

# 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

© ICMBio 2016. O material contido nesta publicação não pode ser reproduzido, guardado pelo sistema “retrieval” ou transmitido de qualquer modo por qualquer outro meio, seja eletrônico, mecânico, de fotocópia, de gravação ou outros, sem mencionar a fonte.

© dos autores 2016. Os direitos autorais das fotografias contidas nesta publicação são de propriedade de seus fotógrafos.

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

<b>APRESENTAÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>1. CONSIDERAÇÕES GERAIS .....</b>	<b>10</b>
<b>2. ATIVIDADES DE CONSTRUÇÃO CIVIL.....</b>	<b>11</b>
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
<b>3. ATIVIDADES MINERÁRIAS.....</b>	<b>19</b>
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
<b>4.</b>	<b>EMPREENDIMENTOS LINEARES.....</b>	<b>39</b>
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
<b>5.</b>	<b>CRITÉRIO DE SEGURANÇA PRELIMINAR .....</b>	<b>46</b>
<b>6.</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>48</b>
<b>ANEXO I</b>	<b>.....</b>	<b>49</b>
	Recomendações Quanto à Execução de Monitoramento Sismográfico de Atividades Emissoras de Vibração na Construção Civil.....	49
<b>ANEXO II</b>	<b>.....</b>	<b>51</b>
	Informações a Serem Reportadas por Relatórios de Monitoramento Sismográfico de Desmontes de Rocha com Uso de Explosivos .....	51
<b>ANEXO III</b>	<b>.....</b>	<b>52</b>
	Tabela T- Student .....	52
<b>ANEXO IV</b>	<b>.....</b>	<b>53</b>
	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 sejam 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. Apesar 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.

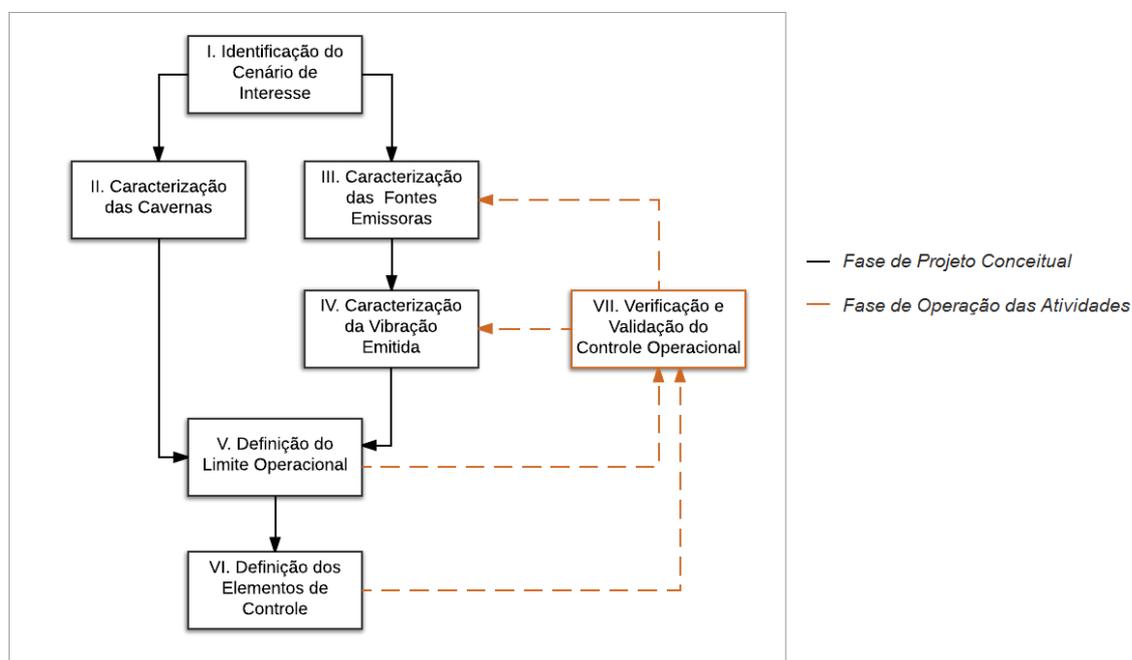


Figura 2.1: Fluxograma de controle das emissões sísmicas em cavernas próximas de atividades de construção civil.

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 trafegarão 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.

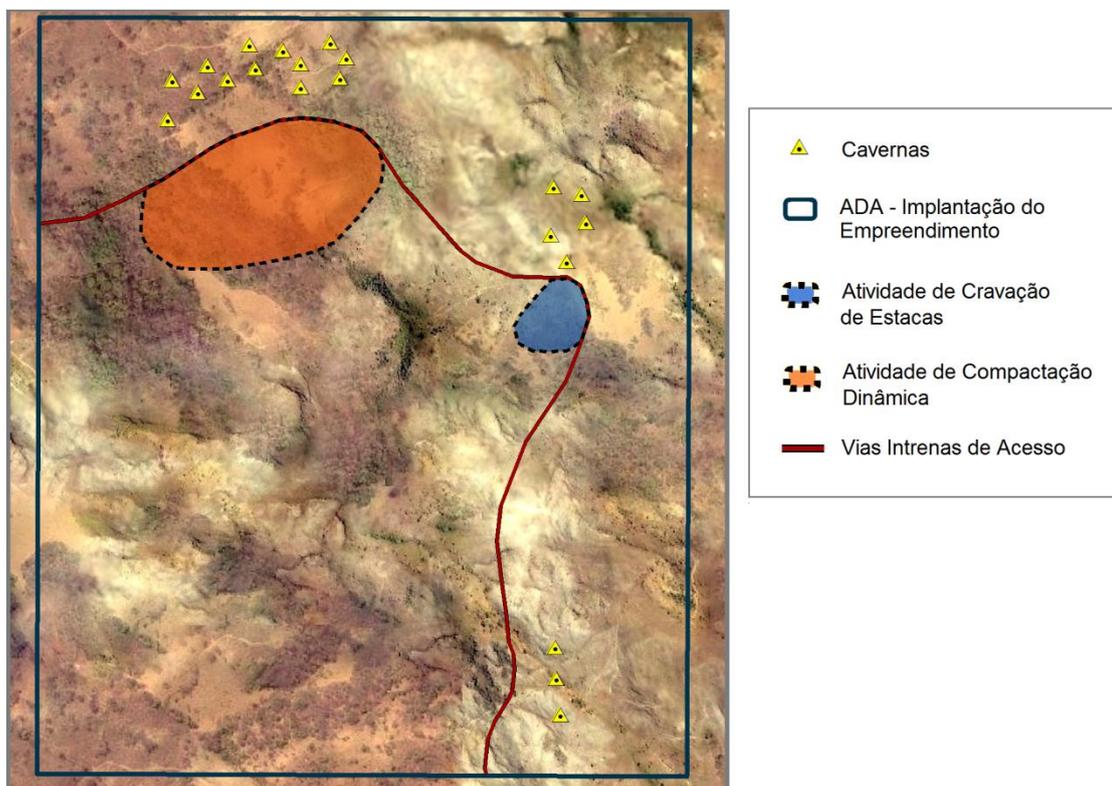


Figura 2.2: Identificação do cenário de interesse – atividades emissores de vibração na construção civil.

## 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 seguir<sup>1</sup>:

#### *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

---

<sup>1</sup> 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 martetele, altura de queda, espaçamento entre os pontos golpeados pelo martetele, 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 interesse<sup>2</sup>.

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:

---

<sup>2</sup> 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.

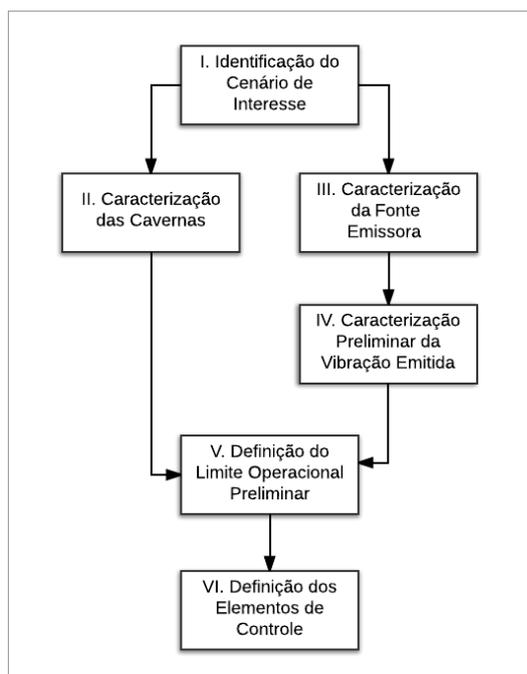


Figura 3.1: Fluxograma de controle das emissões sísmicas decorrente de atividade de desmonte de rocha com uso de explosivos – fase de projeto conceitual.

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.

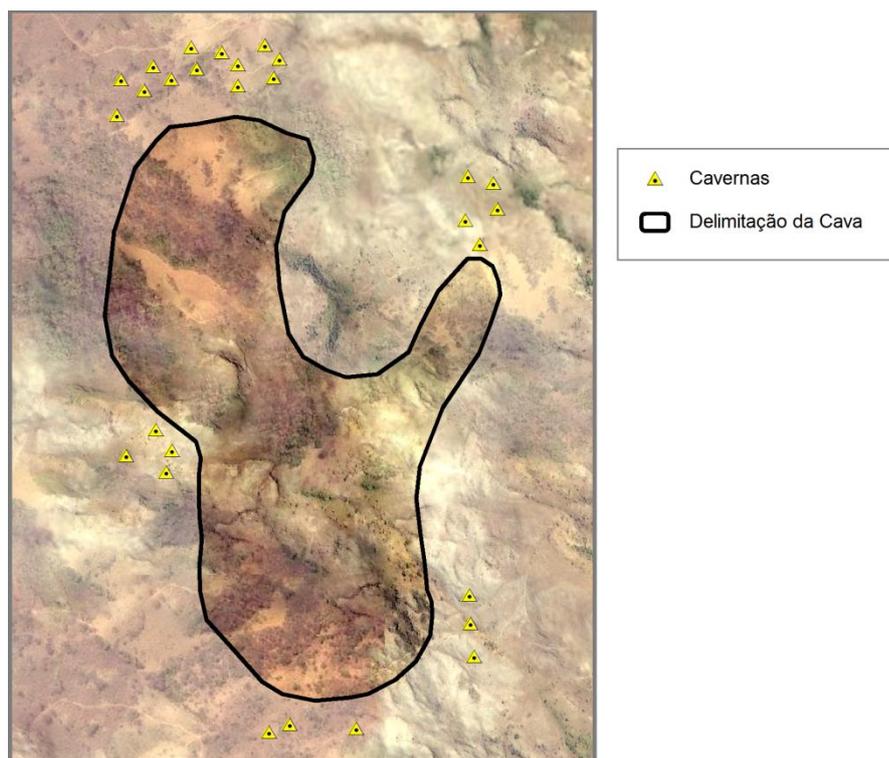


Figura 3.2: Cenário de interesse – atividade de desmonte de rocha com uso de explosivos.

## 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 sísmográfica. Nesse contexto, o estudo de sísmografia 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*

Permitem 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.

## V. Limite Operacional Preliminar

Por meio de projeção sismográfica deverá ser determinado o limite operacional preliminar representado pelo montante de carga máxima por espera (CME) admissível ao longo do perímetro das áreas de cava com vistas a atender ao critério de segurança estrutural definido às cavernas de interesse, considerando a presença de todas as cavernas envolvidas no estudo. No relatório, deverá constar o mapeamento da CME de maneira similar ao exemplificado pela Figura 3.3.

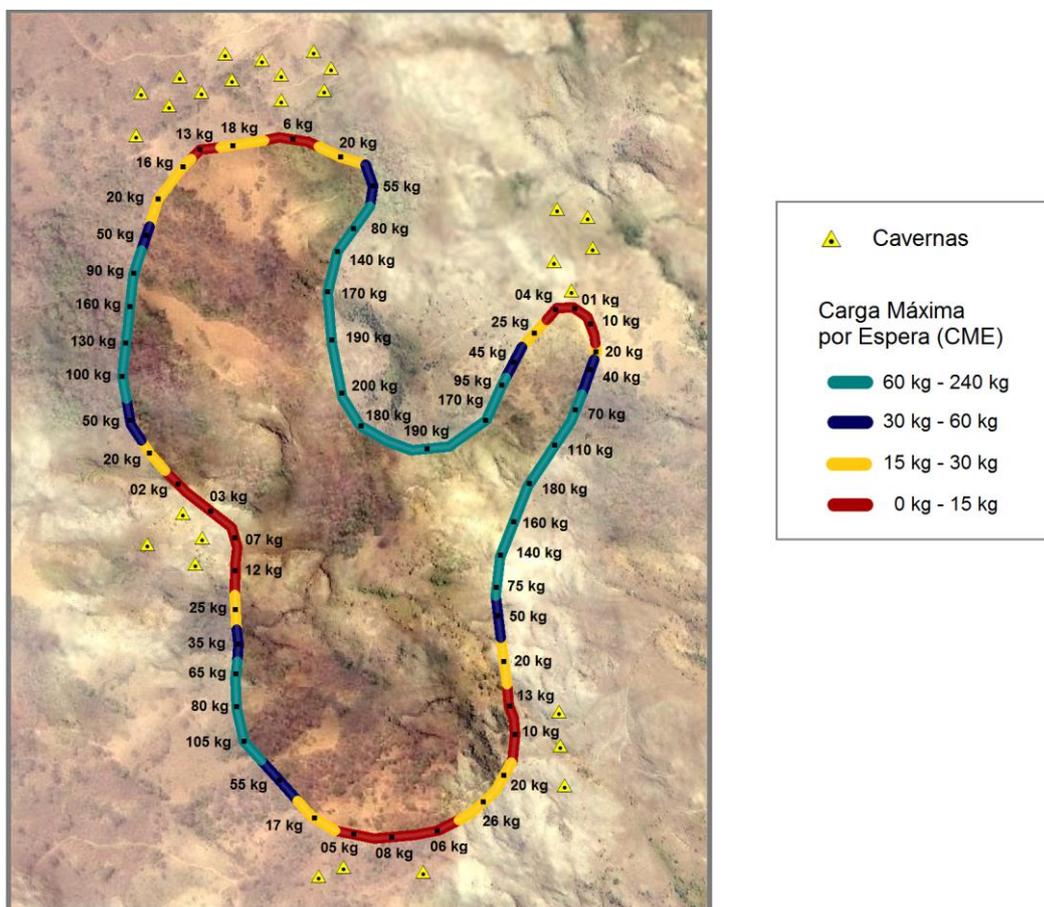


Figura 3.3: CME estimada no perímetro de área de cava – âmbito da fase de projeto conceitual.

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

O limite operacional é considerado preliminar, pois deverá ser validado quando da fase associada à operação das atividades.

## 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 executado na fase de operação da atividade de desmonte de rocha.

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.

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.

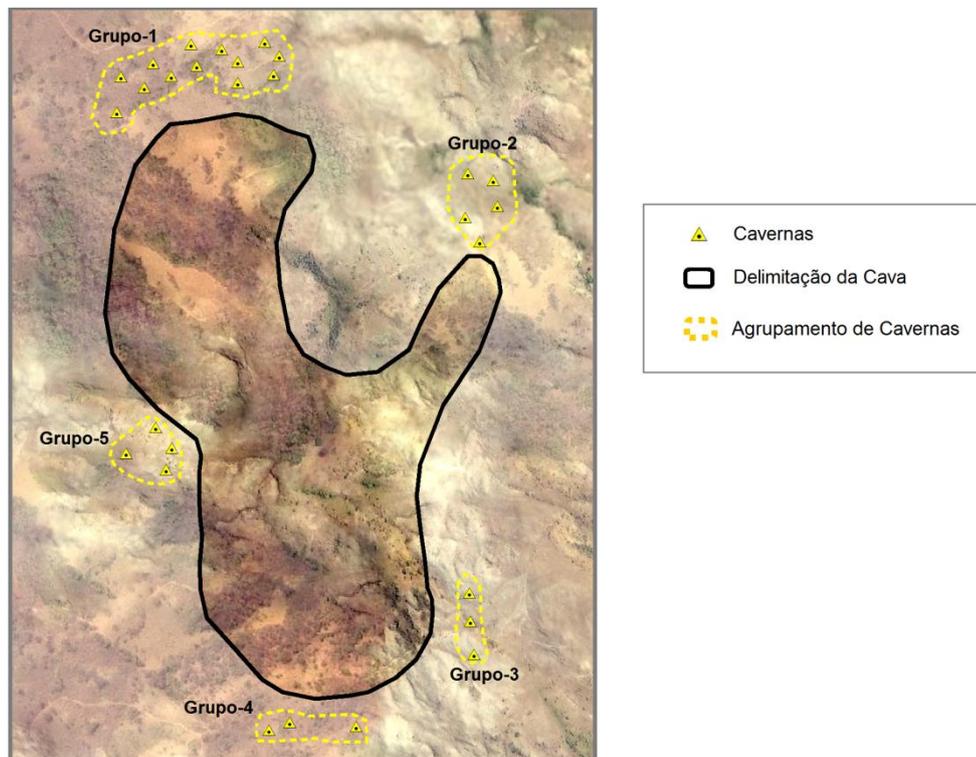


Figura 3.4: Identificação de agrupamentos de cavernas no entorno da atividade de desmonte de rocha.

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.

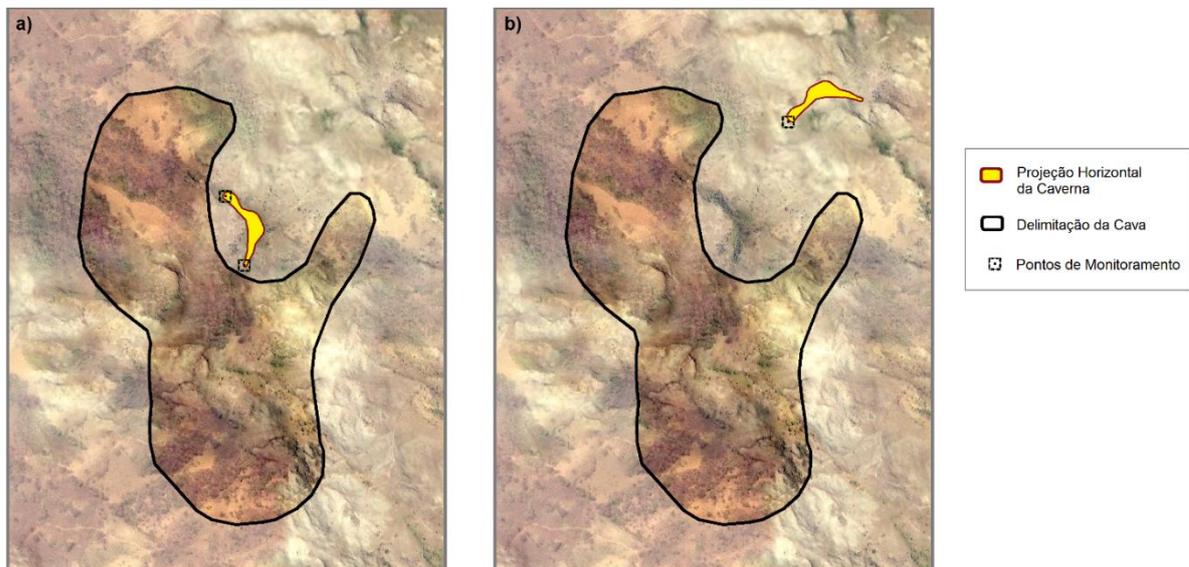


Figura 3.5: Caverna relativamente extensa situada no entorno de uma cava: a) necessidade de a caverna ser representada por mais de um ponto de medição; b) caverna representável por uma localização pontual.

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.

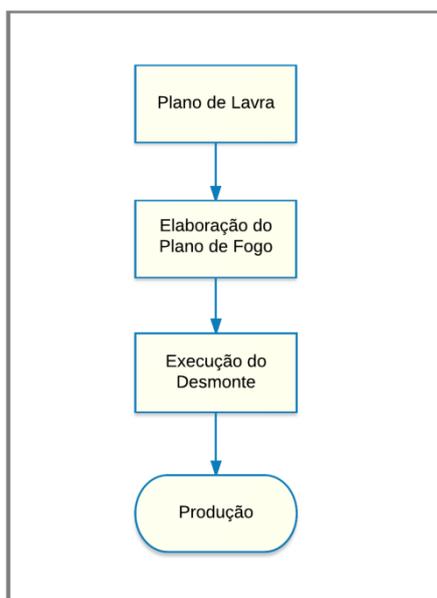


Figura 3.6: Fluxograma do processo produtivo padrão comumente empregado por mineradoras em atividades de desmonte de rocha com uso de explosivos.

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.

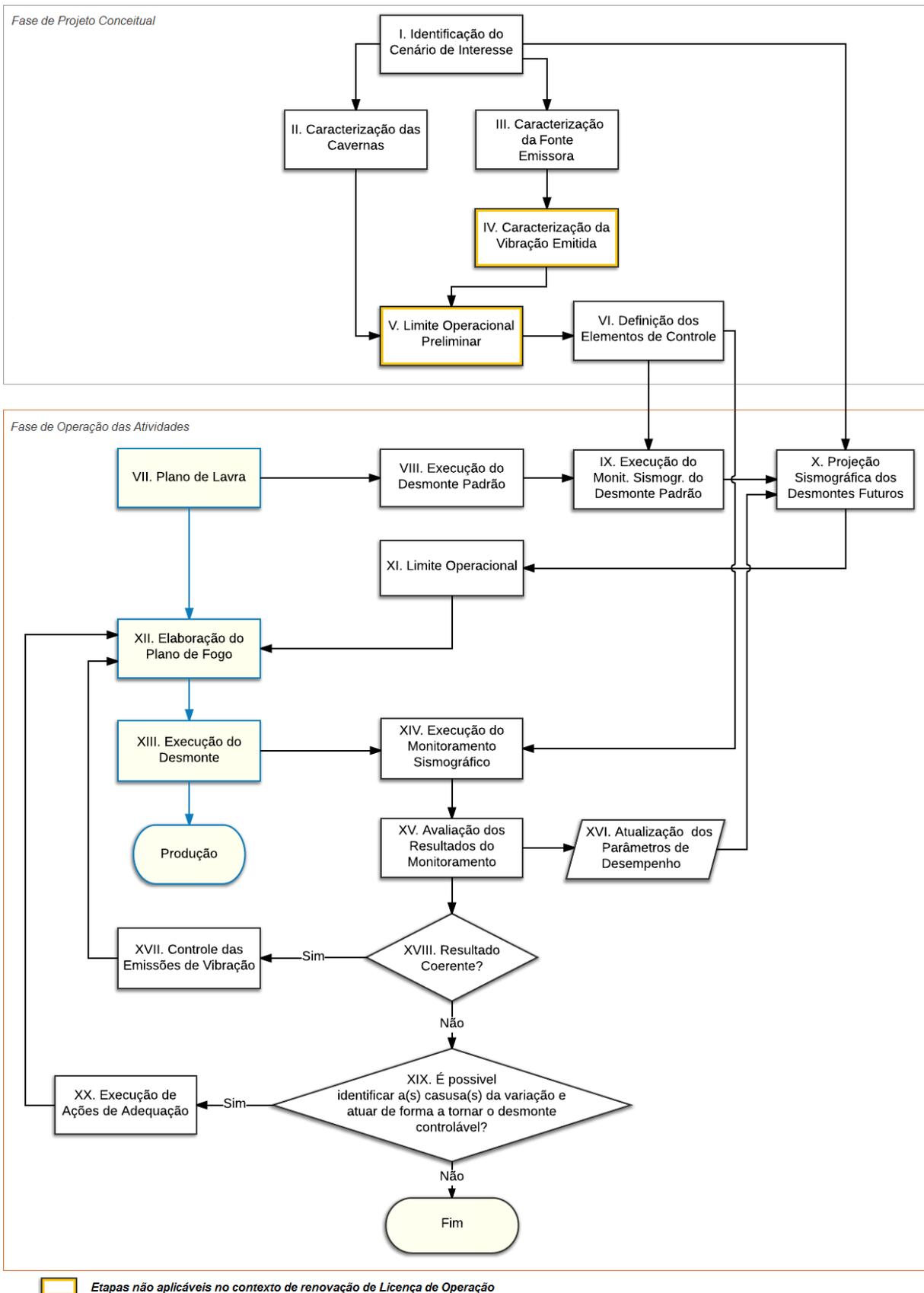


Figura 3.7: Fluxograma de controle das emissões sísmicas decorrentes de atividade de desmorte de rocha com uso de explosivos – fase de operação das atividades.

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.

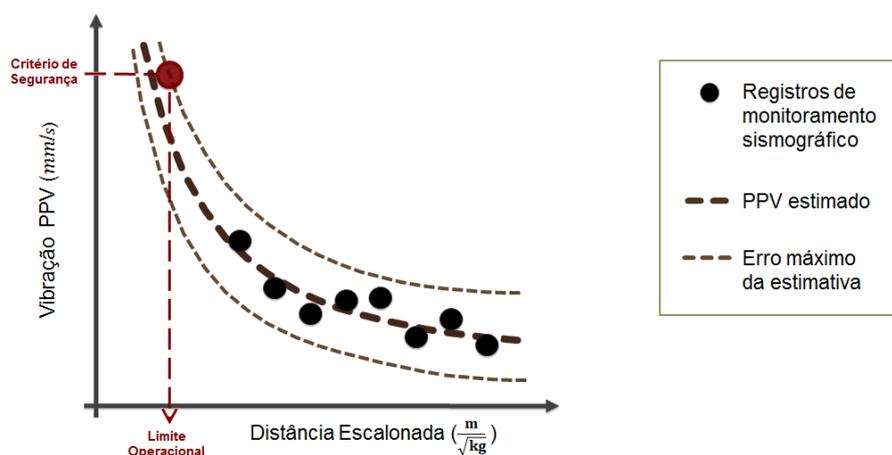


Figura 3.8: Resultado de projeção sismográfica em função da Distância Escalonada.

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.

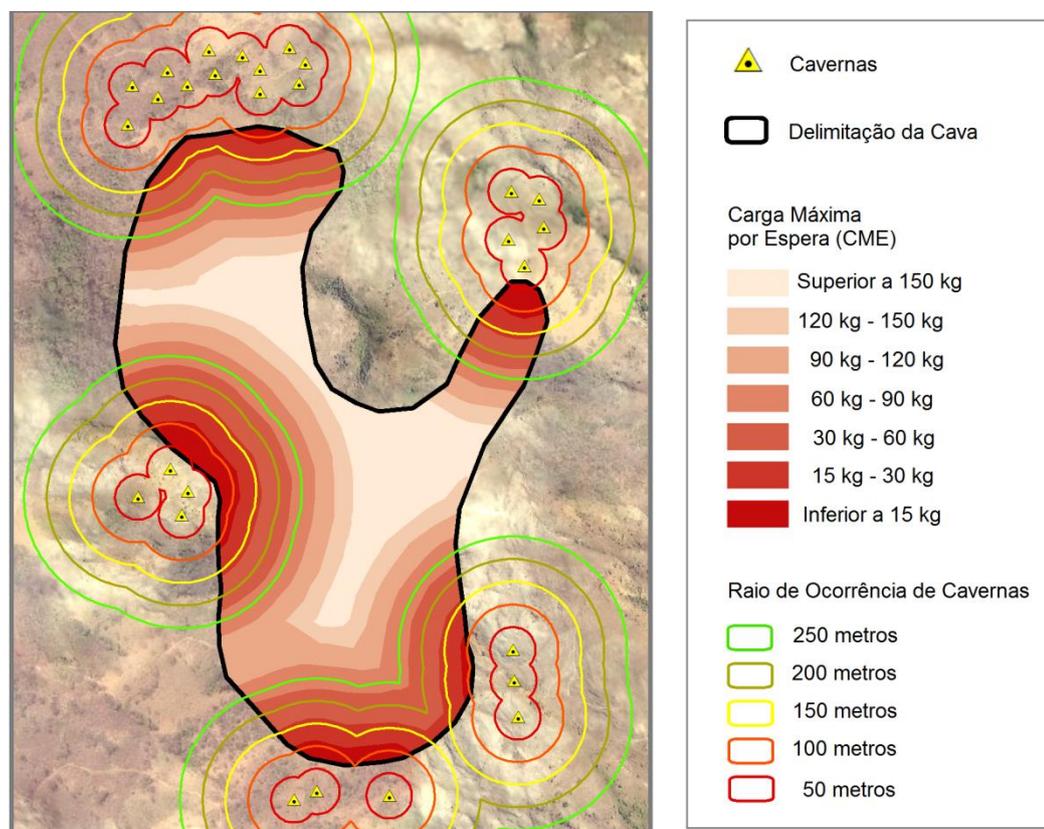


Figura 3.9: CME determinada – fase de operação dos desmontes de rocha.

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.

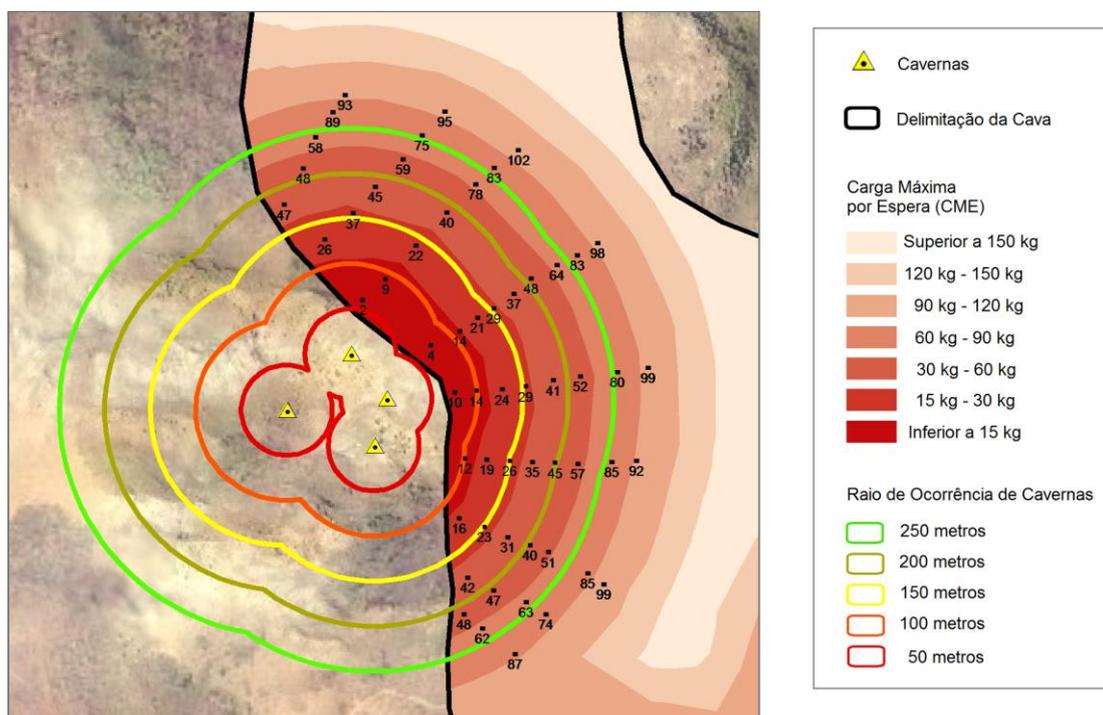


Figura 3.10: Valores de CME em área de lavra próxima ao local de ocorrência de cavernas.

## 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.

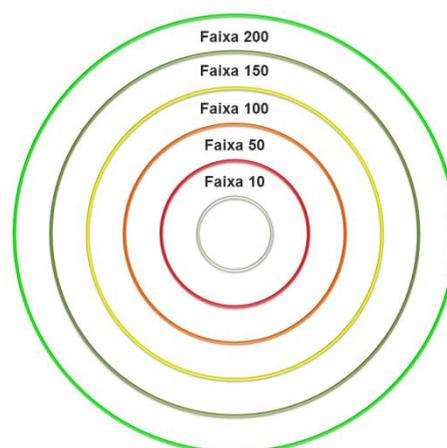
#### XVIII. Controle das Emissões de Vibração

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).

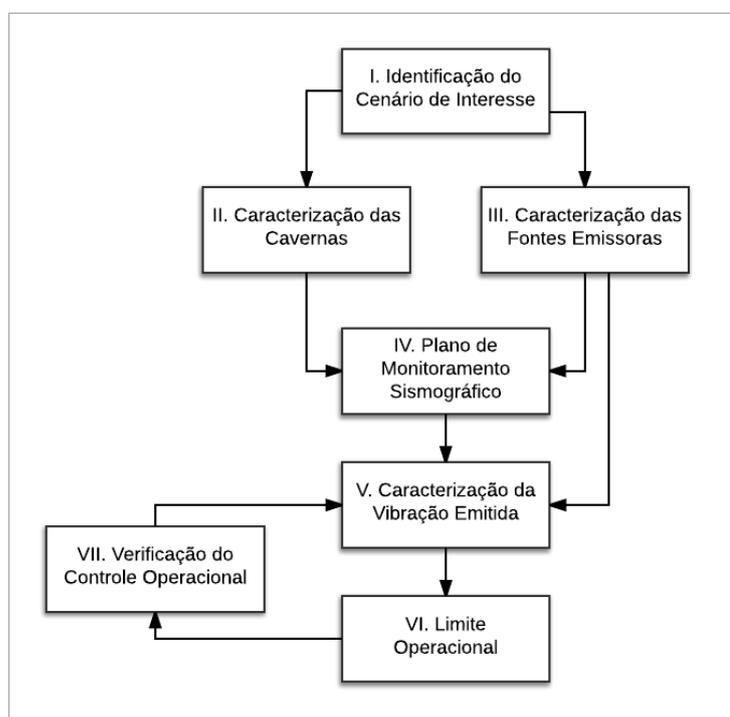


Figura 3.11: Fluxograma de controle das emissões sísmicas em cavernas próximas de operação de atividades minerárias.

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.

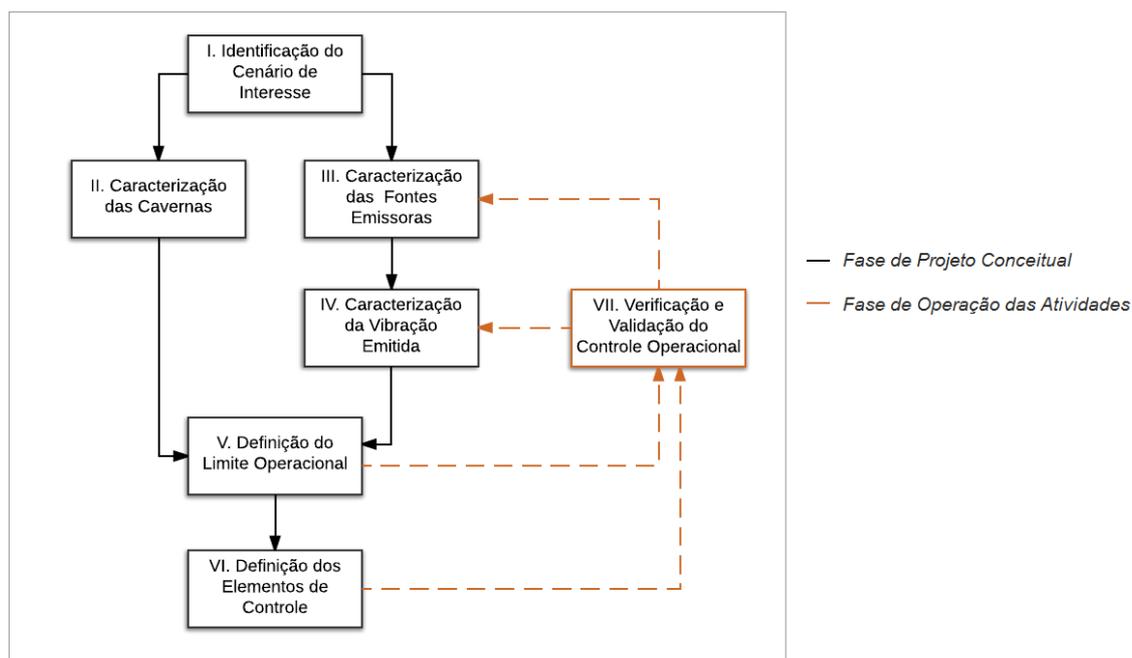


Figura 4.1: Fluxograma de controle das emissões sísmicas em cavernas próximas de empreendimentos lineares.

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.

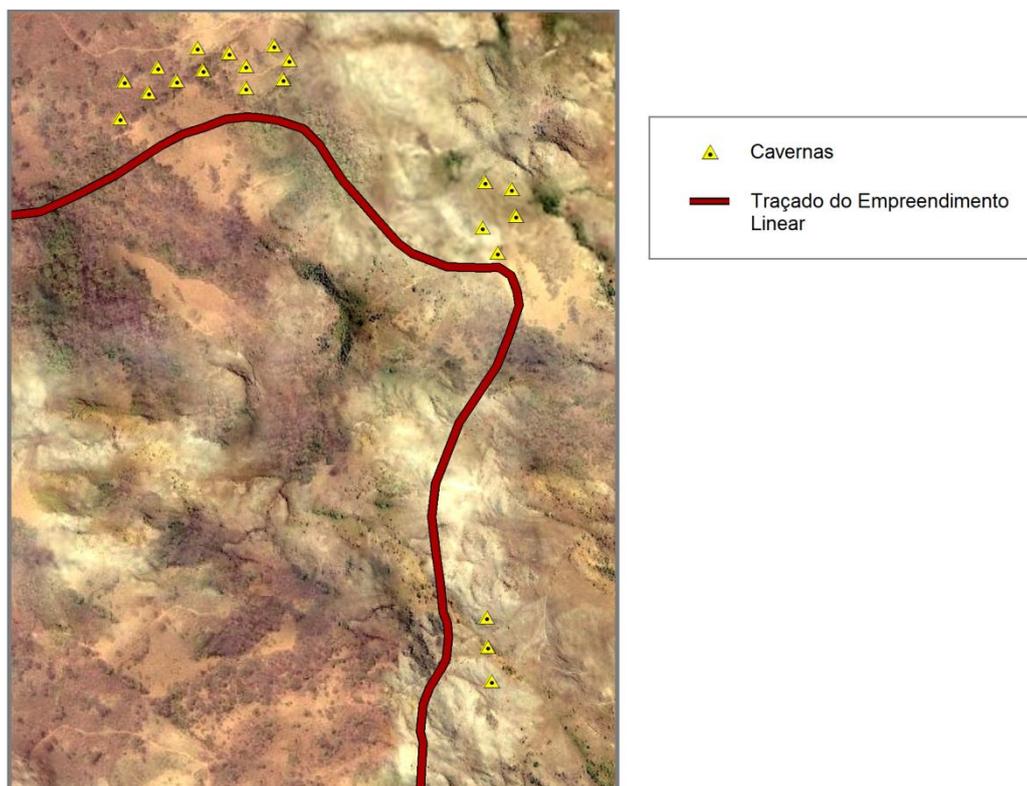


Figura 4.2: Identificação do cenário de interesse – vibração proveniente da operação de empreendimentos lineares.

## 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 conseqüente 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 (PPV<sup>3</sup>) 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;

---

<sup>3</sup> 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*” (m<sup>3</sup>);
  - f. Volume de rocha desmontado por furo “*in situ*” (m<sup>3</sup>);
- 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/m<sup>3</sup>);
  - 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 discontinuidades 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

