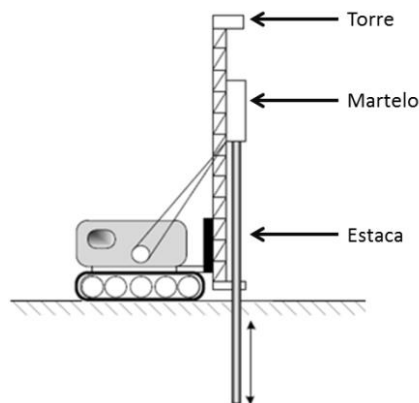


Figura 5.3: Equipamento de cravação de estacas.

Entretanto, nem toda a energia fornecida pela ação do martelo é efetivamente utilizada na cravação da estaca, parte da energia despendida é transmitida ao solo, sob forma de vibração. O nível de vibração emitido pela atividade está associado, portanto, à quantidade de energia despendida ao solo, a qual varia com relação a diversos fatores, dentre os quais a tipologia dos equipamentos, a altura de queda do martelo, a metodologia de cravação e as condições do terreno.

Os processos mais utilizados para cravação de estacas se distinguem de acordo com o processo de queda do martelo: alguns operam com impactos decorrentes de queda por ação da gravidade, outros, por ação de controle mecânico; em alguns casos o martelo se desloca ao longo de um embolo fixado à estrutura do equipamento, em outros, o direcionamento do martelo no topo da estaca é feito com corda, deixando o sucesso da operação a critério do operador e de sua experiência na operação de queda do martelo.

Dentre os respectivos processos, identificam-se variações quanto à eficiência (energia liberada sob forma de vibração) e eficácia (quantidade de impactos por minuto), os quais influenciam na vibração sentida no entorno. Nas ações de mitigação são geralmente consideradas variações desses itens de maneira a reduzir a energia despendida pelos impactos. Ressalta-se que, por vezes, alterações desse

tipo podem resultar em aumento de custo operacional ao empreendimento ou dilatação do prazo de realização da atividade.

Em caso extremo, pode ser avaliada a opção de cravação de estacas por meio do sistema de “hélice-contínua monitorada”. Neste sistema é empregada uma estaca helicoidal que perfura o solo em um processo operacional similar a um gigante “saca-rolhas”. Esta operação é associada a níveis reduzidos de emissão de vibração, no entanto, há de se considerar que equipamentos dessa tipologia não são encontrados em todas as regiões do país.

III.b. Atividade de Compactação Dinâmica

A atividade de compactação dinâmica de solo consiste em se reduzir os vazios intersticiais por meio de processos mecânicos com vistas a se obter, geralmente, aumento da capacidade de suporte (resistência) do solo e a redução de suas compressibilidade e permeabilidade.

As vibrações decorrentes da operação desta atividade estão associadas ao impacto causado pela queda do martetele (bloco) no solo (Figura 5.4). A redução da vibração emitida por esta atividade está vinculada à redução do peso ou do volume do bloco, ou à diminuição da sua altura de queda. As ações de mitigação previstas são geralmente associadas a variações desses itens de maneira a reduzir a energia despendida pelos impactos.

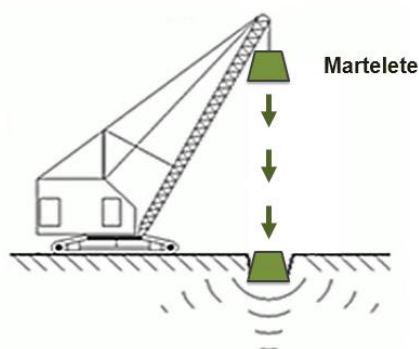


Figura 5.4: Atividade de compactação dinâmica do solo.

Entretanto, o grau de compactação do solo depende justamente do peso do martetele, da altura de queda e do espaçamento entre os pontos golpeados pelo martetele. Ao se reduzir o impacto gerado pela queda do bloco tende-se a diminuir também o volume total de solo compactado e, por consequência, a redução tende a resultar em aumento de número de quedas, prolongando o período previsto de operação da atividade.

III.c. Tráfego de Veículos

A passagem de veículos de carga por uma via de acesso induz vibração no terreno, e esta vibração se propaga pelo solo, podendo atingir cavernas existentes no entorno.

Quando em movimento, o veículo automotor desenvolve esforços dinâmicos diversos que são transmitidos ao terreno por meio do contato entre o veículo (pneu) e a pista de rodagem, dando origem às vibrações, conforme representação esquemática da Figura 5.5.

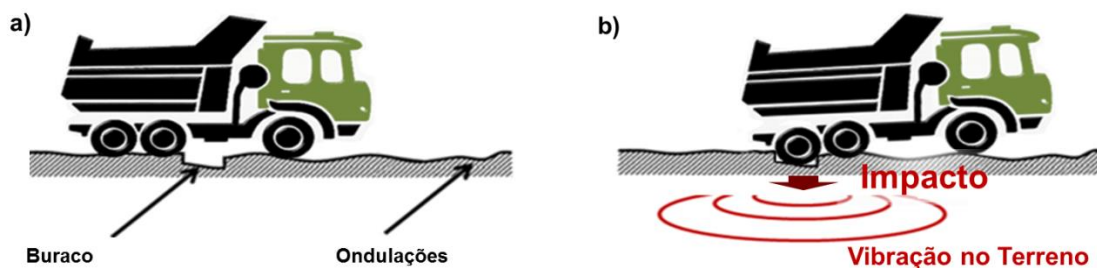


Figura 5.5: a) Passagem de veículo em pista contendo irregularidades e b) vibração no terreno induzida pelo impacto decorrente da passagem do veículo por um buraco na pista.

Com relação ao veículo de carga, a vibração decorrente do impacto da rodagem do veículo é influenciada, notadamente, por dois fatores principais: velocidade de rodagem e carga transportada. Quanto maior a carga em movimento (peso de veículo mais carga transportada), maior tende a ser a vibração induzida, assim como quanto maior a velocidade do veículo, maior o impacto gerado.

Com relação à manutenção da via de acesso, irregularidades na pista, como ondulações e buracos, além da presença de pedras, constituem itens potencialmente críticos, visto que, ao passar por essas irregularidades, o impacto do veículo no solo tende a ampliar a força de excitação no terreno. Quanto mais profunda e brusca a irregularidade, maior o impacto induzido pelo veículo no terreno, resultando em maior geração de vibração.

As ações de mitigação previstas são geralmente associadas a operações que propiciem redução da vibração tanto no tocante ao veículo de carga (através da redução da velocidade máxima permitida, por exemplo), como no tocante à constante manutenção da pista sobretudo no entorno do local de ocorrência de cavernas.

III.d. Tráfego Ferroviário

Diversos fatores estão associados à geração de vibração na operação de empreendimentos ferroviários, dentre os quais se destacam a velocidade das composições e a quantidade de carga transportada, além de imperfeições no sistema do transporte ferroviário.

Quanto às imperfeições, é possível ressaltar as associadas à linha férrea (como as junções entre os trilhos ou irregularidades da via) e as relacionadas à manutenção dos comboios (como excentricidade ou desbalanceamento das rodas).

Espera-se que estudos de sismografia relacionados à fase de projeto conceitual de empreendimentos ferroviários apresentem propostas que minimizem imperfeições associadas à linha férrea e que destaquem a imprescindibilidade da adequada e periódica manutenção dos comboios que trafegarão na futura via ferroviária.

Concernente à operação do empreendimento, devem ser previstas ações de mitigação associadas tanto à linha férrea como ao fluxo ferroviário, como a adequada e periódica manutenção da linha férrea no entorno do local de ocorrência de cavernas, a redução do limite de velocidade de passagem do comboio, dentre outras.

Além da vibração proveniente do tráfego das composições, os locais onde são realizados testes de frenagem de vagões e os pátios de manobra são considerados fontes de vibração de significativo potencial de criticidade. Em decorrência das ações de mitigação associadas a essas atividades, em

específico, serem de baixa eficiência, recomenda-se que seja evitada a operação delas no entorno dos locais de ocorrência de caverna.

IV. Quanto à Caracterização da Vibração Emitida

O estudo de sismografia a ser elaborado deverá estimar o nível de vibração associado às atividades emissoras previstas tanto na fase de implantação como na fase de operação (conforme indicado no item de caracterização das fontes emissoras). Por se tratar de estudo associado a um projeto conceitual, recomenda-se que a quantificação seja obtida a partir de resultados de monitoramento sismográfico a ser executado em um cenário já existente, identificado como *cenário de referência*, que contenha iguais atividades em operação. A composição do terreno do respectivo *cenário de referência* deverá ser similar à composição do terreno do cenário de interesse.

Durante a análise dos estudos, é preciso confirmar que o respectivo cenário adotado como referência seja efetivamente similar ao cenário de interesse. Na avaliação do estudo deve ser igualmente verificado se as atividades objeto de monitoramento são realmente equivalentes às atividades emissoras de vibração do cenário de interesse, e se ao longo do monitoramento as mesmas estiveram operando em condições normais de funcionamento.

Quando a distância ($dist_{CR}$) entre os pontos de monitoramento e a fonte emissora do *cenário de referência* for diferente das distâncias ($dist_{CI}$) envolvidas no cenário de interesse, é recomendado que os resultados de monitoramento obtidos no *cenário de referência* sejam utilizados na projeção dos níveis de vibração considerando-se as distâncias envolvidas no cenário de interesse, conforme ilustrado na desenho esquemático da Figura 5.6.

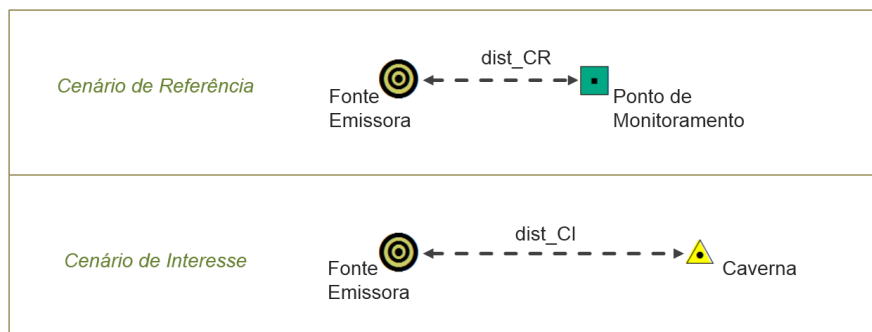


Figura 5.6: a) Determinação da vibração no cenário de interesse por meio da projeção dos níveis de vibração registrados no cenário de referência

Nesse caso, o avaliador dos estudos deve se atentar ao modelo a ser empregado na projeção sismográfica dos respectivos resultados. O modelo adotado deve estar especificado no relatório, assim como deve constar a referência bibliográfica correspondente que forneça o respaldo técnico ao modelo utilizado.

V. Quanto ao Limite Operacional

O limite operacional a ser apresentado pelo estudo de sismografia consiste na distância mínima aceitável dos maquinários e das atividades emissoras de vibração com relação ao local de ocorrência das cavernas. O avaliador deve se atentar ao modelo a ser empregado na projeção sismográfica dos

respectivos resultados. O modelo adotado deve estar especificado no relatório, assim como nele deve constar a referência bibliográfica correspondente, que forneça o respaldo técnico ao modelo utilizado.

Durante a análise do estudo, deve ser verificado se os resultados de monitoramento sismográfico empregados para a determinação do modelo projecional são equivalentes aos resultados fornecidos pelos laudos de monitoramento.

VI. Quanto à Definição dos Elementos de Controle / Monitoramento Sismográfico

O “monitoramento sismográfico” consiste no elemento de controle das emissões sísmicas. Importante ressaltar que o monitoramento não realiza o controle sismográfico. Os resultados fornecidos pelos laudos de monitoramento permitem que seja verificado se os níveis de vibração auferidos nos locais de medição são condizentes com o níveis de vibração previstos no modelo projecional. A partir dos resultados de monitoramento, é possível identificar a eventual necessidade de ajuste do modelo, ou a necessidade de implementação das ações de mitigação, ou mesmo a necessidade de alteração de ações de mitigação eventualmente já implementadas.

Os resultados de monitoramento sismográfico são, portanto, de suma importância no processo de controle das emissões sísmicas. Na análise do estudo, devem ser verificados três aspectos principais: quantidade e localização dos pontos de monitoramento, a periodicidade dos monitoramentos e o limite admissível de vibração.

Em um primeiro momento, poderia se pensar que, tecnicamente, o ideal seria que o monitoramento sismográfico fosse realizado em todas as cavernas de interesse, ao longo de todo o período de operação de todas as fontes emissoras existentes no entorno. Entretanto, esta prática não é sempre viável, seja em relação ao aspecto operacional, seja em relação aos custos envolvidos. Diante disso, o plano de monitoramento deve ser elaborado de maneira a ser viável operacionalmente, a ser eficiente do ponto de vista técnico, e a considerar a minimização de custos (Figura 5.7).



Figura 5.7: Contexto da elaboração do plano de monitoramento sismográfico.

No tocante à localização e quantidade de pontos de medição, no caso dos resultados de monitoramento serem apresentados por meio de agrupamentos, no decorrer da análise deve ser verificado se o respectivo ponto de medição pode ser considerado como representativo de todas as cavidades inseridas no eventual adensamento de cavernas proposto pelo estudo.

No caso de agrupamentos, o avaliador deve estar atento para que o limite de vibração admissível seja condizente com os critérios de segurança das cavidades de maior fragilidade que fazem parte do

agrupamento. Na presença de cavernas extensas ou no caso de cavernas muito frágeis, em que se faz necessário que a medição seja realizada em local interno (como o local de maior fragilidade da caverna), a opção por “agrupamento” pode se tornar não aplicável.

De modo geral, deve ser verificado se os pontos de medição estão situados entre a atividade emissora e o local de ocorrência de caverna, estando preferencialmente o mais próximo possível da caverna – conforme especificado no item 2.1.

Quanto à definição da periodicidade da execução de monitoramentos, recomenda-se que o estudo de sismografia seja avaliado considerando-se a criticidade da atividade emissora perante à vibração sentida no local de ocorrência de caverna. Conforme fluxograma apresentado na Figura 5.8, quanto maior a amplitude da vibração gerada pela fonte emissora, quanto maior a proximidade da fonte com relação ao local de ocorrência de caverna ou quanto maior a duração do período de exposição da caverna com relação à atividade emissora, maior tende a ser o potencial de criticidade do cenário de interesse no tocante ao nível de vibração sísmica sentido no local de observação.

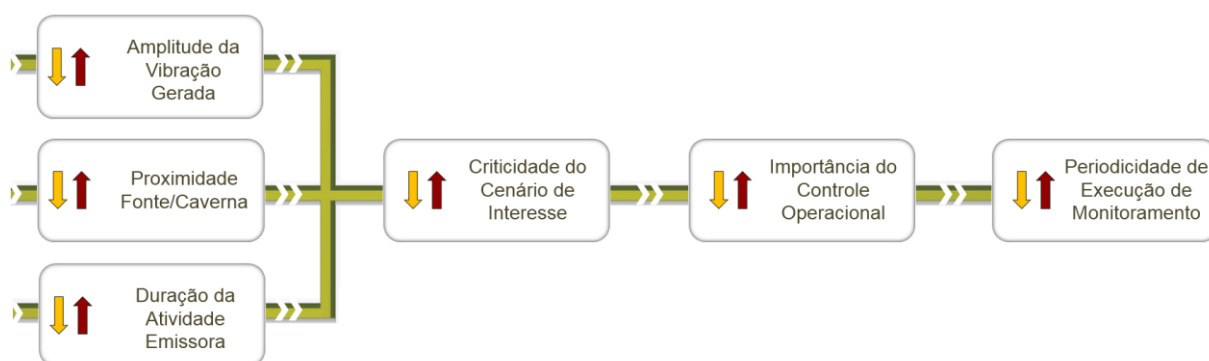


Figura 5.8: Recomendações à definição da periodicidade da execução de monitoramento sismográfico.

Nesse contexto, o controle operacional das emissões sísmicas assume maior importância, o que tende a refletir na necessidade de maior periodicidade de registros de monitoramento.

Quanto ao limite de vibração admissível, o critério de segurança deve ser condizente com o especificado pela caracterização estrutural das cavernas de interesse.

5.2. Fase Associada à Operação de Empreendimentos

Estudos de sismografia relativos à fase de operação devem ser empregados na verificação e validação dos cenários previstos nos estudos anteriores, bem como na prevenção da continuidade do processo de controle das emissões de vibração. A seguir, são apresentadas recomendações com vistas a auxiliar na avaliação dos estudos de sismografia associados a operação de empreendimentos no contexto de proteção de cavernas.

VII. Quanto à Verificação e Validação do Controle Operacional

A verificação e validação do controle operacional é de suma importância para o sucesso do controle da vibração sísmica sentida no local de ocorrência de cavernas, e podem vir a ser necessárias ao longo de toda a vida útil do empreendimento.

Os estudos associados à fase de operação devem apresentar a verificação e a validação por meio de registros de monitoramento sismográfico dos níveis de vibração previstos pelos estudos desenvolvidos quando da fase conceitual – conforme descrito no item IV.

O avaliador deve verificar se os registros de monitoramento obtidos estão condizentes com os níveis previstos de vibração. Em caso negativo, deve-se estar atento para justificativas que permitam esclarecer a variabilidade identificada. No caso dos registros de vibração revelarem níveis superiores ao limite admissível no local de ocorrência de cavernas, as ações de mitigação devem ser implementadas de maneira a resultar na sua redução.

6. ESTUDOS DE SISMOGRAFIA DE DESMONTES DE ROCHA

As informações apresentadas no Capítulo anterior são também aplicáveis à análise dos estudos de sismografia envolvendo desmontes de rocha com uso de explosivos. No entanto, devido ao elevado potencial de energia sísmica associado à atividade e à complexidade dos elementos que influenciam na respectiva emissão de vibração, este Capítulo apresenta, de maneira específica, considerações complementares relacionadas à atividade de desmonte de rocha.

São apresentadas, na sequência, considerações quanto ao modelo de projeção sismográfica a ser empregado no processo de controle operacional, quanto aos aspectos que interagem na determinação do limite operacional e quanto à incerteza associada aos resultados de simulação sismográfica, com vistas a fornecer informações técnicas que subsidiem a análise dos estudos de sismografia de desmontes de rocha no contexto de proteção de cavernas.

6.1. Considerações Quanto aos Modelos de Projeção Sismográfica

O nível de vibração sísmica proveniente da atividade de desmonte de rocha com uso de explosivos tende a aumentar com o acréscimo da carga de explosivos, e a reduzir com o afastamento do local do desmonte. A maneira como esses elementos interagem pode ser representada por meio de modelos de projeção sismográfica. Diversos modelos permitem expressar a curva de tendência representativa do comportamento de propagação da vibração pelo terreno, ou pelo maciço, para o caso de desmonte de rocha. A Tabela 6.1 apresenta alguns dos modelos consagrados disponíveis em literatura técnica específica.

Tabela 6.1: Modelos de projeção de vibração decorrentes de desmonte de rocha.

Identificação	Ano	Equação*
USBM	1959	$V = K (D/\sqrt{Q})^{-b}$
Langefors-Kihlstrom	1963	$V = \left(\sqrt{Q/D^{3/2}} \right)^b$
General predictor (Davies)	1964	$V = K D^{-b} Q^a$
Ambraseys-Hendron	1968	$V = K (D/\sqrt[3]{Q})^{-b}$
Ghosh-Daemen	1983	$V = K (D/\sqrt{Q})^b e^{-aD}$
CMRI – CIMFR (Pal Roy)	1993	$V = n + K(D/\sqrt{Q})^{-1}$

* Sendo V a vibração de velocidade de pico da particular (PPV) em mm/s, D a distância do local do desmonte de rocha, em metros, Q a carga máxima por espera, em kg; K , a , b e n consistem em parâmetros de desempenho intrínsecos ao cenário de interesse, a serem definidos pela calibração do desmonte padrão.

Os modelos de propagação sísmica se diferem no tocante a particularidades de cada caso, as quais assumem importância quando do desenvolvimento de pesquisas sobre o tema. Na prática, porém, os resultados fornecidos pelos modelos podem ser considerados similares, uma vez que a variação dos resultados é significativamente inferior à variabilidade associada à própria operação de desmonte de rocha com uso de explosivos.

Todos os modelos citados têm respaldo técnico científico suficiente para serem empregados na projeção sismográfica com vistas ao controle de vibração em área de ocorrência de cavernas, sendo o modelo desenvolvido pela agência do governo norte americano *U. S. Bureau of Mines* (USBM) o mais referenciado em estudos de pesquisas e o mais amplamente utilizado pelos órgãos oficiais internacionais.

6.2. Considerações Quanto ao Limite Operacional

O resultado principal de estudos de sismografia de desmontes de rocha elaborados com vistas à proteção de cavidades consiste no mapeamento da carga máxima por espera⁷ (CME) a ser empregada no plano de fogo característico do empreendimento. A Figura 6.1 apresenta um exemplo desse mapeamento associado ao contexto da fase de implantação, no qual a CME é determinada ao longo do perímetro de cava. A Figura 6.2 e a Figura 6.3 apresentam um exemplo do respectivo mapeamento associado ao contexto da fase de operação do empreendimento, no qual a CME é determinada ao longo de toda a extensão da área de cava.

⁷ Ressalta-se que, nas equações da Tabela 6.1, o termo “carga máxima por espera” foi identificado pela letra “Q”, conforme disposto nos documentos técnicos científicos correspondentes. Neste relatório, optou-se, entretanto, pela representação do termo por “CME”, de maneira a se evitar confusão com a “carga total de explosivos” a ser empregada em desmontes de rocha.

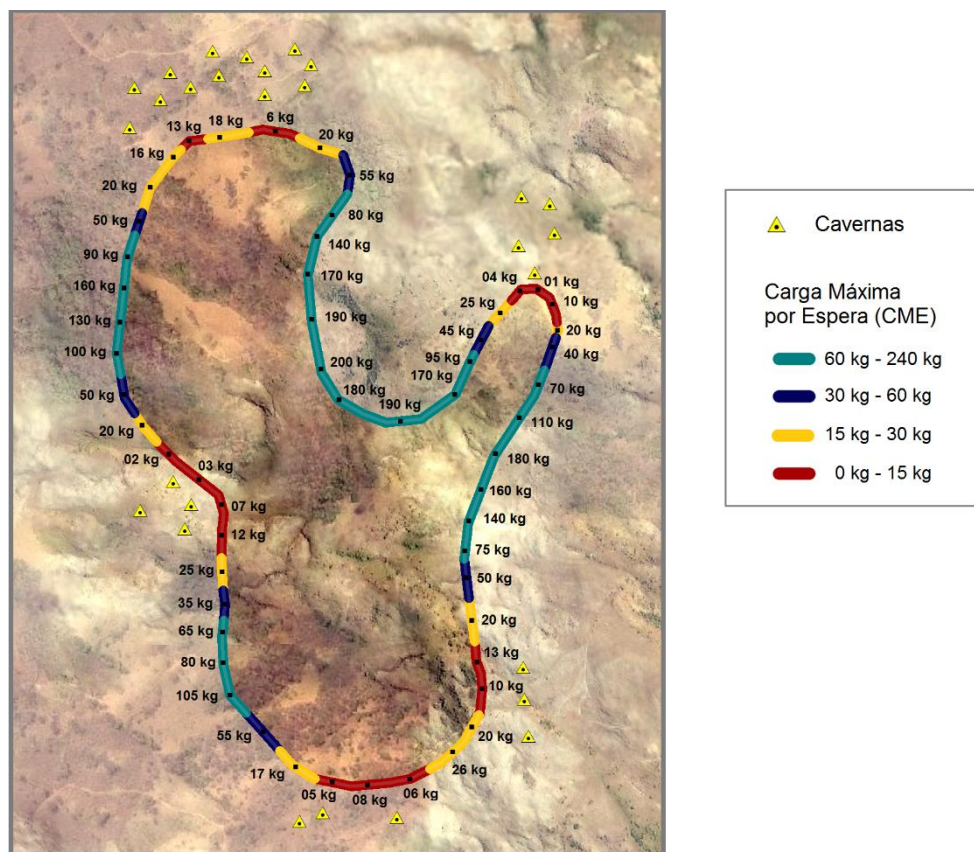


Figura 6.1 CME determinada para critério de segurança de cavidades igual a 5 mm/s – âmbito da fase de projeto conceitual.

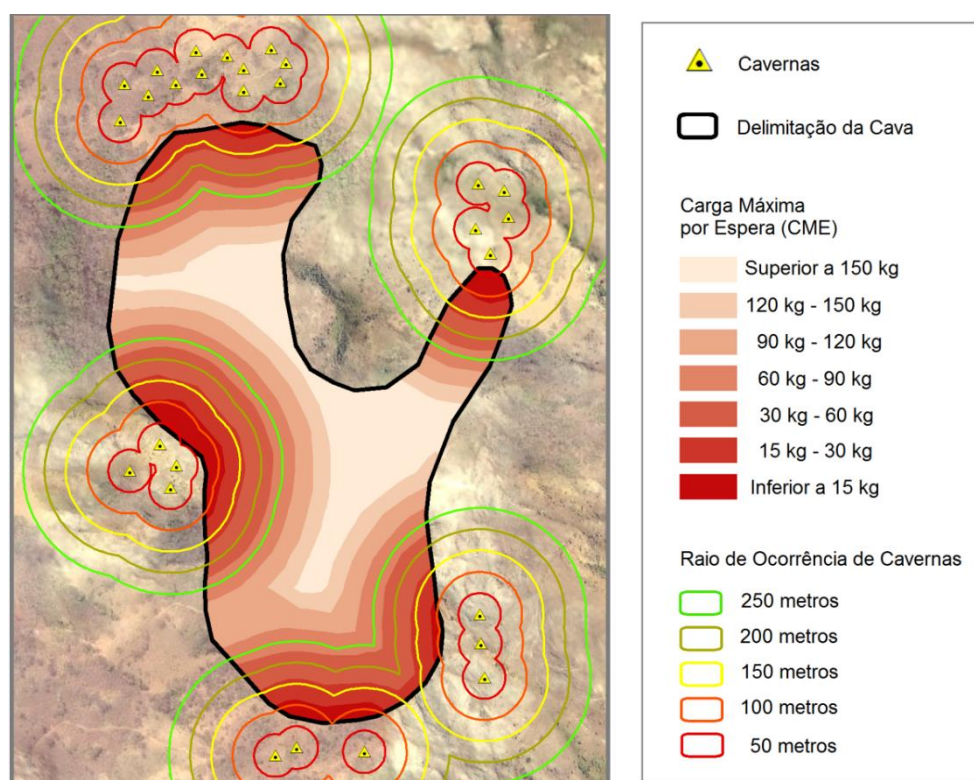


Figura 6.2: CME determinada para critério de segurança de cavidades igual a 5 mm/s – fase de operação dos desmontes de rocha.

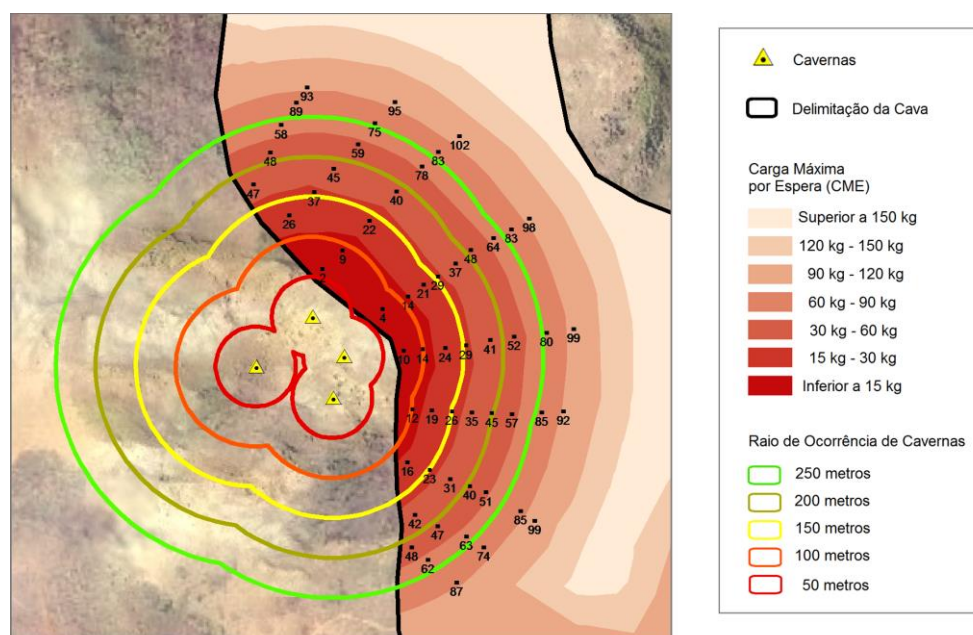


Figura 6.3: CME em área de lavra próxima ao local de ocorrência de cavernas para critério de segurança igual a 5 mm/s.

Por meio do mapeamento da CME é possível identificar o grau de limitação considerado à operação da atividade de desmonte de rocha, de maneira a atender ao limite pré-definido de vibração, na área de ocorrência de caverna.

O resultado do limite operacional representado pelo mapeamento da CME admissível está relacionado a dois aspectos principais: (i) o critério de segurança da caverna (alvo receptor); e (ii) os resultados de monitoramento sismográfico que caracterizam o comportamento de propagação sísmica no terreno, ou no maciço, do entorno da cava. A seguir é apresentada a análise específica do resultado metodológico considerando-se a influência desses dois aspectos na determinação da CME⁸.

6.2.1. Menor Restrição Operacional

Os limites de CME determinados à operação da cava devem ser definidos a partir da curva de tendência comportamental. A Figura 6.4 apresenta o gráfico de vibração em função da Distância Escalonada, nele são apresentadas duas curvas. A curva identificada como de comportamento projetional teórico foi obtida a partir do modelo projetional USBM, considerando os parâmetros de desempenho (teóricos) disponíveis em literatura para a litologia calcário. A fim de exemplificar a influência do comportamento sísmico do entorno da cava nos resultados do limite operacional, parâmetros de desempenho foram definidos de maneira a dar origem a uma curva de tendência comportamental, que reproduza uma condição de menor restrição à operação da cava.

⁸ Os resultados são apresentados para o cenário associado à fase de projeto conceitual, na qual a CME é determinada ao longo do perímetro de cava, no entanto, as análises tecidas são igualmente aplicáveis ao caso do cenário relacionado à fase de operação de empreendimentos, em que a CME é determinada ao longo de toda a extensão da área de cava.

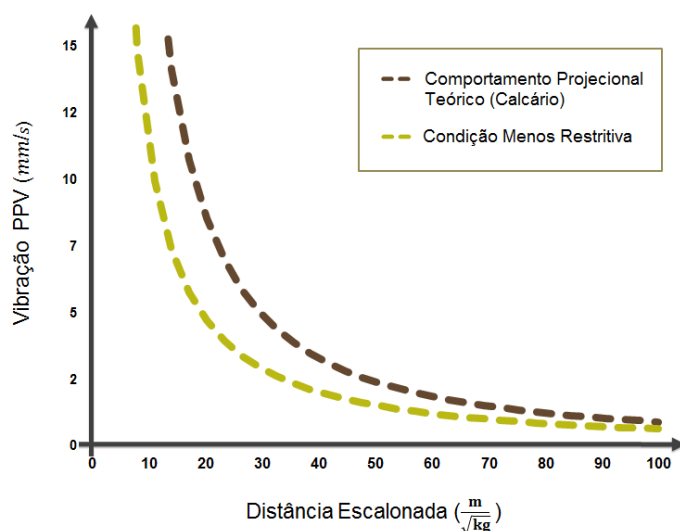


Figura 6.4: Curva de tendência comportamental de propagação sísmica em condição de menor restrição operacional.

A Figura 6.5 apresenta o mapeamento de CME correspondente a ambas as curvas de comportamento de propagação sísmica, considerando o limite de 5 mm/s como critério de segurança às cavernas existentes no entorno da cava. O mapeamento indicado na figura A refere-se ao comportamento projecional dito teórico, enquanto que o indicado na figura B consiste na condição de propagação sísmica pelo terreno, ou pelo maciço, que resulta em um comportamento menos restritivo à operação da cava.

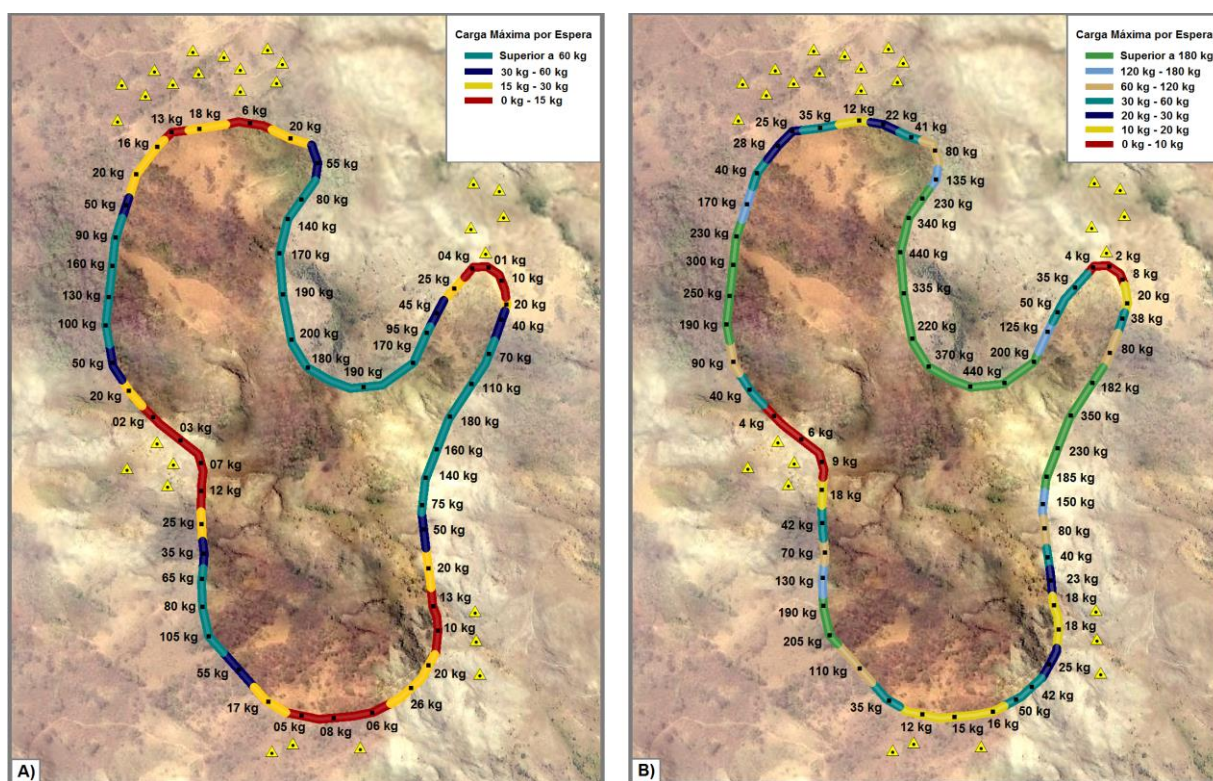


Figura 6.5: Limite de carga máxima por espera ao longo do perímetro da cava para critério de segurança de cavidades igual a 5 mm/s: a) comportamento projecional teórico, b) condição de menor restrição.

A análise dos resultados revela que o deslocamento da curva de tendência no sentido de menor Distância Escalonada (Figura 6.4) reflete na redução de restrição ao limite operacional imposto à atividade de desmonte de rocha com uso de explosivos. Cabe lembrar que a curva de tendência a ser apresentada nos estudos de sismografia deve ser determinada a partir de registros de monitoramento sismográfico de maneira a reproduzir o comportamento de propagação sísmica característico do entorno da cava.

6.2.2. *Maior Restrição Operacional*

De maneira similar, a Figura 6.6 apresenta o gráfico de vibração em função da Distância Escalonada, contendo a curva de comportamento vibracional teórico para a litologia calcário e uma curva de tendência comportamental associada a uma condição de maior restrição quanto à operação da cava.

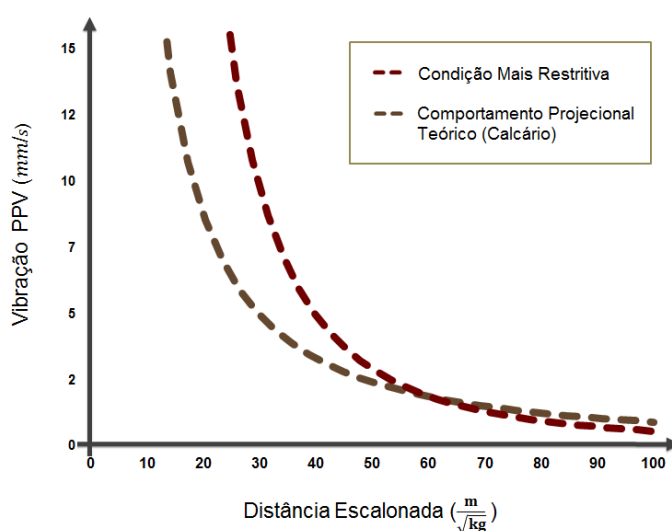


Figura 6.6: Curva de tendência comportamental de propagação sísmica em condição de maior restrição operacional.

O mapeamento de CME correspondente às curvas de comportamento de propagação sísmica é apresentado na Figura 6.7, considerando o limite de 5 mm/s como critério de segurança às cavernas existentes no entorno da cava. O mapeamento indicado na figura A refere-se ao comportamento projecional dito teórico, enquanto que o indicado na figura B consiste na condição de propagação sísmica pelo terreno, ou pelo maciço, que resulta em um comportamento de maior restrição à operação da cava.

Em linha com a análise apresentada no item anterior, os resultados obtidos revelam que o deslocamento da curva de tendência no sentido de maior Distância Escalonada (Figura 6.6) reflete no aumento de restrição ao limite operacional imposto à atividade de desmonte de rocha com uso de explosivos.

As considerações aqui apresentadas evidenciam a importância da curva projecional na representação do comportamento de propagação sísmica ao local de ocorrência de cavernas. Nesse contexto, o avaliador deve estar para que a curva projecional a ser utilizada seja representativa do comportamento que caracteriza a propagação sísmica no entorno da cava objeto de licenciamento.

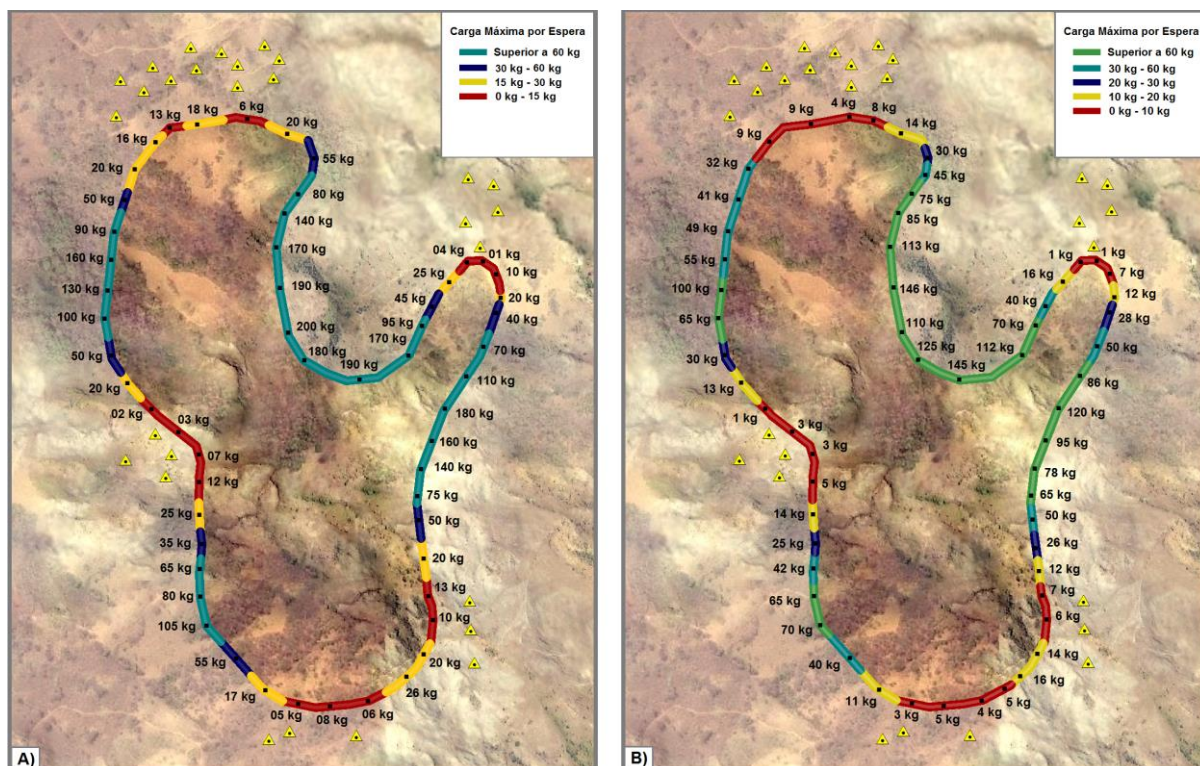


Figura 6.7: Limite de carga máxima por espera ao longo do perímetro da cava para critério de segurança de cavidades igual a 5 mm/s: a) comportamento projecional teórico, b) condição de maior restrição.

6.2.3. Influência do Critério de Segurança da Caverna

Nos itens anteriores foi analisada a influência da variação da curva de tendência comportamental com relação à Distância Escalonada no resultado de limite operacional à atividade de desmonte de rocha. Neste presente item, o limite da operação é avaliado levando-se em consideração a variação do critério de segurança às cavernas existentes no entorno da cava.

O critério de segurança de cada caverna irá influenciar diretamente na limitação operacional da atividade na cava: quanto menor o limite de vibração admissível no local de ocorrência da caverna mais restritivo tende a ser o limite imposto à operação da atividade de desmonte de rocha. A Figura 6.8 apresenta dois mapeamentos de CME obtidos a partir do modelo projecional USBM (Tabela 6.1), considerando os parâmetros de desempenho disponíveis em literatura para a litologia calcário. Na figura A, são apresentados os resultados para o cenário de critério de segurança de 5 mm/s às cavernas do entorno, e na figura B os resultados de CME são apresentados para o cenário de critério de segurança das cavernas igual a 15 mm/s.

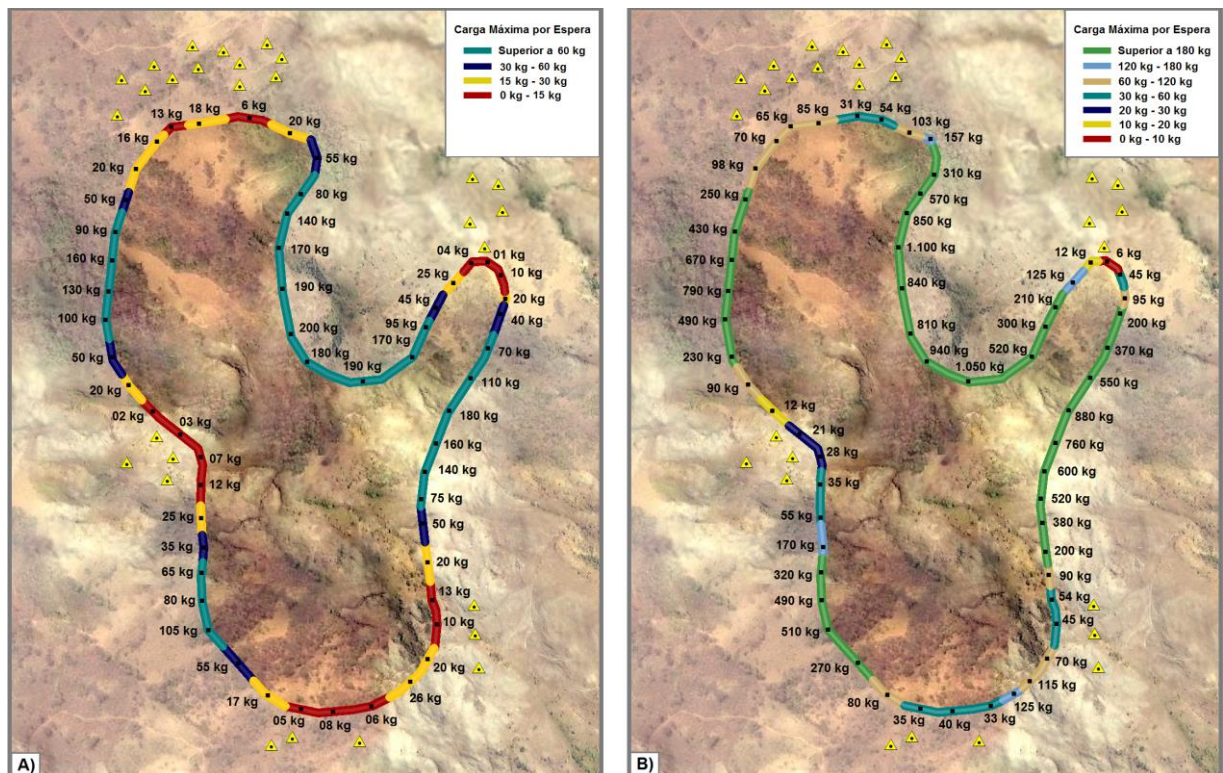


Figura 6.8: Limite de carga máxima por espera ao longo do perímetro da cava: a) critério de segurança das cavernas igual a 5 mm/s, b) critério de segurança das cavernas igual a 15 mm/s.

Do ponto de vista de proteção de cavernas, os contextos apresentados na Figura 6.8 consideram uma variação significativa (de ordem 3) entre os dois níveis de vibração analisados como critério de segurança às cavernas existentes no entorno. Por outro lado, a comparação dos resultados dos mapeamentos revela a forte influência da variação do critério de segurança no limite de operação da atividade.

6.3. Considerações Quanto à Incertezas Associadas à Projeção Sismográfica

A curva de tendência de comportamento sísmico indicada nos itens anteriores é geralmente determinada a partir de resultados de monitoramento sismográfico, conforme apresentado na Figura 6.9.

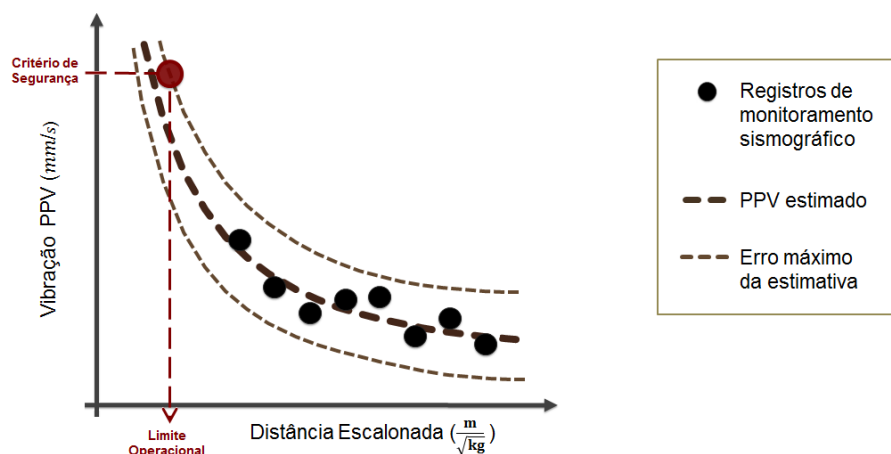


Figura 6.9: Resultado de projeção sismográfica em função da Distância Escalonada.

A incerteza associada indica a representatividade do modelo ajustado com relação ao comportamento real de vibrações sísmicas em estudo ou, em outras palavras, fornece a variabilidade estimada ao valor resultante do modelo de projeção sismográfica. No caso do modelo indicado na Figura 6.9, a incerteza associada é indicada pelo erro máximo da estimativa, sendo diretamente associada à quantidade de registros (amostragem de pontos) e à dispersão dos resultados de monitoramento.

De maneira a evidenciar a influência desses dois aspectos na incerteza associada ao modelo de projeção sismográfica, a seguir são considerados três contextos de avaliação, cujos gráficos correspondentes são apresentados na Figura 6.10.

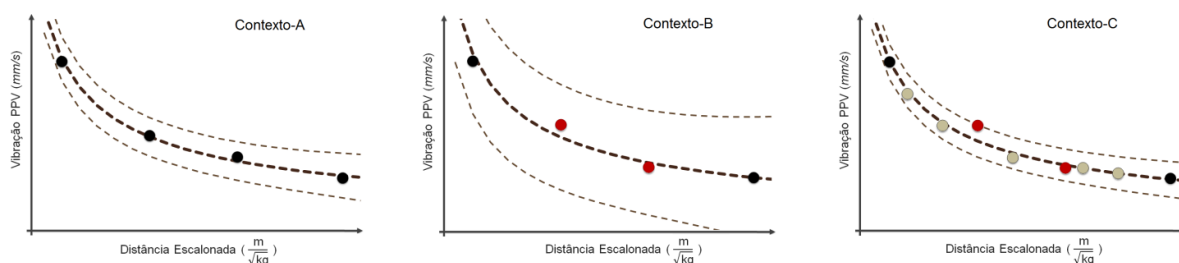


Figura 6.10: Influência da quantidade amostral e da dispersão dos resultados de monitoramento na curva de tendência de projeção sismográfica.

O Contexto-A é caracterizado pela curva de tendência obtida pela quantidade igual a quatro registros de monitoramento sismográfico, os quais se apresentam em baixa dispersão com relação à curva obtida. O contexto-B é caracterizado por igual quantidade de registros, porém por resultados ligeiramente mais dispersos: dois registros de sismografia idênticos ao do contexto anterior (pontos indicados em preto), e dois registros ligeiramente mais distantes com relação à curva de tendência (pontos indicados em vermelho).

O contexto-C é constituído pela quantidade amostral de nove registros de monitoramento sismográfico, sendo que quatro pontos são idênticos aos do Contexto-B; os demais cinco novos registros (pontos indicados em cinza) foram acrescidos de maneira a estarem ligeiramente alinhados à curva de tendência.

A análise comparativa do Contexto-A e do Contexto-B revela que em casos de baixa quantidade amostral (quatro pontos) uma ligeira variação em dois registros de monitoramento assume significativa influência em relação ao erro máximo da estimativa (linhas tracejadas em ambos os gráficos). Quando se aumenta a quantidade amostral (Contexto-C), menor tende a ser o erro máximo da estimativa, bem como mais reduzida torna-se a influência de variações de um ou dois registros de sismografia diante do comportamento geral da estimativa.

Na análise comparativa dos três contextos, identifica-se que:

- Quanto maior a quantidade amostral (registros de monitoramento) empregada na obtenção da curva, menor tende a ser a incerteza associada aos resultados do modelo projecional;
- Quanto maior a dispersão dos resultados de monitoramento, maior a incerteza associada à curva projecional.

Ressalta-se que a dispersão dos resultados de monitoramento está geralmente associada à falta de padronização na operação dos desmontes e na adoção de acessórios de baixa qualidade no plano de fogo, resultando em baixa reprodutibilidade do resultado esperado no tocante a sismografia.

Com vistas a se avaliar o grau de padronização dos desmontes e a qualidade dos acessórios empregados no plano de fogo, é essencial que, junto dos resultados de monitoramento sismográfico, sejam igualmente disponibilizadas informações quanto à configuração do respectivo desmonte objeto de monitoramento, conforme, por exemplo, o descritivo proposto no Anexo II do documento “Sismografia Aplicada à Proteção do Patrimônio Espeleológico - Orientações Básicas à Realização de Estudos Ambientais”, disponibilizado pelo CECAV no ano de 2016.

6.4. Considerações Quanto ao Mapeamento da CME

Conforme apresentado anteriormente, o mapeamento de CME consiste no principal resultado do estudo de sismografia de desmontes de rocha com uso de explosivos, o qual irá fornecer a limitação quanto à operação da atividade a fim de atender o limite definido de vibração na área de ocorrência de caverna.

O mapeamento proposto para a fase de projeto conceitual considera suficiente a delimitação do perímetro da cava para a determinação dos limites de CME, visto que nesses locais estarão inclusas as áreas da cava de maior criticidade quanto à emissão sísmica – correspondentes às regiões de maior proximidade da cava com relação às cavernas existentes no entorno.

Quando da fase de projeto conceitual, em decorrência da inexistência de operações de desmontes de rocha no local, entende-se como suficiente o emprego de parâmetros de desempenho teóricos. Embora não representem, necessariamente, de maneira fiel o comportamento característico do entorno da área de lavra em questão, os resultados obtidos propiciarão ao empreendedor ter ciência de que a operação da cava requer que as emissões de vibração sejam controladas, bem como ter ciência da ordem de grandeza da CME a ser empregada na cava, além de fazer com que o empreendedor assuma a necessidade de se proceder com a manutenção do processo de controle dos níveis de vibração ao longo da fase de operação do empreendimento.

No caso do processo de controle de vibração associado à fase de operação de empreendimentos, faz-se necessário que o mapeamento da CME tenha a abrangência da área de cava por completo, de

maneira a indicar os limites de carga de explosivo admissíveis em todos os locais disponíveis para desmontes.

Os limites definidos de CME estão associados ao nível máximo de vibração permitido nos locais de ocorrência de caverna e, portanto, devem, necessariamente, ser determinados a partir de parâmetros de desempenho característicos da operação da respectiva cava em específico, de maneira a reproduzir o comportamento de propagação sísmica identificado por meio de registros de monitoramento sismográfico. A Tabela 6.2 sintetiza as recomendações indicadas.

Tabela 6.2: Considerações quanto ao mapeamento da CME para as diferentes fases do empreendimento.

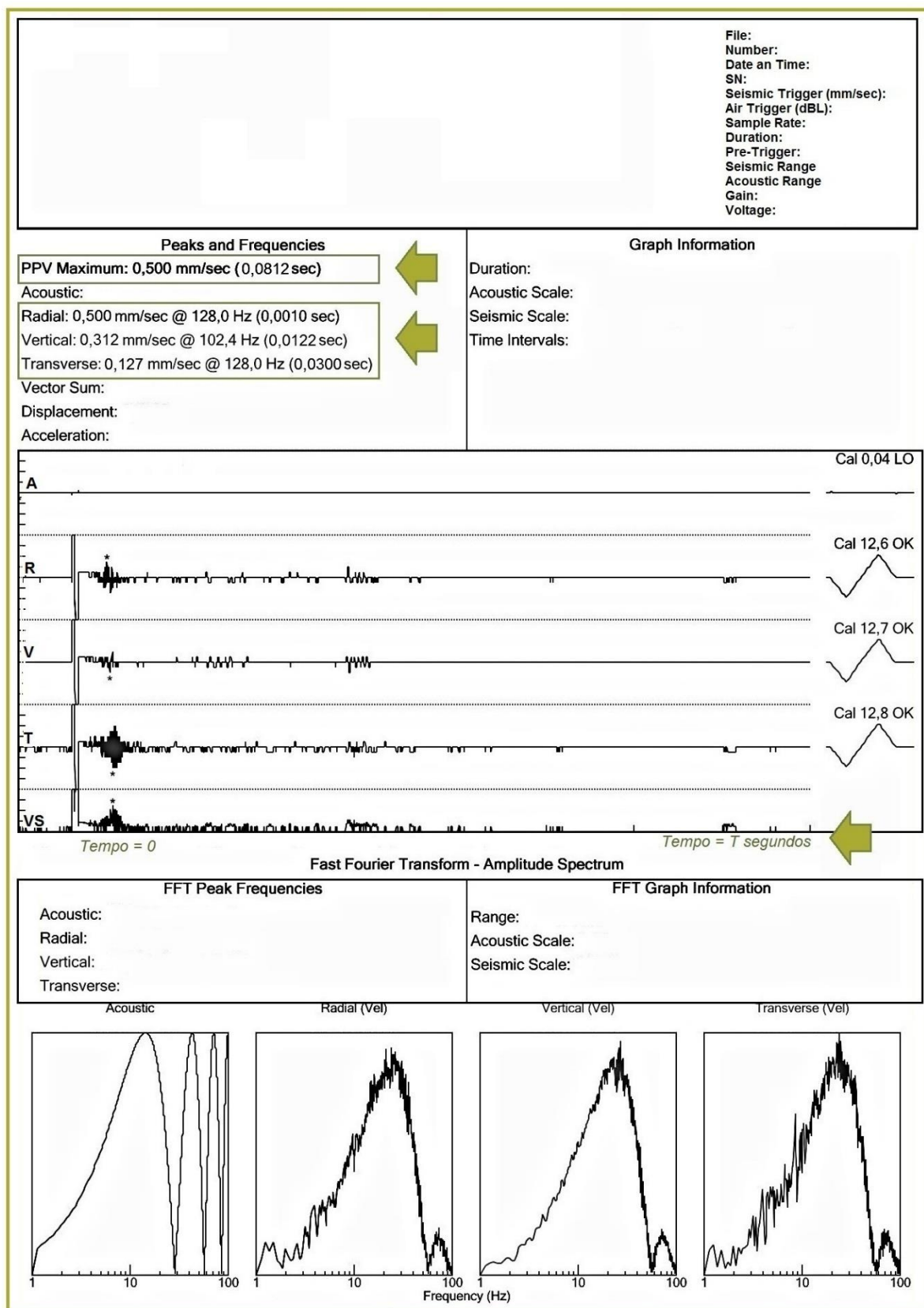
Fase do Empreendimento	Parâmetros de Desempenho	Abrangência do Mapeamento de CME
Fase de projeto conceitual.	Parâmetros teóricos característicos da litologia em questão.	Ao longo de todo o perímetro da cava.
Fase associada à operação do empreendimento.	Parâmetros específicos das cava objeto de licenciamento.	Ao longo de toda a extensão da cava.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- **A. Ghosh, J. Daemen**, *A simple new blast vibration predictor*, In: Mathewson C, editor. Proc 24th US Symp Rock Mech. Texas: College Station, pp. 151–161, 1983.
- **Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT NBR 9653:2005** – Guia para avaliação dos efeitos provocados pelo uso de explosivos nas minerações em áreas urbanas.
- **B. Davies, I. Farmer, P. Attewell**, *Ground vibrations from shallow sub-surface blasts*. Engineer – London 217: pp. 553–559, 1964.
- **CECAV - Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas**, Oficina sobre Área de Influência de Cavidades Naturais Subterrâneas – Relatório Final, 2013.
- _____, *Área de Influência sobre o Patrimônio Espeleológico - Orientações Básicas à Realização de Estudos Espeleológicos*, 2015.
- _____, *Sismografia Aplicada à Proteção do Patrimônio Espeleológico – Orientações Básicas à Realização de Estudos Ambientais*, 2016.
- **C. H. Dowding**, *Blast Vibration Monitoring e Control*, Prentice Hall Inc., 297 pp., 1985.
- **C. H. Dowding**, *Construction Vibrations*. Prentice Hall Inc., 610 pp., 2000.
- **CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente**. Resolução nº 347. Dispõe sobre a proteção do patrimônio espeleológico. Brasília, 2004.
- **Deutsche Norm DIN-4150-3**: Structural Vibration Part 3: Effects of vibration on structures, 1999.
- **H. Miller**, *Transit Noise and Vibration Impact Assessment*, Report DOT-T-95-16 U.S. Department of Transportation and Federal Transit Administration, April 1995.
- **K. Bullen, B. Bolt**, *An Introduction to the theory of Seismology*, Cambridge University Press, 1987.
- **N. Ambraseys, A. Hendron**, *Dynamic behavior of rock masses: rock mechanics in engineering practices*. In: Stagg K, Wiley J, editors. Rock mechanics in Engineering Practices. London: Wiley. pp. 203–207, 1968.
- **Norma Portuguesa NP 2074**. Avaliação da influência em construções de vibrações provocadas por explosões ou solicitações similares. Instituto Português da Qualidade (IPQ), Lisboa, 1983.
- **P. Pal Roy**, *Putting ground vibration predictors into practice*. Colliery Guardian 241: pp.63–67, 1993.
- **R. Sarsby**, *Environmental Geotechnics*, Thomas Telford, 584 pp., 2000.
- **U Langefors, B. Kihlstrom**, *The modern techniques of rock blasting*. New York: Wiley. 438 pp., 1963.
- **UNI 9916. Norma italiana** – Criteri di Misura e Valutazione Degli Effetti Delle Vibrazioni Sugli Edifici, 1991.
- **W. Duvall, B. Petkof**, Spherical propagation of explosion of generated strain pulses in rocks. USBM RI-5483: pp. 1–22, 1959.

ANEXO

Exemplo de Laudos de Monitoramento Sismográfico



Date/Time
Trigger Source
Range
Record Time

Notes
Location
Client
User Name
General

Serial Number
Battery Level
Unit Calibration
File Name
Post Event Notes

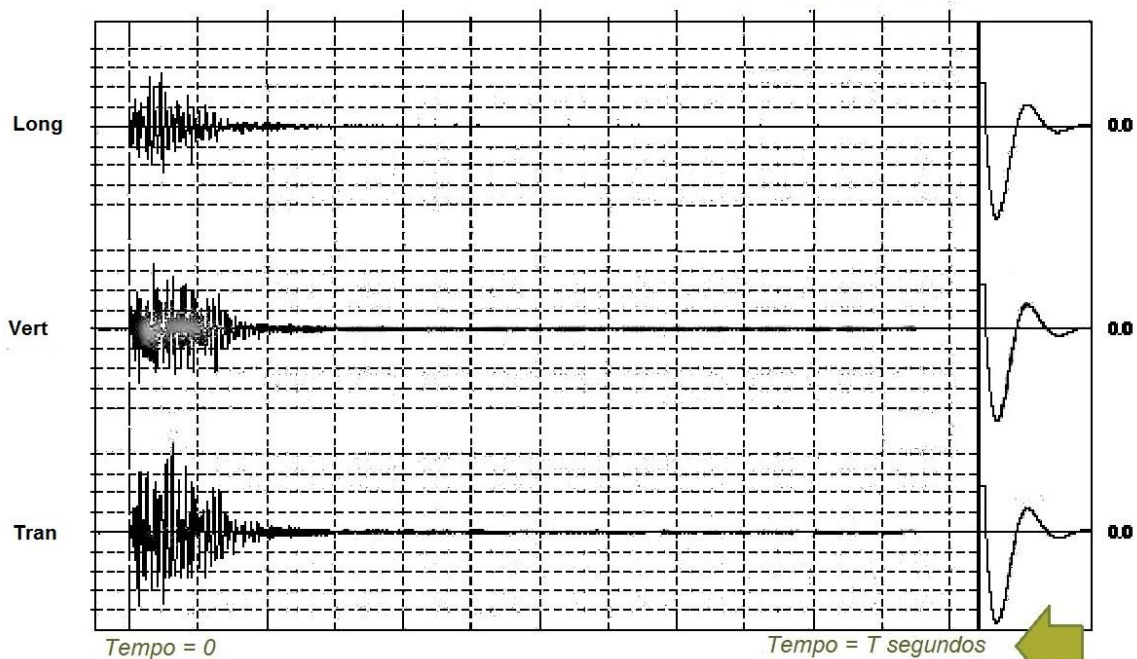
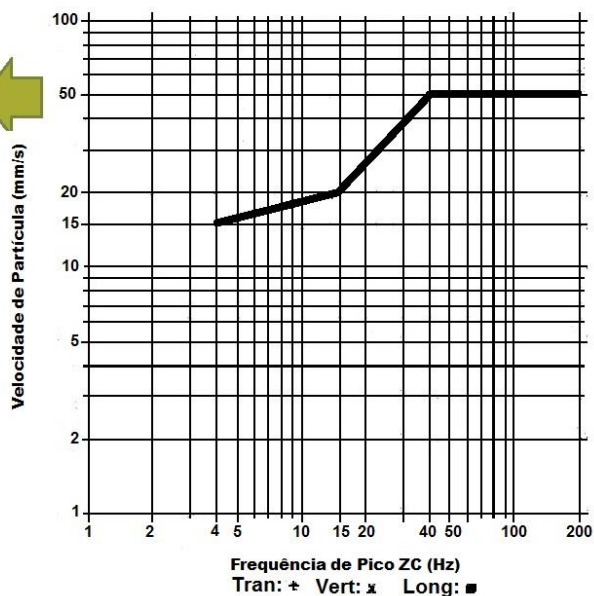
Extended Notes

	Tran	Vert	Long	
PPV	0.610	0.325	0.256	mm/s
ZC Freq	64	37	45	Hz

Time (Rel. to Trig)
Peak Acceleration
Peak Displacement
Sensor Check
Frequency
Overswing Ratio

Peak Vector Sum

Norma Brasileira - ABNT NBR 9653/2005





MINISTÉRIO DO
MEIO AMBIENTE



Sismografia Aplicada ao Patrimônio Espeleológico

Orientações Básicas à Realização de Estudos Ambientais



REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL

Presidente
MICHEL TEMER

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE

Ministro
JOSÉ SARNEY FILHO

Secretária de Biodiversidade e Floresta
JOSÉ PEDRO DE OLIVEIRA COSTA

INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE

Presidente
RÔMULO JOSÉ FERNANDES BARRETO MELLO

Diretor de Pesquisa, Avaliação e Monitoramento da Biodiversidade
MARCELO MARCELINO DE OLIVEIRA

Ministério do Meio Ambiente
Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade
Diretoria de Pesquisa, Avaliação e Monitoramento da Biodiversidade

**SISMOGRAFIA APLICADA À
PROTEÇÃO DO PATRIMÔNIO ESPELEOLÓGICO**
Orientações Básicas à Realização de Estudos Ambientais
Edição Revisada

ICMBIO

BRASÍLIA, DEZEMBRO DE 2016

©ICMBio 2016.

©dos Autores 2016.

Sismografia Aplicada à Proteção do Patrimônio Espeleológico: Orientações Básicas à Realização de Estudos Ambientais

Coordenador do Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas do Instituto Chico Mendes

JOCY BRANDÃO CRUZ

AUTORES

Marcos Pinho - Consultor

André Afonso Ribeiro - Cecav

Cristiano Ferreira Fernandes - Cecav

Jocy Brandão Cruz - Cecav

José Carlos Ribeiro Reino - Cecav

REVISÃO TÉCNICA

André Afonso Ribeiro

Cristiano Ferreira Fernandes

José Carlos Ribeiro Reino

FOTO CAPA

Cristiano Ferreira Fernandes

Caverna Santana - Iporanga/SP

Catálogo na Fonte

Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade

I59s	Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade. Sismografia Aplicada à Proteção do Patrimônio Espeleológico: orientações básicas à realização de estudos ambientais / Marcos Pinho. [et al.]. – Brasília: ICMBio, 2016. 55 p. ; Il. Color. ISBN 978-85-61842-64-2
------	---

1. Sismografia. 2. Espeleologia. 3. Estudos ambientais. 4. Licenciamento ambiental. I. Ribeiro, André Afonso. II. Fernandes, Cristiano Ferreira. III. Cruz, Jocy Brandão. IV. Reino, José Carlos Ribeiro. V. Pinho, Marcos. VI. Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade – ICMBio. VII. Diretoria de Pesquisa, Avaliação e Monitoramento da Biodiversidade. VIII. Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas – Cecav. V. Título.

CDU(2.ed.)551.44

A reprodução total ou parcial desta obra é permitida desde que citada a fonte.

INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE

Diretoria de Pesquisa, Avaliação e Monitoramento da Biodiversidade

Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas

SAS QUADRA 05, LOTE 05, BLOCO H, 4º ANDAR

CEP 70070-914 - Brasília/DF - Tel: 61 3035-3467

<http://www.icmbio.gov.br/CECAV>

APRESENTAÇÃO

Maquinários e atividades em geral caracterizados por emissões de vibração quando inseridos no entorno de locais de ocorrência de cavernas devem operar de maneira controlada, de forma a restringir o nível de vibração a limites admissíveis, com vistas a assegurar a integridade física de cavidades e a não impactar demais estruturas de relevância espeleológica, como espeleotemas.

No ano de 2013 foi promovida pelo CECAV oficina cujo resultado principal foi a elaboração de um manual com orientações técnicas aos termos de referência para subsidiar o processo de licenciamento ambiental e estudos específicos associados a empreendimentos inseridos em áreas com ocorrência de cavernas. No ano seguinte foi disponibilizado, também pelo CECAV, documento em que os elementos físicos (abióticos) e os elementos bióticos foram considerados como necessários à definição da área de influência de uma caverna. Ambos os elementos são originados de fatores naturais e inerentes às tipologias de empreendimentos e danos potenciais.

No contexto de sismografia, exceto quando da existência de fenômenos da natureza (por exemplo, terremotos), a vibração na região do patrimônio espeleológico não é originária de fatores naturais, mas da operação de maquinários e de atividades associadas a empreendimentos inseridos no entorno de locais de ocorrência de caverna. Considera-se, portanto, que, não sendo originada por fatores naturais, a vibração sísmica não consiste em elemento determinante na definição da área de influência.

No entanto, em decorrência do potencial de dano passível de ocorrer em cavernas, a vibração sísmica deve ser considerada como elemento de suma importância na avaliação do modo operacional de maquinários e atividades inseridos em área de influência de uma caverna. Entende-se, desta maneira, que atividades emissoras de vibração podem operar no entorno de locais de ocorrência de cavernas desde que a emissão sísmica seja controlada na fonte.

Neste contexto, o presente documento busca estabelecer diretrizes e apresentar orientações técnicas minimamente necessárias ao controle das emissões de vibração de maquinários e atividades operacionais no geral, com vistas a subsidiar os termos de referência dos estudos a serem solicitados em processos de licenciamento ambiental de empreendimentos capazes de afetar o patrimônio espeleológico ou a sua área de influência.

Ressalta-se que, em função da complexidade de certos cenários em particular, pode ser necessária a realização de estudos complementares, de forma a viabilizar o controle específico dos níveis de vibração sentidos na área do patrimônio espeleológico.

Importa ressaltar que as diretrizes e orientações técnicas apresentadas por este documento visam a possibilitar o controle do nível de vibração sísmica tendo como referência a preservação da integridade física do ambiente cavernícola. Apesar de reconhecer a importância do tema, o presente documento não aborda o contexto de eventual interação da vibração sismográfica com os elementos bióticos que compõem os ecossistemas associados às cavernas.

Este documento encontra-se estruturado da seguinte maneira: no capítulo 1, são apresentadas as considerações gerais quanto às diretrizes e orientações mínimas necessárias para os estudos de sismografia propostos ao controle das emissões de vibração provenientes da operação de atividades no entorno de locais de ocorrência de cavernas. No capítulo 2, são apresentadas as especificações

endereçadas ao controle operacional de atividades de construção civil associadas à implantação de empreendimentos. No capítulo 3, são apresentadas proposições quanto à elaboração de estudos de sismografia pertinentes à operação de atividades minerárias, enquanto no capítulo 4 são apresentadas recomendações de estudos de controle das emissões sísmicas decorrentes da operação de empreendimentos lineares. No capítulo 5, são propostos os limites de vibração com vistas ao controle de segurança estrutural preliminar às cavernas de interesse. No capítulo 6, são apresentadas as referências bibliográficas empregadas na elaboração do presente documento. Por fim, são apresentados quatro anexos que complementam o documentos central.

SUMÁRIO

APRESENTAÇÃO	1
1. CONSIDERAÇÕES GERAIS	10
2. ATIVIDADES DE CONSTRUÇÃO CIVIL.....	11
2.1. Fase de Projeto Conceitual	12
2.1.1. Roteiro Geral	12
I. Identificação do Cenário de Interesse	12
II. Caracterização Estrutural das Cavernas de Interesse	13
II.a. Diagnóstico das fragilidades estruturais de cada caverna	13
II.b. Definição do critério de segurança de cada caverna	14
III. Caracterização das Fontes Emissoras de Vibração.....	14
III.a. Atividade de cravação de estacas por impacto:.....	14
III.b. Atividade de compactação dinâmica por batimento:	15
III.c. Tráfego de veículos de carga:.....	15
IV. Caracterização da Vibração Emitida.....	15
V. Limite Operacional	16
VI. Definição dos Elementos de Controle	16
2.1.2. Relatório do Estudo – Âmbito de Projeto Conceitual	16
2.2. Fase Associada à Operação das Atividades Emissoras de Vibração	17
2.2.1. Roteiro Geral	17
VII. Verificação e Validação do Controle Operacional.....	17
2.2.2. Relatório do Estudo – Fase de Operação das Atividades	17
3. ATIVIDADES MINERÁRIAS.....	19
3.1. Desmonte de Rocha com Uso de Explosivos	19
3.1.1. Fase de Projeto Conceitual.....	19
3.1.1.1. Roteiro Geral	20
I. Identificação do Cenário de Interesse.....	20
II. Caracterização Estrutural das Cavernas de Interesse	21
II.a. Diagnóstico das fragilidades estruturais de cada caverna	21
II.b. Definição do critério de segurança de cada caverna	22
III. Caracterização da Fonte Emissora	22
IV. Caracterização Preliminar da Vibração Emitida	22
V. Limite Operacional Preliminar.....	23

VI.	Definição dos Elementos de Controle	23
VI.a.	Pontos diversos de monitoramento.....	24
VI.b.	Um ponto de monitoramento representativo a mais de uma caverna	24
VI.c.	Mais de um ponto de monitoramento para uma única caverna	25
3.1.1.2.	Relatório do Estudo - Âmbito de Projeto Conceitual	26
3.1.2.	Fase de Operação das Atividades Emissoras de Vibração	26
3.1.2.1.	Roteiro Geral	29
VII.	Plano de Lavra	29
VIII.	Execução de Desmontes-Padrão	29
IX.	Execução do Monitoramento Sismográfico do Desmonte Padrão	29
X.	Projeção Sismográfica	29
XI.	Limite Operacional	31
XII.	Elaboração/Adequação do Plano de Fogo da Mineradora	32
XIII.	Execução do Desmonte	32
XIV.	Execução do Monitoramento Sismográfico	32
XV.	Avaliação dos Resultados de Monitoramento	32
XVI.	Atualização dos Parâmetros de Desempenho	33
XVII.	Quando o Resultado é Coerente	33
XVIII.	Controle das Emissões de Vibração	33
XIX.	É possível Identificar a(s) Causa(s) da Variação e Atuar de Forma a Tornar o Desmonte Controlável?.....	34
XX.	Execução de Ações de Adequação	34
	Fim	34
3.1.2.2.	Relatório do Estudo - Fase de Operação das Atividades.....	35
3.2.	Atividades Diversas Emissoras de Vibração.....	35
3.2.1.	Roteiro Geral	36
I.	Identificação do Cenário de Interesse.....	36
II.	Caracterização Estrutural das Cavernas de Interesse	36
II.a.	Diagnóstico das fragilidades estruturais de cada caverna	36
II.b.	Definição do critério de segurança de cada caverna	37
III.	Caracterização das Fontes Emissoras de Vibração.....	37
IV.	Definição do Plano de Monitoramento Sismográfico	37
V.	Caracterização da Vibração Emitida.....	38
VI.	Limite Operacional	38
VII.	Verificação do Controle Operacional	38

3.2.2.	Relatório do Estudo – Fase de Operação das Atividades	38
4.	EMPREENDIMENTOS LINEARES.....	39
4.1.	Fase de Projeto Conceitual	40
4.1.1.	Roteiro Geral	40
I.	Identificação do Cenário de Interesse	40
II.	Caracterização Estrutural das Cavernas de Interesse	41
II.a.	Diagnóstico das fragilidades estruturais de cada caverna	41
II.b.	Definição do critério de segurança de cada caverna	42
III.	Caracterização das Fontes Emissoras de Vibração.....	42
IV.	Caracterização da Vibração Emitida.....	42
V.	Limite Operacional	43
VI.	Definição dos Elementos de Controle	43
4.1.2.	Relatório do Estudo – Âmbito de Projeto Conceitual	44
4.2.	Fase Associada à Operação das Atividades Emissoras de Vibração	44
4.2.1.	Roteiro Geral	44
VII.	Verificação e Validação do Controle Operacional.....	44
4.2.2.	Relatório do Estudo – Fase de Operação das Atividades	45
5.	CRITÉRIO DE SEGURANÇA PRELIMINAR	46
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	48
ANEXO I	49	
	Recomendações Quanto à Execução de Monitoramento Sismográfico de Atividades Emissoras de Vibração na Construção Civil.....	49
ANEXO II.....	51	
	Informações a Serem Reportadas por Relatórios de Monitoramento Sismográfico de Desmontes de Rocha com Uso de Explosivos	51
ANEXO III	52	
	Tabela T- Student	52
ANEXO IV	53	
	Recomendações Quanto à Execução de Monitoramento Sismográfico Relacionado à Operação de Empreendimentos Lineares	53

1. Considerações Gerais

A análise da vibração sísmica associada à segurança estrutural de cavernas é o resultado da composição de elementos diversos, considerando-se desde a variabilidade de tipologias de fontes emissoras, passando pela complexidade dos aspectos que envolvem a propagação e a atenuação sísmica pelo terreno, ou pelo maciço, além da constituição geoestrutural intrínseca a cada caverna em específico.

Na fase de projeto, as informações associadas ao empreendimento encontram-se geralmente apresentadas em nível conceitual, sendo muitas vezes caracterizadas por significativo grau de subjetividade; na fase de operação do empreendimento, maior precisão é identificada quanto às definições das atividades, notadamente, no tocante à quantificação dos níveis de vibração emitidos pelas fontes emissoras.

Neste contexto, as diretrizes e orientações técnicas apresentadas neste documento fazem distinção quanto às especificações propostas para a elaboração dos estudos de sismografia considerando a diferença de abordagem entre a fase de projeto conceitual e a fase associada à operação do empreendimento no contexto de processos de licenciamento ambiental.

No tocante à abrangência do presente documento, ressalta-se que a diversidade existente de tipologias de fontes emissoras de vibração sísmica associada à variabilidade dos aspectos passíveis de imputar fragilidade ao patrimônio espeleológico remete a um conteúdo significativamente complexo que não permite que todo o contexto de sismografia aplicado à proteção de cavernas seja considerado neste único documento. Diante do exposto, recomenda-se que seja empregado o critério de similaridade para a avaliação de cenários que envolvam a operação de atividades emissoras de vibração sísmica que não seguem abordadas de maneira específica pelo presente documento.

2. Atividades de Construção Civil

Locais onde são realizadas obras de implantação de empreendimentos são geralmente associados à presença de atividades diversas de construção civil compostas por fontes emissoras de vibração de tipologias variadas. A despeito de constituírem fontes emissoras presentes durante um período pré-definido, e limitadas a uma determinada fase do período de obras, certas atividades têm potencial de emissão de níveis significativos de vibração, assim, quando situadas na proximidade de local de ocorrência de cavernas podem vir a afetar as estruturas de um ambiente cavernícola.

Dentre as atividades emissoras de vibração associadas à construção civil, duas merecem atenção especial no tocante ao potencial nível de geração sísmica: a atividade de cravação de estacas por impacto, de natureza intrusiva e com potencialidade de causar danos a estruturas adjacentes; a atividade de compactação dinâmica por batimento, que, pela execução de impactos repetidos de soquetes constituídos de dezenas de toneladas, em altura de queda de dezenas de metros, propicia o adensamento do solo. Devido ao elevado potencial de energia envolvida, a operação de ambas as atividades pode vir a causar danos a estruturas de cavernas localizadas no entorno.

A Figura 2.1 apresenta o fluxograma do processo de controle proposto aos níveis de vibração sentidos em área de ocorrência de cavernas decorrentes da operação de atividades de construção civil, considerando-se a diferença do grau de precisão das informações entre a fase de projeto conceitual e a fase associada à operação das atividades emissoras.

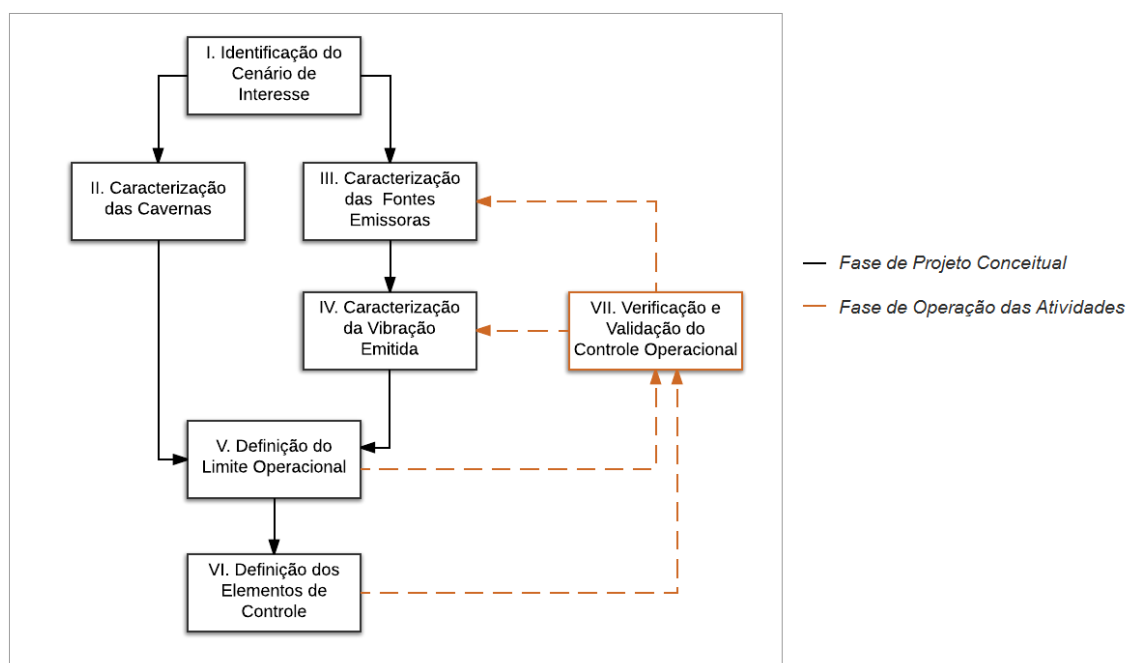


Figura 2.1: Fluxograma de controle das emissões sísmicas em cavernas próximas de atividades de construção civil.

Conforme disposto no fluxograma da Figura 2.1, o processo de controle das emissões sísmicas deverá ser elaborado na fase de projeto das obras, período no qual a precisão das informações geralmente não é completa. Na fase associada à operação das atividades emissoras de vibração, deverá ser

realizada a validação do processo de controle, a qual poderá contar com eventuais ajustes do processo identificados por verificação de resultados de campo.

Na sequência, é apresentado o detalhamento de cada uma das sete etapas que compõem o processo de controle das emissões sísmicas proposto quando da necessidade de execução de atividades de construção civil no entorno de áreas de ocorrência de cavernas.

2.1. Fase de Projeto Conceitual

As sugestões para a realização de cada etapa do processo de controle das emissões sísmicas associada à fase de projeto conceitual das atividades de construção civil são apresentadas no roteiro geral a seguir.

2.1.1. Roteiro Geral

I. Identificação do Cenário de Interesse

O cenário de interesse é constituído por toda a área na qual se pretende executar a atividade emissora de vibração a ser objeto de avaliação e pelas cavernas existentes no entorno. Neste contexto, o estudo deverá apresentar os seguintes itens:

(a) Identificação das unidades do patrimônio espeleológico envolvidas no estudo, considerando:

- Informações necessárias:
 - Identificação nominal das cavernas;
 - Coordenadas geográficas e a projeção horizontal das cavernas;
- Informações desejáveis:
 - Projeção vertical das cavernas;

(b) Mapeamento do cenário de interesse contendo:

- Área diretamente afetada (ADA) pela implantação do empreendimento;
- Localização das cavernas envolvidas no estudo;
- Área na qual se pretende executar as atividades emissoras de vibração capazes de afetar a estrutura das cavidades de interesse;
- Vias de acesso previstas no entorno das cavernas pelas quais tráfegarão veículos de carga ao longo da fase de obras.

As respectivas delimitações deverão ser apresentadas de maneira sobreposta à imagem de satélite, conforme exemplificado na Figura 2.2.

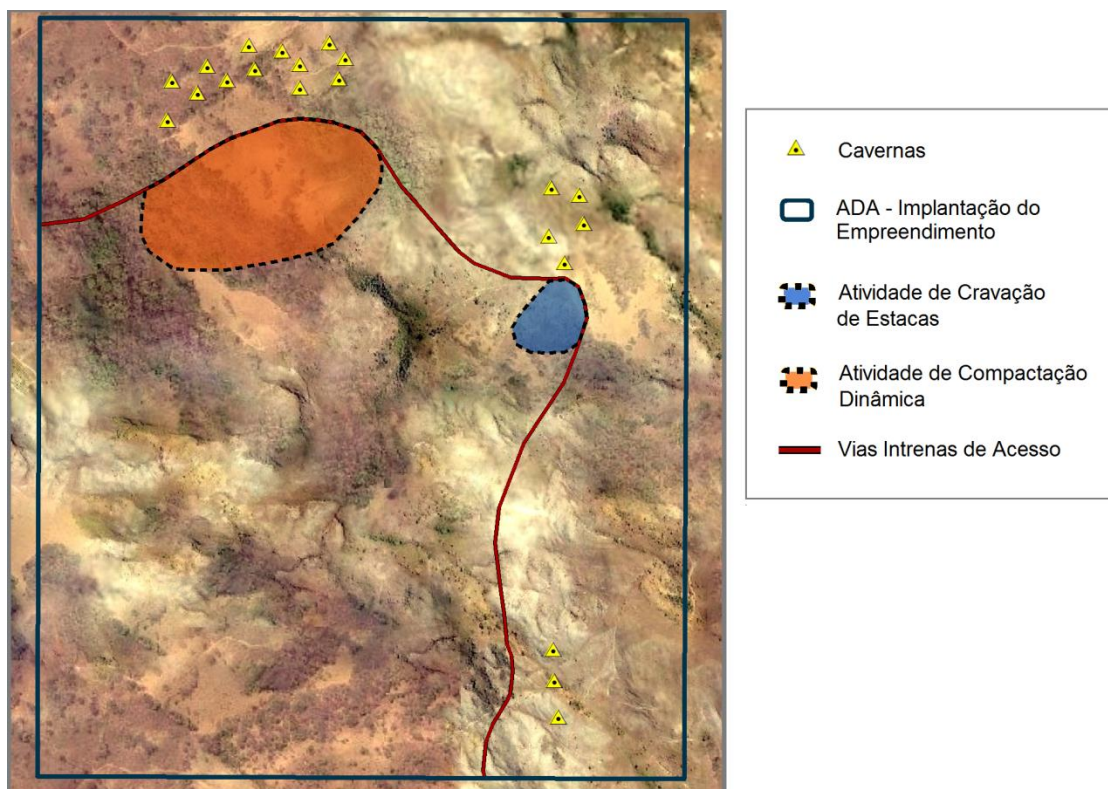


Figura 2.2: Identificação do cenário de interesse – atividades emissoras de vibração na construção civil.

II. Caracterização Estrutural das Cavernas de Interesse

II.a. Diagnóstico das fragilidades estruturais de cada caverna

Descontinuidade consiste em qualquer feição geológica que interrompe a continuidade física de um meio rochoso, como, falhamentos, juntas, fendas, fraturas, fissuras, contatos litológicos, acamamentos, dentre outras. Na presença de descontinuidades, a resistência à tração e ao cisalhamento do maciço é significativamente reduzida.

Quando presentes nas estruturas de uma caverna, certas descontinuidades remetem a uma potencial zona de fragilidade, a qual, por sua vez, pode desenvolver planos de menor resistência à vibração sísmográfica. Nesse contexto, o estudo de sismografia deverá apresentar diagnóstico de caráter geológico-geotécnico das fragilidades estruturais específicas para cada uma das cavernas identificadas no item I, contendo:

- (a) Elaboração da planta baixa da caverna com a identificação dos seguintes itens (quando houver):
 - Zonas de fragilidade estrutural da caverna;
 - Locais de relevância espeleológica caracterizados por fragilidade estrutural aparente – como a presença de espeleotemas frágeis, a existência de amplos salões, a ocorrência de dolinas, zonas estruturais de concentração de tensão, dentre outros;
- (b) Caracterização sucinta e objetiva dos elementos indicados no item (a), além de inserção de fotografias que auxiliem na sua devida compreensão;
- (c) Avaliação e identificação de eventuais estruturas da caverna que já tenham sofrido ação antrópica;
- (d) Avaliação e identificação de eventual colapso parcial de algum setor da caverna.

No caso de uma dada caverna não apresentar os elementos indicados entre os itens a-d, estudos deverão ser realizados para levantar estas informações.

O diagnóstico das fragilidades estruturais das cavernas deverá ser acompanhado de anotação de responsabilidade técnica – ART do profissional responsável pelo estudo.

Ressalta-se que o diagnóstico das fragilidades estruturais de cada caverna consiste em um documento recomendado com vistas à definição do real critério de segurança da caverna. Na ausência deste documento, ou de documento não satisfatório, recomenda-se a utilização de critério de segurança definido no item a seguir.

II.b. Definição do critério de segurança de cada caverna

O critério de segurança estrutural de uma caverna consiste no parâmetro que deverá reproduzir, por meio de métricas, as fragilidades estruturais de cada caverna identificada no item I.

O critério de segurança a ser apresentado deverá informar o limite máximo de vibração (PPV) que os elementos indicados no item II.a são capazes de suportar, sem que haja impactos negativos irreversíveis e sem que a integridade física da caverna seja alterada.

O critério de segurança deverá ser um valor único para toda a faixa de frequência.

A definição do critério de segurança de cada caverna deverá ser acompanhada de anotação de responsabilidade técnica – ART do profissional responsável pelo estudo.

Na ausência da definição de critério de segurança específico, recomenda-se que seja adotado o limite de vibração definido no Capítulo 5.

III. Caracterização das Fontes Emissoras de Vibração

Deverá ser apresentado o inventário de fontes emissoras de vibração identificadas como capazes de afetar a estrutura das cavidades de interesse, para as quais deverão ser associadas as características principais das respectivas atividades emissoras, conforme especificado a seguir¹:

III.a. Atividade de cravação de estacas por impacto:

- Distância em linha reta da localização da atividade com relação a cada uma das cavernas;
- Período de realização:
 - Data de início e data de término da atividade;
 - Quantidade de horas/dia previstas de ocorrência da atividade;
- Profundidade prevista de cravação das estacas no solo;
- Informação quanto à tipologia do equipamento (martelos do tipo queda livre, martelos hidráulicos, outros);
- Ações de mitigação previstas: identificação das ações possíveis de serem empregadas no caso da necessidade de redução da vibração gerada pela atividade emissora – como a identificação

¹ No caso da existência de atividades por detonação de explosivos com vistas a auxiliar em processos diversos associados à construção civil, como, por exemplo, em processos de densificação de solos e de terraplenagem, o controle das atividades deverá seguir as orientações dispostas no capítulo 3.1.

objetiva de alteração de tipologia de equipamentos ou de alteração de operação do equipamento, dentre outros.

III.b. Atividade de compactação dinâmica por batimento:

- Distância em linha reta da localização da atividade com relação a cada uma das cavernas;
- Período de realização:
 - Data de início e data de término da atividade;
 - Quantidade de horas/dia prevista de ocorrência da atividade;
- Peso dos soquetes a serem empregados;
- Altura prevista de queda dos soquetes;
- Ações de mitigação previstas: identificação das ações possíveis de serem empregadas no caso da necessidade de redução da vibração gerada pela atividade emissora – como a identificação objetiva de alteração da tipologia de soquetes ou de alteração da respectiva altura de queda, dentre outros.

III.c. Tráfego de veículos de carga:

- Distância das vias de acesso às cavernas do entorno;
- Período de realização:
 - Data de início e data de término da utilização da via de acesso;
 - Identificação da tipologia dos veículos de carga previstos para trafegar por cada via, identificando a quantidade (em toneladas) de carga transportada;
 - Quantidade estimada de veículos de carga a trafegar, por dia, na via.
- Ações de mitigação previstas: identificação das ações possíveis de serem empregadas no caso da necessidade de redução da vibração gerada pelo tráfego de veículos de carga em cada via.

IV. Caracterização da Vibração Emitida

O nível de vibração associado às atividades emissoras de vibração caracterizadas no item anterior deverá ser quantificado a partir de monitoramento sismográfico a ser executado em um cenário de obras já existente, identificado neste documento como *cenário de referência*, que contenha iguais atividades em operação. A composição do terreno do respectivo *cenário de referência* deverá ser similar à composição do terreno do cenário de interesse.

As características das atividades realizadas no *cenário de referência* deverão ser similares às características das atividades emissoras previstas ao cenário de interesse, objeto de licenciamento, quais sejam:

- ✓ À atividade de cravação de estacas: torre, martelo hidráulico ou queda-livre, motor, dimensões e peso das estacas, capacete metálico, coxim, etc.;
- ✓ À atividade de compactação dinâmica: grau de compactação do solo, peso do marteleto, altura de queda, espaçamento entre os pontos golpeados pelo marteleto, etc.;
- ✓ Ao tráfego de veículos de carga: tipologia do veículo e quantidade de carga transportada.

Registros de monitoramento sismográfico deverão ser realizados com vistas a obter o nível de vibração (PPV) proveniente da atividade emissora de vibração presente no *cenário de referência*, considerando as especificações indicadas no Anexo I.

Quando a distância dos pontos de monitoramento à fonte emissora do *cenário de referência* for diferente das distâncias envolvidas no cenário de interesse, os resultados de monitoramento obtidos no *cenário de referência* deverão ser utilizados na obtenção dos níveis de vibração nas distâncias envolvidas no cenário de interesse.

V. Limite Operacional

Dos registros de monitoramento de operação das atividades emissoras de vibração no *cenário de referência*, associados ao limite de segurança estrutural definido a cavernas de interesse, deverá ser determinada, por meio de projeção sismográfica, a distância mínima aceitável de operação no cenário de interesse das atividades emissoras de vibração com relação ao local de ocorrência das cavernas.

Com vistas a considerar eventuais variabilidades de operação das atividades emissoras de vibração do *cenário de referência* para o cenário de interesse, recomenda-se a adoção de fator de segurança igual a 2 (por exemplo, no caso da distância mínima identificada igual a 15 metros, para efeito de limite operacional deverá ser adotada a distância mínima igual a 30 metros).

Devem constar do relatório do estudo os laudos de monitoramento, bem como o modelo empregado para projeção sismográfica.

VI. Definição dos Elementos de Controle

O monitoramento sismográfico deverá ser empregado como elemento de controle da vibração sentida na área de ocorrência de cavernas. Na fase de projeto conceitual, deverão ser apresentadas as especificações quanto ao plano de monitoramento previsto de ser realizado quando da fase de operação das atividades emissoras de vibração.

O Plano de Monitoramento Sismográfico deverá ser elaborado de forma a abranger todo o cenário identificado no item II, contendo as seguintes identificações:

- As coordenadas dos pontos de monitoramento;
- A periodicidade de realização dos monitoramentos;
- O limite admissível de vibração (referente ao critério de segurança) para efeito de controle sismográfico em cada ponto de monitoramento.

As informações necessárias que deverão constar do resultado do monitoramento sismográfico são dispostas no Anexo I.

2.1.2. Relatório do Estudo – Âmbito de Projeto Conceitual

O relatório deverá ser apresentado de maneira objetiva e adequada à sua compreensão. As informações devem ser transpostas em linguagem acessível, ilustradas por mapas, cartas, quadros, gráficos e demais técnicas de comunicação visual, de modo que os resultados do estudo possam ser entendidos em sua completude.

O relatório deverá reportar a todos os itens dispostos no roteiro geral, além de:

- Apresentar as principais conclusões associadas ao controle operacional das emissões de vibração previstas quando da fase associada à operação das atividades no entorno do patrimônio espeleológico;
- Listar a referência bibliográfica utilizada para a obtenção de dados secundários e/ou para validar alguma informação ou procedimento técnico adicional ao disposto no roteiro geral;
- Apresentar a anotação de responsabilidade técnica – ART do responsável pelo estudo elaborado.

2.2. Fase Associada à Operação das Atividades Emissoras de Vibração

As sugestões para a realização da etapa do processo de controle das emissões sísmicas associada à fase de operação das atividades de construção civil são apresentadas no roteiro geral a seguir.

2.2.1. Roteiro Geral

VII. Verificação e Validação do Controle Operacional

Conforme apresentado no fluxograma da Figura 2.1, o processo de controle apresentado na fase de projeto conceitual deverá ser objeto de verificação quando do início das operações das atividades emissoras de vibração e, caso necessário, deverão ser executadas as respectivas adequações. O nível de vibração definido na fase de projeto conceitual (item VI) deverá ser validado por meio da realização de monitoramento sismográfico no cenário de interesse².

Para efeito de verificação dos níveis de vibração, recomenda-se que as atividades emissoras comecem a operar em local o mais distante possível da área de ocorrência das cavernas, ocasião na qual deverão ser realizadas a verificação e a validação dos resultados de projeção sismográfica.

No caso do monitoramento sismográfico apresentar resultados divergentes do previsto na fase de projeto conceitual, as ações de mitigação previstas (item VI) para reduzir a vibração gerada pela atividade emissora deverão ser executadas de maneira a limitar o nível de vibração na área de ocorrência de cavernas, segundo o critério de segurança estrutural definido às cavernas de interesse.

Do relatório do estudo de sismografia, deverão constar todas as ações executadas e os resultados obtidos.

2.2.2. Relatório do Estudo – Fase de Operação das Atividades

O relatório deverá ser apresentado de maneira objetiva e adequada à sua compreensão. As informações devem ser transpostas em linguagem acessível, ilustradas por mapas, cartas, quadros, gráficos e demais técnicas de comunicação visual, de modo que os resultados do estudo possam ser entendidos em sua completude.

O relatório deverá reportar todos os itens dispostos no roteiro geral, além de:

² No eventual caso de o processo de controle das vibrações sísmicas identificado no item 2.1 não ter sido realizado quando da fase de projeto conceitual, o mesmo deverá ser executado em fase anterior ao início do processo de controle descrito no item 2.2.

- Apresentar as principais conclusões associadas ao controle operacional das emissões de vibração identificadas na fase associada à operação das atividades no entorno do patrimônio espeleológico;
- Informar a periodicidade do envio ao órgão ambiental de relatórios de acompanhamento, de maneira a confirmar a manutenção, por parte do empreendedor responsável pelas obras, do respectivo controle das emissões de vibração;
- Listar a referência bibliográfica utilizada para a obtenção de dados secundários, e/ou para validar alguma informação ou procedimento técnico adicional ao disposto no roteiro geral;
- Apresentar a anotação de responsabilidade técnica – ART do responsável pelo estudo elaborado.

3. Atividades Minerárias

O processo de produção associado à operação de empreendimentos minerários é geralmente constituído de atividades diversas emissoras de vibração, como a atividade de desmonte de rocha com usos de explosivos, as atividades associadas ao carregamento ou descarregamento de material (produtos, estéril, rejeito, ROM, etc), a operação de maquinários nas unidades de beneficiamento de minério, as atividades associadas ao nivelamento de pilhas de estéril ou de rejeito por meio de tratores, o tráfego de veículos de carga em vias internas de acesso, dentre outras.

Na sequência, são apresentadas as diretrizes e orientações técnicas mínimas propostas à elaboração de estudos ambientais associados ao controle das emissões sísmicas provenientes das atividades minerárias inseridas no entorno do patrimônio espeleológico. Em virtude da diferença de tipologia de vibração emitida, as proposições apresentadas a seguir fazem distinção entre a atividade de desmonte de rocha e as demais atividades associadas à operação de empreendimentos minerários.

3.1. Desmonte de Rocha com Uso de Explosivos

O processo de controle das emissões sísmicas decorrentes da operação da atividade de desmonte de rocha com usos de explosivos deverá ser previsto na fase de projeto conceitual do empreendimento, período no qual a precisão das informações geralmente não é completa. Na fase associada à operação dos desmontes de rocha, deverá haver a respectiva validação do processo de controle, a qual poderá contar com eventuais ajustes do processo identificados por verificação de resultados de campo.

Diante do exposto, as recomendações quanto à elaboração de estudos de sismografia para o controle das emissões sísmicas de desmontes de rocha situados no entorno de local de ocorrência de cavernas são apresentadas a seguir fazendo-se distinção entre a fase de projeto conceitual e a fase associada à operação do empreendimento minerário.

3.1.1. Fase de Projeto Conceitual

A Figura 3.1 apresenta o fluxograma proposto ao processo de controle das vibrações sísmicas da atividade de desmonte de rocha com uso de explosivos com vistas à preservação do patrimônio espeleológico considerando o grau de informação geralmente disponível quando os empreendimentos encontram-se em fase de projeto conceitual.

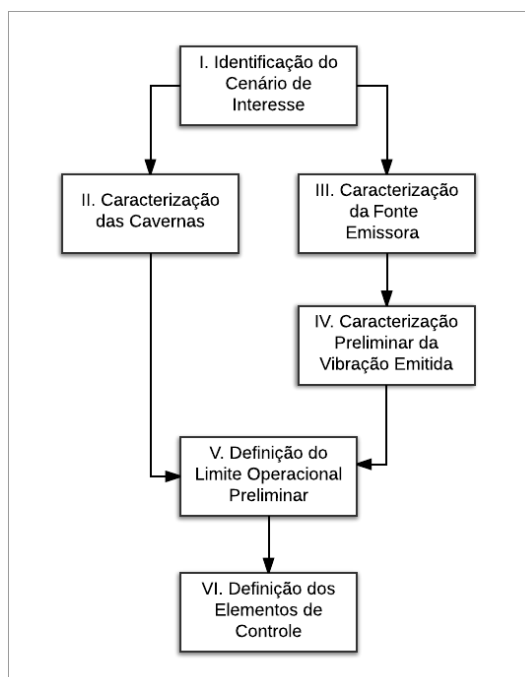


Figura 3.1: Fluxograma de controle das emissões sísmicas decorrente de atividade de desmonte de rocha com uso de explosivos – fase de projeto conceitual.

Tendo como referência o fluxograma da Figura 3.1, na sequência é apresentado o roteiro geral contendo as recomendações para realização de cada etapa do processo de controle das emissões sísmicas decorrentes da atividade de desmonte de rocha com uso de explosivos a ser elaborado quando da fase de projeto conceitual do empreendimento.

3.1.1.1. Roteiro Geral

I. Identificação do Cenário de Interesse

O cenário de interesse é constituído pelas (i) áreas de cava da mineradora, e (ii) pelas cavernas existentes no entorno. Neste contexto, o estudo deverá apresentar os itens indicados a seguir:

- (a) Delimitação das áreas de concessão de lavra;
- (b) Identificação das unidades do patrimônio espeleológico envolvidas no estudo, considerando:
 - Informações necessárias:
 - Identificação nominal das cavernas;
 - Localização pontual das cavernas;
 - Informações desejáveis:
 - Coordenadas geográficas e a projeção horizontal das cavernas;
 - Projeção vertical das cavernas;
 - Delimitação do empreendimento.
- (c) Mapeamento do cenário de interesse contendo (i) a localização das cavernas envolvidas no estudo, e (ii) a delimitação oficial das áreas de cava. As respectivas delimitações deverão ser apresentadas de maneira sobreposta à imagem de satélite, conforme exemplificado na Figura 3.2.

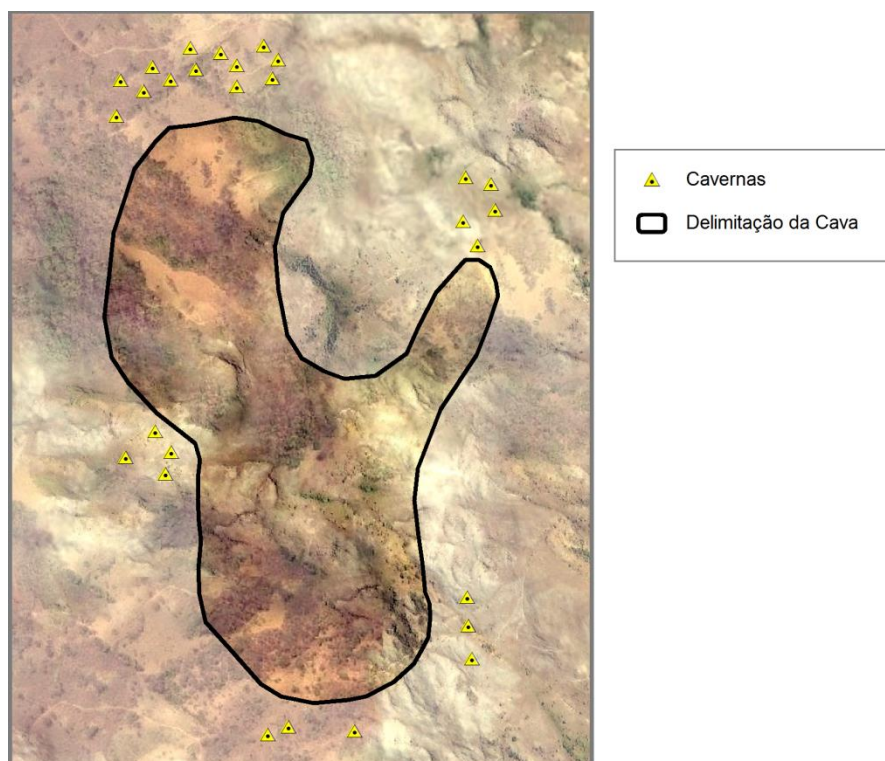


Figura 3.2: Cenário de interesse – atividade de desmonte de rocha com uso de explosivos.

II. Caracterização Estrutural das Cavernas de Interesse

II.a. Diagnóstico das fragilidades estruturais de cada caverna

Descontinuidade consiste em qualquer feição geológica que interrompe a continuidade física de um meio rochoso, como, falhamentos, juntas, fendas, fraturas, fissuras, contatos litológicos, acamamentos, dentre outras. Na presença de descontinuidades, a resistência à tração e ao cisalhamento do maciço é significativamente reduzida.

Quando presentes nas estruturas de uma caverna, certas descontinuidades remetem a uma potencial zona de fragilidade, a qual, por sua vez, pode desenvolver planos de menor resistência à vibração sismográfica. Nesse contexto, o estudo de sismografia deverá apresentar diagnóstico de caráter geológico-geotécnico das fragilidades estruturais específicas para cada uma das cavernas identificadas no item I, contendo:

- (a) Elaboração da planta baixa da caverna com a identificação dos seguintes itens (quando houver):
 - Zonas de fragilidade estrutural da caverna;
 - Locais de relevância espeleológica caracterizados por fragilidade estrutural aparente – como a presença de espeleotemas frágeis, a existência de amplos salões, a ocorrência de dolinas, zonas estruturais de concentração de tensão, dentre outros;
- (b) Caracterização sucinta e objetiva dos elementos indicados no item (a), além de inserção de fotografias que auxiliem na sua devida compreensão;
- (c) Avaliação e identificação de eventuais estruturas da caverna que já tenham sofrido ação antrópica;
- (d) Avaliação e identificação de eventual colapso parcial de algum setor da caverna.

No caso de uma dada caverna não apresentar os elementos indicados entre os itens a-d, estudos deverão ser realizados para levantar estas informações.

O diagnóstico das fragilidades estruturais das cavernas deverá ser acompanhado de anotação de responsabilidade técnica – ART do profissional responsável pelo estudo.

Ressalta-se que o diagnóstico das fragilidades estruturais de cada caverna consiste em um documento recomendado com vistas à definição do real critério de segurança da caverna. Na ausência deste documento, ou de documento não satisfatório, recomenda-se a utilização de critério de segurança definido no item a seguir.

II.b. Definição do critério de segurança de cada caverna

O critério de segurança estrutural de uma caverna consiste no parâmetro que deverá reproduzir, por meio de métricas, as fragilidades estruturais de cada caverna identificada no item I.

O critério de segurança a ser apresentado deverá informar o limite máximo de vibração (PPV) que os elementos indicados no item II.a são capazes de suportar, sem que haja impactos negativos irreversíveis e sem que a integridade física da caverna seja alterada.

O critério de segurança deverá ser um valor único para toda a faixa de frequência.

A definição do critério de segurança de cada caverna deverá ser acompanhada de anotação de responsabilidade técnica – ART do profissional responsável pelo estudo.

Na ausência da definição de critério de segurança específico, recomenda-se que seja adotado o limite de vibração definido no Capítulo 5.

III. Caracterização da Fonte Emissora

Permite a identificação das características principais que definem a fonte emissora de vibração: (i) a delimitação das áreas de cava identificadas no item I, e (ii) a tipologia litológica típica do local.

IV. Caracterização Preliminar da Vibração Emitida

Considerando a distância do local do desmonte e a carga máxima por espera, por meio de modelos de projeção sismográfica deverá ser determinado o nível de vibração (PPV) decorrente de desmontes de rocha com uso de explosivos em função da Distância Escalonada.

Os respectivos modelos de projeção fazem uso de parâmetros de desempenho a serem obtidos *in situ* por meio de monitoramento sismográfico dos desmontes de rocha do cenário de interesse. No âmbito da fase de projeto conceitual, considera-se que a esses parâmetros podem ser empregados valores teóricos disponíveis em literatura técnica especializada, ou valores provenientes de desmontes de rocha realizados na operação de outras cavas caracterizadas por condição litológica e por processo operacional (plano de fogo) similares ao da operação da futura cava objeto de licenciamento.

Nesse caso, deverão constar do relatório do estudo o modelo de projeção sismográfica adotado, e os valores empregados para os parâmetros de desempenho do modelo.

Ressalta-se que a caracterização da vibração emitida é considerada preliminar, pois deverá ser validada no início da fase associada à operação das atividades.

- As coordenadas dos pontos de monitoramento;
- A periodicidade de realização dos monitoramentos;
- O limite admissível de vibração (referente ao critério de segurança) para efeito de controle sismográfico em cada ponto de monitoramento.

Ressalta-se que a quantidade de pontos de monitoramentos deve ser suficiente para propiciar a adequada representatividade do cenário em avaliação. Por vezes, um único ponto de monitoramento pode ser suficiente para o controle dos níveis de vibração sismográfica em mais de uma caverna, enquanto que, por vezes, pode também haver necessidade de mais de um ponto de controle para uma mesma caverna. A definição da adequada quantidade de pontos deverá considerar a proximidade das cavernas e a sua localização com relação ao local de ocorrência da atividade emissora, conforme descrito na sequência.

VI.a. Pontos diversos de monitoramento

Na existência de localização dispersa de cavernas ao longo do entorno da cava, pontos de monitoramento deverão ser identificados de forma a representar a abrangência da área onde se localizam todas as cavernas a serem preservadas.

No caso de cavernas que possam ser representadas por uma localização pontual, recomenda-se que o ponto de monitoramento seja situado em local externo à caverna e, conforme indicado anteriormente, situado em uma trajetória de linha reta entre ela e a cava, estando o ponto de medição o mais próximo possível da caverna.

No caso de cavernas que não possam ser representadas por uma localização pontual, a necessidade de mais de um ponto de monitoramento deverá ser avaliada. Neste caso, pontos de monitoramento em área interna da caverna podem ser necessários, os quais deverão estar posicionados em locais que representem as zonas de maior fragilidade, conforme especificado no item II.

As informações necessárias que deverão constar do resultado do monitoramento sismográfico são dispostas no Anexo II.

VI.b. Um ponto de monitoramento representativo a mais de uma caverna

No caso da presença de cavernas situadas próximas umas das outras e com características de fragilidade estrutural similares, deve-se analisar a possibilidade do controle das emissões sísmicas ser realizado por meio de “agrupamentos de cavernas”. A Figura 3.4 exemplifica a possibilidade de composição de cinco agrupamentos de cavernas para o cenário em questão.

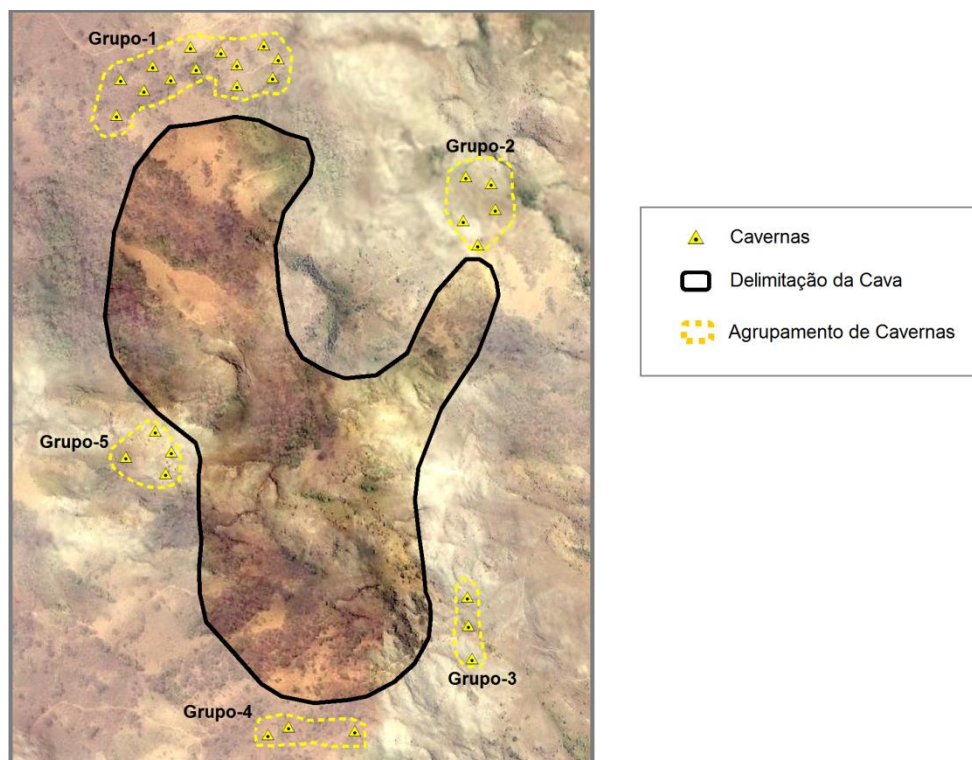


Figura 3.4: Identificação de agrupamentos de cavernas no entorno da atividade de desmonte de rocha.

Na opção por “agrupamento”, o controle dos níveis de vibração sentidos na área de ocorrência de cavernas poderá ser realizado por meio de um único ponto por agrupamento, o qual deverá estar situado em uma trajetória de linha reta entre a cava e o local da caverna mais próxima. O ponto de medição deverá estar o mais próximo possível do local da caverna.

O controle da vibração sentida nas demais cavernas do respectivo grupo será realizado de maneira indireta a partir do dado ponto de monitoramento. Nesse caso, deverá ser apresentado mapeamento no qual sejam identificados os agrupamentos propostos, de maneira similar ao exemplificado na Figura 3.4.

O limite de vibração deverá contemplar o critério de segurança de todas as cavernas representadas pelo respectivo ponto de monitoramento, sobretudo, daquelas identificadas como as de maior fragilidade estrutural.

VI.c. Mais de um ponto de monitoramento para uma única caverna

No contexto de sismografia aplicado à proteção de cavernas, considera-se uma caverna como não extensa quando ela, comparada à área em que se insere a fonte emissora (no caso a área de lavra), pode ser representada por meio de uma localização pontual. De forma a exemplificar esse conceito, a Figura 3.5.a apresenta a projeção horizontal de uma caverna relativamente extensa situada na vizinhança de uma cava. Nota-se que, em função da sua extensão e da sua localização com relação à delimitação e localização da cava existente no entorno, a representação desta caverna por meio de um único ponto não é aplicável. Isso porque verificam-se pelo menos dois locais da caverna (as duas extremidades) próximas a duas regiões diferentes da cava.

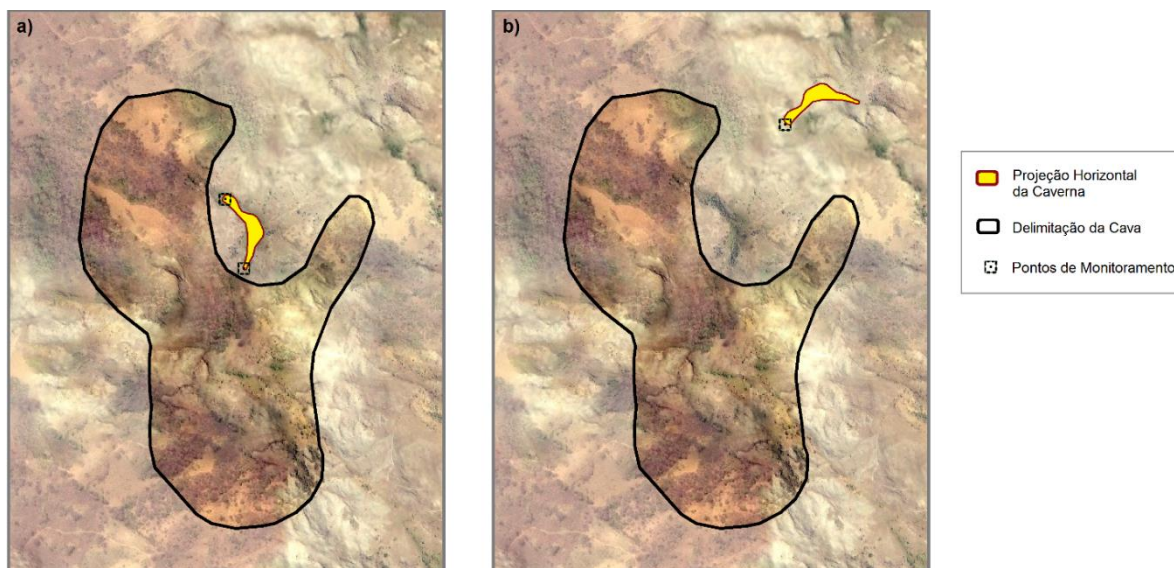


Figura 3.5: Caverna relativamente extensa situada no entorno de uma cava: a) necessidade de a caverna ser representada por mais de um ponto de medição; b) caverna representável por uma localização pontual.

A Figura 3.5.b apresenta uma caverna de projeção horizontal idêntica à da Figura 3.5.a, mas em localização e disposição diferentes com relação à cava. Nota-se que, neste caso, a representação da caverna por meio de um ponto torna-se aplicável, sendo indicado o local da caverna situado o mais próximo possível da cava, ou o identificado pelo local de maior fragilidade da caverna (deve-se optar pelo de maior caráter restritivo em favor da caverna).

3.1.1.2. Relatório do Estudo - Âmbito de Projeto Conceitual

O relatório deverá ser apresentado de maneira objetiva e adequada à sua compreensão. As informações devem ser transpostas em linguagem acessível, ilustradas por mapas, cartas, quadros, gráficos e demais técnicas de comunicação visual, de modo que os resultados do estudo possam ser entendidos em sua completude.

O relatório deverá reportar a todos os itens dispostos no roteiro geral, além de:

- Apresentar as principais conclusões associadas ao controle operacional das emissões de vibração previstas quando da fase associada à operação das atividades no entorno do patrimônio espeleológico;
- Listar a referência bibliográfica utilizada para a obtenção de dados secundários e/ou para validar alguma informação ou procedimento técnico adicional ao disposto no roteiro geral;
- Apresentar a anotação de responsabilidade técnica – ART do responsável pelo estudo elaborado.

3.1.2. Fase de Operação das Atividades Emissoras de Vibração

O processo produtivo padrão comumente empregado por mineradoras na operação envolvendo desmontes de rocha com uso de explosivos, quando da ausência de cavernas no entorno da área de lavra, pode ser sintetizado conforme fluxograma da Figura 3.6. A partir das especificações contidas no plano de lavra, elabora-se o plano de fogo, de forma que o material resultante do desmonte de rocha atenda às demandas de produção.

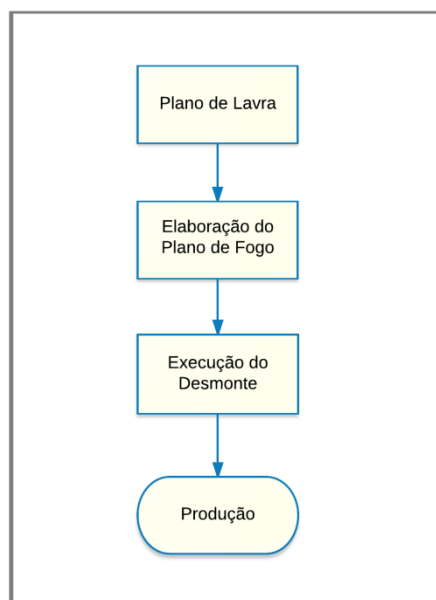


Figura 3.6: Fluxograma do processo produtivo padrão comumente empregado por mineradoras em atividades de desmonte de rocha com uso de explosivos.

Quando da existência de cavernas no entorno da área de cava, a vibração emitida pela atividade de desmonte de rocha deve ser controlada de maneira a não afetar o patrimônio espeleológico ou a sua área de influência, conforme preconiza a Resolução CONAMA nº 347/2004.

No item 3.1.1 foi apresentado o processo proposto de controle das emissões de vibração sísmica de desmontes de rocha com uso de explosivos a ser elaborado quando da fase de projeto conceitual do empreendimento. Na fase associada à operação dos desmontes, os resultados previstos na fase de projeto conceitual deverão ser validados, assim como o processo de controle deverá ser periodicamente atualizado ao longo de toda a vida útil da cava, de maneira que os elementos de controle se mantenham representativos da evolução dinâmica da cava. Nesse contexto, a Figura 3.7 apresenta o fluxograma proposto para controle das emissões sísmicas decorrentes de atividade de desmonte de rocha com uso de explosivos associado à fase de operação da cava.

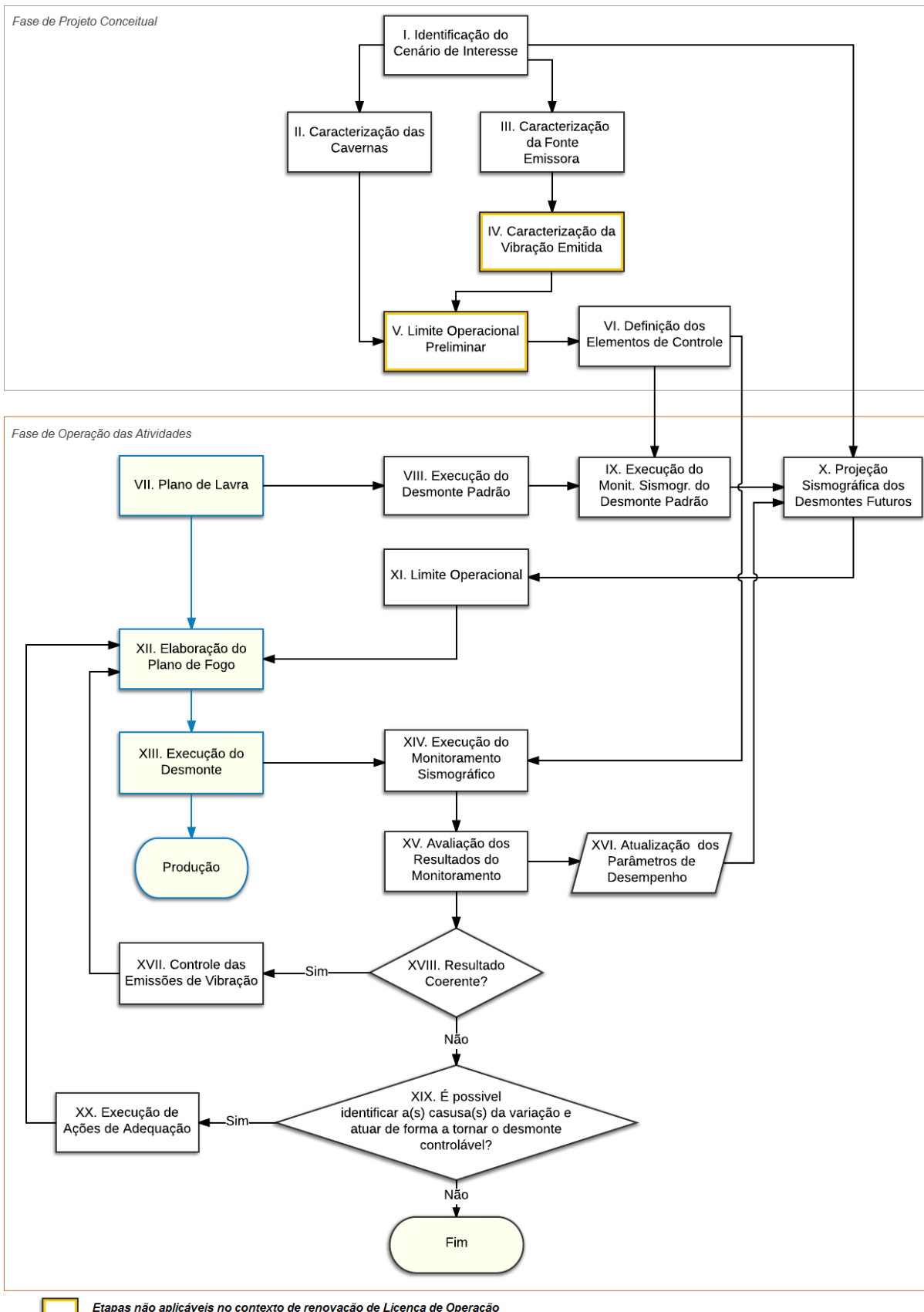


Figura 3.7: Fluxograma de controle das emissões sísmicas decorrentes de atividade de desmonte de rocha com uso de explosivos – fase de operação das atividades.

Tendo como referência o fluxograma da Figura 3.7, na sequência é apresentado o roteiro geral contendo as recomendações para realização das etapas do processo de controle das emissões sísmicas decorrentes da atividade de desmonte de rocha com uso de explosivos no âmbito associado à operação do empreendimento, em continuação às etapas da fase de projeto conceitual.

3.1.2.1. Roteiro Geral

VII. Plano de Lavra

No contexto da emissão da primeira Licença de Operação: quando da elaboração do Plano de Lavra a ser protocolado no DNPM, o sequenciamento de avanço de frente de lavra deverá ser considerado de maneira gradativa, conforme especificado mais adiante no item XVIII.

No contexto da renovação da Licença de Operação: o Plano de Lavra e o respectivo sequenciamento de avanço de frente de lavra previsto deverão constar do relatório de estudo.

VIII. Execução de Desmontes-Padrão

Os desmontes de rocha empregados na determinação inicial dos parâmetros de desempenho que caracterizam o comportamento de atenuação da vibração sísmica são denominados como “Desmontes-Padrão”. Os Desmontes-Padrão devem ser realizados em conformidade com a configuração especificada no Plano de Lavra registrado junto ao DNPM.

A quantidade mínima de Desmontes-Padrão a ser realizada deve ser igual à quantidade de parâmetros de desempenho a serem empregados no modelo de projeção sismográfica. No entanto, o aumento da quantidade de Desmontes-Padrão tende a reduzir o grau de incerteza quanto ao erro estimado na projeção dos níveis de sismografia (conforme indicado no item X), além de propiciar maior representatividade aos resultados obtidos pelo modelo projetional.

IX. Execução do Monitoramento Sismográfico do Desmonte Padrão

O modelo de projeção sismográfica a ser definido no item X faz uso de parâmetros de desempenho intrínsecos (i) ao Plano de Fogo empregado nos desmontes realizados na mineradora, bem como (ii) aos atributos do meio físico relativos ao trajeto de propagação da onda sísmica. A determinação do valor dos respectivos parâmetros deve ser realizada por meio de resultados de monitoramento sismográfico nos pontos de medição definidos no item VI.

Ressalta-se que a configuração dos desmontes objeto de monitoramento deve ser representativa da configuração dos desmontes comumente executados pela mineradora.

Os monitoramentos sismográficos deverão ser realizados em conformidade com o especificado pela Norma ABNT NBR 9653:2005.

No tocante à potencialidade de danos em estruturas, é recomendado que a vibração seja quantificada por meio do parâmetro "velocidade de vibração de partícula de pico", referido como PPV - *Peak Particle Velocity*.

X. Projeção Sismográfica

(a) Definição do Modelo Projetional

Considerando-se a distância do local do desmorte e a carga máxima por espera, por meio de modelos de projeção sismográfica deverá ser determinado o nível de vibração (PPV) decorrente de desmontes de rocha com uso de explosivos em função da Distância Escalonada. Os respectivos modelos de projeção fazem uso de parâmetros de desempenho que devem ser calibrados ao padrão operacional de desmorte de rocha empregado.

(b) Calibração dos Parâmetros de Desempenho

A calibração dos parâmetros de desempenho deverá ser realizada com vistas a tornar o modelo projecional representativo do comportamento real de atenuação sismográfica da área de lavra até a região do patrimônio espeleológico que se pretende preservar. A calibração dos respectivos parâmetros ocorre por meio dos resultados de monitoramento sismográfico dos Desmontes-Padrão. A Figura 3.8 apresenta um exemplo de curva de comportamento resultante do modelo de projeção sismográfica após efetuada a calibração dos parâmetros de desempenho.

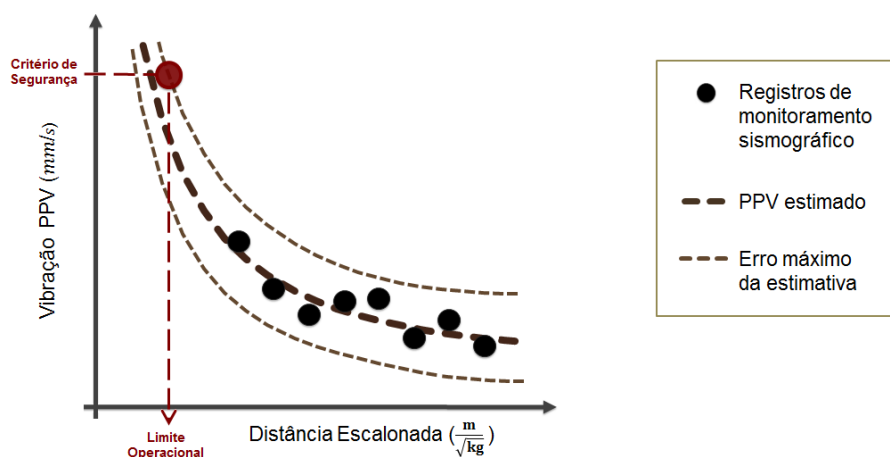


Figura 3.8: Resultado de projeção sismográfica em função da Distância Escalonada.

O nível de vibração é apresentado em função do parâmetro Distância Escalonada – resultante da razão entre a distância pela raiz da carga máxima por espera. Os resultados de projeção sismográfica deverão ser gerados a partir dos registros de monitoramento e, ao serem apresentados, deverão estar acompanhados da respectiva análise de dispersão de dados – por exemplo, o erro máximo da estimativa ou o desvio padrão, em mm/s, de maneira similar ao apresentado pelo gráfico da Figura 3.8.

Para a análise da dispersão de dados, recomenda-se que seja adotado como referência o intervalo de confiança de 95%. Como exemplo, no Anexo III são apresentados os valores da tabela *T-Student* para o intervalo de confiança de 95%, considerando até 20 graus de liberdade.

A carga máxima por espera de explosivos e/ou a distância mínima (da caverna) associada à operação da atividade de desmorte de rocha com uso de explosivos, correspondente à área de abrangência do respectivo ponto de monitoramento, é dada pelo limite operacional resultante. Conforme Figura 3.8, o limite operacional é fornecido pelo cruzamento do erro máximo previsto pelo comportamento sismográfico com o limite de vibração (PPV) definido como critério de segurança à caverna (item 5).

Com relação à determinação do limite operacional, ressalta-se que:

- Quanto maior o erro máximo da estimativa, maior a Distância Escalonada e, portanto, menor a carga máxima por espera e/ou maior a distância mínima admitida do desmonte com relação ao local da caverna;
- Quanto maior a quantidade amostral (correspondente aos registros de monitoramento sismográfico), maior é o grau de liberdade do cálculo de incerteza, e menor tende a ser o erro máximo da estimativa;
- Quanto menor o erro máximo da estimativa, mais restrita torna-se a variação dos resultados estimados pela projeção sismográfica a serem avaliados no contexto de coerência (item XVII) com relação aos resultados do monitoramento sismográfico.

Ressalta-se que do relatório do estudo deverá constar o modelo projecional adotado, bem como o valor empregado para os parâmetros de desempenho.

XI. Limite Operacional

Por meio de simulação sismográfica, deverá ser determinado o limite operacional representado pelo montante de CME admissível ao longo de toda a área da cava com vistas a atender ao critério de segurança estrutural definido às cavernas de interesse, considerando-se a presença de todas as cavernas envolvidas no estudo. Deve-se apresentar mapeamento da CME obtida conforme exemplificado pela Figura 3.9, bem como as delimitações de buffer de 50 metros, 100 metros, 150 metros, 200 metros e 250 metros, tendo como referência o local de ocorrência de cavernas.

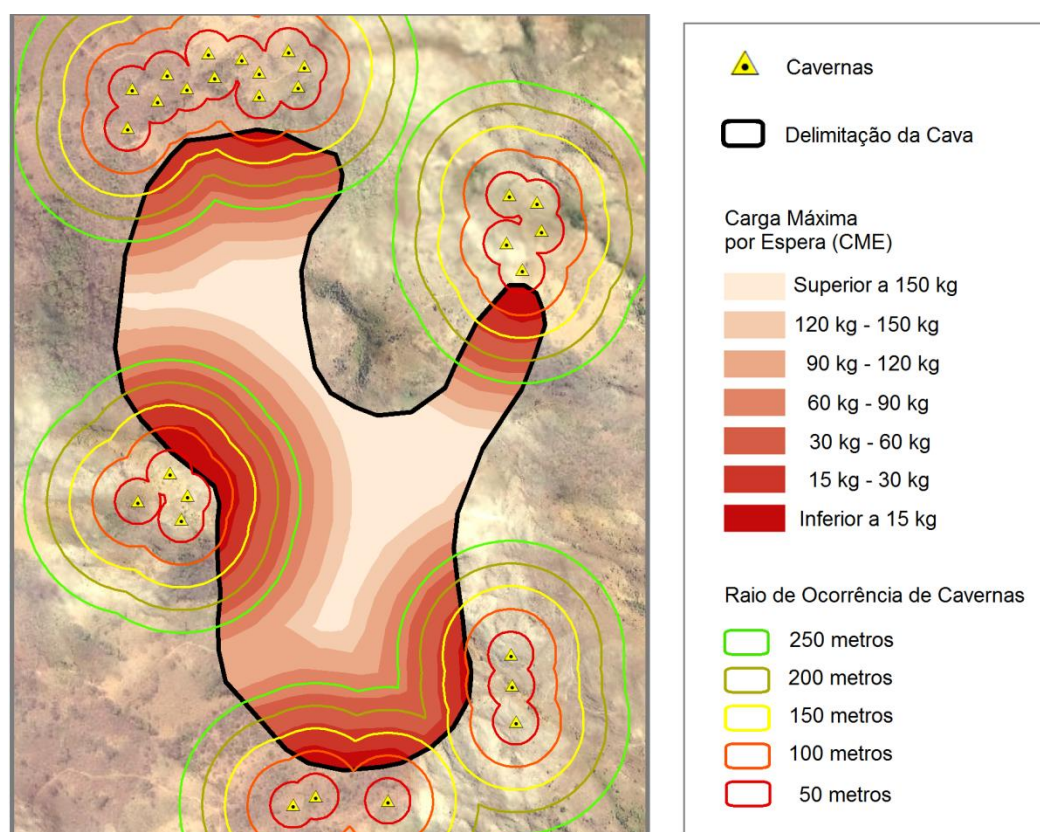


Figura 3.9: CME determinada – fase de operação dos desmontes de rocha.

A segmentação de valores de CME correspondentes ao mapa de cores deverá ser escolhida de forma a melhor representar os resultados obtidos.

Para as regiões da cava em distâncias inferiores aos 250 metros do local de ocorrência de cavernas, deverão ser indicados os montantes projetados de CME conforme exemplificado pela Figura 3.10.

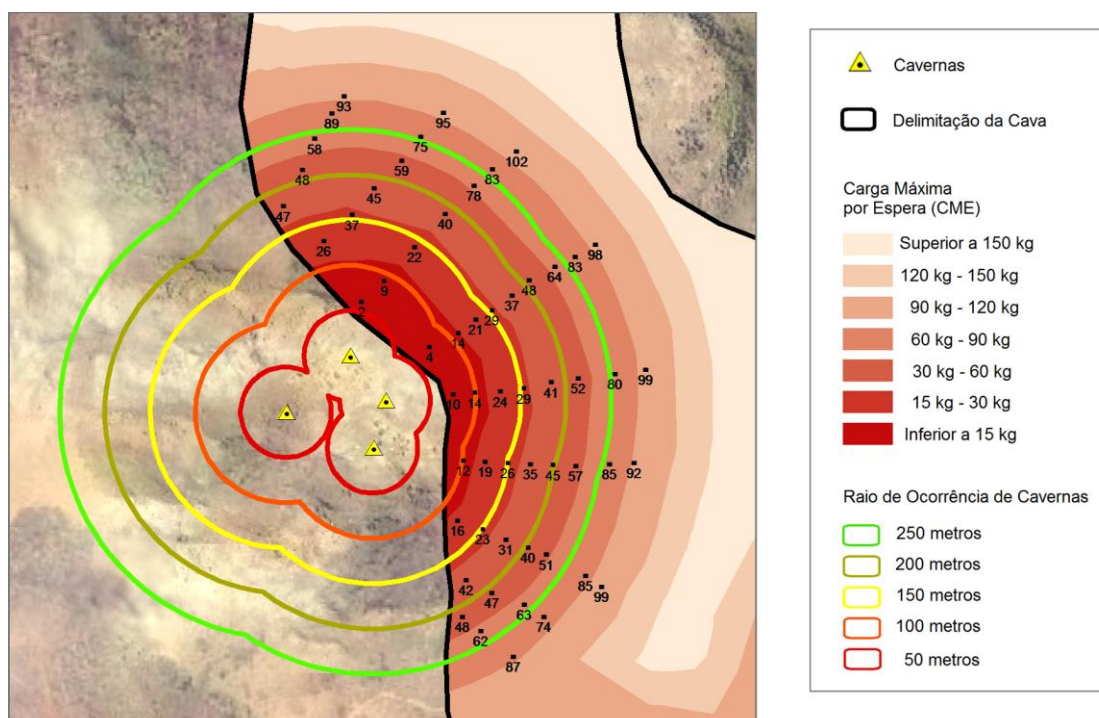


Figura 3.10: Valores de CME em área de lavra próxima ao local de ocorrência de cavernas.

XII. Elaboração/Adequação do Plano de Fogo da Mineradora

O Plano de Fogo empregado pelos desmontes realizados pela mineradora deverá estar em consonância com os limites de CME definidos no item XI.

XIII. Execução do Desmonte

Processo operacional a ser realizado conforme os padrões normativos da mineradora, segundo as especificações do Plano de Fogo definidas no item XII.

XIV. Execução do Monitoramento Sismográfico

Monitoramento sismográfico a ser realizado por profissionais qualificados, em conformidade com as especificações definidas no item VI.

XV. Avaliação dos Resultados de Monitoramento

Os resultados obtidos pelos registros de monitoramento sismográficos deverão ser avaliados tendo como referência os resultados de projeção sismográfica obtidos pelo item X. O resultado dos registros de sismografia deverão ser inseridos nos respectivos gráficos de projeção sismográfica (Figura 3.8).

XVI. Atualização dos Parâmetros de Desempenho

À medida que se avança com a frente de lavra, o material minerado é removido do maciço, ocorrendo naturalmente a alteração do meio de propagação da onda sísmica. Ao longo de um dado período, a sequência de alterações do meio pode assumir relevância, modificando de maneira significativa a propagação da vibração pelo terreno/maçico. O modelo projecional deverá, portanto, ser periodicamente atualizado por meio de ajustes dos parâmetros de desempenho, de maneira que o modelo se mantenha representativo do comportamento de propagação sísmica do cenário de interesse.

Quando ocorrer alteração dos parâmetros de desempenho, esta informação deverá constar do respectivo relatório de acompanhamento.

XVII. Quando o Resultado é Coerente

O resultado de monitoramento de sismografia é considerado coerente quando o nível de vibração PPV obtido está inserido na margem de erro estimada para os resultados de projeção sismográfica.

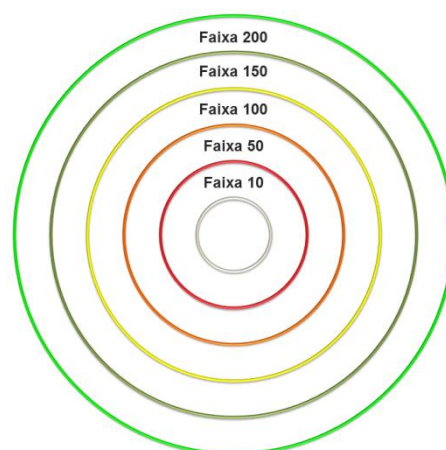
XVIII. Controle das Emissões de Vibração

Caso o resultado (PPV) do monitoramento de um dado ponto de medição seja considerado coerente, a atividade de desmonte de rocha com uso de explosivos poderá ser considerada controlável no tocante às emissões de vibração para aquela região de abrangência específica de monitoramento representada pelo respectivo ponto de medição.

Quando a atividade de desmonte de rocha é dita controlável, recomenda-se que os desmontes de rocha possam ser executados também em áreas próximas ao local de ocorrência de cavernas.

Recomenda-se que o avanço da frente de lavra em distância inferior a 250 metros do local de ocorrência de cavernas se proceda de maneira gradativa, devendo a faixa de 250 metros ser subdividida em cinco, conforme definido a seguir:

- Faixa 200: definida pelos limites de 250m a 200m com relação ao local das cavernas;
- Faixa 150: definida pelos limites de 200m a 150m com relação ao local das cavernas;
- Faixa 100: definida pelos limites de 150m a 100m com relação ao local das cavernas;
- Faixa 50: definida pelos limites de 100m a 50m com relação ao local das cavernas;
- Faixa 10: definida pelos limites de 50m a 10m com relação ao local das cavernas.



Quando as emissões de vibração provenientes da atividade de desmonte de rocha realizada em distância superior a 250 metros do patrimônio espeleológico são consideradas controladas, recomenda-se que seja permitida que a frente de lavra avance na região da faixa 200, sendo limitada à abrangência da área de lavra específica na qual a atividade é considerada controlada no tocante às emissões de vibração.

O respectivo procedimento se repete para as demais faixas de avanço de lavra, quando se faz necessária a comprovação (conforme item XVII) do controle das emissões de vibração na região atual de operação dos desmontes de rocha, para se poder avançar por sobre a faixa seguinte mais próxima do patrimônio espeleológico.

Caberá à mineradora comprovar que detém o controle das emissões de vibração provenientes das detonações de explosivos, bem como que mantém ao longo do avanço da frente de lavra o devido controle da operação, de forma a poder executar a atividade de desmonte de rocha na proximidade do patrimônio espeleológico a ser preservado.

O relatório do estudo deverá informar a periodicidade de envio, ao órgão ambiental, de relatório de acompanhamento, com vistas a confirmar a manutenção, por parte da mineradora, do respectivo controle das emissões de vibração. A periodicidade do envio do documento deverá ser condizente com o processo de avanço de lavra pretendido.

XIX. É possível Identificar a(s) Causa(s) da Variação e Atuar de Forma a Tornar o Desmonte Controlável?

No caso do resultado do monitoramento sismográfico referente a um ou mais pontos de medição se mostrar fora da margem de desvio prevista pela projeção sismográfica (item X), o respectivo resultado é considerado não coerente. Nesse caso, a atividade de desmonte de rocha com uso de explosivos para aquela região específica de monitoramento representada pelo dado ponto de medição poderá ser considerada momentaneamente não controlável no tocante às emissões de vibração.

A mineradora deverá realizar análise específica com vistas a identificar as causas envolvidas que resultaram na divergência do resultado de monitoramento com relação ao nível de vibração estimado.

XX. Execução de Ações de Adequação

A partir da identificação das possíveis causas que resultaram na variação do resultado do monitoramento com relação ao nível de projeção sismográfica, a mineradora deverá proceder com a execução das respectivas ações de adequação junto ao Plano de Fogo (item XI).

No caso do resultado dos monitoramentos sismográficos seguintes indicarem sucesso das ações executadas, ou seja, indicarem que os registros de monitoramento são coerentes (item XVII) com os resultados previstos pelo modelo de projeção sismográfica, a atividade de desmonte de rocha com uso de explosivos poderá ser considerada controlável no tocante às emissões de vibração para aquela região específica de monitoramento, representada pelo respectivo ponto de medição.

Fim

Caso não se consiga identificar as causas que resultaram na diferença entre os resultados de vibração, e/ou as ações de adequações executadas não sejam suficientes para tornar coerentes os resultados dos desmontes seguintes, a atividade passará a ser considerada não controlável no tocante às emissões de vibração.

Por não deter o controle das emissões de vibração para a região específica do cenário do entorno da cava representado pelo dado ponto de monitoramento, recomenda-se que a mineradora não deva operar na proximidade da área de ocorrência de cavernas, devendo respeitar o distanciamento de no mínimo 250 metros do patrimônio espeleológico.

3.1.2.2. Relatório do Estudo - Fase de Operação das Atividades

O relatório deverá ser apresentado de maneira objetiva e adequada à sua compreensão. As informações devem ser transpostas em linguagem acessível, ilustradas por mapas, cartas, quadros, gráficos e demais técnicas de comunicação visual, de modo que os resultados do estudo possam ser entendidos em sua completude.

O relatório deverá reportar a todos os itens dispostos no roteiro geral, além de:

- Apresentar as principais conclusões associadas ao controle operacional das emissões de vibração previstas quando da fase associada à operação das atividades no entorno do patrimônio espeleológico;
- Listar a referência bibliográfica utilizada para a obtenção de dados secundários e/ou para validar alguma informação ou procedimento técnico adicional ao disposto no roteiro geral;
- Apresentar a anotação de responsabilidade técnica – ART do responsável pelo estudo elaborado.

3.2. Atividades Diversas Emissoras de Vibração

No tocante à proteção de cavernas, o processo de controle das emissões sísmicas decorrentes das atividades associadas ao carregamento ou descarregamento de material (produtos, estéril, rejeito, ROM, etc), à operação de maquinários nas unidades de beneficiamento de minério, às atividades associadas ao nivelamento de pilhas de estéril ou de rejeito por meio de tratores, ao tráfego de veículos de carga em vias internas de acesso, dentre outras, é apresentado neste documento considerando-se a fase associada à operação das atividades emissoras.

A Figura 3.11 apresenta o fluxograma do processo de controle proposto aos níveis de vibração sentidos em área de ocorrência de cavernas decorrentes da operação de atividades associadas ao processo produtivo de empreendimentos minerários (exceto desmonte de rocha com uso de explosivos).

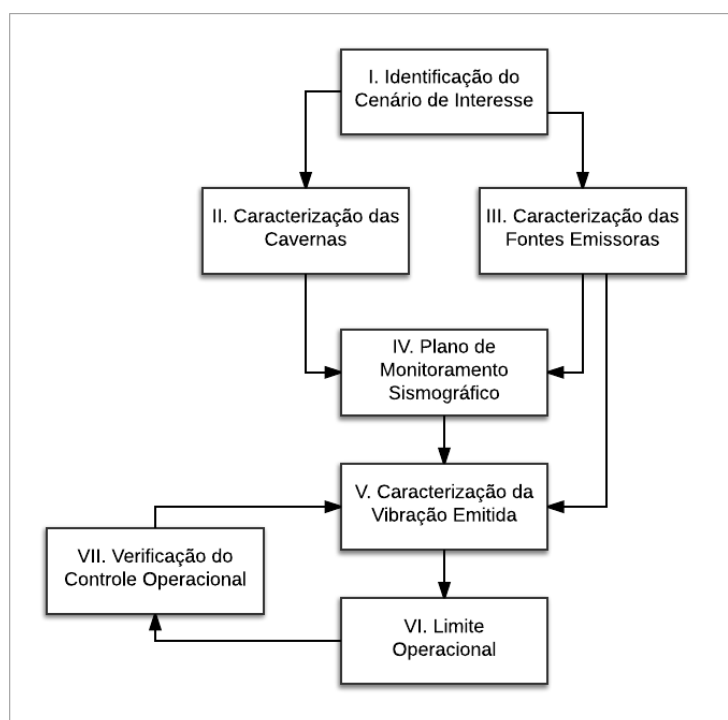


Figura 3.11: Fluxograma de controle das emissões sísmicas em cavernas próximas de operação de atividades minerárias.

Na sequência, são apresentadas as recomendações para a realização de cada etapa do processo de controle das emissões sísmicas associado à operação das atividades de empreendimentos minerários.

3.2.1. Roteiro Geral

I. Identificação do Cenário de Interesse

O cenário de interesse é constituído pela área de abrangência dos locais de ocorrência das atividades emissoras de vibração objeto de avaliação e pelas cavernas existentes no entorno. Neste contexto, o estudo deverá apresentar as seguintes informações:

(a) Identificação das unidades do patrimônio espeleológico envolvidas no estudo, considerando:

- Informações necessárias:
 - Identificação nominal das cavernas;
 - Coordenadas geográficas e a projeção horizontal das cavernas;
- Informações desejáveis:
 - Projeção vertical das cavernas;

(b) Mapeamento do cenário de interesse contendo:

- Localização das cavernas envolvidas no estudo;
- Identificação das áreas nas quais são executadas as atividades emissoras de vibração;
- Identificação das vias de acesso existentes no entorno das cavernas pelas quais trafegam veículos de carga;

As respectivas delimitações deverão ser apresentadas de maneira sobreposta à imagem de satélite.

II. Caracterização Estrutural das Cavernas de Interesse

II.a. Diagnóstico das fragilidades estruturais de cada caverna

Descontinuidade consiste em qualquer feição geológica que interrompe a continuidade física de um meio rochoso, como, falhamentos, juntas, fendas, fraturas, fissuras, contatos litológicos, acamamentos, dentre outras. Na presença de descontinuidades, a resistência à tração e ao cisalhamento do maciço é significativamente reduzida.

Quando presentes nas estruturas de uma caverna, certas descontinuidades remetem a uma potencial zona de fragilidade, a qual, por sua vez, pode desenvolver planos de menor resistência à vibração sísmográfica. Nesse contexto, o estudo de sismografia deverá apresentar diagnóstico de caráter geológico-geotécnico das fragilidades estruturais específicas para cada uma das cavernas identificadas no item I, contendo:

(a) Elaboração da planta baixa da caverna com a identificação dos seguintes itens (quando houver):

- Zonas de fragilidade estrutural da caverna;
- Locais de relevância espeleológica caracterizados por fragilidade estrutural aparente – como a presença de espeleotemas frágeis, a existência de amplos salões, a ocorrência de dolinas, zonas estruturais de concentração de tensão, dentre outros;

- (b) Caracterização sucinta e objetiva dos elementos indicados no item (a), além de inserção de fotografias que auxiliem na sua devida compreensão;
- (c) Avaliação e identificação de eventuais estruturas da caverna que já tenham sofrido ação antrópica;
- (d) Avaliação e identificação de eventual colapso parcial de algum setor da caverna.

No caso de uma dada caverna não apresentar os elementos indicados entre os itens a-d, estudos deverão ser realizados para levantar estas informações.

O diagnóstico das fragilidades estruturais das cavernas deverá ser acompanhado de anotação de responsabilidade técnica – ART do profissional responsável pelo estudo.

Ressalta-se que o diagnóstico das fragilidades estruturais de cada caverna consiste em um documento recomendado com vistas à definição do real critério de segurança da caverna. Na ausência deste documento, ou de documento não satisfatório, recomenda-se a utilização de critério de segurança definido no item a seguir.

II.b. Definição do critério de segurança de cada caverna

O critério de segurança estrutural de uma caverna consiste no parâmetro que deverá reproduzir, por meio de métricas, as fragilidades estruturais de cada caverna identificada no item I.

O critério de segurança a ser apresentado deverá informar o limite máximo de vibração (PPV) que os elementos indicados no item II.a são capazes de suportar, sem que haja impactos negativos irreversíveis e sem que a integridade física da caverna seja alterada.

O critério de segurança deverá ser um valor único para toda a faixa de frequência.

A definição do critério de segurança de cada caverna deverá ser acompanhada de anotação de responsabilidade técnica – ART do profissional responsável pelo estudo.

Na ausência da definição de critério de segurança específico, recomenda-se que seja adotado o limite de vibração definido no Capítulo 5.

III. Caracterização das Fontes Emissoras de Vibração

Deverá ser apresentado o inventário de fontes emissoras de vibração identificadas como capazes de afetar a estrutura das cavidades de interesse, para as quais deverão ser associadas as características principais das respectivas atividades emissoras.

IV. Definição do Plano de Monitoramento Sismográfico

O monitoramento sismográfico deverá ser empregado como elemento de verificação e controle da vibração sentida na área de ocorrência de cavernas. O plano de monitoramento sismográfico deverá ser elaborado de maneira a abranger todo o cenário identificado no item II, contendo as seguintes identificações:

- A localização das atividades (fontes) emissoras de vibração;
- A localização das cavernas de interesse;
- As coordenadas dos pontos de monitoramento: em cada caso o ponto de monitoramento deverá estar situado em local externo à caverna, em uma trajetória de linha reta entre ela e a atividade emissora de vibração, estando o ponto de medição o mais próximo possível da caverna;

- O limite admissível de vibração (referente ao critério de segurança) para efeito de controle sismográfico em cada ponto de monitoramento.

O plano de monitoramento sismográfico a ser elaborado deverá prever a duração do período de medição de maneira específica a cada atividade emissora, que deverá ser compatível com a tipologia das características da vibração emitida. O resultado do monitoramento deverá ser representativo da operação normal da atividade no processo de produção do empreendimento.

V. Caracterização da Vibração Emitida

O nível de vibração associado às atividades emissoras de vibração deverá ser quantificado a partir da execução do monitoramento sismográfico definido no item anterior.

Registros do nível de vibração (PPV) provenientes das atividades emissoras de vibração deverão ser obtidos nos respectivos pontos de monitoramento.

VI. Limite Operacional

Os registros de monitoramento da operação das atividades emissoras de vibração deverão ser avaliados considerando-se os limites de segurança estrutural definidos às cavernas de interesse.

No caso do monitoramento sismográfico apresentar níveis superiores ao admissível pelo critério de segurança, ações de mitigação deverão ser executadas para reduzir a vibração gerada pela atividade emissora, de maneira que os limites definidos de segurança estrutural sejam respeitados.

Do relatório do Estudo deverão constar todas as ações executadas e os resultados obtidos.

VII. Verificação do Controle Operacional

Deverá constar do relatório de Estudo a periodicidade proposta para verificação do controle da vibração sentida nas áreas de ocorrência de cavernas, a ser realizado por meio de monitoramento sismográfico. A periodicidade da verificação do controle das emissões sísmicas deverá ser condizente com a operação do empreendimento.

3.2.2. Relatório do Estudo – Fase de Operação das Atividades

O relatório deverá ser apresentado de maneira objetiva e adequada à sua compreensão. As informações devem ser transpostas em linguagem acessível, ilustradas por mapas, cartas, quadros, gráficos e demais técnicas de comunicação visual, de modo que os resultados do estudo possam ser entendidos em sua completude.

O relatório deverá reportar a todos os itens dispostos no roteiro geral, além de:

- Apresentar as principais conclusões associadas ao controle operacional das emissões de vibração previstas quando da fase associada à operação das atividades no entorno do patrimônio espeleológico;
- Listar a referência bibliográfica utilizada para a obtenção de dados secundários e/ou para validar alguma informação ou procedimento técnico adicional ao disposto no roteiro geral;
- Apresentar a anotação de responsabilidade técnica – ART do responsável pelo estudo elaborado.

4. Empreendimentos Lineares

Cenários de sismografia envolvendo a operação de empreendimentos lineares situados na proximidade de local de ocorrência de cavernas são geralmente caracterizados por significativa complexidade, exigindo que a análise da eventual interferência seja desenvolvida considerando-se efeitos combinados de diversos fatores, dentre os quais a tipologia de vibração gerada pela fonte emissora, as características geomecânicas do meio de propagação das ondas sísmicas e a fragilidade estrutural das cavernas envolvidas. Nesse contexto, a seguir são apresentadas as diretrizes e orientações técnicas mínimas propostas à elaboração de estudos ambientais associados ao controle das emissões sísmicas provenientes da operação de acessos ferroviários e de acessos rodoviários inseridos no entorno do patrimônio espeleológico.

A Figura 4.1 apresenta o fluxograma do processo de controle proposto aos níveis de vibração sentidos em área de ocorrência de cavernas decorrentes do tráfego ferroviário/rodoviário considerando-se a diferença do grau de precisão das informações entre a fase de projeto conceitual e a fase associada à operação das atividades emissoras.

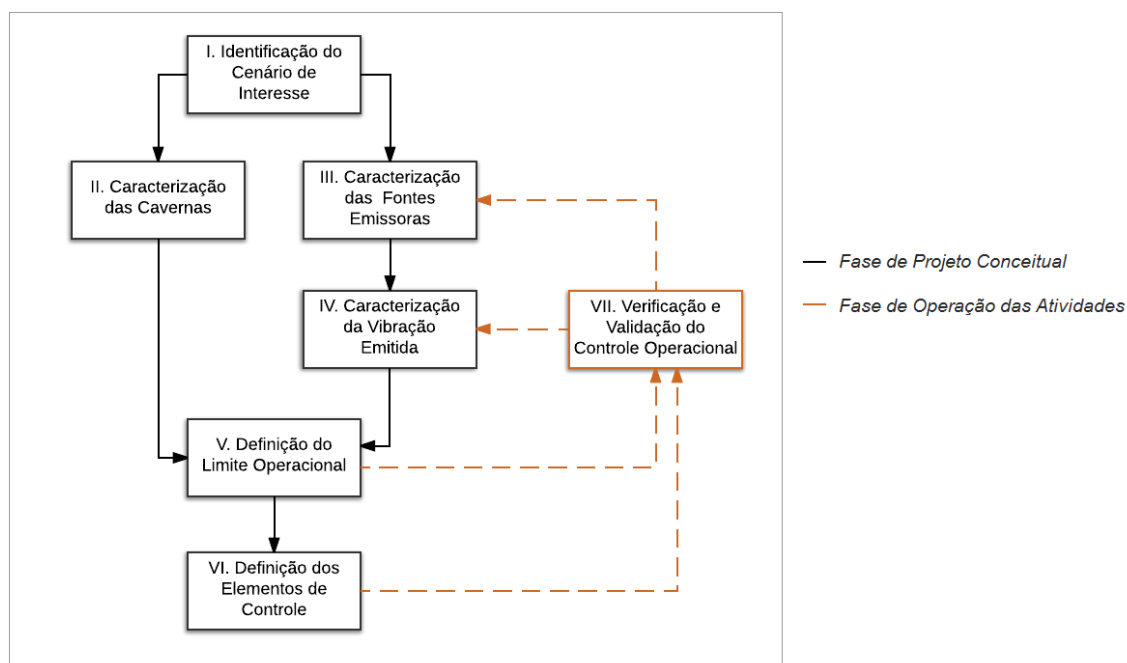


Figura 4.1: Fluxograma de controle das emissões sísmicas em cavernas próximas de empreendimentos lineares.

Conforme disposto no fluxograma da Figura 4.1, o processo de controle das emissões sísmicas deverá ser elaborado na fase de projeto do empreendimento, período no qual a precisão das informações geralmente não é completa. Quando da fase associada à operação das atividades emissoras de vibração, deverá ser realizada a validação do processo de controle, que poderá contar com eventuais ajustes do processo identificados por verificação de resultados de campo.

Na sequência, é apresentado o detalhamento de cada uma das sete etapas que compõem o processo de controle das emissões sísmicas proposto no caso da inserção de empreendimentos lineares no entorno de áreas de ocorrência de cavernas.

4.1. Fase de Projeto Conceitual

As sugestões para a realização de cada etapa do processo de controle das emissões sísmicas associada à fase de projeto conceitual de empreendimentos lineares são apresentadas no roteiro geral a seguir.

4.1.1. Roteiro Geral

I. Identificação do Cenário de Interesse

O cenário de interesse é constituído pela parte do traçado do empreendimento linear a ser inserido no entorno de área de ocorrência de cavernas, além do próprio patrimônio espeleológico envolvido. Neste contexto o estudo deverá apresentar os itens identificados a seguir:

(a) Identificação das unidades do patrimônio espeleológico envolvidas no estudo, considerando:

- Informações necessárias:
 - Identificação nominal das cavernas;
 - Coordenadas geográficas e a projeção horizontal das cavernas;
- Informações desejáveis:
 - Projeção vertical das cavernas;

(b) Mapeamento do cenário de interesse contendo:

- Localização das cavernas envolvidas no estudo;
- Trecho do traçado do empreendimento linear situado no entorno das cavernas.

As respectivas delimitações deverão ser apresentadas de maneira sobreposta à imagem de satélite, conforme exemplificado na Figura 4.2.

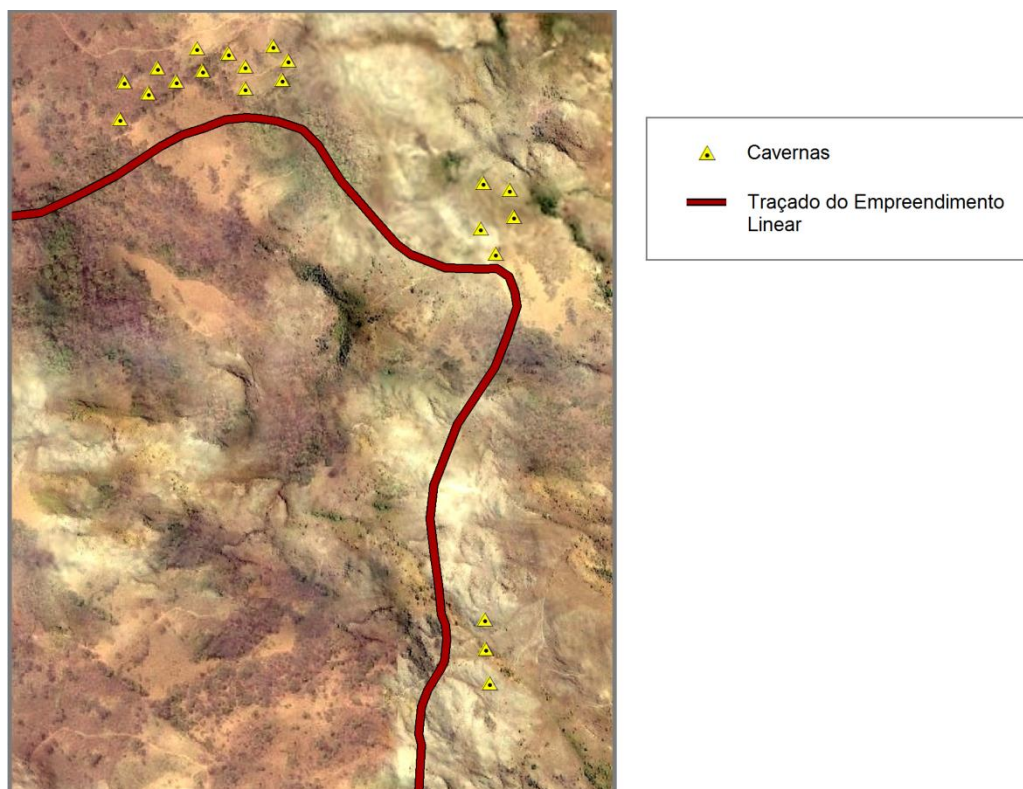


Figura 4.2: Identificação do cenário de interesse – vibração proveniente da operação de empreendimentos lineares.

II. Caracterização Estrutural das Cavernas de Interesse

II.a. Diagnóstico das fragilidades estruturais de cada caverna

Descontinuidade consiste em qualquer feição geológica que interrompe a continuidade física de um meio rochoso, como, falhamentos, juntas, fendas, fraturas, fissuras, contatos litológicos, acamamentos, dentre outras. Na presença de descontinuidades, a resistência à tração e ao cisalhamento do maciço é significativamente reduzida.

Quando presentes nas estruturas de uma caverna, certas descontinuidades remetem a uma potencial zona de fragilidade, a qual, por sua vez, pode desenvolver planos de menor resistência à vibração sísmográfica. Nesse contexto, o estudo de sismografia deverá apresentar diagnóstico de caráter geológico-geotécnico das fragilidades estruturais específicas para cada uma das cavernas identificadas no item I, contendo:

- (a) Elaboração da planta baixa da caverna com a identificação dos seguintes itens (quando houver):
 - Zonas de fragilidade estrutural da caverna;
 - Locais de relevância espeleológica caracterizados por fragilidade estrutural aparente – como a presença de espeleotemas frágeis, a existência de amplos salões, a ocorrência de dolinas, zonas estruturais de concentração de tensão, dentre outros;
- (b) Caracterização sucinta e objetiva dos elementos indicados no item (a), além de inserção de fotografias que auxiliem na sua devida compreensão;
- (c) Avaliação e identificação de eventuais estruturas da caverna que já tenham sofrido ação antrópica;
- (d) Avaliação e identificação de eventual colapso parcial de algum setor da caverna.

No caso de uma dada caverna não apresentar os elementos indicados entre os itens a-d, estudos deverão ser realizados para levantar estas informações.

O diagnóstico das fragilidades estruturais das cavernas deverá ser acompanhado de anotação de responsabilidade técnica – ART do profissional responsável pelo estudo.

Ressalta-se que o diagnóstico das fragilidades estruturais de cada caverna consiste em um documento recomendado com vistas à definição do real critério de segurança da caverna. Na ausência deste documento, ou de documento não satisfatório, recomenda-se a utilização de critério de segurança definido no item a seguir.

II.b. Definição do critério de segurança de cada caverna

O critério de segurança estrutural de uma caverna consiste no parâmetro que deverá reproduzir, por meio de métricas, as fragilidades estruturais de cada caverna identificada no item I.

O critério de segurança a ser apresentado deverá informar o limite máximo de vibração (PPV) que os elementos indicados no item II.a são capazes de suportar, sem que haja impactos negativos irreversíveis e sem que a integridade física da caverna seja alterada.

O critério de segurança deverá ser um valor único para toda a faixa de frequência.

A definição do critério de segurança de cada caverna deverá ser acompanhada de anotação de responsabilidade técnica – ART do profissional responsável pelo estudo.

Na ausência da definição de critério de segurança específico, recomenda-se que seja adotado o limite de vibração definido no Capítulo 5.

III. Caracterização das Fontes Emissoras de Vibração

Deverá ser identificado o fluxo ferroviário/rodoviário previsto ao empreendimento linear, considerando-se a frequência (diária) de operação.

IV. Caracterização da Vibração Emitida

A vibração sísmica induzida no terreno decorrente do tráfego ferroviário/rodoviário é gerada pelo movimento de carga, em função da velocidade e da quantidade de carga transportada. No âmbito da fase de projeto conceitual, a vibração emitida deverá ser quantificada a partir de monitoramento sismográfico a ser executado em empreendimento linear similar já existente, identificado neste documento como *cenário de referência*, que contenha iguais atividades em operação.

As características das atividades realizadas no *cenário de referência* deverão ser similares às características das atividades emissoras previstas ao cenário de interesse objeto de licenciamento, quais sejam:

- No caso de acesso ferroviário, o cenário a ser adotado como referência deverá ter tráfego de composição ferroviária e volume de carga similar ao da ferrovia objeto de licenciamento;
- No caso de acesso rodoviário, o cenário a ser adotado como referência deverá ter tráfego de veículos (de carga) e limite de velocidade de rodagem similar ao do cenário de referência.

Além disso, a composição do terreno do respectivo *cenário de referência* deverá ser similar à composição do terreno do cenário de interesse.

Registros de monitoramento sismográfico deverão ser realizados com vistas a obter o nível de vibração (PPV) proveniente do tráfego (ferroviário ou rodoviário) representativo do fluxo característico do empreendimento linear adotado como referência, considerando-se as especificações indicadas no Anexo IV.

Quando a distância dos pontos de monitoramento à fonte emissora do *cenário de referência* for diferente das distâncias referentes ao cenário de interesse, os resultados de monitoramento realizados no *cenário de referência* deverão ser utilizados na obtenção dos níveis de vibração nas distâncias envolvidas no cenário de interesse.

Ações de mitigação deverão ser previstas em cada caso (empreendimento ferroviário ou empreendimento rodoviário) conforme a necessidade de redução da vibração gerada quando da fase de operação do empreendimento. São elas, por exemplo, medidas objetivas de redução de velocidade de passagem do comboio ferroviário, ou do limite de velocidade de passagem do veículo de carga, dentre outras.

V. Limite Operacional

Dos registros de monitoramento de operação do empreendimento linear do *cenário de referência*, associados ao limite de segurança estrutural definido às cavernas de interesse, deverá ser determinada, por meio de projeção sismográfica, a distância mínima aceitável do traçado (seja da linha férrea, seja da pista de rodagem) no cenário de interesse, com relação ao local de ocorrência das cavernas.

Com vistas a considerar eventuais variabilidades de operação das atividades emissoras de vibração do *cenário de referência* para o cenário de interesse, recomenda-se a adoção de fator de segurança igual a 2 (por exemplo, no caso da distância mínima identificada igual a 15 metros, para efeito de limite operacional deverá ser adotada a distância mínima igual a 30 metros).

Deverão constar do relatório do estudo os laudos de monitoramento, bem como o modelo empregado para projeção sismográfica.

Ressalta-se que, no caso de empreendimentos ferroviários, recomenda-se que no entorno de área de ocorrência de cavernas não seja admitida a presença de pátios de testes de frenagem de locomotivas e de outras atividades potencialmente críticas no tocante à emissão de vibração.

VI. Definição dos Elementos de Controle

O monitoramento sismográfico deverá ser empregado como elemento de controle da vibração sentida na área de ocorrência de cavernas. Na fase de projeto conceitual, deverão ser apresentadas as especificações quanto ao plano de monitoramento previsto para ser realizado na fase de operação do empreendimento linear.

O Plano de Monitoramento Sismográfico deverá ser elaborado de forma a abranger todo o cenário identificado no item II, contendo as seguintes identificações:

- As coordenadas dos pontos de monitoramento;
- A periodicidade de realização dos monitoramentos;
- O limite admissível de vibração (referente ao critério de segurança) para efeito de controle sismográfico em cada ponto de monitoramento.

As informações necessárias que deverão constar do resultado do monitoramento sismográfico são dispostas no Anexo IV.

4.1.2. Relatório do Estudo – Âmbito de Projeto Conceitual

O relatório deverá ser apresentado de maneira objetiva e adequada à sua compreensão. As informações devem ser transpostas em linguagem acessível, ilustradas por mapas, cartas, quadros, gráficos e demais técnicas de comunicação visual, de modo que os resultados do estudo possam ser entendidos em sua completude.

O relatório deverá reportar a todos os itens dispostos no roteiro geral, além de:

- Apresentar as principais conclusões associadas ao controle operacional das emissões de vibração previstas quando da fase associada à operação das atividades no entorno do patrimônio espeleológico;
- Listar a referência bibliográfica utilizada para a obtenção de dados secundários e/ou para validar alguma informação ou procedimento técnico adicional ao disposto no roteiro geral;
- Apresentar a anotação de responsabilidade técnica – ART do responsável pelo estudo elaborado.

4.2. Fase Associada à Operação das Atividades Emissoras de Vibração

As sugestões para a realização da etapa do processo de controle das emissões sísmicas associada à fase de operação de empreendimentos lineares são apresentadas no roteiro geral a seguir.

4.2.1. Roteiro Geral

VII. Verificação e Validação do Controle Operacional

Conforme apresentado no fluxograma da Figura 4.1, o processo de controle apresentado na fase de projeto conceitual deverá ser objeto de verificação quando do início das operações do empreendimento linear e, caso necessário, deverão ser realizadas as respectivas adequações. O nível de vibração definido na fase de projeto conceitual (item VI) deverá ser validado por meio da execução de monitoramento sismográfico no cenário de interesse.

Para efeito de verificação dos níveis de vibração, recomenda-se que o fluxo ferroviário/rodoviário comece a operar em velocidade reduzida, inferior ao limite de velocidade pretendido. No caso do monitoramento sismográfico apresentar resultados divergentes do previsto na fase de projeto conceitual, as ações de mitigação previstas (item IV) para reduzir a vibração gerada pela atividade emissora deverão ser executadas, de maneira que os limites definidos de segurança estrutural sejam respeitados.

Do relatório do Estudo deverão constar todas as ações executadas e os resultados obtidos.

4.2.2. Relatório do Estudo – Fase de Operação das Atividades

O relatório deverá ser apresentado de maneira objetiva e adequada à sua compreensão. As informações devem ser transpostas em linguagem acessível, ilustradas por mapas, cartas, quadros, gráficos e demais técnicas de comunicação visual, de modo que os resultados do estudo possam ser entendidos em sua completude.

O relatório deverá reportar a todos os itens dispostos no roteiro geral, além de:

- Apresentar as principais conclusões associadas ao controle operacional das emissões de vibração previstas quando da fase associada à operação das atividades no entorno do patrimônio espeleológico;
- Listar a referência bibliográfica utilizada para a obtenção de dados secundários e/ou para validar alguma informação ou procedimento técnico adicional ao disposto no roteiro geral;
- Apresentar a anotação de responsabilidade técnica – ART do responsável pelo estudo elaborado.

5. Critério de Segurança Preliminar

O critério de segurança de uma caverna deve indicar a máxima vibração que a mesma pode suportar sem que haja impactos negativos irreversíveis e sem que a integridade física da caverna seja alterada.

Os esforços dinâmicos suportados pelas estruturas de uma caverna dependem das características de vibração emitida pelos agentes externos, em função da amplitude e da frequência de vibração, do tempo de exposição e da periodicidade com que as atividades são realizadas. O critério de segurança deve ser capaz de reproduzir esta sensibilidade diferenciada da caverna face aos aspectos diferenciados da vibração proveniente das diferentes atividades existentes no entorno.

A vibração emitida por uma dada atividade varia com relação ao período de operação (longa, média ou curta duração), bem como com relação à sua magnitude, podendo ser subdividida em três grupos principais:

- Vibração intermitente: caracterizada pela sucessão de eventos vibratórios, de curta duração – caso da detonação de explosivos por meio de microrretardos, da atividade de cravação de estacas por impacto e da atividade de compactação dinâmica por batimento;
- Vibração transiente: quando os níveis de vibração resultam de um impacto súbito, seguido de um tempo de repouso relativamente prolongado – por exemplo, as vibrações decorrentes de atividades como tráfego de veículos de carga em vias de acesso rodoviário, da passagem de um comboio ferroviário, bem como as decorrentes do carregamento ou descarregamento de material;
- Vibração contínua: quando um nível de vibração aproximadamente constante é mantido por um período de tempo significativo (são os casos, por exemplo, das vibrações originadas pelo funcionamento de maquinários pesados em geral tais como os existentes nos processos de britagem).

Excitação estrutural, decorrente de vibrações contínuas, tende a ser mais prejudicial às estruturas que as vibrações de caráter transiente, uma vez que o período de tempo de exposição a que as estruturas ficam sujeitas à excitação vibracional é mais prolongado. Assim os limites de segurança são mais restritivos para vibrações contínuas que para o caso de vibração transiente; e ambos são inferiores aos limites para vibrações intermitentes.

Considerando o princípio da precaução e tendo como referência as normas ABNT NBR 9653 e DIN 4150-3, a seguir são apresentados os limites recomendados para o critério de segurança estrutural de cavernas de relevância máxima, considerando-se de maneira distinta a tipologia da atividade emissora e a consequente especificidade da vibração emitida:

- Para atividades emissoras de vibração de caráter intermitente, recomenda-se o nível de vibração (PPV) igual a 5,0 (cinco) mm/s como critério de segurança preliminar;
- Para atividades emissoras de vibração de caráter transiente, recomenda-se o nível de vibração (PPV) igual a 3,0 (três) mm/s como critério de segurança preliminar;
- Para atividades emissoras de vibração de caráter contínuo, recomenda-se o nível de vibração (PPV) igual a 2,5 (dois vírgula cinco) mm/s como critério de segurança preliminar.

Ressalta-se que o critério de segurança preliminar é recomendado somente quando da ausência de diagnóstico geológico-geotécnico específico de determinação do real critério de segurança, a ser definido considerando-se as reais fragilidades estruturais envolvidas nas cavernas de interesse.

De maneira complementar, propõe-se que o limite de segurança estrutural definido a cavidades seja periódica e sistematicamente reavaliado por meio de análise comparativa de registros fotográficos de detalhes da caverna, juntamente com a realização de monitoramento da integridade física, de maneira a assegurar que o limite de segurança proposto esteja condizente com as fragilidades da estrutura cavernícola.

6. Referências Bibliográficas

- **Associação Brasileira de Normas Técnicas** - ABNT NBR 9653:2005 – Guia para avaliação dos efeitos provocados pelo uso de explosivos nas minerações em áreas urbanas.
- **CECAV - Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas**, Oficina sobre Área de Influência de Cavidades Naturais Subterrâneas – Relatório Final, 2013.
- _____, Área de Influência sobre o Patrimônio Espeleológico - Orientações Básicas à Realização de Estudos Espeleológicos, 2015.
- **C. H. Dowding**, *Blast Vibration Monitoring e Control*, Prentice Hall Inc., 297 pp., 1985.
- **C. H. Dowding**, *Construction Vibrations*. Prentice Hall Inc., 610 pp., 2000.
- **CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente**, Resolução nº 347. Dispõe sobre a proteção do patrimônio espeleológico. Brasília, 2004.
- **Deutsche Norm DIN-4150-3**: Structural Vibration Part 3: Effects of vibration on structures, 1999.
- **Norma Portuguesa NP 2074**. Avaliação da influência em construções de vibrações provocadas por explosões ou solicitações similares. Instituto Português da Qualidade (IPQ), Lisboa, 1983.
- **R. Sarsby**, *Environmental Geotechnics*, Thomas Telford, 584 pp., 2000.
- **UNI 9916. Norma italiana** – Criteri di Misura e Valutazione Degli Effetti Delle Vibrazioni Sugli Edifici, 1991.

Anexo I

Recomendações Quanto à Execução de Monitoramento Sismográfico de Atividades Emissoras de Vibração na Construção Civil

- I. Quantidade de pontos de medição: a quantidade de pontos de medição a ser empregada deverá ser suficiente para representar de maneira adequada o cenário de sismografia em questão.
- II. Localização dos pontos de medição:

A localização dos pontos de medição deverá ser definida de forma a não haver ocorrência de descontinuidades ao longo do terreno existente, seguindo até o local de operação da atividade emissora de vibração. Os itens indicados na sequência deverão igualmente ser considerados:

 - a. Quando do cenário de referência, no tocante ao distanciamento da fonte emissora, os pontos de medição deverão estar situados em distância igual, ou inferior, ao distanciamento do local de ocorrência de caverna com relação à fonte emissora do cenário de interesse;
 - b. Quando do cenário de interesse, os pontos de medição deverão estar situados em uma trajetória de linha reta entre o local de ocorrência da fonte emissora e o local da caverna mais próxima, estando o ponto de medição o mais próximo possível da caverna.
- III. Duração:
 - a. Atividade de cravação de estacas: o período de cada medição deverá abranger um ciclo completo de operação para a cravação de 1 (uma) estaca;
 - b. Atividade de compactação dinâmica: o período de medição deverá abranger um ciclo completo de operação, tendo início na subida do soquete, e sendo finalizado instantes após o impacto da queda do soquete no solo;
 - c. Tráfego de veículos de carga em vias internas de acesso: o período de medição deverá contemplar, no mínimo, 3 (três) passagens de veículos de carga na pista de rodagem.
- IV. Quantidade de medições: o mínimo de 3 (três) medições, cada qual contendo a duração especificada no item anterior.
- V. Resultados a serem reportados a cada medição:
 - a. Nível de vibração (PPV³) e curvas de vibração em função do tempo e da frequência, de maneira a evidenciar a abrangência de todo o período de medição definido no item III;
 - b. Fotografia da montagem dos equipamentos de medição;
 - c. Mapeamento ou desenho esquemático do local dos pontos de medição, do local de ocorrência da fonte emissora e das cavernas envolvidas no caso do cenário de interesse;

³ PPV: *Peak Particle Velocity*.

- d. Identificação das coordenadas geográficas dos pontos de medição, do local de ocorrência da fonte emissora mais próximo dos pontos de medição e das cavernas envolvidas no caso do cenário de interesse;
 - e. Indicação da distância mínima de cada ponto de medição com relação ao local de ocorrência da fonte emissora;
- VI. Certificado de calibração: apresentação de cópia do certificado de calibração dos equipamentos de medição, os quais deverão estar dentro do prazo de vigência;
- VII. Padrão de Referência: as medições deverão ser executadas em conformidade com o disposto pela Norma ABNT NBR 9653:2005 – Guia para avaliação dos efeitos provocados pelo uso de explosivos nas minerações em áreas urbanas.

Anexo II

Informações a Serem Reportadas por Relatórios de Monitoramento Sismográfico de Desmontes de Rocha com Uso de Explosivos

- I. Bancada:
 - a. Coordenadas geográficas de identificação da bancada;
 - b. Tipo de rocha;
 - c. Altura da bancada (m);
 - d. Largura da bancada (m);
 - e. Volume total de rocha desmontado “*in situ*” (m³);
 - f. Volume de rocha desmontado por furo “*in situ*” (m³);
- II. Furos:
 - a. Número de furos;
 - b. Número de linhas;
 - c. Comprimento do Furo (m);
 - d. Subfuração (m);
 - e. Ângulo de inclinação (graus);
 - f. Diâmetro do furo (mm);
 - g. Afastamento (m);
 - h. Espaçamento (m);
 - i. Comprimento do tampão (m);
 - j. Material utilizado no tampão;
- III. Explosivos:
 - a. Tipo de explosivo (encartuchado / granulado / emulsão bombeada);
 - b. Quantidade de explosivos (kg):
 - b1. Carga por mina;
 - b2. Carga total;
 - c. Booster (pç/g);
 - d. Razão de carregamento (kg/m³);
 - e. Carga máxima por espera (kg);
- IV. Ligações utilizadas:
 - a. Nas minas (tipo/quantidade);
 - b. Croqui (desenho esquemático) da ligação contendo o sequenciamento de fogo e identificação dos tempos de retardo;
 - c. Forma de iniciação.

Anexo III

Tabela T- Student

Grau de Liberdade	Intervalo de Confiança de 95%
1	12,706
2	4,303
3	3,182
4	2,776
5	2,571
6	2,447
7	2,365
8	2,306
9	2,262
10	2,228
11	2,201
12	2,179
13	2,160
14	2,145
15	2,131
16	2,120
17	2,110
18	2,101
19	2,093
20	2,086

Anexo IV

Recomendações Quanto à Execução de Monitoramento Sismográfico Relacionado à Operação de Empreendimentos Lineares

- I. Quantidade de pontos de medição: a quantidade de pontos de medição a ser empregada deverá ser suficiente para representar de maneira adequada o cenário de sismografia em questão.
- II. Localização dos pontos de medição:

A localização dos pontos de medição deverá ser definida de forma a não haver ocorrência de descontinuidades ao longo do terreno existente, seguindo até o local do traçado do empreendimento linear. Os itens indicados na sequência deverão igualmente ser considerados:

 - a. Cenário de referência: no tocante ao distanciamento do traçado (via férrea ou pista de rodagem), os pontos de medição deverão estar situados em distância igual, ou inferior, ao distanciamento do local de ocorrência de caverna com relação ao traçado do cenário de interesse;
 - b. Cenário de interesse: os pontos de medição devem estar situados em uma trajetória de linha reta entre o traçado do empreendimento linear e o local da caverna mais próxima, estando o ponto de medição o mais próximo possível da caverna.
- III. Duração:
 - a. Empreendimento Ferroviário: o período de abrangência de cada medição deverá contemplar a passagem de um comboio ferroviário completo;
 - b. Empreendimento Rodoviário: o período de abrangência de cada medição deverá ser igual ou superior a 15 (quinze) minutos, devendo a medição ser realizada em dia de semana e horário de maior fluxo de veículos de carga na via de acesso.
- IV. Quantidade de medições: o mínimo de 3 (três) medições, cada qual contendo a duração especificada no item anterior.
- V. Resultados a serem reportados a cada medição:
 - a. Nível de vibração (PPV) e curvas de vibração em função do tempo e da frequência, de maneira a evidenciar a abrangência de todo o período de medição definido no item III;
 - b. Fotografia da montagem dos equipamentos de medição;
 - c. Mapeamento ou desenho esquemático do local dos pontos de medição, do traçado do empreendimento linear, e das cavernas envolvidas- no caso do cenário de interesse;
 - d. Identificação das coordenadas geográficas dos pontos de medição, do local do traçado mais perto dos pontos de medição, e das cavernas envolvidas- no caso do cenário de interesse;

- e. Indicação da distância mínima de cada ponto de medição com relação ao traçado do empreendimento linear.
- VI. Certificado de calibração: Apresentar cópia do certificado de calibração dos equipamentos de medição, os quais deverão estar dentro do prazo de vigência.
- VII. Padrão de Referência: As medições devem ser executadas em conformidade com o disposto pela Norma ABNT NBR 9653:2005 – Guia para avaliação dos efeitos provocados pelo uso de explosivos nas minerações em áreas urbanas.



MINISTÉRIO DO
MEIO AMBIENTE



LEGISLAÇÃO SOBRE CAVERNAS DO BRASIL

- CONSTITUIÇÃO FEDERAL Art. 20, São bens da União
- CONSTITUIÇÃO FEDERAL Art. 216, Constituem patrimônio cultural brasileiro
- CONSTITUIÇÃO FEDERAL Art. 225, Ambiente, ecossistema e patrimônio genético a serem preservados para gerações futuras
- CONSTITUIÇÃO DO ESTADO DE SÃO PAULO Art. 197, São áreas de proteção permanente.
- CONSTITUIÇÃO DO ESTADO DE MINAS GERAIS Art. 208, Constituem patrimônio cultural mineiro.
- CONSTITUIÇÃO DO ESTADO DA BAHIA Art. 215, São áreas de proteção permanente. LEI Nº 3.924, de 26.07.1961, Dispõe sobre os monumentos arqueológicos e pré-históricos.
- LEI Nº 9.605, de 12.12.1998, Dispõe sobre sanções penais a danos ao meio ambiente.
- LEI Nº 9.985, de 18.07.2000, Institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação - SNUC.
- LEI ESTADUAL Nº 10.879, de 07.07.1989, Cria o Parque Estadual de Terra Ronca (GO).
- LEI ESTADUAL Nº 11.726, de 30.12.1994, classifica o patrimônio espeleológico como patrimônio cultural mineiro (MG).
- LEI ESTADUAL Nº 7.369, de 20.12.2000, Cria o Parque Estadual Gruta da Lagoa Azul e dá outras providências (MT).
- LEI ESTADUAL Nº 10.431, de 20.12.2006, classifica cavernas como de bens e espaços de preservação permanente (BA).
- LEI ESTADUAL Nº 12.810, de 21.02.2008, Institui o Mosaico de Unidades de Conservação do Jacupiranga - incluindo o Parque Estadual Caverna do Diabo (SP).
- LEI ESTADUAL Nº 18.043, de 23.01.2009, Modifica o Decreto nº 20.597, de 4 de junho de 1980, que define área de proteção especial, situada nos Municípios de Lagoa Santa, Pedro Leopoldo e Matozinhos (MG).
- LEI ESTADUAL Nº 18.348, de 25.08.2009, Define como Unidade de Proteção Integral, na categoria Monumento Natural Estadual, a área denominada Gruta Rei do Mato, no Município de Sete Lagoas (MG).
- LEI MUNICIPAL Nº 1.019, de 03.10.2006, Cria o Parque Natural Municipal Dona Ziza em Pains MG.
- DECRETO Nº 83.548, de 05.06.1979, Cria o Parque Nacional da Serra da Capivara (PI).
- DECRETO Nº 98.182, de 26.09.1989, Dispõe sobre a criação da APA Cavernas do Peruaçu (MG).
- DECRETO Nº 99.881, de 25.01.1990, Dispõe sobre a criação da APA Carste de Lagoa Santa (MG).
- DECRETO Nº 99.556, de 01.10.1990, Dispõe sobre a proteção das cavidades naturais subterrâneas existentes no Território Nacional, e dá outras providências.
- DECRETO Nº 1.876, de 25.04.1996, Altera o memorial descritivo da APA Carste de Lagoa Santa (MG).
- DECRETO S/Nº, de 21.09.1999, Cria o Parque Nacional Cavernas do Peruaçu (MG).
- DECRETO S/Nº, de 21.09.2000, Cria o Parque Nacional da Serra da Bodoquena (MS).
- DECRETO Nº 9.335, de 27.09.2001, Institui a APA do Rio Vermelho (GO).
- DECRETO Nº 6.640, de 07.11.2008, Dá nova redação ao Decreto 99.556/1990.
- DECRETO ESTADUAL Nº 32.487, de 04.11.1985, Dispõe sobre a criação da APA Gruta dos Brejões/Vereda do Romão Gramacho (BA).
- DECRETO ESTADUAL Nº 40.135, de 08.06.1995, Cria o Parque Estadual de Intervalos (SP).
- DECRETO ESTADUAL Nº 10.394, de 11.06.2001, Institui o Monumento Natural da Gruta do Lago Azul (MS).
- DECRETO ESTADUAL Nº 5.558, de 18.02.2002, Declara de utilidade pública, para fins de desapropriação as áreas do Parque Estadual de Terra Ronca (GO).
- DECRETO ESTADUAL Nº 6.538, de 03.05.2006, Cria o Monumento Natural Gruta da Lancinha (PR).
- DECRETO MUNICIPAL Nº 25, de 19.07.2007, Institui o Monumento Natural da Caverna do Jabuti (Curvelândia-MT).
- DECRETO ESTADUAL Nº 11.235, de 10.10.2008, Classifica cavernas como bens e áreas de preservação permanente (BA).

- DECRETO ESTADUAL Nº 44.935, de 03.11.2008, Amplia o Parque Estadual do Sumidouro localizado nos Municípios de Lagoa Santa e Pedro Leopoldo (MG).
- DECRETO ESTADUAL Nº 12.897, de 22.12.2009, Dispõe sobre a criação do Geopark Bodoquena-Pantanal (MS).
- DECRETO ESTADUAL Nº 46.960, de 29.02.2016, Cria o Monumento Natural Estadual Lapa Nova de Vazante, no Município de Vazante (MG).
- DECRETO MUNICIPAL Nº 40, de 18.11.2009, Cria o Monumento Natural Jardim do Éden e dá outras providências (Pains-PR).
- DECRETO ESTADUAL Nº 47.041, de 31.08.2016, Dispõe sobre os critérios para a compensação e a indenização dos impactos e danos causados em cavidades naturais subterrâneas existentes no território do Estado (MG).
- RESOLUÇÃO CONAMA Nº 009, de 24.01.1986, Institui comissão especial para tratar de assuntos relativos à preservação do patrimônio espeleológico.
- RESOLUÇÃO CONAMA Nº 237, de 19.12.1997, Regula o licenciamento ambiental.
- RESOLUÇÃO CONAMA Nº 347, de 10.09.2004, Dispões sobre a proteção do patrimônio espeleológico.
- RESOLUÇÃO SMA-SP Nº 87, de 16.09.2013, Dispõe sobre a criação do Conselho do Patrimônio Espeleológico do Estado de São Paulo.
- RESOLUÇÃO SMA-SP Nº 07, de 28.01.2014, Designa os representantes do Conselho do Patrimônio Espeleológico do Estado de São Paulo, criado pela Resolução SMA 87 de 2013.
- PORTARIA IBAMA Nº 28, de 12.03.1989, Inclui espécies de cavernas do Vale do Ribeira na lista de ameaçadas de extinção.
- PORTARIA IBAMA Nº 887, de 15.07.1990, Delibera sobre o patrimônio espeleológico nacional e delimita a área de influência das cavidades naturais.
- PORTARIA IBAMA Nº 57, de 05.06.1997, Institui o Centro Nacional de Estudo Proteção Manejo de Cavernas - CECAV.
- PORTARIA IBAMA Nº 14, de 23.02.2001, Delibera sobre a interdição da Gruta dos Ecos (GO).
- PORTARIA IBAMA Nº 15, de 23.02.2001, Regulamenta o uso turístico das Cavernas da Chapada Diamantina (BA).
- PORTARIA MMA Nº 81, de 26.02.2002, Institui um Grupo de Trabalho para rever Portarias CONAMA referente ao patrimônio Espeleológico.
- PORTARIA IBAMA Nº 34, de 18.04.2006, Constitui o Grupo de Trabalho CavLegis.
- PORTARIA ICMBio Nº 78, de 03.09.2009, Institui o Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas - CECAV.
- PORTARIA MMA Nº 358, de 30.09.2009, Institui o Programa Nacional de Conservação do Patrimônio Espeleológico.
- PORTARIA IMASUL Nº 257, de 20.12.2012, Autoriza a visitação turística na Gruta do Lago Azul.
- PORTARIA SEC-MT Nº 19, de 25.03.2014, Tombamento do Monumento Natural Caverna do Jabut.
- PORTARIA DNPM Nº 542, de 18.12.2014, Estabelece os procedimentos para autorização e comunicação prévias para extração de fósseis.
- PORTARIA INTERMINISTERIAL Nº 30, de 24.03.2015, Estabelece procedimentos para órgãos envolvidos em processo de licenciamento de competência do IBAMA.
- PORTARIA ICMBio Nº 148, de 30.03.2015, Institui o Grupo Assessor Técnico do PAN Cavernas do São Francisco.
- PORTARIA ICMBio Nº 62, de 23.12.2015, Estabelece normas e procedimentos para condução de visitantes no Parque Nacional Cavernas do Peruaçu .
- INSTRUÇÃO NORMATIVA IBAMA Nº 100, de 05.06.2006, Dispõe sobre a pratica de mergulho em cavernas, revoga a Portaria IBAMA 89
- INSTRUÇÃO NORMATIVA MMA Nº 2, de 20.08.2009, Dispõe sobre as regras para classificar o grau de relevância das cavernas de acordo com o Decreto 6.640/2008.

- INSTRUÇÃO NORMATIVA ICMBio Nº 25, de 12.04.2012, Disciplina os procedimentos de planos de ação nacionais para conservação de espécies ameaçadas de extinção ou do patrimônio espeleológico.
- INSTRUÇÃO NORMATIVA ICMBio Nº 30, de 19.09.2012, Estabelecer procedimentos administrativos e técnicos para a execução de compensação espeleológica.
- INSTRUÇÃO NORMATIVA ICMBio Nº 7, de 10.11.2014, Estabelece procedimentos para licenciamentos e autorização de pesquisa em Unidades de Conservação Federais e suas Áreas de Amortecimento, incluindo cavernas.
- INSTRUÇÃO DE SERVIÇO SEMAD (MG) Nº 3, de 26.12.2014, Estabelece procedimentos administrativos em processos de licenciamento ambiental envolvendo cavernas em Minas Gerais.
- PROJETO DE LEI 5.071/1990 - Lei das Cavernas - Dispõe sobre a proteção das cavidades naturais subterrâneas, em conformidade com os Arts. 20, inciso X, e 216, inciso V, da Constituição Federal e dá outras providências.
- SUBSTITUTIVO AO PROJETO DE LEI 36/1996 - Dispõe sobre uso das cavidades naturais.
- PROJETO DE LEI 2.832/2003 - Dispõe sobre a proteção do patrimônio espeleológico e dá outras providências
- PROJETO DE LEI 2.047/2007 - Dispõe sobre a proteção do patrimônio espeleológico e dá outras providências.
- PROJETO DE DECRETO LEGISLATIVO 1.138/2008 - Determina a sustação do Decreto n.º 6.640, de 7 de novembro de 2008, do Poder Executivo, por exorbitar do poder regulamentar.
- PROJETO DE LEI 4.630/2009 - Altera a Lei nº 9.985, de 2000, no que diz respeito à proteção dos sítios espeleológicos do território nacional (APA).
- PROJETO DE LEI 855/2011 - Altera a Lei nº 9.985, de 2000, no que diz respeito à proteção dos sítios espeleológicos do território nacional (APA).
- PROJETO DE LEI 7.182/2014 - Altera a Lei nº 9.985, de 2000, no que diz respeito à proteção dos sítios espeleológicos do território nacional (APA).

REVOGADAS

- RESOLUÇÃO SMA-SP Nº 23, de 30.03.2010, Dispõe sobre a criação do Conselho do Patrimônio Espeleológico em Unidades de Conservação do Estado de São Paulo.
- PORTARIA 89, de 13.08.2001, Dispõe sobre a prática de mergulho em cavernas (REVOGADA)
- RESOLUÇÃO CONAMA Nº 005, de 06.08.1987, Aprova o Programa Nacional de Proteção ao Patrimônio Espeleológico (REVOGADA)
- DECRETO ESTADUAL Nº 30.936, de 20.02.1990, Institui a Área de Proteção Especial Lapa Nova de Vazante MG (REVOGADA).

SUGESTÃO DE LEITURA

- Miranda&Chiodi. Proteção Jurídica do Patrimônio Espeleológico. in Ruchks, et al. Patrimônio Espeleológico em Rochas Ferruginosas. Campinas: SBE, 2015.

INTRODUÇÃO

É de conhecimento que as vibrações oriundas de detonações para desmorte de rochas podem causar danos às edificações e estruturas naturais como as cavidades subterrâneas. O presente estudo tem como objetivo verificar e quantificar o nível das vibrações que podem ser causadas por fontes mecânicas, sendo, neste caso específico geradas pelo tráfego de veículos variados sobre uma cavidade natural que está inserida sob uma estrada no município de Brumadinho, em Minas Gerais. A cavidade MJ-000 tem sua gênese claramente associada à erosão fluvial já que é possível observar processos hidrológicos, um sumidouro na forma de uma pequena cachoeira, após a queda d'água, que penetra via claraboia, o escoamento perene percorre aproximadamente 18m pela cavidade, ressurgindo logo em seguida. A cavidade é constituída pela canga detrítica, composta por fragmentos angulosos a sub-angulosos constituídos principalmente por calhaus e seixos de hematita compacta, fragmentos da formação ferrífera e, menos comumente, pelo quartzo.

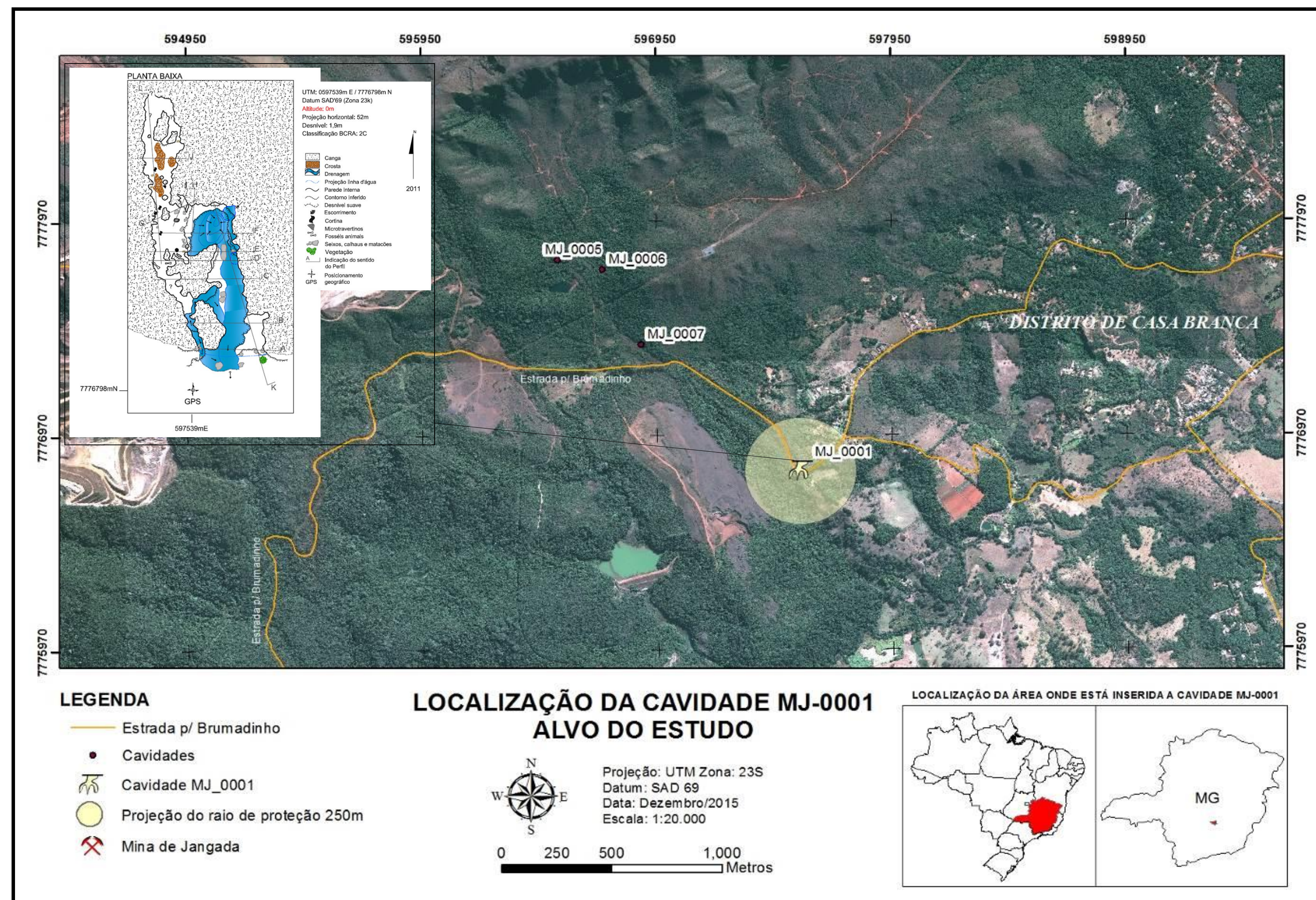


Figura 1 - Mapa de localização da cavidade com detalhe para planta baixa da mesma

METODOLOGIA

Para mensurar o nível das vibrações, foi utilizado um sismógrafo de engenharia modelo Minimate Plus Series III, da marca Instanet devidamente calibrado dotado de sensor tri ortogonal (Geofone) para registro de vibrações no terreno. Configurado em modo sensitive, sendo neste, o valor de sensibilidade mínimo de gatilho para acionamento do aparelho definido como superior a 0,51 mm/s de velocidade de pico de partícula até o limite máximo de 31,7 mm/s. Foram realizadas duas sessões de monitoramento estando o geofone instalado sobre a cavidade em sua calota superior externa, onde pressupõe-se que seja o local mais susceptível a abalos sísmicos devido a sua pouca espessura. O equipamento foi locado cerca de um (1) metro distante da linha de tráfego dos veículos monitorados. Através desse monitoramento é possível identificar os níveis de vibrações induzidos ao terreno natural por diversos tipos de veículos com massas (kg) e velocidades variadas. Os monitoramentos aqui relatados foram realizados no período de 10h00min às 12h30min do dia 02 de outubro de 2015 e no período de 10h30min às 12h00min do dia 04 de novembro de 2015, totalizando 67 medições.



Figura 2 - Superfície sobre a caverna MJ-0001: a linha tracejada indicando a projeção linear aproximada da cavidade sob a estrada. No detalhe acima à direita, geofone do sismógrafo instalado no maciço que comporta o teto da cavidade.

RESULTADOS

Com relação às vibrações provocadas pelo tráfego durante o monitoramento realizado na área em estudo, estão apresentados abaixo os resultados obtidos para cada tipo de veículo:

• Motocicletas

Foram realizadas um total de 5 monitoramentos, sendo que nenhum conseguiu disparar o gatilho do sismógrafo de engenharia de $V_p = 0,51$ mm/s.

• Carros Pequenos

Foram monitorados diversos tipos de carros pequenos. Assim, foram realizados um total de 36 medições, sendo que nenhuma conseguiu disparar o gatilho do sismógrafo de engenharia de $V_p = 0,51$ mm/s.

• Caminhonete

Foram realizadas um total de 10 medições, sendo que nenhuma conseguiu disparar o gatilho do sismógrafo de engenharia de $V_p = 0,51$ mm/s.

• Van

Foram realizadas um total de 6 medições, sendo que nenhuma conseguiu disparar o gatilho do sismógrafo de engenharia de $V_p = 0,51$ mm/s.

• Ônibus

Foram monitorados ônibus e micro ônibus. Assim, foram realizadas um total de 12 medições, sendo que nenhuma conseguiu disparar o gatilho do sismógrafo de engenharia de $V_p = 0,51$ mm/s.

• Caminhão

Foram monitorados diversos tipos de caminhões com diferentes cargas. Assim, foram realizados um total de 11 medições, sendo que nenhuma conseguiu disparar o gatilho do sismógrafo de engenharia de $V_p = 0,51$ mm/s.



Figura 3 - Registro dos tipos de veículo que trafegaram sobre a cavidade durante o experimento

CONCLUSÕES

Com relação às vibrações provocadas pelo tráfego de veículos durante os trabalhos realizados na área em estudo foram observados vários tipos de veículos trafegando no local incluindo: ônibus, caminhões carregados, automóveis pequenos, caminhonetes, vans, motocicletas e micro-ônibus. Em nenhuma ocasião os sensores dos sismógrafos foram acionados, não sendo assim registradas vibrações superiores ao nível mínimo de acionamento programado de $V_p = 0,51$ mm/s, e com isso nenhum sismograma foi gerado. Com base nos ensaios realizados, pôde-se observar que os níveis de vibração pelo terreno mantiveram-se abaixo dos limites estabelecidos pela norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) Normas Brasileiras Regulamentadoras (NBR) 9653/2005. Conclui-se então que no período abrangido pelo presente estudo o tráfego local não é capaz de gerar vibrações que comprometam a integridade física da cavidade MJ-0001, já que a intensidade das mesmas é muito reduzida.

REFERÊNCIAS

- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9653. Guia para avaliação dos efeitos provocados pelo uso de explosivos nas minerações em áreas urbanas. São Paulo, 11p., 2005.
- ANTONINI, A., MARTINS, B.D. Relatório de monitoramento das vibrações pelo terreno geradas por fontes aleatórias e detonações no Projeto Ferro Carajás S11D em Canã dos Carajás – PA – período setembro a dezembro de 2014 / terceiro quadrimestre de 2014. Belo Horizonte, 716p., 2015.
- AULER, A. Perímetro de Proteção - Cavidade CAI-03. Carste Consultores Associados, Belo Horizonte, 18p., 2011.
- DIAS, C.R.C., DUTRA, G.M., LUZZI, L.A.C., MUNARO, P. Estudos de adequação do entorno de proteção das cavidades naturais subterrâneas ABOB-0006 e 0019 da mina Abóbora. Nova Lima, 29p., 2014.
- RIBEIRO, F.A., et al. Análise de Relevância do Patrimônio Espeleológico na Área de Influência Direta (AID) referente à Licença de Instalação (179/2008) do Projeto de Expansão da Mina da Jangada. Belo Horizonte, 174p., 2011.
- SISKIND, D.E. Vibrations From Blasting. International Society of Explosives Engineers, 120p., 2000.
- T. Milne and A. Weir-Jones Use of passive microseismic monitoring. Canadian Mining Journal. 2013.
- ZHENDE, G., XIAOZHEN J., MING, G. A Calibration Test of Karst Collapse Monitoring Device by Optical Time Domain Reflectometry (BOTDR) Technique. 13th Sinkhole Conference, 8p., 2013.



CONTROLE E MONITORAMENTO DE VIBRAÇÕES EM CAVIDADES SITUADAS EM ÁREAS DIRETAMENTE AFETADAS PELO RAMAL FERROVIÁRIO SUDESTE DO PARÁ

Dias, C.R.C.¹; Dutra, G.¹; Luzzi, L.¹; Scherer, R.¹; Brandi, I. V.¹ - ¹ Gerência de Espeleologia e Tecnologia Ambiental, DIPF, Vale S.A.
Contato: claudio.dias@vale.com

Introdução

A necessidade de compatibilização das atividades de implantação de empreendimentos de engenharia e a preservação de cavidades naturais subterrâneas, tem levado a adoção de medidas de controle que permitam a eliminação dos riscos de impactos ambientais. No caso do Ramal Ferroviário Sudeste do Pará, o programa de proteção e monitoramento espeleológico constante no Plano Básico Ambiental, visa o detalhamento das medidas mitigadoras propostas para a atenuação dos impactos ambientais gerados durante as fases de implantação e operação do ramal ferroviário.

Materiais e Métodos

As cavidades GEM-1441, GEM-1442 e GEM-1614 estão na área de influência direta do Ramal Ferroviário Sudeste do Pará. O monitoramento dos níveis de vibração em conjunto com o controle periódico de alterações morfológicas permite o acompanhamento das condições de integridade física das cavidades, possibilitando a detecção e quantificação de possíveis danos.

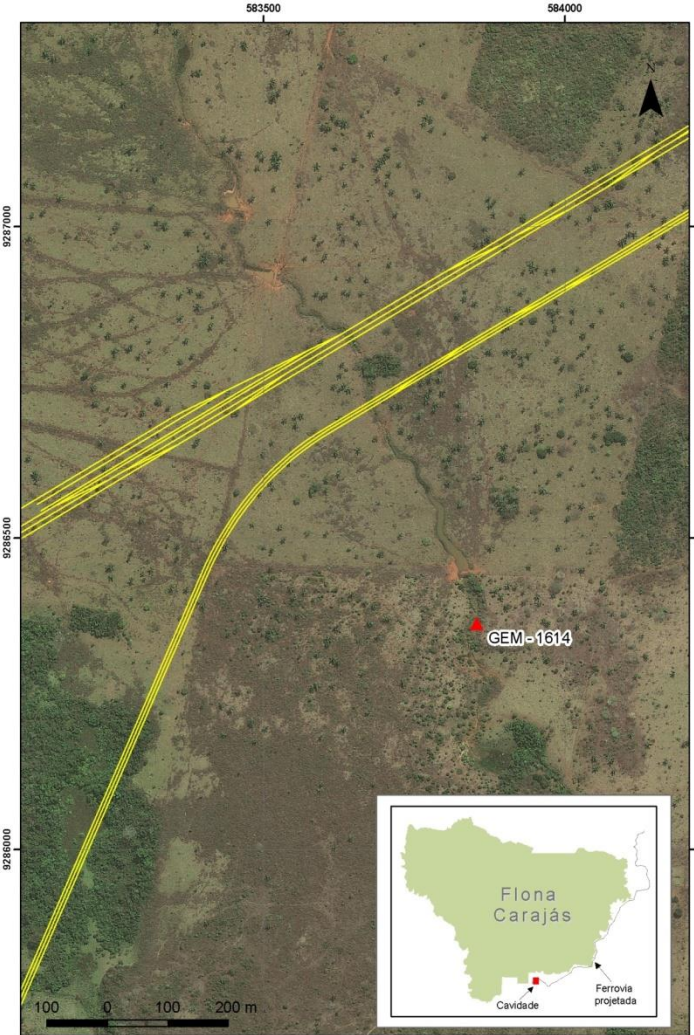


Figura 1 – Localização da cavidade GEM-1614 em relação à ferrovia. Fonte: Vale, 2014.

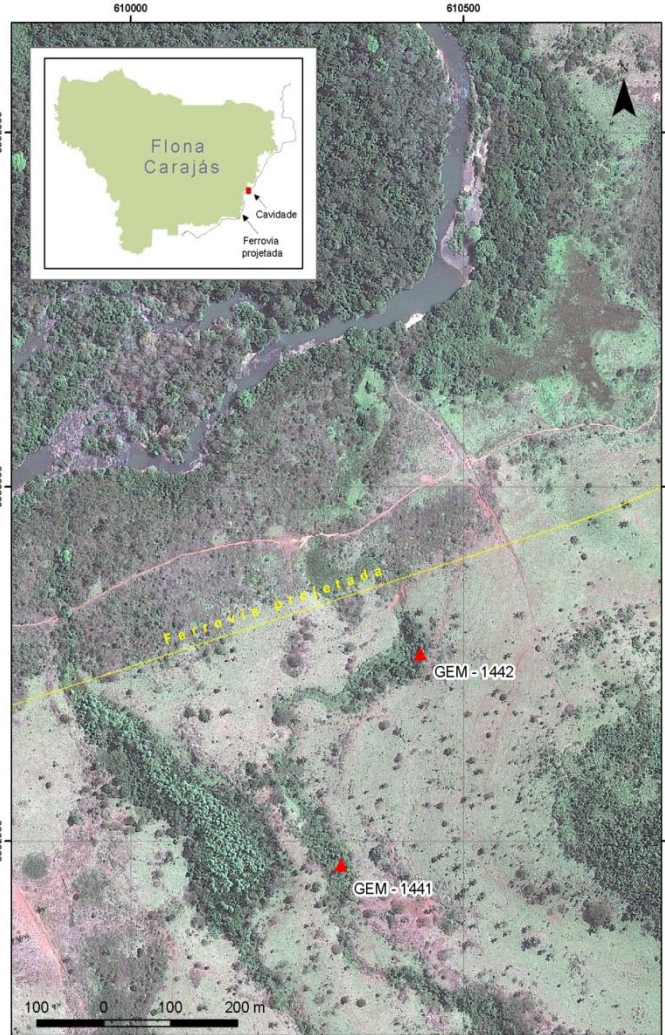


Figura 2 – Localização das cavidades GEM-1441 e GEM-1442 em relação à ferrovia. Fonte: Vale, 2014

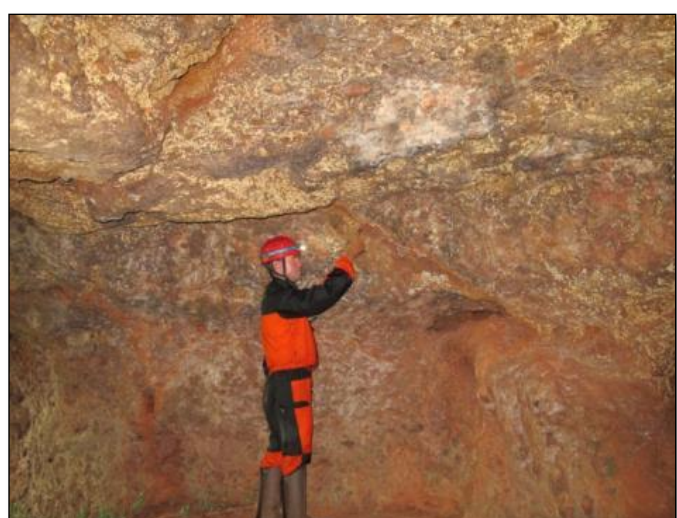


Figura 3 – Mapeamento Geoestrutural

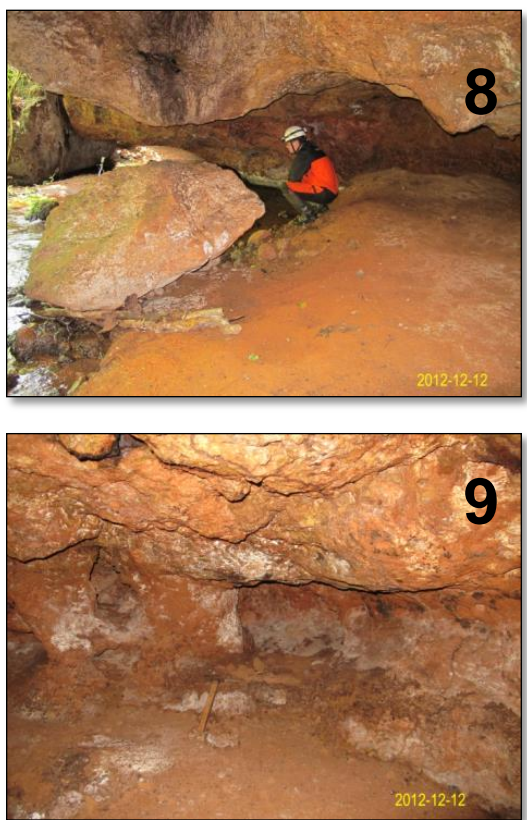
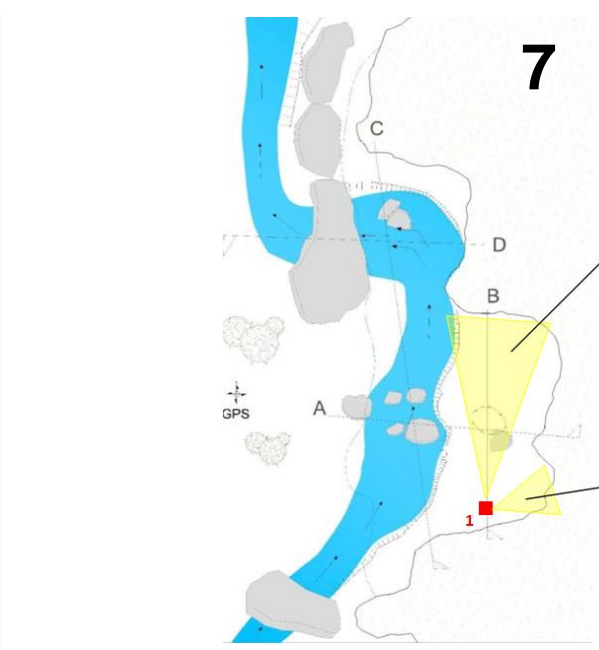
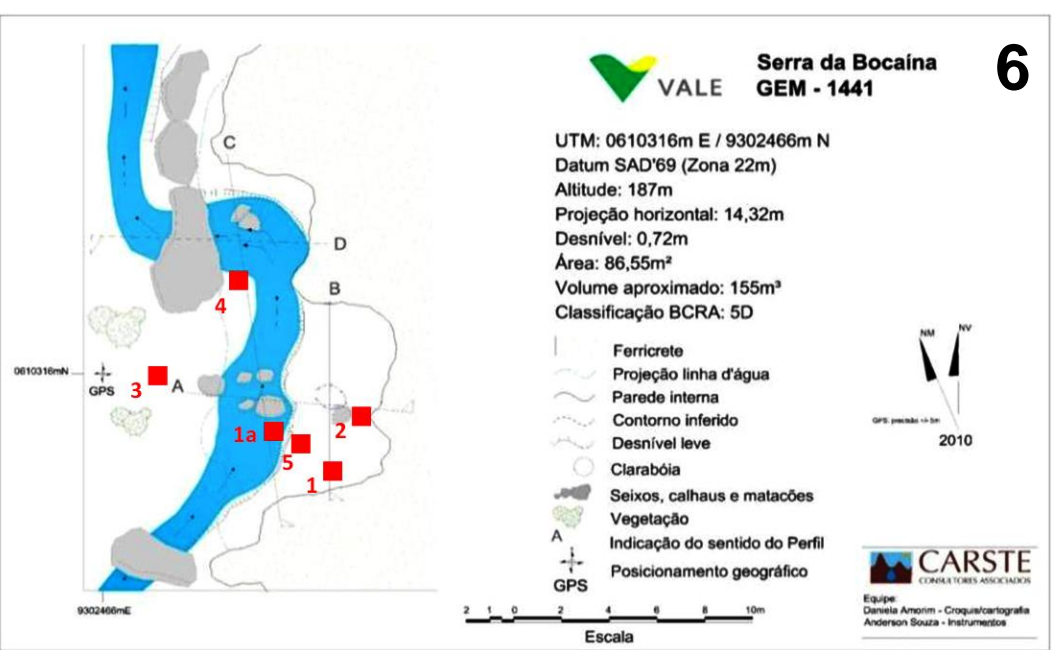


Figura 4 – Monitoramento Fotográfico



Figura 5 – Monitoramento Sismográfico

A metodologia proposta para o controle de alterações morfológicas é o registro fotográfico georeferenciado através da utilização da técnica de HILDRETH-WERKER.



- Figura 6 – Mapa GEM-1441 com plotagem dos pontos de monitoramento;
- Figura 7 – Mapa GEM 1441, com visadas a partir da estaca 1;
- Figura 8 – Foto1.1: Aspecto da cavidade (H=0,80m, Inclinação=0° e Az=0°) ;
- Figura 9 – Foto1.2: Câmaras (H=0,80m, Inclinação=-10° e Az=90).

O monitoramento das vibrações realizado continuamente através da instalação de sismógrafos de engenharia no interior das cavidades durante o período de implantação das obras de construção da ferrovia, e em seguida durante a fase de operação.



Figura 10 – Sismógrafo de Engenharia



Figura 11 – Sismógrafo instalado na cavidade GEM-1442



Figuras 12, 13 e 14 – Equipamentos sendo monitorados durante as operações de corte e aterro

Resultados e Discussão

A tabela a seguir apresenta a relação “velocidade de vibração x distância” para cada um dos equipamentos monitorados:

EQUIPAMENTO	DISTÂNCIA (m)	VELOCIDADE DE PARTÍCULA (mm/s)
Escavadeira Hidráulica	27	<0,51
	5	1,100
Trator de Esteira	15	0,648
	30	<0,51
Caminhão traçado	5	<0,51
MotoScraper	5	<0,51
	5	6,510
	15	3,040
Rolo Compactador	30	1,800
	60	0,684
	80	0,684
	100	<0,51
Patrol Motoniveladora	4	<0,51

Conclusões

O monitoramento sismográfico realizado durante a fase de implantação do ramal ferroviário tem demonstrado que, para as distâncias monitoradas (acima de 400 m), as vibrações geradas pelos equipamentos utilizados nas operações de corte e aterro não possuem intensidades capazes de causar danos a integridade física das cavidades em estudo.

CONTROLE E MONITORAMENTO DE VIBRAÇÕES EM CAVIDADES SITUADAS EM ÁREAS DIRETAMENTE AFETADAS PELO RAMAL FERROVIÁRIO SUDESTE DO PARÁ

Dias, C.R.C.¹; Dutra, G.¹; Luzzi, L.¹; Scherer, R.¹; Brandi, I. V.¹

¹ Gerência de Espeleologia e Tecnologias Ambientais, DIPF, Vale S.A;

RESUMO: A necessidade de compatibilização das atividades de implantação de novos empreendimentos de engenharia e a preservação de cavidades naturais subterrâneas, tem levado a adoção de medidas de controle que permitam a avaliação dos impactos ambientais.

No caso da implantação do ramal ferroviário sudeste do Pará, o programa de proteção e monitoramento espeleológico constante no Plano Básico Ambiental, foi elaborado visando o detalhamento das medidas mitigadoras propostas para a atenuação dos impactos ambientais gerados durante as fases de implantação e operação do ramal ferroviário.

As cavidades GEM-1441, GEM-1442 e GEM-1614, estão na área de influência direta do ramal ferroviário do Sudeste do Pará, sendo objeto de monitoramento contínuo nas fases de implantação e operação do empreendimento.

O monitoramento dos níveis de vibração em conjunto com o controle periódico de alterações morfológicas, permitirá o acompanhamento das condições de integridade física das cavidades, possibilitando a detecção e quantificação de possíveis danos.

A metodologia proposta para o controle de alterações morfológicas é o registro fotográfico georeferenciado através da utilização da técnica de HILDRETH-WERKER; o que permitirá ao longo do tempo, um comparativo sistemático de imagens fotográficas obtidas a partir de estações fixas.

O monitoramento das vibrações será realizado continuamente através da instalação de sismógrafos de engenharia no interior das cavidades durante o período de implantação das obras de construção da ferrovia, e em seguida durante a fase de operação.

No caso específico das estruturas de transporte ferroviário, as vibrações geradas serão originárias de fontes mecânicas distintas em função da fase do empreendimento.

Na fase de implantação, as vibrações serão originadas pelos equipamentos (rolo compactador, escavadeira, carregadeira, trator, motoniveladora e caminhão) utilizados nas operações de corte e aterro.

Na fase de operação, as vibrações serão originadas pelo tráfego das composições ferroviárias.

O monitoramento sismográfico realizado durante a fase de implantação do ramal ferroviário, tem demonstrado que para as distâncias monitoradas (acima de 400 m), as vibrações geradas pelos equipamentos utilizados nas operações de corte e aterro, não possuem intensidades capazes de causar danos a integridade física das cavidades em estudo.

PALAVRAS CHAVE: CAVIDADES, MONITORAMENTO, VIBRAÇÕES