

Sismografia Aplicada ao Patrimônio Espeleológico

Contribuição Técnica à Análise de Estudos Ambientais



REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL

Presidente
MICHEL TEMER

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE

Ministro
JOSÉ SARNEY FILHO

Secretaria de Biodiversidade e Florestas
JOSÉ PEDRO DE OLIVEIRA COSTA

INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE

Presidente
RÔMULO JOSÉ FERNANDES BARRETO MELLO

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

© 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
Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas

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

ICMBIO

BRASÍLIA, DEZEMBRO DE 2016

©ICMBio 2016.

©dos Autores 2016.

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

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

JOCY BRANDÃO CRUZ

AUTORES

Marcos Pinho - Consultor

André Afonso Ribeiro - Cecav

Cristiano Ferreira Fernandes - Cecav

Jocy Brandão Cruz - Cecav

José Carlos Ribeiro Reino - Cecav

REVISÃO TÉCNICA

André Afonso Ribeiro

Cristiano Ferreira Fernandes

José Carlos Ribeiro Reino

FOTO CAPA

Cristiano Ferreira Fernandes

Caverna Santana - Iporanga/SP

Catálogo na Fonte

Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade

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

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

CDU(2.ed.)551.44

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

INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE

Diretoria de Pesquisa, Avaliação e Monitoramento da Biodiversidade

Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas

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

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

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

APRESENTAÇÃO

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

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

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

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

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

SUMÁRIO

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

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

1. FUNDAMENTAÇÃO TÉCNICA DE BASE

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

1.1. Elementos de Vibração

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

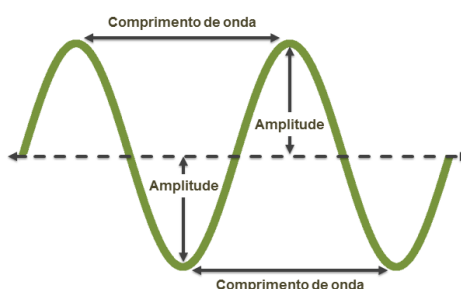


Figura 1.1: Parâmetros principais constituintes da onda sísmica.

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

1.1.1. Amplitude de Vibração

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

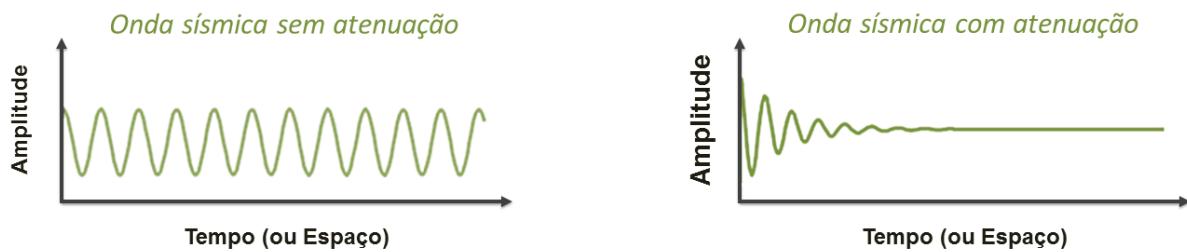


Figura 1.2: Onda sísmica sem atenuação (amplitude constante) e onda sísmica com atenuação (amplitude decrescente).

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

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

1.1.2. Frequência de Vibração

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

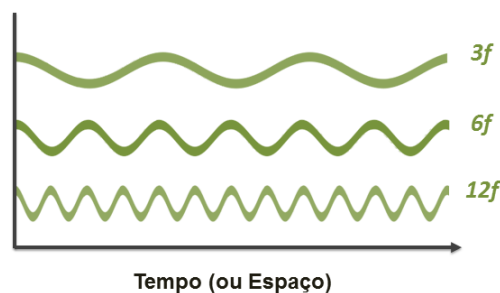


Figura 1.3: Ondas sísmicas de igual amplitude e diferentes frequências de oscilação.

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

1.2. Cenário do Patrimônio Espeleológico Sujeito a Vibrações

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



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

1.2.1. Fonte Emissora de Vibração

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

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

1.2.1.1. Espalhamento Esférico

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

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

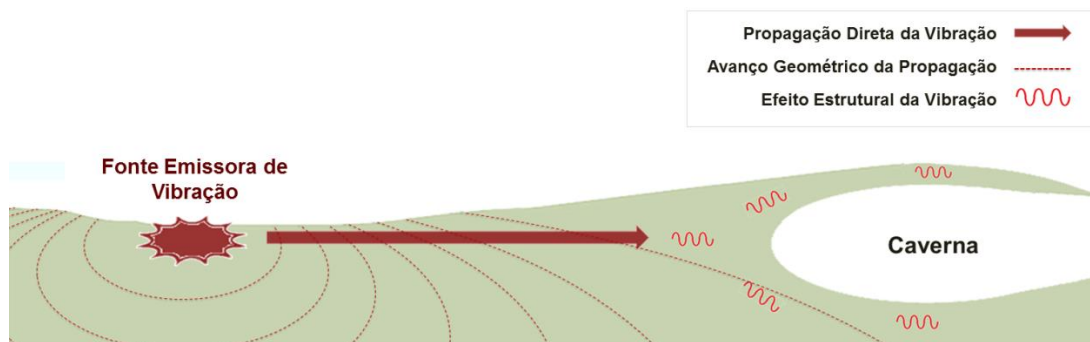


Figura 1.5: Efeito de espalhamento esférico na atenuação da propagação sísmica.

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

1.2.1.2. Atributos do Terreno

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

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

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

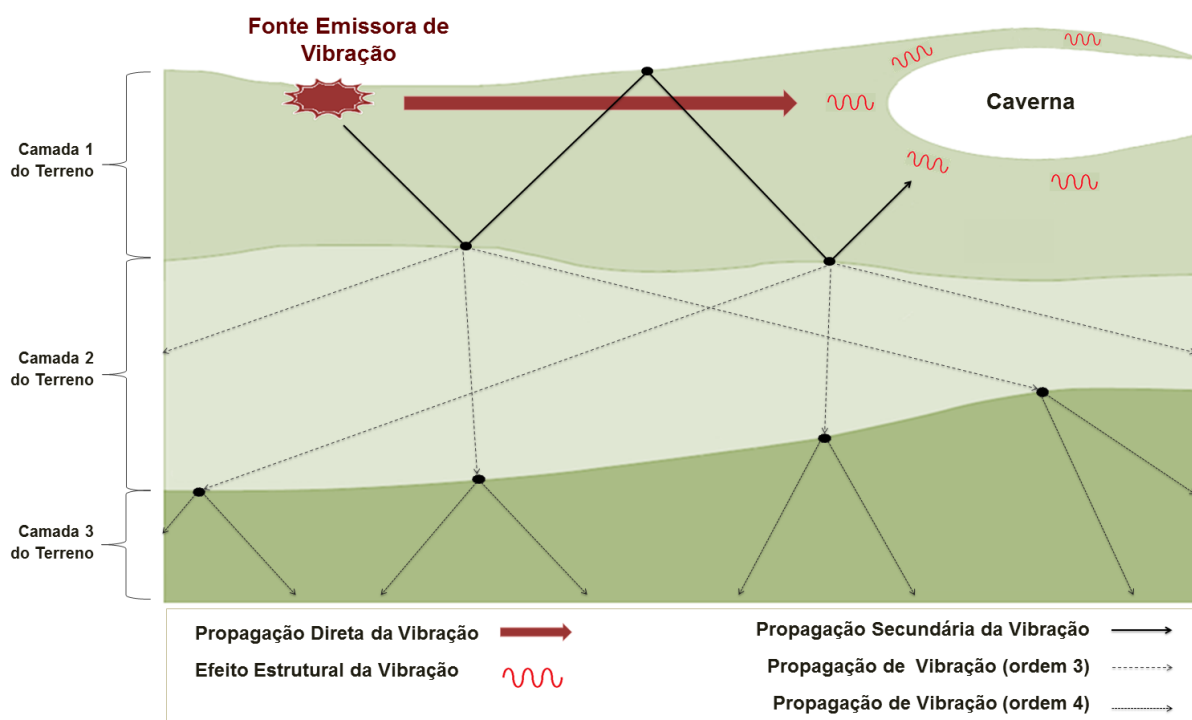


Figura 1.6: Efeito de descontinuidades do solo na propagação da vibração sísmica.

1.2.2. Alvo Receptor de Vibração: Caverna

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



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

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

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

2. INFORMAÇÕES TÉCNICAS COMPLEMENTARES

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

2.1. Localização de Pontos de Monitoramento

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

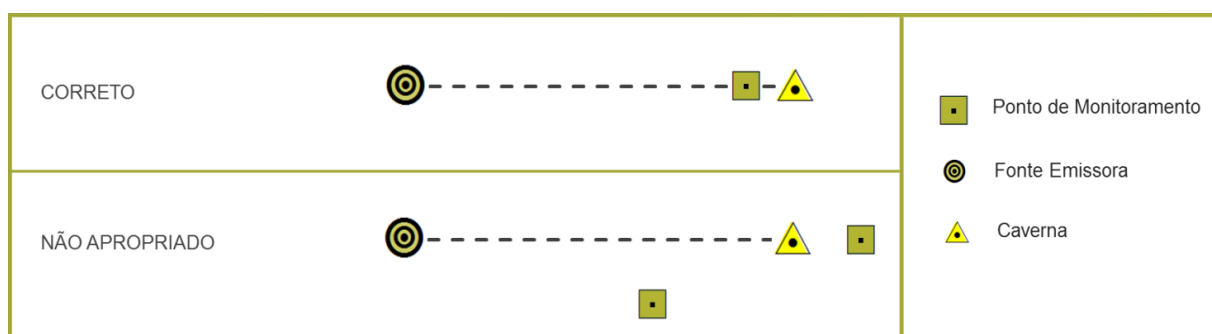


Figura 2.1: Recomendação quanto à localização dos pontos de monitoramento.

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

2.2. Diferenças entre Monitoramento e Medição

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

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

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

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

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

2.3. Simulação Projecional e Verificação Operacional em Avaliação Sismográfica

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

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

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

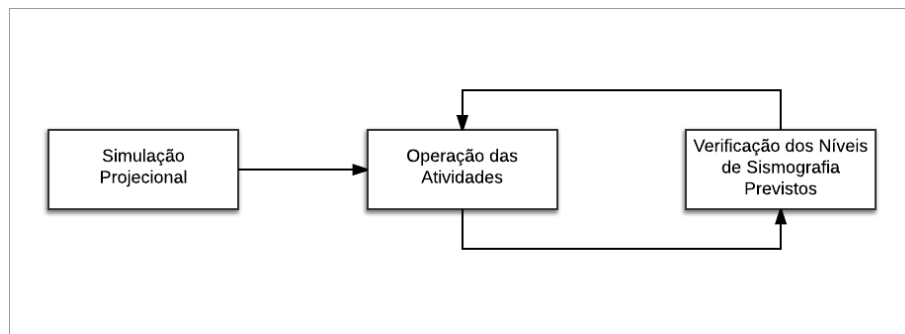


Figura 2.2: Simulação projetional e verificação sismográfica.

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

3. CRITÉRIO DE SEGURANÇA DE CAVERNAS

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

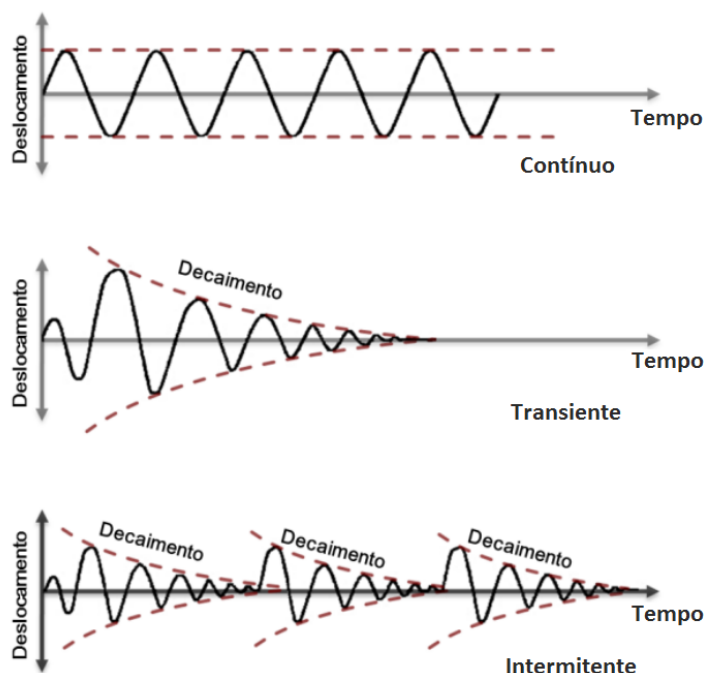


Figura 3.1: Classificação das vibrações sísmicas (adaptado de Sarsby - 2000).

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

4. ANÁLISE DE LAUDOS DE SISMOGRAFIA

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

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

4.1. Características de Medição

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

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

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

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

¹ *Peak Particle Velocity – PPV.*

4.2. Resultados Pertinentes ao Processo de Controle Operacional

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

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

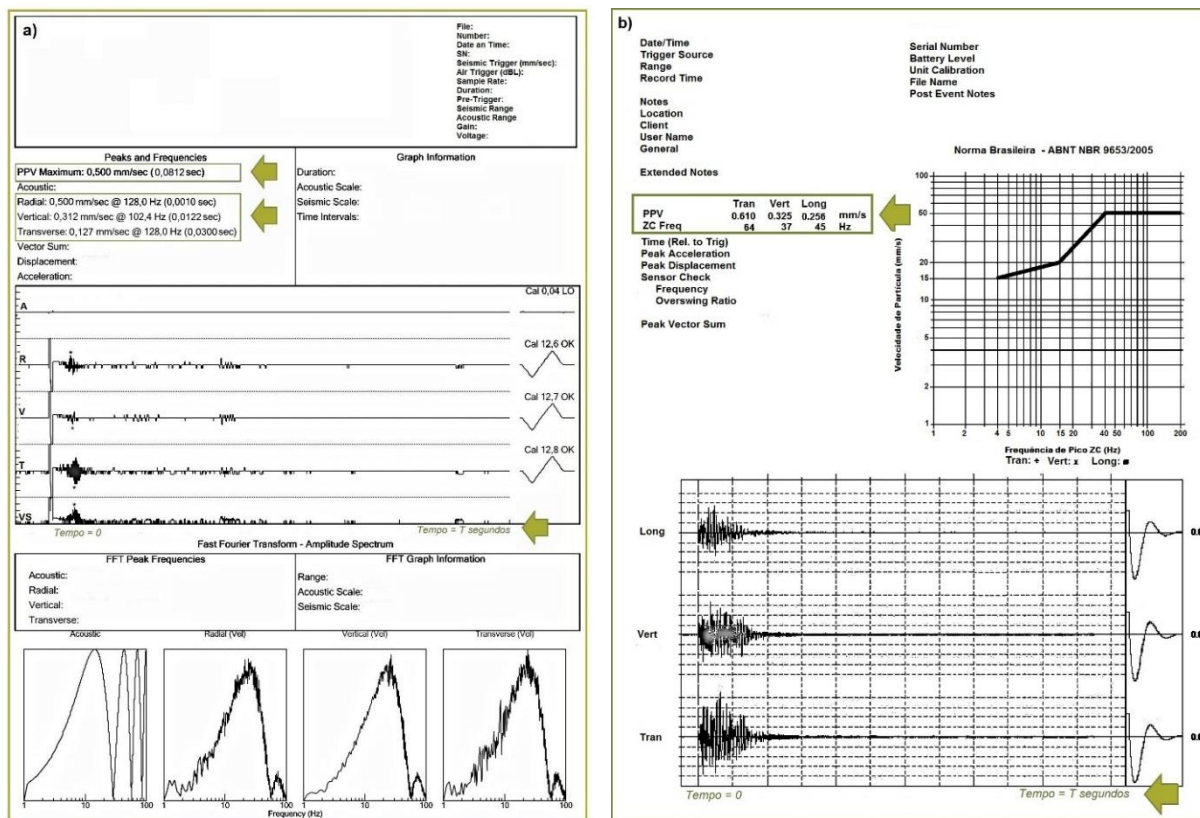


Figura 4.1: Exemplos de laudos de medição gerados por dois modelos de sismógrafos de fabricantes diferentes².

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

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

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

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

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

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

5. ANÁLISE DE ESTUDOS DE SISMOGRAFIA

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

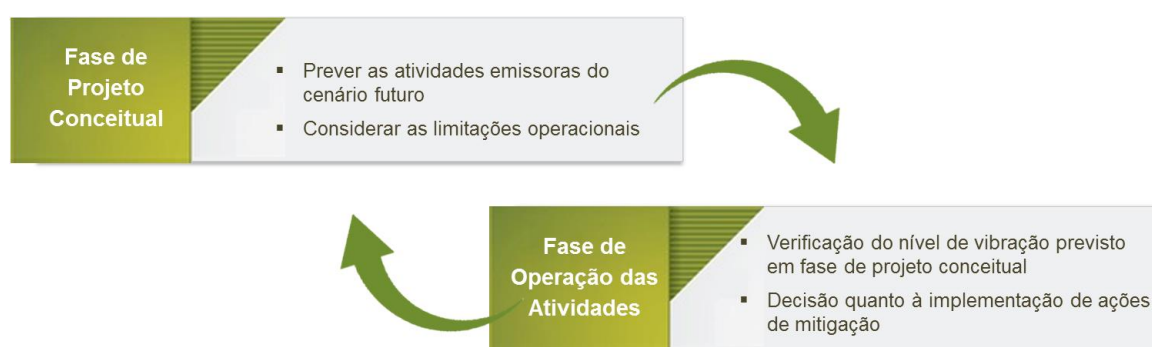


Figura 5.1: Integração entre o estudo da fase de projeto conceitual e o estudo da fase de operação das atividades.

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

5.1. Empreendimentos em Fase de Projeto Conceitual

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

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

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

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

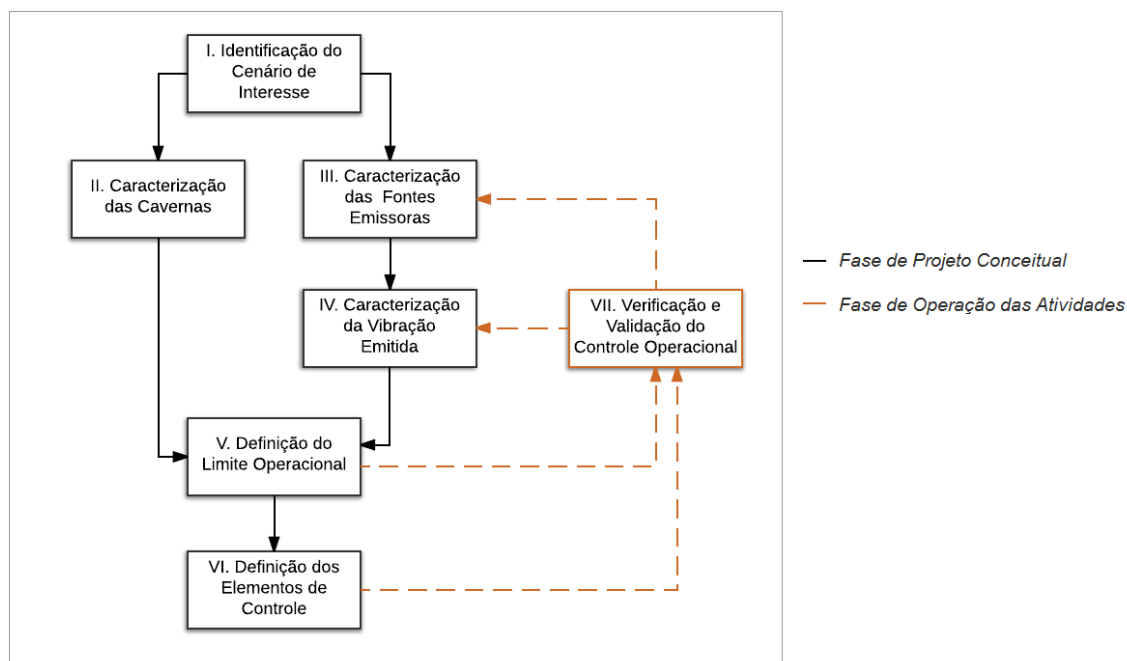


Figura 5.2: Fluxograma de controle das emissões sísmicas em cavernas próximas a fontes emissoras de vibração.⁴

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

I. Quanto à Identificação do Cenário de Interesse

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

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

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

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

II. Quanto à Caracterização Estrutural das Cavernas de Interesse

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

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

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

III. Quanto à Caracterização das Fontes Emissoras de Vibração

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

III.a. Atividade de Cravação de Estacas

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

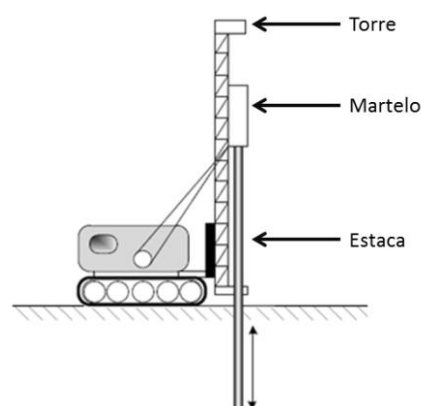


Figura 5.3: Equipamento de cravação de estacas.

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

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

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

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

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

III.b. Atividade de Compactação Dinâmica

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

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

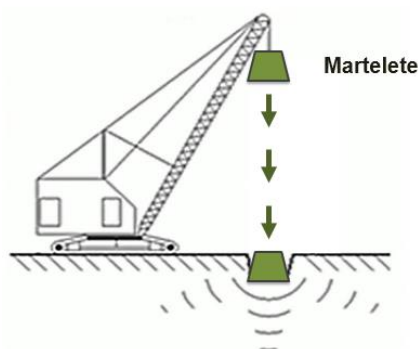


Figura 5.4: Atividade de compactação dinâmica do solo.

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

III.c. Tráfego de Veículos

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

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

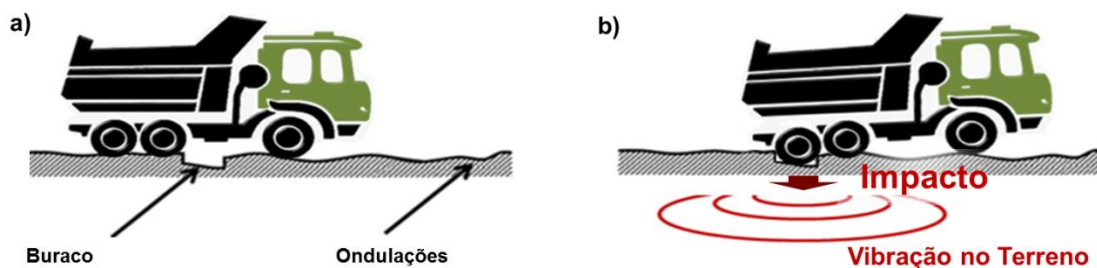


Figura 5.5: a) Passagem de veículo em pista contendo irregularidades e b) vibração no terreno induzida pelo impacto decorrente da passagem do veículo por um buraco na pista.

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

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

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

III.d. Tráfego Ferroviário

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

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

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

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

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

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

IV. Quanto à Caracterização da Vibração Emitida

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

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

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

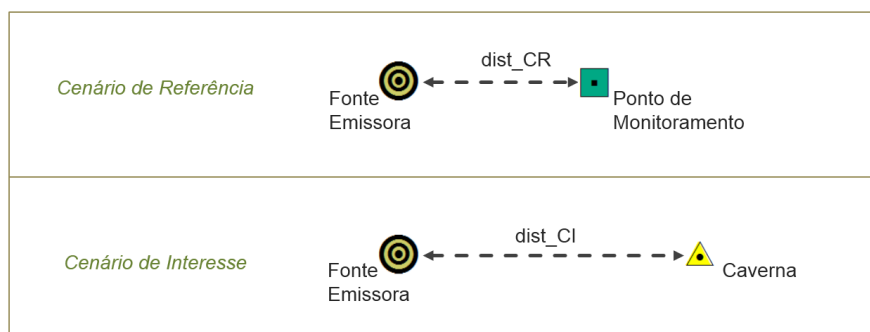


Figura 5.6: a) Determinação da vibração no cenário de interesse por meio da projeção dos níveis de vibração registrados no cenário de referência

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

V. Quanto ao Limite Operacional

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

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

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

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

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

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

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



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

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

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

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

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

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

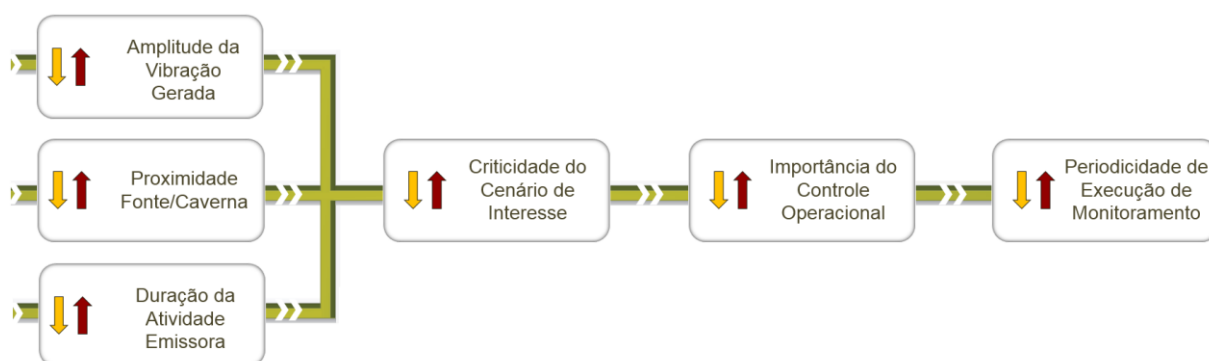


Figura 5.8: Recomendações à definição da periodicidade da execução de monitoramento sismográfico.

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

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

5.2. Fase Associada à Operação de Empreendimentos

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

VII. Quanto à Verificação e Validação do Controle Operacional

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

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

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

6. ESTUDOS DE SISMOGRAFIA DE DESMONTES DE ROCHA

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

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

6.1. Considerações Quanto aos Modelos de Projeção Sismográfica

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

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

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

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

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

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

6.2. Considerações Quanto ao Limite Operacional

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

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

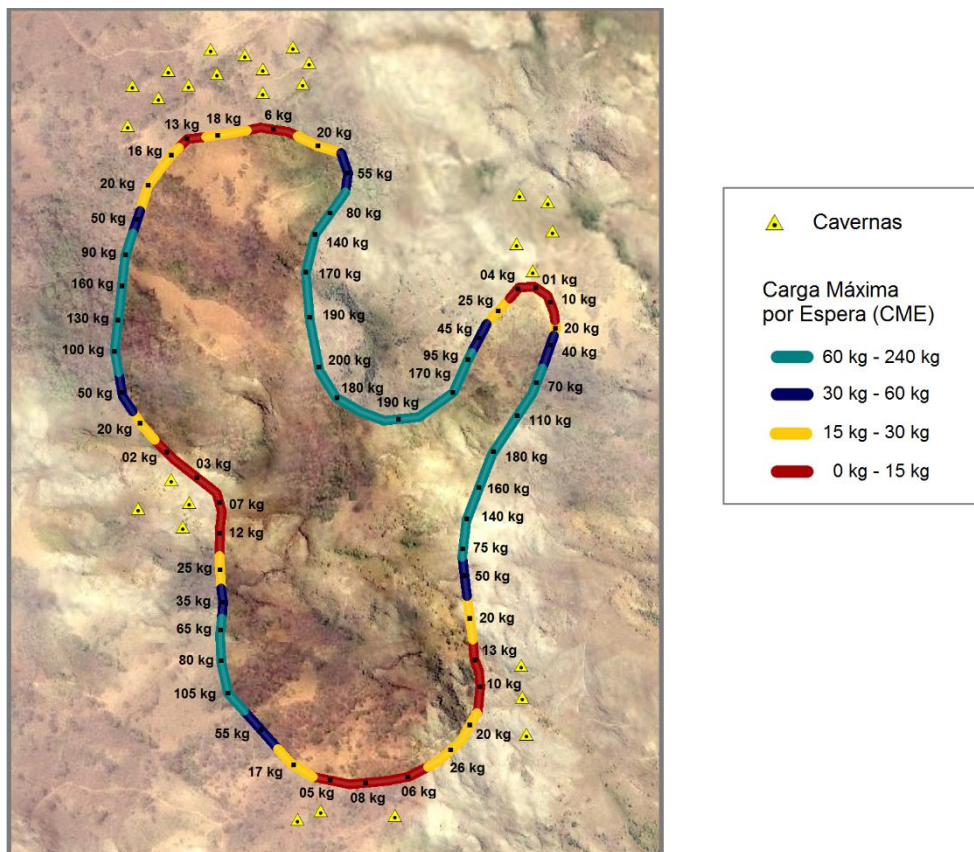


Figura 6.1 CME determinada para critério de segurança de cavidades igual a 5 mm/s – âmbito da fase de projeto conceitual.

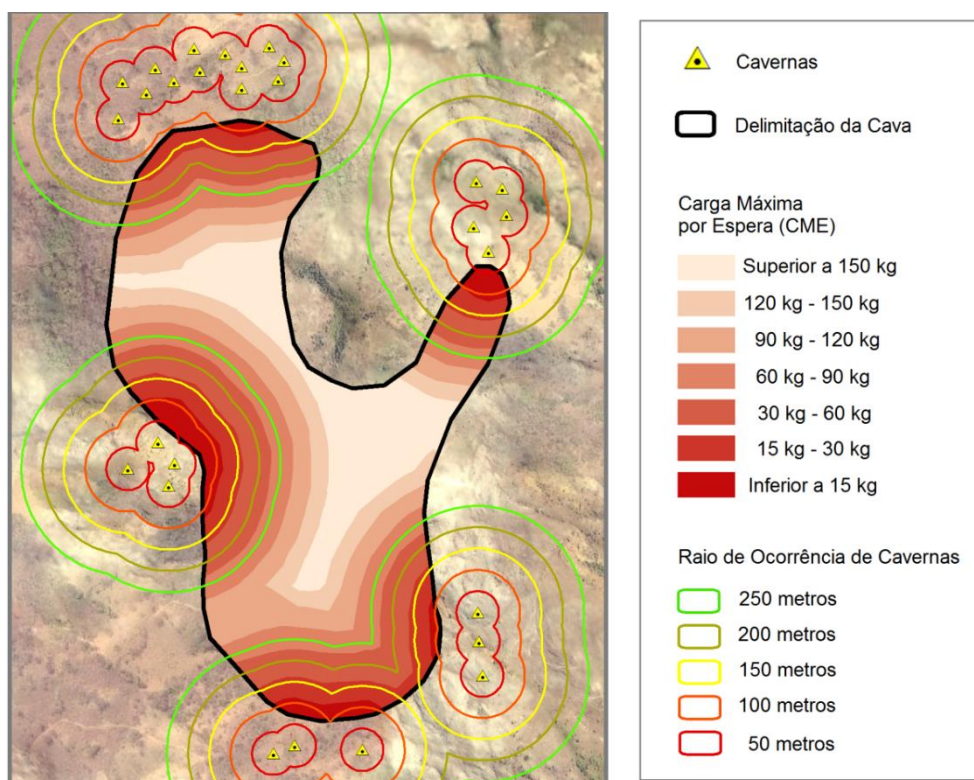


Figura 6.2: CME determinada para critério de segurança de cavidades igual a 5 mm/s – fase de operação dos desmontes de rocha.

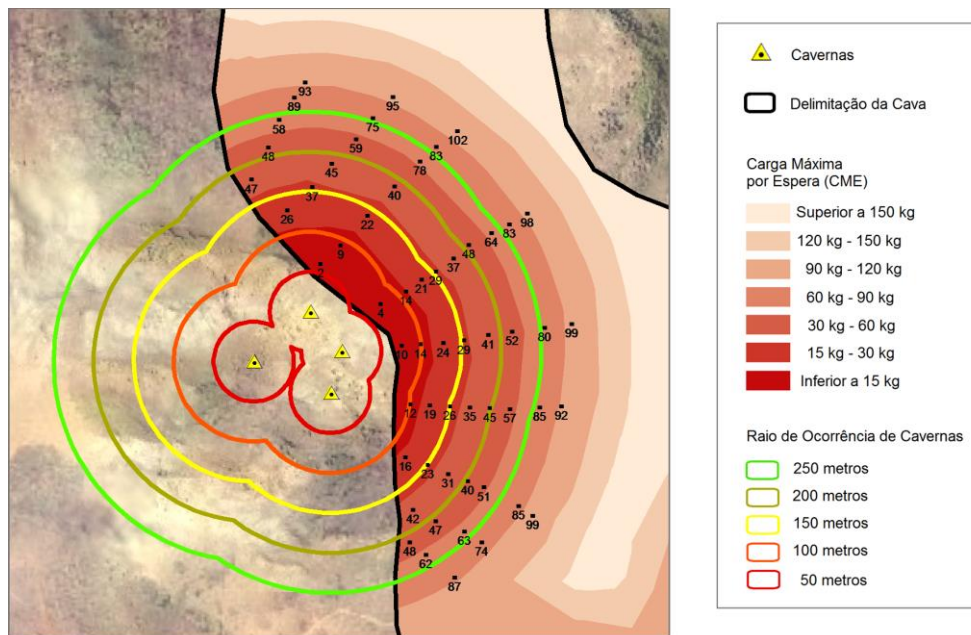


Figura 6.3: CME em área de lavra próxima ao local de ocorrência de cavernas para critério de segurança igual a 5 mm/s.

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

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

6.2.1. Menor Restrição Operacional

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

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

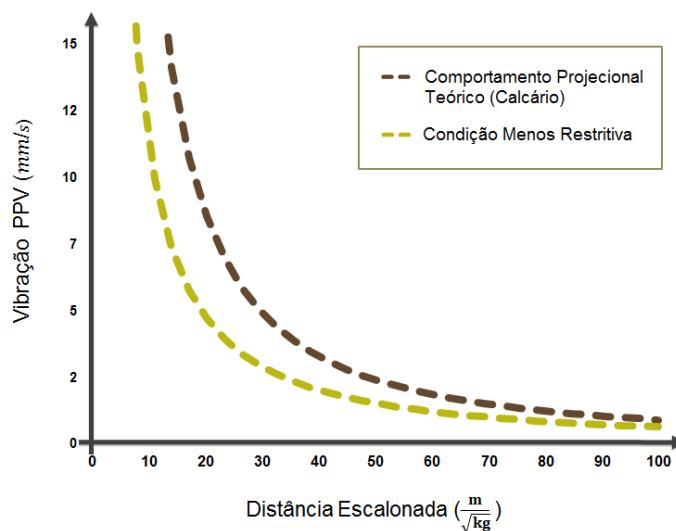


Figura 6.4: Curva de tendência comportamental de propagação sísmica em condição de menor restrição operacional.

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

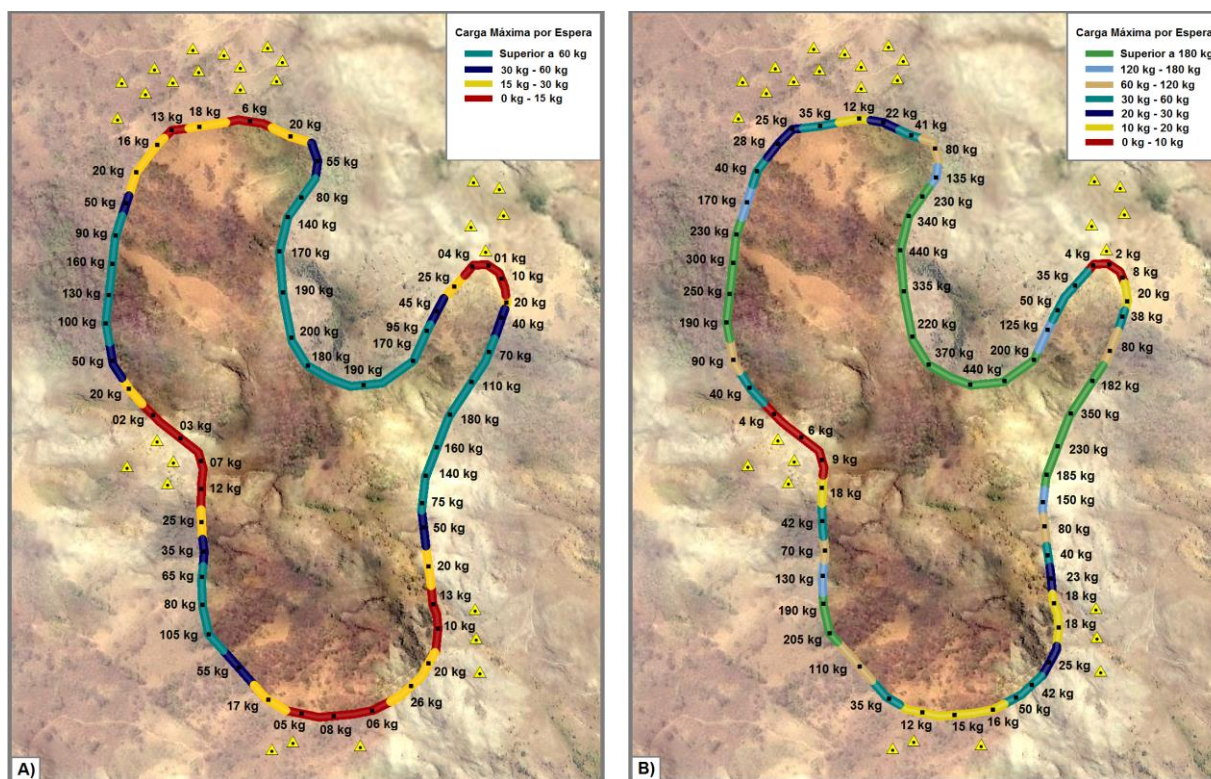


Figura 6.5: Limite de carga máxima por espera ao longo do perímetro da cava para critério de segurança de cavidades igual a 5 mm/s: a) comportamento projecional teórico, b) condição de menor restrição.

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

6.2.2. Maior Restrição Operacional

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

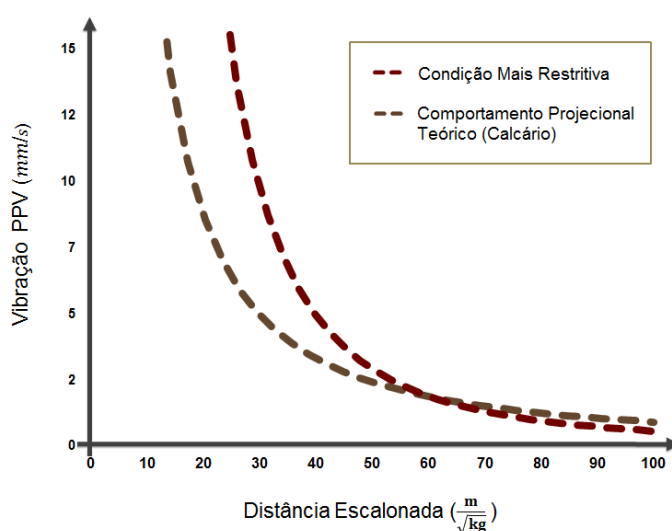


Figura 6.6: Curva de tendência comportamental de propagação sísmica em condição de maior restrição operacional.

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

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

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

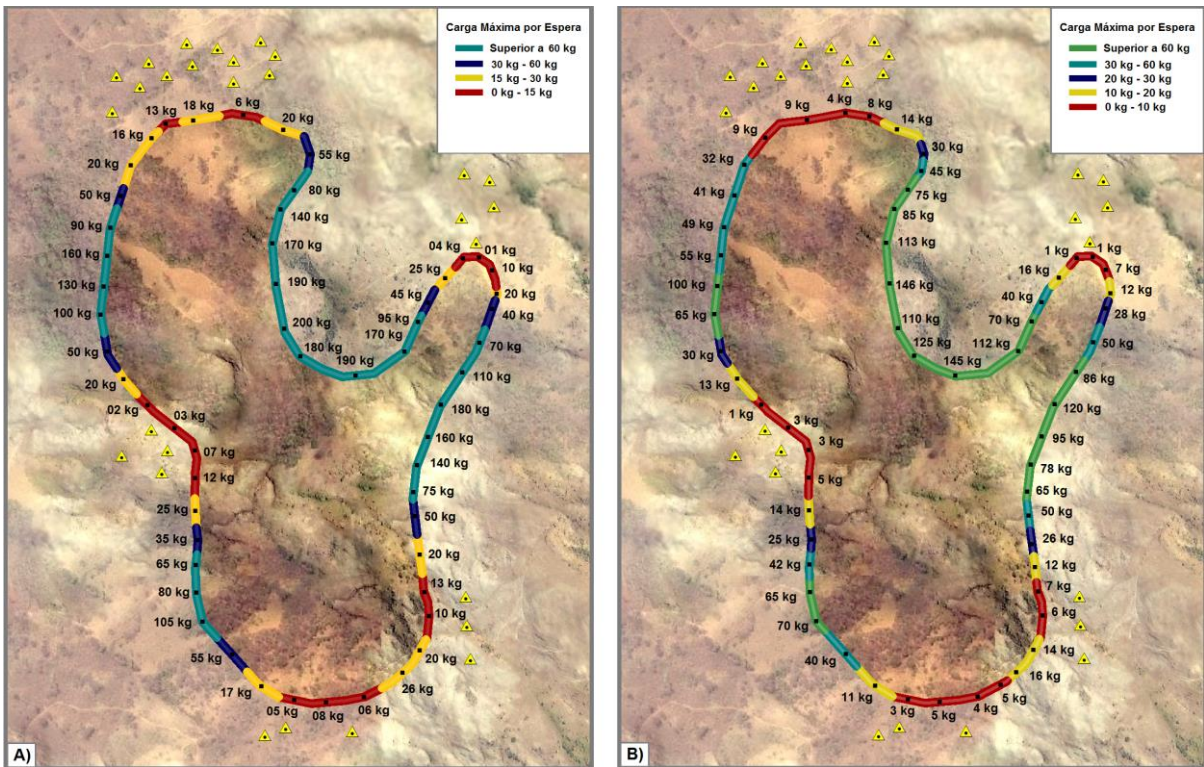


Figura 6.7: Limite de carga máxima por espera ao longo do perímetro da cava para critério de segurança de cavidades igual a 5 mm/s: a) comportamento projecional teórico, b) condição de maior restrição.

6.2.3. Influência do Critério de Segurança da Caverna

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

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

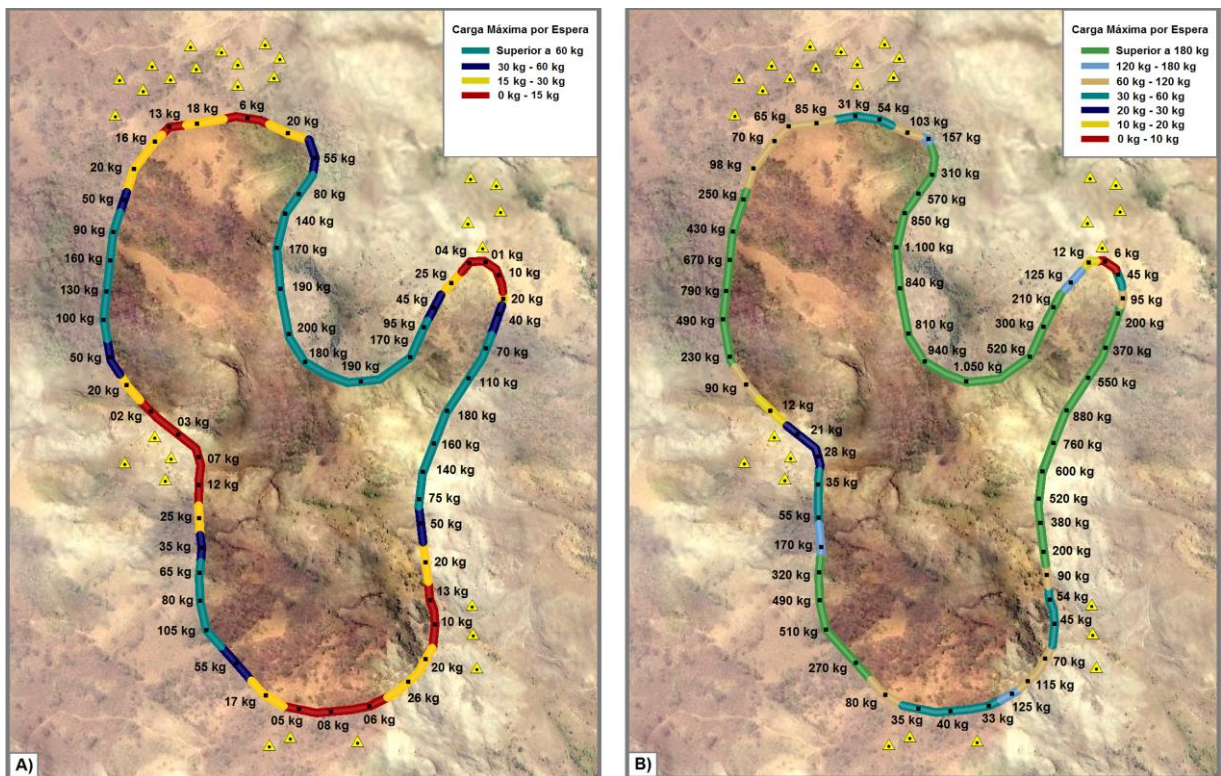


Figura 6.8: Limite de carga máxima por espera ao longo do perímetro da cava: a) critério de segurança das cavernas igual a 5 mm/s, b) critério de segurança das cavernas igual a 15 mm/s.

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

6.3. Considerações Quanto à Incertezas Associadas à Projeção Sismográfica

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

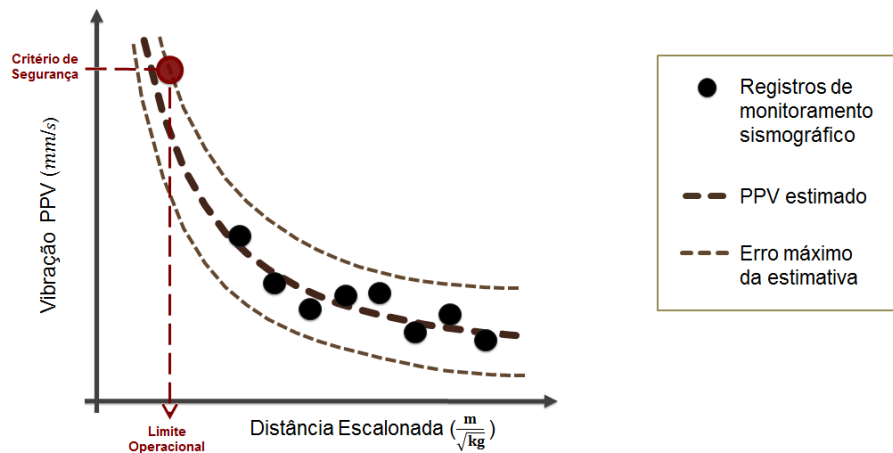


Figura 6.9: Resultado de projeção sismográfica em função da Distância Escalonada.

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

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

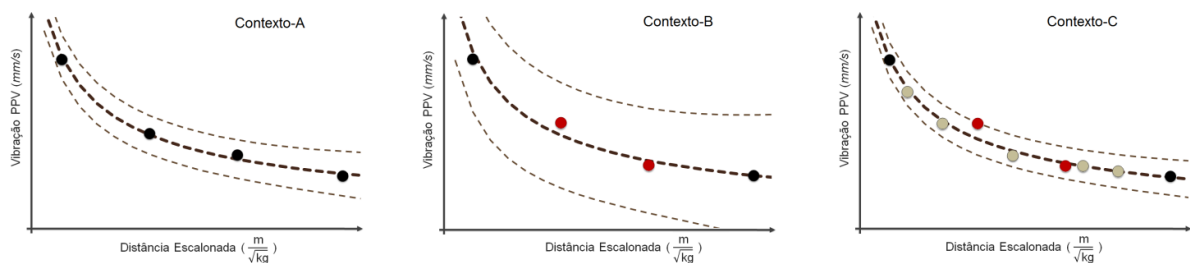


Figura 6.10: Influência da quantidade amostral e da dispersão dos resultados de monitoramento na curva de tendência de projeção sismográfica.

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

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

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

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

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

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

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

6.4. Considerações Quanto ao Mapeamento da CME

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

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

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

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

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

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

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

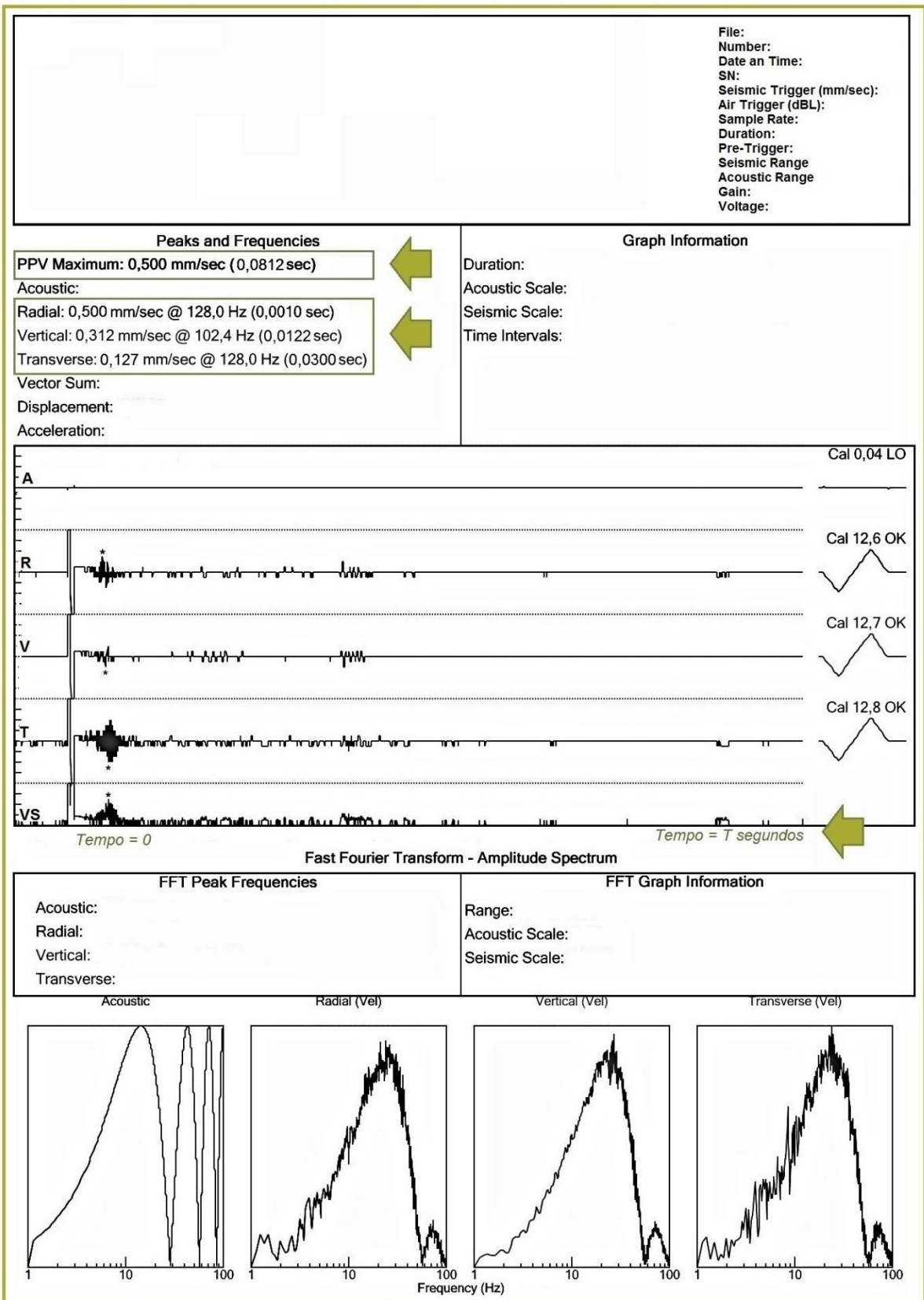
Fase do Empreendimento	Parâmetros de Desempenho	Abrangência do Mapeamento de CME
Fase de projeto conceitual.	Parâmetros teóricos característicos da litologia em questão.	Ao longo de todo o perímetro da cava.
Fase associada à operação do empreendimento.	Parâmetros específicos das cava objeto de licenciamento.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

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

ANEXO

Exemplo de Laudos de Monitoramento Sismográfico



Date/Time
 Trigger Source
 Range
 Record Time

Serial Number
 Battery Level
 Unit Calibration
 File Name
 Post Event Notes

Notes
 Location
 Client
 User Name
 General

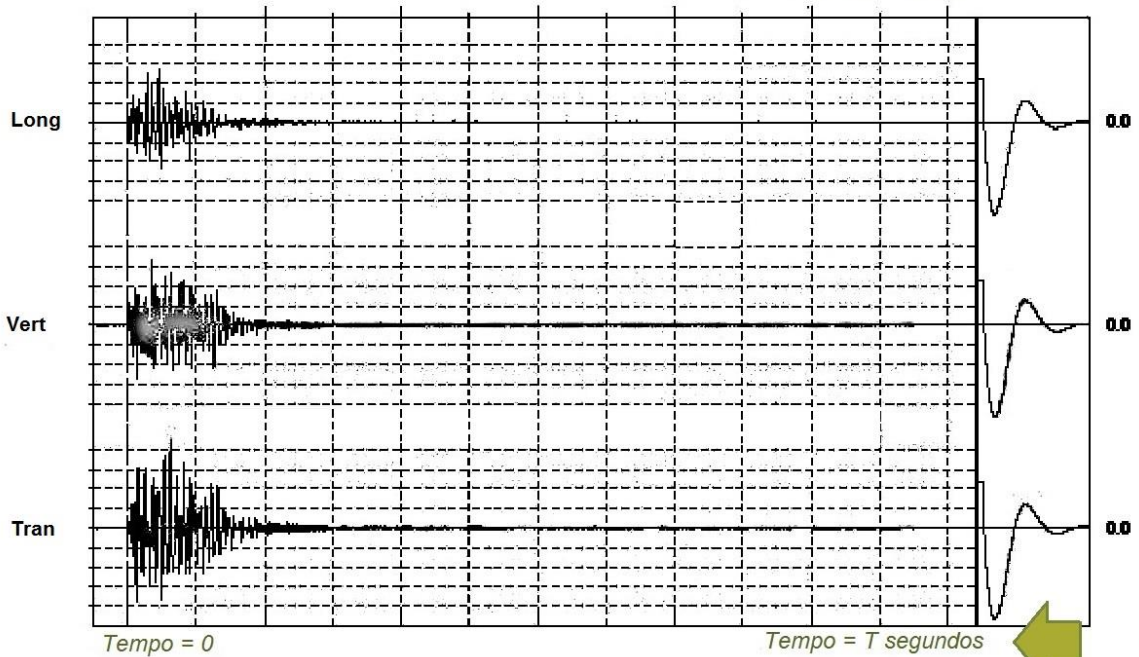
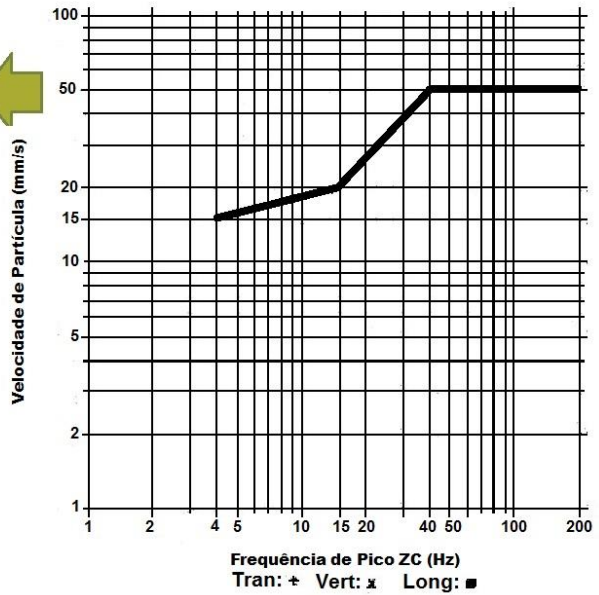
Extended Notes

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

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

Peak Vector Sum

Norma Brasileira - ABNT NBR 9653/2005





MINISTÉRIO DO
MEIO AMBIENTE

