

# **METODOLOGIA PARA ANÁLISE DE VIBRAÇÕES PROVOCADAS POR DESMONTES COM RECURSO A EXPLOSIVOS**

**JOSÉ PEDRO MOREIRA ANDRADE GOMES**

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de  
**MESTRE EM ENGENHARIA DE MINAS E GEO-AMBIENTE**

---

Orientador: Professor Doutor Alexandre Júlio Machado Leite

---

Coorientador: Mestre Vinícius Gouveia de Miranda

FEVEREIRO DE 2016

## MESTRADO EM ENGENHARIA DE MINAS E GEO-AMBIENTE 2015/2016

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS

Tel. +351 225 081 986

+351 225 081 960

Fax +351 225 081 448

✉ [minas@fe.up.pt](mailto:minas@fe.up.pt)

*Editado por*

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351 225 081 400

Fax +351 225 081 440

✉ [feup@fe.up.pt](mailto:feup@fe.up.pt)

🌐 <http://www.fe.up.pt>



O trabalho "Metodologia para Análise de Vibrações Provocadas por Desmontes com Recurso a Explosivos" de José Pedro Moreira Andrade Gomes e Universidade do Porto está licenciado com uma Licença [Creative Commons - Atribuição-NãoComercial-CompartilhaQual 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

*Knowledge comes by taking things apart: analysis.  
But wisdom comes by putting things together.*

*John A. Morrison*



## AGRADECIMENTOS

Com o culminar de mais uma etapa académica, é necessário fazer uma retrospeção. E, ao olhar para trás, para além das memórias experienciadas, recordámo-nos Pessoas que a elas estão intimamente ligadas. E, a estas Pessoas, expresso toda a minha gratidão:

- Ao Professor Alexandre Leite, Orientador do presente trabalho, bem como de todo o meu percurso estudantil, agradeço todo o apoio prestado, não só do ponto de vista académico, mas também enquanto gestor de ansiedades e receios.
- Ao Engenheiro Vinícius Gouveia, Coorientador e Mentor, agradeço a proposta para a realização deste trabalho, bem como todo o esforço e empenho demonstrados na execução deste.
- Ao Professor Henrique Miranda, agradeço pela leitura atenta e considerações tecidas, importantes para o sucesso deste trabalho.
- A todos os Professores do departamento de Minas da FEUP, por me instigarem a ter interesse em aprender.
- Ao Francisco Leite, agradeço todo o apoio prestado na desmitificação dos “Grandes Problemas”, no decurso da realização deste trabalho.
- Ao João Morais, agradeço toda a motivação e atenção prestadas no desenrolar desta fase atribulada.
- A todos os meus amigos, que me ajudaram a lidar com as minhas preocupações recorrentes e momentos complicados: Zé Mário, Nininha, Zé da Ponte, Xiquinho, Mendanha, Ana Raquel, Caraslindas, Vânia, Paulo Samuel, Guida, Tó, Joana, Cebolido, Jorge, Filipe, João, Pedro... Um muito Obrigado...
- E, acima de tudo, agradeço à minha família, pedra basilar na minha formação como indivíduo.



## **RESUMO**

A necessidade imperiosa de melhorias no controlo e mitigação das condicionantes ambientais e sociais associadas à extração e transformação de matérias-primas é, cada vez mais, uma demanda imposta pelas entidades legais. Neste sentido, o presente trabalho tem como objetivo apresentar uma melhoria na estimação da magnitude das vibrações resultantes de desmontes com recurso a explosivos.

Assim sendo, apresenta-se aqui uma nova metodologia que visa incorporar heterogeneidades provocadas por parâmetros não controláveis, tais como parâmetros geológicos e geotécnicos, no estudo do comportamento das vibrações.

Para isto, recorrendo aos conceitos teóricos presentes nas metodologias existentes, aliadas a técnicas de discretização do terreno, propõe-se então uma aproximação mais fiável e fidedigna do fenómeno vibratório propagado.

Ainda no âmbito da Dissertação, procedeu-se ao início de desenvolvimento de uma ferramenta informática com recurso ao MATLAB, com o intuito de esclarecer e validar a nova metodologia.

Por último, com recurso a dados reais, comparou-se ambos os métodos e avaliou-se o desempenho de cada um, utilizando como base a mesma área de estudo.

**PALAVRAS-CHAVE:** vibrações, desmontes, estimação, leis de atenuação, áreas de influência.



## **ABSTRACT**

The urgent need for improvements in the control and mitigation of environmental and social conditions associated with the extraction and processing of raw materials is increasingly a demand imposed by legal entities. In this sense, this present Dissertation aims to an improvement of the estimation of the magnitude of the vibrations resulting from blasting using explosives.

So, herein we present a new methodology that aims at incorporating heterogeneity caused by uncontrollable parameters such as geological and geotechnical parameters in the vibration behavior of the study.

For this, using theoretical concepts present in existing methodologies, combined with the terrain discretization techniques, then it proposes a more reliable and trustworthy approach vibratory phenomenon propagated.

Also as part of the dissertation, proceeded to the early development of a software tool using MATLAB, in order to clarify and validate the new methodology.

Finally, using real data from an area of study, was compared both methods and evaluated the performance of each, using as a basis the same area of study.

**KEYWORDS:** vibrations, rock blasting, estimation, attenuation law, influence areas



## ÍNDICE GERAL

|  |             |
|--|-------------|
| <b>AGRADECIMENTOS</b> .....                                    | <b>I</b>    |
| <b>RESUMO</b> .....  | <b>III</b>  |
| <b>ABSTRACT</b> .....  | <b>V</b>    |
| <b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....                                 | <b>XI</b>   |
| <b>ÍNDICE DE TABELAS</b> .....                                 | <b>XIII</b> |
| <br>   |             |
| <b>1. INTRODUÇÃO</b> .....                                     | <b>1</b>    |
| 1.1. ENQUADRAMENTO E OBJETIVOS .....                           | 1           |
| 1.2. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO .....                             | 1           |
| <br>   |             |
| <b>2. DESMONTE</b> .....                                       | <b>3</b>    |
| 2.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....                              | 3           |
| 2.2. ESCAVABILIDADE .....                                      | 4           |
| 2.2.1. CLASSIFICAÇÃO DE ESCAVABILIDADE DE FRANKLIN.....        | 5           |
| 2.2.2. ÍNDICE DE ESCAVABILIDADE DE HADJIGIORGIU E SCOBLE ..... | 5           |
| 2.3. DESMONTE COM RECURSO A EXPLOSIVOS .....                   | 6           |
| 2.3.1. DESMONTES EM BANCADA .....                              | 8           |
| 2.3.1.1. Índice de Clastibilidade .....                        | 9           |
| 2.3.1.2. Consumo Específico .....                              | 10          |
| 2.3.1.3. Equipamentos Auxiliares.....                          | 10          |
| 2.3.1.4. Tipo de Explosivo .....                               | 11          |
| 2.3.1.5. Geometria do Desmonte .....                           | 11          |
| <br>   |             |
| <b>3. FENÓMENO VIBRATÓRIO</b> .....                            | <b>13</b>   |
| 3.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....                              | 13          |
| 3.2. CARACTERIZAÇÃO DE UMA ONDA .....                          | 13          |
| 3.3. TIPOS DE ONDAS .....                                      | 14          |
| 3.3.1. ONDAS INTERNAS .....                                    | 15          |
| 3.3.1.1. Ondas P .....   | 16          |
| 3.3.1.2. Ondas S .....   | 16          |
| 3.3.2. ONDAS SUPERFICIAIS.....                                 | 16          |
| 3.3.2.1. Ondas R .....   | 17          |
| 3.3.2.2. Ondas Q .....   | 17          |
| 3.4. REFLEXÃO E REFRAÇÃO DE ONDAS .....                        | 17          |

|   |           |
|---|-----------|
| <b>3.5. INSTRUMENTOS DE MONITORIZAÇÃO .....</b>                     | <b>18</b> |
| <br>  |           |
| <b>4. PREVISÃO DAS VIBRAÇÕES NO TERRENO.....</b>                    | <b>21</b> |
| <b>4.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....</b>                            | <b>21</b> |
| <b>4.2. FATORES QUE INFLUENCIAM A PROPAGAÇÃO DE VIBRAÇÕES .....</b> | <b>22</b> |
| 4.2.1. PARÂMETROS CONTROLÁVEIS .....                                | 22        |
| 4.2.1.1. Carga Operante .....                                       | 23        |
| 4.2.1.2. Consumo Específico.....                                    | 23        |
| 4.2.1.3. Tempo de Retardo.....                                      | 23        |
| 4.2.1.4. Parâmetros Geométricos do Desmonte .....                   | 23        |
| 4.2.1.5. Tipos de Explosivos.....                                   | 24        |
| 4.2.2. PARÂMETROS NÃO CONTROLÁVEIS.....                             | 24        |
| 4.2.2.1. Geologia .....   | 24        |
| 4.2.2.2. Distância .....  | 25        |
| <b>4.3. LEIS DE PREVISÃO DA ATENUAÇÃO DE VIBRAÇÕES .....</b>        | <b>25</b> |
| 4.3.1. MÉTODOS TEÓRICOS .....                                       | 26        |
| 4.3.2. MÉTODOS EMPÍRICOS .....                                      | 26        |
| <b>4.4. NORMATIVAS .....</b>  | <b>30</b> |
| 4.4.1. NORMA PORTUGUESA NP 2074.....                                | 31        |
| 4.4.2. NORMAS INTERNACIONAIS .....                                  | 32        |
| 4.4.2.1. Normas Norte-Americana RI 8507 .....                       | 32        |
| 4.4.2.2. Norma Espanhola UNE 22.381 .....                           | 33        |
| 4.4.2.3. Norma Alemã DIN 4150 .....                                 | 34        |
| <br>  |           |
| <b>5. METODOLOGIA PROPOSTA.....</b>                                 | <b>37</b> |
| <b>5.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....</b>                            | <b>37</b> |
| <b>5.2. DESCRIÇÃO DA METODOLOGIA PROPOSTA.....</b>                  | <b>38</b> |
| 5.2.1. CLASSIFICAÇÃO DOS DADOS.....                                 | 39        |
| 5.2.2. DETERMINAÇÃO DAS LEIS DE ATENUAÇÃO .....                     | 40        |
| 5.2.3. DETERMINAÇÃO DAS ÁREAS DE INFLUÊNCIA .....                   | 40        |
| 5.2.4. ESTIMAÇÃO DA VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO .....                  | 41        |
| 5.2.5. INCORPORAÇÃO DE DADOS DE NOVOS DESMONTES .....               | 42        |
| <br>  |           |
| <b>6. ESTUDO DE CASO .....</b>                                      | <b>43</b> |
| <b>6.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....</b>                            | <b>43</b> |
| <b>6.2. DESCRIÇÃO DA ROTINA .....</b>                               | <b>43</b> |

|  |           |
|--|-----------|
| 6.2.1. INCORPORAÇÃO DOS DADOS .....                              | 43        |
| 6.2.2. DETERMINAÇÃO DA LEI DE ATENUAÇÃO DE CADA SISMÓGRAFO ..... | 44        |
| 6.2.3. DETERMINAÇÃO DAS ÁREAS DE INFLUÊNCIA .....                | 45        |
| 6.2.4. ESTIMAÇÃO DA VELOCIDADE DE PICO DAS PARTÍCULAS .....      | 46        |
| <b>6.3. ANÁLISE DE RESULTADOS .....</b>                          | <b>48</b> |
| 6.3.1. VALIDAÇÃO PRELIMINAR DA METODOLOGIA .....                 | 52        |
| 6.3.2. LIMITAÇÕES DA METODOLOGIA PROPOSTA.....                   | 54        |
| <br>   |           |
| <b>7. CONCLUSÃO.....</b>   | <b>57</b> |
| 7.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....                                   | 57        |
| 7.2. TRABALHOS FUTUROS.....                                      | 58        |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....                                  | 59        |
| <br>   |           |
| <b>ANEXOS.....</b>   | <b>I</b>  |
| ANEXO A: RELATÓRIO DE VIBRAÇÕES .....                            | III       |
| ANEXO B: <i>FUNCTION GETATTENUATIONLAW</i> .....                 | V         |
| ANEXO C: <i>FUNCTION MUDARSIGNIFICANCIAK</i> .....               | VII       |
| ANEXO D: <i>FUNCTION MONTARMATRIZATENUACAODEFOGO</i> .....       | IX        |
| ANEXO E: <i>FUNCTION GETPPV</i> .....                            | XI        |



## ÍNDICE DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1 - Classificação da escavabilidade segundo Franklin (Bastos, 1998) .....   | 5  |
| Figura 2 – Fluxograma da Execução de um Desmorte com Recurso a Explosivos .....  | 7  |
| Figura 3 – Zonas associadas a um furo de um desmorte (Leite, 2013) .....   | 8  |
| Figura 4 – Fluxograma para o Dimensionamento de uma Pega de Fogo.....  | 9  |
| Figura 5 - Geometria do desmorte.....  | 11 |
| Figura 6 - Tipos de ondas.....   | 14 |
| Figura 7 – Ondas P (Dowding, 1985) .....   | 16 |
| Figura 8 – Ondas S (Dowding, 1985) .....   | 16 |
| Figura 9 – Ondas R (Dowding, 1985) .....   | 17 |
| Figura 10 - Idealização da forma da onda num desmorte (Silva-Castro, 2012) .....   | 18 |
| Figura 11 - Orientação do transdutor em relação ao desmorte (Dowding, 1985).....   | 18 |
| Figura 12 - Sismógrafo VibraZEB VM-7D+ .....   | 19 |
| Figura 13 – Dados Recolhidos numa campanha de vibrações .....  | 29 |
| Figura 14 –Representação log-log dos dados recolhidos numa campanha de vibrações ....                                    | 29 |
| Figura 15 – Método dos Mínimos Quadrados e traslação para um intervalo de confiança de 95%.....                          | 30 |
| Figura 16 – Limites da velocidade de pico das partículas impostos pela Norma RI 8507 ....                                | 33 |
| Figura 17 - Limites da velocidade de pico das partículas impostos pela Norma UNE 22.381 .....                            | 33 |
| Figura 18 - Limites da velocidade de pico das partículas impostos pela Norma DIN 4150... ..                              | 35 |
| Figura 19 - Fluxograma da Metodologia para a Estimação da Velocidade de Vibração de Pico das Partículas .....            | 37 |
| Figura 20 – Localização Hipotética de Sismógrafos numa Área de Pedreira e Lei de Atenuação Global nessa mesma Área ..... | 38 |
| Figura 21 - Fluxograma da Metodologia Proposta .....   | 39 |
| Figura 22 - Diagrama de Voronoi .....  | 40 |
| Figura 23 – Decomposição de um Terreno Hipotético e Leis de Atenuação Vigentes em cada Área de Influência.....           | 41 |
| Figura 24 – Forma dos dados de entrada .....   | 44 |
| Figura 25 – Localização dos Sismógrafos e Respetivas Leis de Atenuação .....   | 45 |
| Figura 26 - Metodologia para determinação das áreas de Influência.....   | 46 |
| Figura 27 – Demonstrações gráficas da atenuação das vibrações no terreno .....   | 47 |
| Figura 28 - Estimação da PPV através da metodologia tradicional em localizações diferentes .....                         | 48 |
| Figura 29 - Estimação da PPV através da nova metodologia em áreas de influência distintas .....                          | 49 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 30 - Previsão da Velocidade de Pico das Partículas das metodologias em estudo no sismógrafo 5 .....                 | 50 |
| Figura 31 - Diferença das duas metodologias em estudo na área de influência do sismógrafo 5 .....                          | 50 |
| Figura 32 - Previsão da Velocidade de Pico das Partículas das metodologias em estudo no sismógrafo 1 .....                 | 51 |
| Figura 33 - Diferença das duas metodologias em estudo na área de influência do sismógrafo 1 .....                          | 52 |
| Figura 34 - Histograma dos resíduos segundo o método atual (à esquerda) e apresentada (à direita) .....                    | 53 |
| Figura 35 – Descontinuidade na estimação entre duas áreas de influência .....  | 54 |
| Figura 36 - Leis de Atenuação vigentes nas áreas de influência e Lei de Atenuação na direção assinalada na Figura 35 ..... | 55 |
| Figura 37 - Lei de Atenuação corrigida na direção assinalada na Figura 35 .....  | 56 |

## ÍNDICE DE TABELAS

|   |    |
|---|----|
| Tabela 1 - Critérios de Escavabilidade, adaptado de (Bastos, 1998).....   | 4  |
| Tabela 2 - Índice de Escavabilidade segundo Hadjigeorgiou e Scoble, adaptado de (González de Vallejo, et al., 2002).....                      | 6  |
| Tabela 3 – Parâmetros para o cálculo do <i>Blastability Index</i> (Jimeno, et al., 1995) .....  | 10 |
| Tabela 4 - Velocidades de propagação das Ondas P e S em diferentes meios; adaptado de (Standford Rock Physics Laboratory) .....               | 15 |
| Tabela 5 – Fatores que influenciam a magnitude das vibrações (Rosenthal, et al., 1987) ...  | 22 |
| Tabela 6 - Frequências preferenciais para a transmissão de vibrações no terreno (Sarsby, 2000).....   | 25 |
| Tabela 7 - Variáveis consideradas na análise dimensional da propagação de vibrações (Dowding, 1985) .....                                     | 27 |
| Tabela 8 – Evolução dos critérios de dano e respetivos autores (Dinis da Gama, 1998) .....  | 31 |
| Tabela 9 – Quadro síntese dos parâmetros utilizados para o cálculo da velocidade de pico das partículas limite disposta na Norma NP2074 ..... | 32 |
| Tabela 10 – Limites da velocidade de pico das partículas impostos pela Norma DIN 4150 .   | 34 |



# 1

## INTRODUÇÃO

### 1.1. ENQUADRAMENTO E OBJETIVOS

Os impactes ambientais e sociais são uma constante aquando da utilização de substâncias explosivas para desmonte de rocha. Quando estes são realizados na proximidade de áreas urbanas, os impactes ambientais adquirem ainda uma importância redobrada. Nestes são incluídas as vibrações induzidas no terreno, a par da projeção de blocos, propagação da onda aérea e produção de poeiras.

As vibrações, no seio dos impactes ambientais associados ao desmonte de rocha, estão frequentemente na génese de conflitos entre as comunidades circundantes e as autoridades competentes. Assim sendo, a mitigação destes efeitos é tida como um objetivo fundamental aquando do planeamento e execução de pegadas de fogo.

Devido às condicionantes sociais vigentes, bem como ao risco de dano decorrente quando as estruturas antrópicas e naturais estão sujeitas à ação das vibrações, os órgãos legais têm legislado ativamente, no sentido de evitar interferências de grande ordem. Assim sendo, devido à impossibilidade de eliminação da propagação de vibrações, é necessário o controlo e monitorização destas, com o intuito de garantir os limites impostos. É prática comum por parte dos responsáveis pelos desmontes, a execução da estimativa das vibrações, com o objetivo de garantir previamente com uma maior confiança que a magnitude das vibrações não ultrapassa os limites legais.

As metodologias empregues comumente para a estimativa do comportamento das vibrações consistem em formulações empíricas, calibradas com desmontes executados previamente. Com base nas características do desmonte que mais influenciam a formação de vibrações, bem como com os dados amostrados relativos à magnitude destas, estabelece-se uma lei de atenuação que descreve o comportamento do movimento ondulatório. Ora, a formulação de uma lei de atenuação geral para toda a área envolvente ao desmonte pode acarretar erros de estimativa intimamente relacionados com parâmetros não controláveis, como por exemplo, a heterogeneidade dos parâmetros geotécnicos.

Para colmatar a existência de erros, a presente Dissertação apresenta uma nova metodologia para a estimativa da magnitude das vibrações, que consiste na decomposição do terreno em áreas locais caracterizadas por leis de atenuação próprias. Desta forma, o efeito das heterogeneidades é contabilizado na modelação do problema, levando a uma estimativa mais fidedigna.

### 1.2. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

A presente Dissertação iniciou-se com a constatação da necessidade de a indústria obter estimativas mais exatas, no que diz respeito ao controlo das condicionantes ambientais e sociais. Posto isto, procedeu-se

à realização de uma revisão bibliográfica, com o intuito de clarificar conceitos previamente abordados ao longo da formação académica, bem como a introdução a novas temáticas, dos foros teórico e operacional, mais especificamente associadas ao fenómeno vibratório. Seguidamente, demos início à formulação da metodologia aqui apresentada, e finalmente, foi desenvolvida uma rotina para a estimação das vibrações no terreno, recorrendo ao método apresentado.

# 2

## DESMONTE

### 2.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O desmonte consiste na fragmentação e desagregação de um maciço rochoso previamente existente. Este é conseguido introduzindo tensões no terreno que, quando são superiores às tensões de rotura do material, originam a sua fracturação e conseqüente desagregação. Promove-se o desmonte quando se pretende a criação de um vazio num maciço rochoso, bem como quando é necessário a extração de uma substância útil existente na rocha tendo em vista o seu beneficiamento.

O desmonte de maciços rochosos é realizado essencialmente em duas situações:

- Operações mineiras;
- Obras geotécnicas.

O objetivo final destas duas operações é diferente, sendo o planeamento e o desmonte executados de modo distinto. Aquando da extração de minérios ou massas minerais, o volume de rocha desmontada e a granulometria das partículas após o desmonte adquirem uma grande importância, tendo em vista as operações posteriores de transporte e transformação. Quanto às obras geotécnicas, a qualidade do maciço remanescente é o fator mais importante aquando do dimensionamento do desmonte. Em ambas as situações afigura-se sempre fundamental assegurar todas as condições de segurança dos indivíduos e bens envolvidos nas operações.

Importa ainda fazer a distinção entre desmontes à superfície e em profundidade. A exploração em corta de massas e jazigos minerais, tal como a execução de taludes e fundações, são operações à superfície que requerem desmontes. No caso de escavações subterrâneas, os mais relevantes são a exploração de minas subterrâneas, bem como a execução de túneis.

Em ambos os casos, o estudo dos fatores de segurança e ambientais são deveras importantes, não só para todos os envolvidos nas operações de desmonte, mas também quando estes são executados na proximidade de aglomerados urbanos ou estruturas antrópicas. É neste grupo que se insere o estudo das vibrações induzidas no terreno, bem como por exemplo a onda aérea e a projeção de blocos em operações superficiais, ou o estudo da subsidência do terreno em operações subterrâneas.

A escavação de um talude requer a utilização de meios mecânicos ou desmontes com recursos a explosivos. A seleção do método de escavação depende basicamente da escavabilidade dos materiais, das dimensões e geometria da escavação e do rendimento dos equipamentos (González de Vallejo, et al., 2002).

## 2.2. ESCAVABILIDADE

A escavabilidade é um parâmetro que permite, com base em grandezas relacionados com as características do terreno, classificar o melhor método, sob os pontos de vista técnicos e económicos, de desmonte a aplicar. Pode ainda ser definida como a capacidade de resistência à ação proporcionada pelos equipamentos de escavação, tanto os mecânicos, como os explosivos (Bastos, 1998).

Foram desenvolvidos inúmeros métodos empíricos para classificação da escavabilidade, com base nos resultados provenientes dos ensaios para as caracterizações geotécnica e geofísica, aliados ao tipo de desmonte a realizar.

A classificação geotécnica apoia-se nas características do material-rocha, bem como nas características das discontinuidades neles existentes.

Quanto ao tipo de desmonte, este é normalmente dividido em desmontes a céu aberto ou em túnel.

Na Tabela 1, estão enunciados os mais importantes critérios para avaliar a escavabilidade, relacionando os parâmetros determinados com a aplicação para a qual foram desenvolvidos:

Tabela 1 - Critérios de Escavabilidade, adaptado de (Bastos, 1998)

| Critérios de Escavabilidade   | Aplicação  | Parâmetros   |
|-------------------------------|------------|--|
| Franklin (1971)               | Túneis     | $IS_{50}$ (índice de resistência à carga pontual), espaçamento médio entre fraturas, resistência à compressão simples, número de Schmidt, <b>RQD</b>         |
| Weaver (1975)                 | Céu aberto | Velocidade sísmica, dureza, grau de alteração, e o espaçamento, continuidade, preenchimento e orientação de diáclases  |
| Atkinson (1977)               |            | Resistência à compressão simples   |
| Romana (1981)                 |            | Resistência à compressão uniaxial, <b>RQD</b> , grau de abrasividade (equivalente de sílica)   |
| Kirsten (1982)                |            | Resistência à compressão uniaxial, <b>RQD</b> , $J_n$ e $J_r$ , do sistema de classificação Q de Barton, posição relativa dos blocos, alteração de diáclases |
| Abdullatif e Cruden (1983)    |            | <b>RMR</b>   |
| Scoble e Muftuoglu (1984)     |            | Grau de alteração, resistência à compressão uniaxial, resistência à carga pontual, espaçamento de diáclases, possança média da estratificação                |
| Hadjigiorgiou e Scoble (1990) | Céu aberto | Resistência à carga pontual, tamanho de blocos, grau de alteração, disposição estrutural relativa  |
| Singh (1989)                  | Céu aberto | Resistência à tração, grau de alteração, grau de abrasividade, espaçamento de diáclases  |

A título de exemplo, de todos os critérios apresentados, seleccionámos dois para o desenvolvimento a fim de melhor percebermos as suas metodologias de determinação dos respetivos índices de escavabilidade. Nos subcapítulos abaixo, serão enunciados os métodos de Franklin e o de Hadjigiorgiou e Scoble.

### 2.2.1. CLASSIFICAÇÃO DE ESCAVABILIDADE DE FRANKLIN

Este critério é utilizado, essencialmente, para caracterizar a escavabilidade em túneis. Este é definido correlacionando o índice de carga pontual ou a resistência à compressão, com o espaçamento das descontinuidades.

A Figura 1 permite de uma forma simplificada determinar o método de desmorte, com base no índice de resistência a cargas pontuais ou com a resistência à compressão triaxial e o espaçamento médio entre fraturas.

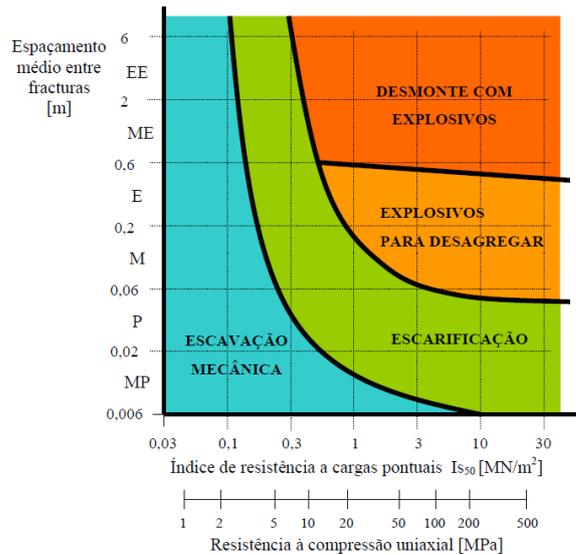


Figura 1 - Classificação da escavabilidade segundo Franklin (Bastos, 1998)

### 2.2.2. ÍNDICE DE ESCAVABILIDADE DE HADJIGIORGIU E SCOBLE

Este critério é utilizado, essencialmente, para caracterizar a escavabilidade em taludes. Este é definido a partir da Equação 1:

$$IE = (I_s + B_s) \cdot W \cdot J_s \quad (\text{Eq. 1})$$

Em que:

- $I_s$  é a resistência da rocha à carga pontual;
- $B_s$  é o índice de tamanho do bloco;
- $W$  é o índice de alteração;
- $J_s$  é o índice de disposição estrutural relativa.

Na Tabela 2 é possível, com base nas características do material-rocha e das descontinuidades, determinar os valores para os parâmetros aplicados na Equação 1, para o cálculo do índice de escavabilidade:

Tabela 2 - Índice de Escavabilidade segundo Hadjigeorgiou e Scoble, adaptado de (González de Vallejo, et al., 2002)

| Parâmetros   |                 |           |                        |              |                    |
|--|-----------------|-----------|------------------------|--------------|--------------------|
| Resistência da rocha à carga pontual $I_{s(50)}$ [MPa] | <0,5            | 0,5-1,5   | 1,5-2,0                | 2,0-3,5      | >3,5               |
| Valor $I_s$  | 0               | 10        | 15                     | 20           | 25                 |
| Tamanho dos blocos                                     | Muito pequenos  | Pequenos  | Médios                 | Grandes      | Muito grandes      |
| Valor $B_s$  | 5               | 15        | 30                     | 45           | 50                 |
| Alteração  | Completa        | Alta      | Moderada               | Ligeira      | Nula               |
| Valor $W$  | 0,6             | 0,7       | 0,8                    | 0,9          | 1,0                |
| Disposição estrutural relativa                         | Muito favorável | Favorável | Ligeiramente favorável | Desfavorável | Muito desfavorável |
| Valor $J_s$  | 0,5             | 0,7       | 1,0                    | 1,3          | 1,5                |

| Classe                        | 1           | 2     | 3       | 4             | 5                      |
|-------------------------------|-------------|-------|---------|---------------|------------------------|
| Índice de escavabilidade $IE$ | <20         | 20-30 | 30-45   | 45-55         | >55                    |
| Facilidade de escavação       | Muito fácil | Fácil | Difícil | Muito difícil | Desmonte c/ explosivos |

### 2.3. DESMONTE COM RECURSO A EXPLOSIVOS

Como foi referido anteriormente, os critérios para a escolha do método de desmonte devem ter em conta o propósito para o qual vão ser executados, bem como a escavabilidade do maciço. A aplicação de explosivos em desmontes é o método mais eficiente quando o maciço é bastante competente, ou seja, quando o recurso a meios mecânicos não é exequível em tempo útil e a um custo aceitável. Como contrapartida, é o método que acarreta mais impactes durante e imediatamente após a sua execução.

Para a execução de um desmonte, é necessário a estudar as condicionantes, com o intuito de calibrar as variáveis, como se pode analisar na Figura 2:

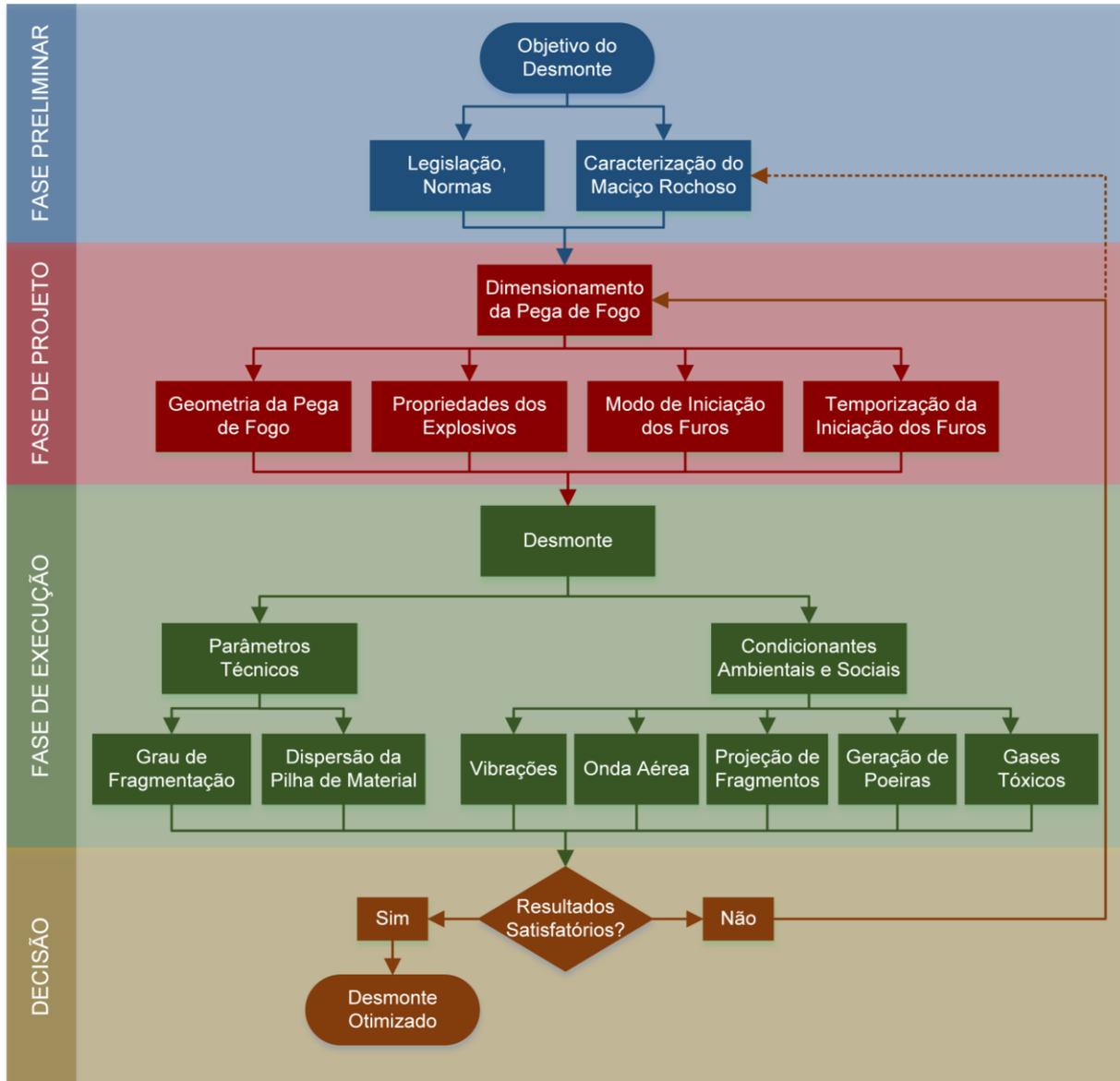


Figura 2 – Fluxograma da Execução de um Desmorte com Recurso a Explosivos

O estudo dos impactes ambientais e, neste âmbito, o estudo das vibrações induzidas no terreno aquando da realização do desmorte, adquirem geralmente uma grande importância, pois estão intimamente correlacionados.

Tipicamente, quando uma carga de explosivo é detonada, liberta-se uma certa quantidade de energia, sob a forma de energia elástica contida nos gases, bem como calor e onda aérea. Quando os gases gerados estão confinados, exercem uma pressão elevada na parede do furo, fomentando a fragmentação da rocha envolvente.

A execução de um desmorte mal dimensionado incorre num desperdício de energia proveniente da detonação do explosivo, e pode conduzir à produção de vibrações excessivas.

Em torno de um furo em processo de detonação, é possível identificar três zonas fundamentais:

- **Zona hidrodinâmica:** é a zona onde a pressão dos gases é superior à resistência à compressão do maciço, provocando a pulverização da rocha;
- **Zona plástica:** é a zona onde a pressão dos gases excede o limite elástico do maciço, provocando deformações plásticas. Geram-se também fendas radiais muito intensas promovidas pelas tensões de tração tangenciais;
- **Zona elástica:** é a zona onde as tensões provocadas pela detonação não ultrapassam o limite elástico da rocha. A dissipação de energia é baixa, desencadeando a propagação de vibrações no maciço a grandes distâncias.

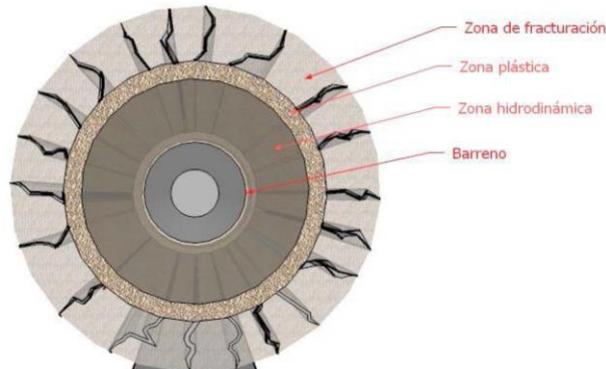


Figura 3 – Zonas associadas a um furo de um desmonte (Leite, 2013)

O comportamento total da rocha, resultante dos acontecimentos nestas três zonas definidas, vai resultar em impactes ambientais e de segurança. Estes podem ser referidos por ordem decrescente de risco:

- Instabilidade do maciço remanescente;
- Projeção de fragmentos;
- Produção de gases e poeiras;
- Onda aérea;
- Vibrações.

Apesar de as vibrações serem o impacte que apresenta menor risco de provocar danos graves, é aquele que acontece com maior frequência, bem como é o que causa mais perturbações nas zonas contíguas, sendo uma fonte de conflitos permanente com os habitantes da periferia da operação.

### 2.3.1. DESMONTES EM BANCADA

Os desmontes em bancada são o método mais utilizado na extração de rocha. Segundo Bagherpour (2007), 11,5 mil milhões de toneladas de concentrados metálicos e não metálicos e de carvão são extraídos a céu aberto, representando cerca de 70% da produção anual. A este valor ainda se somam 22,5 mil milhões de toneladas relativas à exploração das massas minerais e 2,3 mil milhões de materiais para o fabrico de cimento. Assim sendo, estima-se que a quantidade total de material extraído anualmente a céu aberto seja da ordem dos 67,3 mil milhões de toneladas (Atlas Copco, 2012).

Um dos aspetos que se reveste de grande importância nos desmontes a céu aberto é o dimensionamento da pega de fogo, pois é esta operação que, com base nas condicionantes existentes, permite controlar a qualidade do material para o beneficiamento futuro, bem como mitigar alguns dos efeitos ambientais nefastos.

Assim sendo, as características geológicas e geotécnicas adquirem uma grande importância no dimensionamento da pega de fogo, bem como os equipamentos existentes. Na Figura 4, está descrito o fluxograma para o dimensionamento de uma pega de fogo:

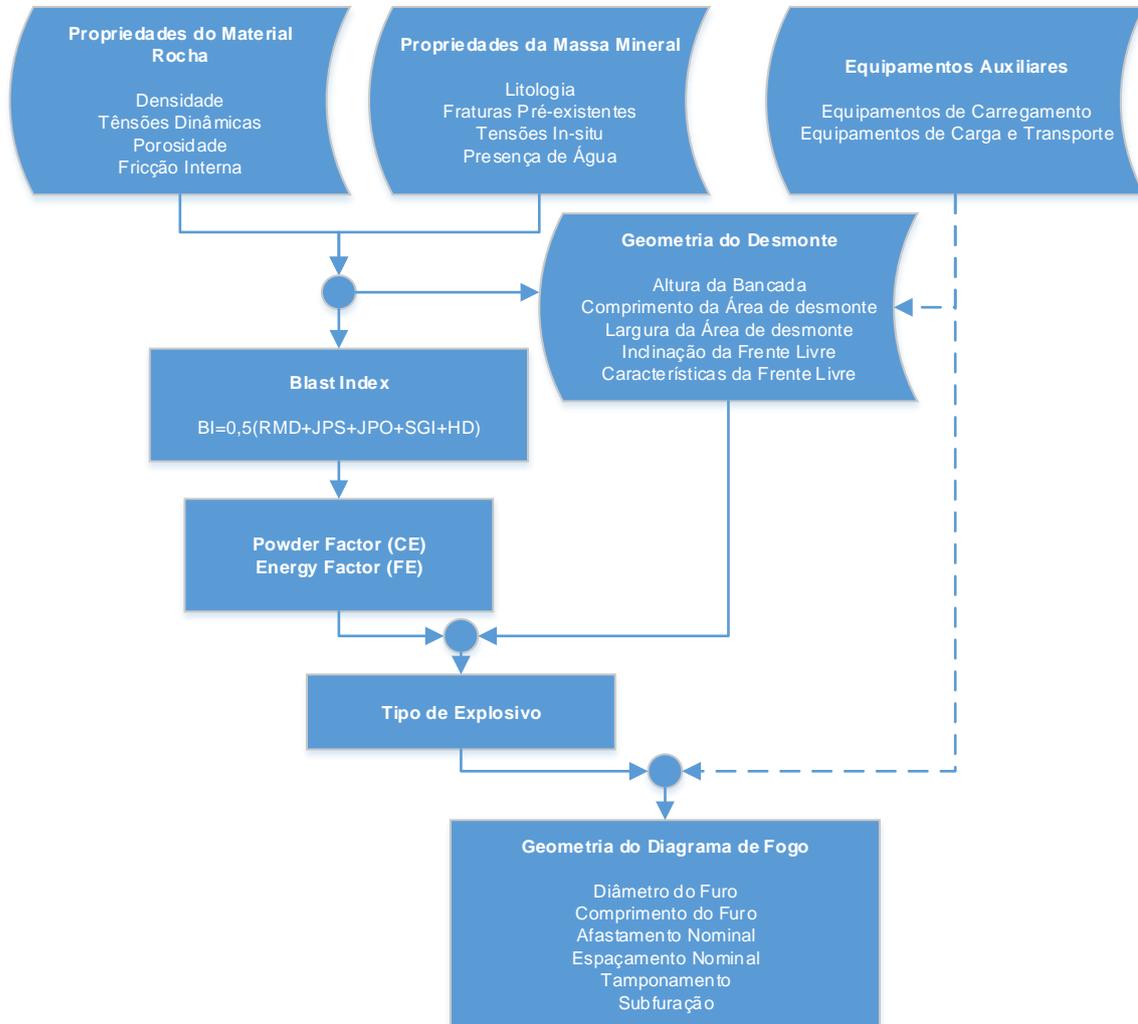


Figura 4 – Fluxograma para o Dimensionamento de uma Pega de Fogo

### 2.3.1.1. Índice de Clastibilidade

Um dos parâmetros que permite quantificar as propriedades geomecânicas da massa mineral é o *Blastability Index*. O cálculo deste, segundo Lilli (1986), é apresentado na Equação 2:

$$BI = 0,5 \cdot (RMD + JPS + JPO + SGI + HD) \quad (\text{Eq. 2})$$

Os parâmetros necessários para o cálculo do BI encontram-se na Tabela 3:

Tabela 3 – Parâmetros para o cálculo do *Blastability Index* (Jimeno, et al., 1995)

| Parâmetros Geométricos                                | Classificação         |
|---|-----------------------|
| Rock Mass Description (RMD)                           |                       |
| • Maciço friável                                      | 10                    |
| • Maciço em blocos                                    | 20                    |
| • Maciço compacto                                     | 50                    |
| Espaçamento entre fraturas (JPS)                      |                       |
| • <0,1 metros   | 10                    |
| • 0,1 a 1 metros                                      | 20                    |
| • >1 metro  | 50                    |
| Orientação das fraturas (JPO)                         |                       |
| • Horizontal  | 10                    |
| • Mergulho para a frente livre                        | 20                    |
| • Direção normal à frente livre                       | 30                    |
| • Mergulho coincidente com a frente livre             | 40                    |
| Influência do peso específico (SGI)                   | $25 \cdot SG - 50$    |
| SG é o peso específico da rocha (ton/m <sup>3</sup> ) |                       |
| Índice de influência da resistência (HD)              | $0,05 \cdot \sigma_c$ |
| $\sigma_c$ é a resistência à compressão simples       |                       |

### 2.3.1.2. Consumo Específico

O consumo de explosivo é um parâmetro que se reveste de grande importância no dimensionamento de uma pega de fogo, pois tem influência tanto na qualidade do material desmontado, como nos custos da operação de desmonte, bem como nos impactos ambientais. Para isso, estabelece-se um rácio entre a massa de explosivo necessário e o volume de rocha a desmontar, denominado *Powder Factor*. Normalmente este fator encontra-se normalizado, sendo a massa de explosivo referida ao ANFO. Assim sendo, este necessita de ser adaptado, consoante o tipo de explosivo, multiplicando por um fator.

Um dos métodos para o cálculo do *Powder Factor* é apresentado na Equação 3:

$$CE = 0,004 \cdot BI \text{ [kg ANFO/Ton]} \quad (\text{Eq. 3})$$

### 2.3.1.3. Equipamentos Auxiliares

Na frente da exploração é necessário o recurso a diversos equipamentos mecânicos, que auxiliam todas as tarefas necessárias para a extração, carga e transporte da rocha. A existência de uma vasta gama de produtos no mercado permite uma otimização do desmonte. Porém, a limitação da adaptação de determinados equipamentos previamente existentes associados ao desmonte e carga constitui uma condicionante no dimensionamento da pega de fogo.

#### 2.3.1.4. Tipo de Explosivo

A existência de uma vasta gama de explosivos permite que, com base nas características destes bem como nas características geológicas e geotécnicas, se encontre uma opção que seja mais adequada para a obtenção de desmontes mais eficazes, e capaz, também, de minimizar impactes ambientais decorrentes destes. A escolha do explosivo deve ainda ter em conta as condicionantes encontradas no local do desmorte, tais como por exemplo a presença de água ou a reatividade do terreno.

#### 2.3.1.5. Geometria do Desmorte

As características geométricas do desmorte são formuladas tendo em consideração as regulamentações existentes, bem como as propriedades dos equipamentos mecânicos auxiliares às operações de desmorte e transporte do material, e ainda dos impactes inerentes dos desmontes. A geometria de uma pega de fogo consiste numa série de parâmetros que são adaptados tendo como objetivo a obtenção do material fragmentado conforme as características desejadas, bem como assegurar que a amplitude dos impactes ambientais e sociais não ultrapassem os limites legais.

A Figura 5 expõe os parâmetros associados à geometria do desmorte:

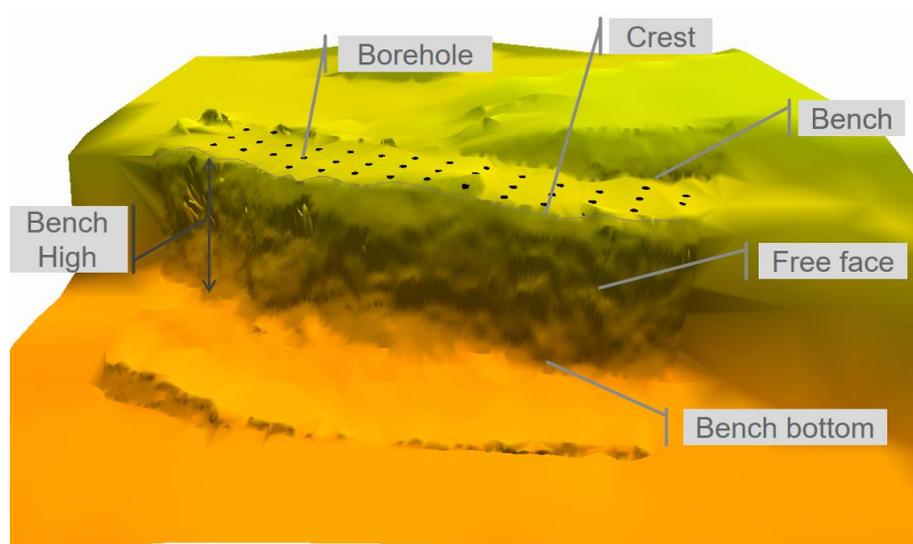


Figura 5 - Geometria do desmorte



# 3

## FENÓMENO VIBRATÓRIO

### 3.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Do ponto de vista mecânico, uma vibração é o movimento oscilatório de uma partícula em torno da sua posição de equilíbrio, provocado por um impulso. Este impulso é gerado, geralmente, por forças exteriores, que são transmitidas pelas partículas envolventes. A vibração pode ser decomposta num somatório de ondas periódicas elementares, cuja natureza depende do meio físico em que se propagam.

As vibrações são uma resposta elástica do terreno, quando este é sujeito à passagem de uma onda de tensão, com origem direta ou indireta numa sollicitação dinâmica de origem artificial ou natural (Bernardo, 2004).

A detonação de uma carga explosiva confinada induz no terreno uma quantidade considerável de energia sob a forma de pressão. Esta, por sua vez, gera tensões concêntricas ao furo, que são responsáveis pela formação de vibrações.

### 3.2. CARACTERIZAÇÃO DE UMA ONDA

As vibrações produzidas por desmontes podem ser, de uma ótica simplificada, analisadas como ondas sinusoidais, que se propagam radialmente em torno da pega de fogo. Quando estas se propagam em regime elástico, não existe movimento irreversível de material, verificando-se apenas a transferência de energia de um ponto para outro.

Um movimento oscilatório fica definido, quando se conhecem as seguintes características:

- Características da partícula:
  - Deslocamento –  $u$ ;
  - Velocidade –  $\dot{u}$ ;
  - Aceleração –  $\ddot{u}$ .
  - Duração da vibração da partícula;
- Características da onda:
  - Velocidade de Propagação –  $c$ ;
  - Comprimento de onda da vibração;
  - Frequência de Propagação –  $f$ ;
  - Atenuação da Onda em função do meio de propagação –  $Q$ .

De uma forma simplificada, o movimento vibratório assemelha-se a um movimento sinusoidal harmónico, definido pela equação 4:

$$u(x, t) = u_{max} \cdot \sin\left(\frac{2\pi \cdot f}{c} \cdot x + 2\pi \cdot f \cdot t\right) \quad (\text{Eq. 4})$$

Para a obtenção da velocidade e da aceleração, realiza-se a primeira e a segunda derivada em ordem ao tempo, respetivamente.

$$\dot{u}(x, t) = \frac{du}{dt} = \frac{2\pi}{f} \cdot u_{max} \cdot \cos\left(\frac{2\pi \cdot f}{c} \cdot x + 2\pi \cdot f \cdot t\right) \quad (\text{Eq. 5})$$

$$\ddot{u}(x, t) = \frac{d^2u}{dt^2} = -\left(\frac{2\pi}{f}\right)^2 \cdot u_{max} \cdot \sin\left(\frac{2\pi \cdot f}{c} \cdot x + 2\pi \cdot f \cdot t\right) \quad (\text{Eq. 6})$$

Esta formulação aqui apresentada é inadequada para descrever o fenómeno vibratório afeto aos desmontes, pois este é composto por vários tipos de onda com características diferentes entre si, o que confere ao fenómeno em estudo uma complexidade maior do que a que é apresentada. Contudo é o melhor método simplificado para a sua caracterização.

### 3.3. TIPOS DE ONDAS

As vibrações elásticas que se propagam no terreno são compostas por ondas com diferentes características, as quais aliadas à heterogeneidade dos meios de propagação, conferem à vibração um padrão pseudoaleatório. Estas podem ser divididas em dois grupos, como se explicita na Figura 6. Esta divisão é realizada com base no tipo de propagação.

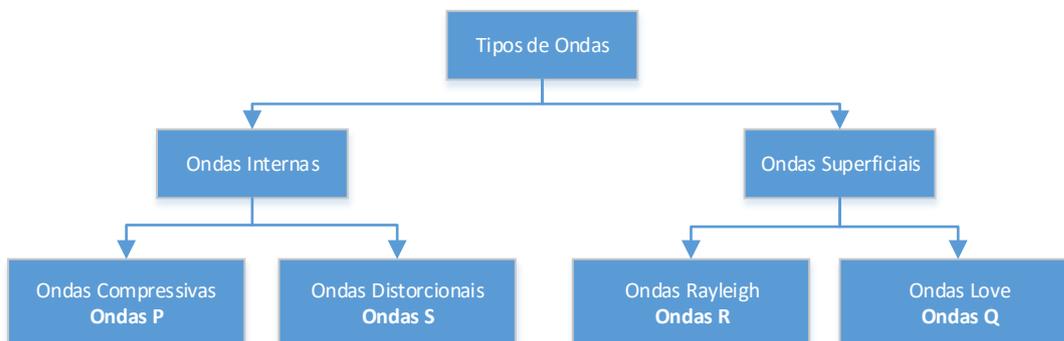


Figura 6 - Tipos de ondas

Importa sublinhar que as características da propagação das ondas sísmicas no terreno dependem das particularidades do meio onde se propagam. O tipo de material, bem como a existência de

heterogeneidades no terreno são os fatores que representam maior importância na alteração no modo de propagação à medida que as ondas progridem no meio.

As velocidades de propagação das ondas são variáveis, assumindo valores consoante o tipo de onda bem como o tipo de meio onde se propagam. A Tabela 4 compara as velocidades de propagação, com base nos parâmetros atrás enunciados:

Tabela 4 - Velocidades de propagação das Ondas P e S em diferentes meios; adaptado de (Stanford Rock Physics Laboratory)

| Meios de Propagação        | Ondas P [m/s] |      | Ondas S [m/s] |      |
|----------------------------|---------------|------|---------------|------|
| Solo vegetal               | 300           | 700  | 100           | 300  |
| Seixos                     | 300           | 700  | 100           | 300  |
| Areias secas               | 400           | 1200 | 100           | 500  |
| Areias Saturadas           | 1500          | 2000 | 400           | 600  |
| Argila saturada            | 100           | 2500 | 200           | 800  |
| Xisto fino saturado        | 100           | 2500 | 200           | 800  |
| Margas                     | 200           | 3000 | 750           | 1500 |
| Arenitos porosos saturados | 2000          | 3500 | 800           | 1800 |
| Calcário                   | 3500          | 6000 | 2000          | 3300 |
| Giz                        | 2300          | 6000 | 1100          | 1300 |
| Sal-gema                   | 4500          | 5500 | 2500          | 3100 |
| Anidrite                   | 4000          | 5500 | 2200          | 3100 |
| Dolomite                   | 3500          | 6500 | 199           | 3600 |
| Granito                    | 4500          | 6000 | 2500          | 3300 |
| Basalto                    | 5000          | 6000 | 2800          | 3400 |
| Gneisse                    | 4400          | 5200 | 2700          | 3200 |
| Carvão                     | 2200          | 2700 | 1000          | 1400 |
| Água                       | 1450          | 1500 |               |      |
| Gelo                       | 3400          | 3800 | 1700          | 1900 |
| Óleo                       | 1200          | 1250 |               |      |

### 3.3.1. ONDAS INTERNAS

As ondas internas são caracterizadas por se propagarem esfericamente no interior da massa rochosa e induzirem nas partículas do solo movimentos unidirecionais. Estas assumem uma maior importância, ao nível da energia libertada, na proximidade da fonte que as gera. As ondas internas são compostas por ondas compressivas, denominadas doravante por ondas P, e por ondas transversais, ou ondas S.

### 3.3.1.1. Ondas P

As ondas P propagam-se induzindo no terreno uma deformação longitudinal na direção da sua propagação, até intersectarem outro meio onde vão ocorrer alterações, nomeadamente, no surgimento de ondas de corte e de superfície. Para além de se tratarem das ondas com maior velocidade de propagação, estas são ainda caracterizadas pelas suas pequenas amplitudes e altas frequências.

A Figura 7 demonstra o movimento da onda P no terreno.

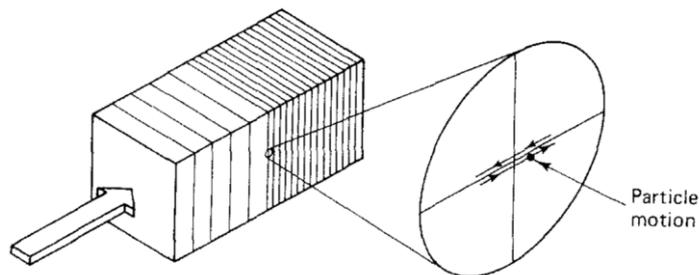


Figura 7 – Ondas P (Dowding, 1985)

### 3.3.1.2. Ondas S

As ondas S geram no terreno uma deformação transversal à direção da sua propagação. A sua velocidade de difusão situa-se entre 60-70% da velocidade das ondas P. Estas apenas se propagam em corpos sólidos uma vez que os fluidos não suportam tensões de corte.

A Figura 8 demonstra o movimento da onda-S no terreno.

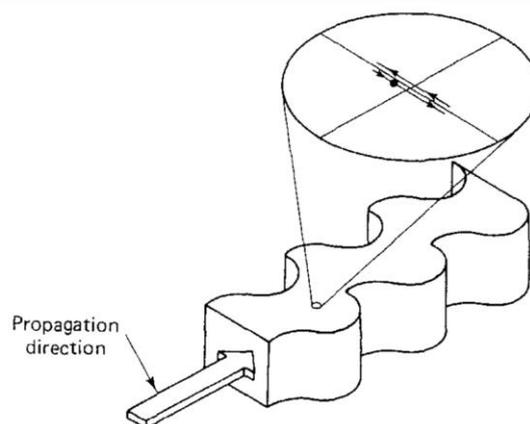


Figura 8 – Ondas S (Dowding, 1985)

### 3.3.2. ONDAS SUPERFICIAIS

As ondas superficiais são caracterizadas por se propagarem nas interfaces do terreno, como por exemplo nas falhas, contactos geológicos e na superfície do terreno, induzindo vibrações bidimensionais. Na

gênese destas ondas está a transformação das ondas internas quando intersectam essas interfaces decorrentes da anisotropia nos materiais. São caracterizadas como tendo grande amplitude e duração, bem como baixa frequência. Assim sendo, tendencialmente estas gozam de um carácter mais destrutivo, e adquirem uma maior importância com distâncias de transmissão maiores. As ondas superficiais mais importantes são as ondas Rayleigh, denominadas doravante por ondas R, e as ondas Love, ou ondas Q.

### 3.3.2.1. Ondas R

As ondas R propagam-se elipticamente em planos verticais, tendo o mesmo sentido que a direção de propagação. A amplitude destas ondas é mais elevada do que as ondas internas, contudo, esta diminui rapidamente com o aumento da distância à interface. A velocidade de difusão destas ondas é aproximadamente 90% da velocidade das ondas S.

A Figura 9 demonstra o movimento da onda-R no terreno.

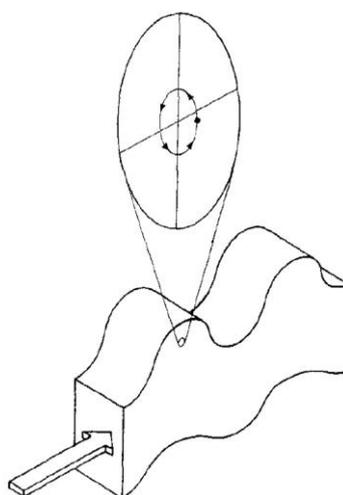


Figura 9 – Ondas R (Dowding, 1985)

### 3.3.2.2. Ondas Q

As ondas Q propagam-se em planos horizontais, sendo o tipo de oscilação elíptico. Tal como as ondas R, estas possuem amplitudes elevadas e frequências baixas, diferindo apenas na velocidade de propagação, que é ligeiramente superior.

## 3.4. REFLEXÃO E REFRAÇÃO DE ONDAS

A heterogeneidade do meio de propagação de uma vibração conduz à alteração do fenómeno vibratório. Quando é realizada a detonação da carga explosiva, ondas de tensão propagam-se em todas as direções. Na proximidade do furo, a vibração aproxima-se a um impulso de Dirac. Com o aumento da distância ao furo, a vibração adquire a forma sinusoidal, devido à combinação das propagações direta, refletida e refratada (Dowding, 1985).

Na Figura 10 compara-se a forma das vibrações, de acordo com a localização do transdutor.

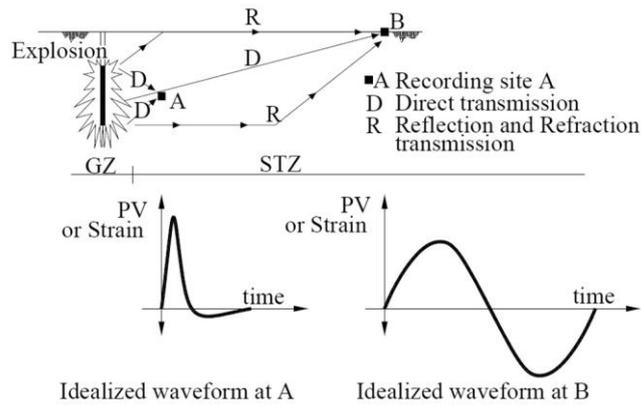


Figura 10 - Idealização da forma da onda num desmonte (Silva-Castro, 2012)

### 3.5. INSTRUMENTOS DE MONITORIZAÇÃO

Aquando da passagem da vibração, as partículas do solo movem-se em todas as direções, até atingirem o ponto de repouso. Com o objetivo de descrever este movimento, ele deve ser registado em três direções perpendiculares, em que tipicamente um dos eixos tem a direção do desmonte. Esta direção é denominada componente longitudinal, e as outras duas direções ortogonais denominadas componentes, transversal e vertical.

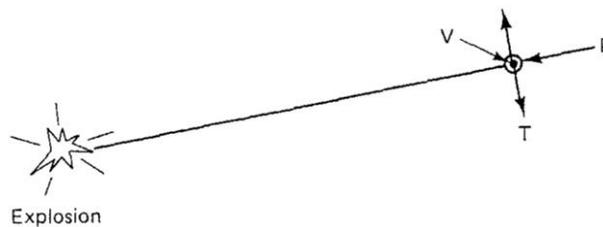


Figura 11 - Orientação do transdutor em relação ao desmonte (Dowding, 1985)

O equipamento para a monitorização de vibrações consiste em transdutores que convertem sinais mecânicos (deslocamento, velocidade, aceleração ou deformação) em sinais elétricos, que são transmitidos através de cabos até um sistema de amplificação e armazenamento. O funcionamento de transdutores simples consiste num íman móvel suspenso no interior de uma bobina, em que, quando o íman se desloca relativamente à bobina cria uma corrente elétrica, proporcional ao movimento do íman. Por sua vez, o movimento do íman é proporcional ao deslocamento, velocidade e aceleração do ponto amostrado. Atualmente, os transdutores mais utilizados pela indústria são fabricados com materiais piezoelétricos, que quando são deformados geram correntes elétricas proporcionais ao deslocamento, velocidade e aceleração (Silva-Castro, 2012).

Um vasto número destes equipamentos permite o acoplamento de um microfone para controlo da onda aérea. Segundo diversos estudos, a análise da velocidade de vibração das partículas é mais eficaz na determinação dos danos, comparativamente com o deslocamento e aceleração das mesmas (Richards, et al.).

Na Figura 12 é apresentado um equipamento para determinação de vibrações e onda aérea:



Figura 12 - Sismógrafo VibraZEB VM-7D+

Para proporcionar uma boa reprodutibilidade dos fenómenos amostrados durante o tratamento, é necessário garantir que a aquisição dos dados é feita de forma correta e rigorosa. Para isso, há uma série de exigências que necessitam de ser garantidas:

- O geofone necessita ser encastrado no terreno, para garantir total acoplamento. Se tal não for possível, para evitar movimentos bamboleantes, deverá ser, no mínimo cravado e disposto sob um saco de areia;
- O equipamento deverá ter a capacidade de armazenar a totalidade da vibração provocada pelo desmonte;
- Os limites de medição das grandezas do equipamento deverão ser superiores aos impulsos provocados pela vibração;
- A frequência de amostragem do equipamento deverá ser, pelo menos, superior ao dobro da frequência máxima da vibração, garantindo assim a representatividade do sinal.

Durante a execução de estudo de vibrações no terreno com recurso a um geofone, os dados recolhidos relativamente à velocidade de vibração são armazenados internamente. Estes, normalmente, são dispostos num relatório de vibrações. A título de exemplo, podemos observar um destes relatórios de vibrações no Anexo A.



# 4

## PREVISÃO DAS VIBRAÇÕES NO TERRENO

### 4.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Estima-se que apenas 5 a 15% da energia libertada pelas detonações de explosivos em rocha é efetivamente utilizada na fragmentação de rocha, significando que o remanescente é transferido ao ambiente sob a forma de calor, ruído e vibrações (Dinis da Gama, 1998).

As vibrações no terreno, a par da onda aérea, da projeção de blocos e geração de poeiras, são as principais perturbações criadas pelos desmontes nas áreas circundantes. Estas podem, se não forem acauteladas, desencadear danos permanentes em estruturas antrópicas na proximidade, bem como ser o principal motivo de conflitos com a população envolvente.

A intensidade das vibrações, como é facilmente entendido, tende a diminuir exponencialmente com o aumento da distância. Os fatores determinantes na redução das vibrações com a distância são (Sarsby, 2000):

- Expansão geométrica das ondas;
- Progressiva separação dos diferentes tipos de onda;
- Presença de descontinuidades nos maciços, provocando a reflexão, refração, difração e dispersão das ondas;
- Atrito interno dinâmico característico das rochas.

Desmontes em corta usualmente envolvem cargas explosivas relativamente elevadas a distâncias substanciais dos pontos de interesse, pelo que o movimento predominante do terreno vai surgir a partir de ondas de superfície com baixas frequências. Em desmontes em locais de construção, geralmente recorre-se a cargas e distância menores, pelo que as ondas geradas mais dominantes são as ondas internas, com frequência de vibração mais elevadas (Sarsby, 2000).

Assim sendo, desenvolveram-se leis para estimação das vibrações, com o objetivo de obter uma previsão do movimento do terreno na área envolvente. Estas foram desenvolvidas correlacionando as variáveis que afetam a propagação. Segundo diversos estudos realizados, admite-se que os danos em estruturas estão correlacionados com a amplitude das ondas sísmicas, sendo que, das grandezas físicas que as caracterizam, a velocidade vibratória das partículas é a que melhor se ajusta à referida correlação.

## 4.2. FATORES QUE INFLUENCIAM A PROPAGAÇÃO DE VIBRAÇÕES

A propagação de vibrações no terreno é função de diversas variáveis que influenciam as características das mesmas. Estas variáveis podem ser distinguidas como controláveis ou não controláveis, consoante a capacidade de adaptação aquando do dimensionamento da carga e do diagrama de fogo.

A Tabela 5 enuncia os fatores que afetam a propagação de ondas, bem como a sua influência. Seguidamente serão descritos os principais parâmetros que afetam esta problemática:

Tabela 5 – Fatores que influenciam a magnitude das vibrações (Rosenthal, et al., 1987)

|                                   |   | Influência nas Vibrações |                          |                |
|-----------------------------------|---|--------------------------|--------------------------|----------------|
|                                   |   | Importante               | Moderadamente Importante | Insignificante |
| Variáveis Controláveis            | Peso da carga explosiva por retardo           | X                        |                          |                |
|                                   | Intervalo dos retardos                        | X                        |                          |                |
|                                   | Parâmetros geométricos do desmorte:           |                          |                          |                |
|                                   | • Afastamento e espaçamento                   |                          |                          |                |
|                                   | • Confinamento da carga                       |                          |                          |                |
|                                   | • Comprimento e diâmetro da carga             | X                        |                          |                |
|                                   | • Ângulo e inclinação da carga                |                          |                          |                |
|                                   | • Profundidade da carga                       |                          |                          |                |
| • Quantidade e tipo do atacamento |   |                          |                          |                |
|                                   | Peso da carga por detonação                   | X                        |                          |                |
|                                   | Direção da iniciação                          | X                        |                          |                |
|                                   | Cordão detonante descoberto ou não            |                          |                          | X              |
| Variáveis Não Controláveis        | Geologia local                                | X                        |                          |                |
|                                   | Tipo de material de cobertura                 | X                        |                          |                |
|                                   | Espessura do material de cobertura            | X                        |                          |                |
|                                   | Distância entre desmorte e ponto de interesse | X                        |                          |                |
|                                   | Propriedades do maciço rochoso                | X                        |                          |                |
|                                   | Erro no tempo de iniciação                    |                          | X                        |                |
|                                   | Superfície do terreno                         |                          |                          | X              |

### 4.2.1. PARÂMETROS CONTROLÁVEIS

Os parâmetros controláveis associados a desmontes com recurso a explosivos podem ser estipulados de antemão, aquando do dimensionamento das pegas de fogo, bem como no carregamento e execução destas. A variação e adaptabilidade destes pode permitir uma melhoria na qualidade do desmorte, bem como na mitigação das perturbações ambientais e sociais.

#### 4.2.1.1. Carga Operante

A magnitude das vibrações num determinado ponto varia com a carga explosiva detonada. Segundo Jimeno, et al., (1995), este é o fator mais importante que afeta a geração de vibrações. Em desmontes com detonações diferidas no tempo, a amplitude das vibrações tendencialmente será menor, desde que os retardos sejam suficientes para evitar detonações de furos num mesmo instante temporal. Se tal acontecer, a carga operante a considerar na estimação da magnitude das vibrações deverá ser a carga de explosivo máxima detonada em 8 milissegundos.

Este parâmetro é função de inúmeras variáveis geométricas do desmonte, como por exemplo o diâmetro dos furos, a altura das bancadas, ou mesmo a utilização de espaçadores intermédios ou *Air-Decks*.

#### 4.2.1.2. Consumo Específico

A diminuição do consumo específico resulta da diminuição da massa de explosivo por desmonte. Este fator é, ate certo ponto, benéfico pois permite diminuir a carga operante por retardo. Em contrapartida, se a relação entre a massa de explosivo e o volume de rocha for insuficiente, ocorrerão problemas relacionados com a fragmentação, bem como um aumento da magnitude das vibrações, devido ao confinamento excessivo do explosivo. Segundo González de Vallejo, et al., (2002), para uma diminuição de 20% do *powder factor* em relação ao valor ótimo, os níveis de vibração poderão duplicar ou triplicar.

#### 4.2.1.3. Tempo de Retardo

As interferências cumulativas das vibrações são consequência do insuficiente intervalo temporal entre a detonação de furos. Assim sendo, retardos elevados assegurariam que tal não acontecesse, mas, por vezes, para assegurar um desmonte eficaz, isto não acontece.

A ocorrência deste tipo de fenómeno pode gerar vibrações com grande amplitude. Assim sendo, foram desenvolvidos diversos estudos:

- *Nobel's Explosives Co.*: retardos entre furos inferiores a 25ms pode provocar interferências construtivas, aumentando a velocidade máxima das partículas;
- *Langefors, 1963*: com retardos 3 vezes superiores entre furos adjacentes ao período de vibração pode-se supor que não existe amplificação da amplitude das ondas;

#### 4.2.1.4. Parâmetros Geométricos do Desmonte

As variáveis da geometria do desmonte têm uma considerável influência na mitigação de vibrações propagadas no maciço. Entre elas destacam-se (Jimeno, et al., 1995):

- **Diâmetro do furo**: o aumento do diâmetro do furo pressupõe um aumento do volume de explosivo proporcional ao quadrado do diâmetro, o que irá aumentar a carga operante, sendo desfavorável no controlo das vibrações;
- **Altura da bancada**: o aumento da altura da bancada aumenta a probabilidade de desvio dos furos, o que pode ter consequências não só ao nível da fragmentação, bem como de vibrações e *fly-rock*, se não for assegurada a relação entre a altura da bancada e o afastamento entre o furo e a mesma. A relação entre a altura da bancada e afastamento deverá ser superior a 2;
- **Afastamento e espaçamento entre furos**: o confinamento do explosivo é um parâmetro que se reveste de grande importância no controlo granulométrico do material desmontado, bem como

no controlo dos impactes ambientais. Um confinamento excessivo da carga explosiva acarreta uma resistência maior à fragmentação, que resultará numa fragmentação deficiente, assim como um aumento da componente da energia sísmica produzida pelo explosivo. Em contrapartida, se o confinamento do explosivo for diminuto, a fragmentação poderá ser excessiva, bem como o aumento da intensidade de onda aérea e uma maior propensão para a geração de *fly-rocks*;

- **Subfuração:** o aumento da subfuração para além do comprimento necessário introduz irregularidades na praça, corresponde a um custo desnecessário em perfuração e explosivos e é nefasto no controlo das vibrações, pois é na zona inferior que o confinamento é maior.
- **Tamponamento:** o tamponamento excessivo gera um maior confinamento do explosivo, potenciando a magnitude das vibrações, bem como problemas de fragmentação. Em contrapartida, um tamponamento deficiente pode levar à ocorrência de *fly-rock*, formação de crateras, e potenciar a onda aérea;
- **Inclinação do furo:** a inclinação dos furos permite melhorar o rendimento da detonação, principalmente na zona inferior do maciço, levando a uma diminuição da magnitude das vibrações;
- **Cargas interpostas com decks:** o escalonamento da carga de explosivo por furo permite reduzir a carga operante, proporcionando a diminuição da magnitude das vibrações. A melhoria da fragmentação e uma melhor distribuição granulométrica são também vantagens que a regulação deste parâmetro permite conseguir.

#### 4.2.1.5. Tipos de Explosivos

O tipo de explosivo selecionado na execução dos desmontes tem um efeito na velocidade das partículas, pois esta velocidade é proporcional às tensões que o explosivo quando é detonado exerce nas paredes do furo. Deste modo, explosivos de baixa densidade e velocidade de detonação provocarão níveis de vibração inferiores.

#### 4.2.2. PARÂMETROS NÃO CONTROLÁVEIS

Os parâmetros não controláveis são normalmente dependentes das características geológicas e geotécnicas presentes no local envolvente do desmonte, bem como de erros não controláveis associados aos equipamentos utilizados no desmonte. Assim sendo, dada a imprevisibilidade destes, o seu controlo é inviabilizado. No entanto, as variações que estes produzem necessitam de se contabilizadas e incorporadas nas análises executadas. A metodologia aqui apresentada visa incorporar alguns dos parâmetros aqui referidos na estimação da magnitude das vibrações produzidas.

##### 4.2.2.1. Geologia

A geologia local e a geomecânica das rochas têm uma grande influência na propagação das vibrações, e a sua importância aumenta em pontos mais distantes do desmonte. A heterogeneidade das propriedades geomecânicas, bem como a existência de diferentes litologias, leva à diversificação das propriedades de propagação. Os diferentes tipos de solos e rochas acarretam um papel de filtragem de vibrações com determinadas frequências, tipicamente entre 5 e 100 Hertz, como se pode verificar na Tabela 6.

Tabela 6 - Frequências preferenciais para a transmissão de vibrações no terreno (Sarsby, 2000)

| Tipo de Terreno                              | Gama de Frequências (Hz) |
|--|--------------------------|
| Siltes e argilas muito moles                 | 5-20                     |
| Argilas moles e areias soltas                | 10-25                    |
| Areias e cascalhos compactos e argilas duras | 15-40                    |
| Rochas pouco competentes                     | 30-80                    |
| Rochas muito competentes                     | >50                      |

A existência de diferentes litologias e heterogeneidades no terreno têm, em grande parte dos casos, um efeito atenuador na propagação das vibrações no terreno. Contudo, em condições específicas, podem ocorrer fenómenos de amplificação, desencadeando assim um aumento do risco de acidentes. Um dos exemplos mais claros é, no caso de solos estratificados, a ocorrência de amplificação das vibrações quando ocorre uma diminuição da espessura dos estratos.

#### 4.2.2.2. Distância

A densidade da energia que se propaga através de vibrações tende a diminuir com o aumento da distância entre o desmorte e o ponto em estudo, devido à expansão geométrica das ondas, bem como à separação dos tipos de onda provocadas pelas diferentes velocidades de propagação. Assim sendo, a magnitude das ondas sísmicas diminui com o aumento da distância entre o desmorte e o ponto a estudar.

Outra característica que afeta a magnitude de vibrações é o facto de o terreno filtrar a componente de altas frequências das vibrações.

### 4.3. LEIS DE PREVISÃO DA ATENUAÇÃO DE VIBRAÇÕES

A previsão dos fenómenos vibratórios é um procedimento que se reveste de grande importância no controlo das condicionantes ambientais e de segurança, pois permite estimar previamente a magnitude das vibrações. Assim sendo, é possível conhecer de antemão, com algum grau de certeza se, aquando da realização da operação geradora de vibrações, os limites legais da magnitude do fenómeno vibratório são cumpridos.

Como foi referido anteriormente, as características vibratórias nos maciços dependem de inúmeros fatores (ver Capítulo 4.2). Porém, a enorme variabilidade e complexidade dos parâmetros envolvidos nas propagações ondulatórias têm inviabilizado a modelização teórica recorrendo a esses mesmos parâmetros. Geralmente, procura-se quantificar o fenómeno vibratório com base nos dados experimentais (Bernardo, 2004).

Assim sendo, o critério que tem merecido maior aceitação na previsão das características do fenómeno vibratório é o estudo de relações empíricas baseadas nos dados de campo. Nesse sentido, a velocidade vibratória de partícula é o parâmetro que melhor correlaciona os danos em estruturas com o fenómeno vibratório. Segundo estudos apresentados por Berger, (1971), mais de 97% dos casos de danos em estruturas estão associados a velocidades vibratórias superiores a 500mm/s, bem como 50% das falhas

estruturais verificadas, ocorreram quando foram submetidas a velocidades da ordem de 137mm/s (Dinis da Gama, 1998).

#### 4.3.1. MÉTODOS TEÓRICOS

Os modelos teóricos permitem, com base nas características geológicas e geotécnicas, bem como na energia sísmica transmitida à rocha pelo explosivo, a estimação da magnitude das vibrações. Estes métodos permitem aproximações razoáveis, quando não se dispõe de equipamentos para o estudo das vibrações. Berta, (1985), apresentou um modelo teórico de previsão da velocidade de pico das partículas, enunciado na Equação 7 (Jimeno, et al., 1995):

$$\dot{u} = \frac{\sqrt{W}}{D} \cdot \sqrt{\frac{n_t \cdot \left[1 - \frac{(Z_e - Z_r)^2}{(Z_e + Z_r)^2}\right] \cdot \frac{1}{e^{D_f/d_f} - 1,72} \cdot E_T \cdot 10^6}{5 \cdot k_f \cdot \log(D) \cdot \pi \cdot \rho_r \cdot c}} \cdot 10^2 \quad (\text{Eq. 7})$$

Em que:

- $\dot{u}$  é a velocidade de pico das partículas do terreno ( $m \cdot s^{-1}$ );
- $W$  é a quantidade de explosivo máxima detonada num intervalo de 8ms ( $kg$ );
- $D$  é a distância da carga ao ponto a estimar ( $m$ );
- $n_t$  é o rendimento de transmissão de energia;
  - $n_t < 0,4$  para cargas dispostas no terreno;
  - $n_t > 0,4$  para cargas em furos com frente livre;
- $Z_e$  é a impedância do explosivo ( $kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-2}$ );
- $Z_r$  é a impedância da rocha ( $kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-2}$ );
- $D_f$  é o diâmetro do furo ( $mm$ );
- $d_f$  é o diâmetro da carga ( $mm$ );
- $E_T$  é a energia do explosivo ( $MJ \cdot kg^{-1}$ );
- $k_f$  é a constante de redução da frequência;
  - $0,11 < k_f < 0,13$  para solos saturados de água;
  - $0,06 < k_f < 0,09$  para aluviões pouco consolidados;
  - $0,01 < k_f < 0,03$  para rocha dura e compacta;
- $\rho_r$  é a densidade da rocha ( $kg \cdot m^{-3}$ );
- $c$  é a velocidade de propagação das ondas no maciço ( $m \cdot s^{-1}$ ).

Contudo, os modelos teóricos apresentam muitas limitações, principalmente no que diz respeito à incorporação da variabilidade e complexidade da determinação dos parâmetros envolvidos. Nesse sentido, a determinação da magnitude das vibrações de forma prática adquire uma maior importância.

#### 4.3.2. MÉTODOS EMPÍRICOS

Os métodos empíricos para a previsão da atenuação das vibrações têm sido desenvolvidos desde meados do século XX. Os primeiros estudos incidiram na estimação das vibrações associadas a explosões

nucleares, sendo posteriormente adaptados para os desmontes com recurso a cargas explosivas convencionais.

A utilização de métodos empíricos pressupõe a existência de dados das Velocidades de Pico das Partículas (PPV's) de desmontes previamente efetuados. A não existência destes dados implica a execução de desmontes teste. Para a execução destes, é necessário acautelar que a vibração produzida não excede os limites legais. Assim sendo, para colmatar esta necessidade, a *United States Bureau of Mines*, estabeleceu um critério de segurança conservativo que visa determinar a distância de segurança em função da carga utilizada:

$$D_s \geq 22,5 \cdot \sqrt{W} \quad (\text{Eq. 8})$$

A execução de um desmonte teste, pressupõe ainda uma geometria específica na colocação dos geofones, com o intuito da obtenção de uma boa dispersão dos dados amostrados. Dowding, (1985), sugere que a colocação dos sismógrafos, para a determinação das PPV's numa determinada direção, seja geometricamente crescente. Desta forma, é possível garantir uma boa dispersão dos dados evitando o seu agrupamento, prejudicial aquando da construção da lei de atenuação.

Segundo Dowding (1985), Hendron considerou que a propagação das vibrações é dependente das variáveis descritas na Tabela 7:

Tabela 7 - Variáveis consideradas na análise dimensional da propagação de vibrações (Dowding, 1985)

|               | Variáveis  | Símbolo    | Dimensão <sup>1</sup>      |
|---------------|--|------------|----------------------------|
| Independentes | Energia libertada pela explosão (por retardo)      | $W$        | $F \cdot l$                |
|               | Distância entre a detonação e o ponto de interesse | $D$        | $l$                        |
|               | Velocidade de propagação das ondas no terreno      | $c$        | $l \cdot t^{-1}$           |
|               | Densidade do terreno                               | $\rho$     | $F \cdot t^2 \cdot l^{-4}$ |
|               | Tempo  | $t$        | $l \cdot t$                |
| Dependentes   | Deslocamento máximo da partícula                   | $u$        | $l$                        |
|               | Velocidade máxima da partícula                     | $\dot{u}$  | $l \cdot t^{-1}$           |
|               | Aceleração máxima da partícula                     | $\ddot{u}$ | $l \cdot t^{-2}$           |
|               | Frequência de vibração do meio                     | $f$        | $t^{-1}$                   |

Langhaar, posteriormente, estimou através do teorema dos  $\pi$ 's de Buckingham, que o fenómeno vibratório poderia ser descrito por seis parâmetros adimensionais independentes:  $u/D$ ,  $\dot{u}/c$ ,  $\ddot{u} \cdot D/c^2$ ,  $f \cdot t$ ,  $t \cdot c/D$  e  $W/\rho \cdot c^2 \cdot D^3$ . Uma vez que a densidade,  $\rho$ , e a velocidade de propagação das ondas no

<sup>1</sup>  $F$ , força;  $l$ , comprimento;  $t$ , tempo.

terreno são relativamente constantes quando comparadas com a distância entre o desmonte e o ponto amostrado,  $D$ , bem como com a energia libertada pela detonação do explosivo,  $W$ , a sua variação pode ser desprezada. Desta forma, estabeleceu-se para o estudo da velocidade das partículas a Lei de Atenuação de Johnson, descrita na Equação 8:

$$\dot{u} = k \cdot W^\alpha \cdot D^\beta \quad (\text{Eq. 9})$$

Em que:

- $\dot{u}$  é a velocidade de pico máxima das partículas do terreno;
- $D$  é a distância entre a o desmonte e o ponto de estudo;
- $W$  é a massa de explosivo;
- $k$  é um parâmetro relacionado com a geologia local;
- $\alpha$  é um parâmetro relacionado com a geometria da carga explosiva;
- $\beta$  é um parâmetro relacionado com decaimento da velocidade de pico das partículas.

Desta forma, é possível a determinação dos parâmetros, através da análise de regressão linear tridimensional. Contudo, com a necessidade de incorporação de limites de segurança, a existência de três parâmetros controláveis apresenta diversos problemas, no que diz respeito à complexidade e exigência de cálculo. Assim sendo, diversos organismos oficiais, utilizadores e fabricantes de explosivos procederam à redução de três para duas dimensões admitindo o recurso à distância escalonada (SD):

$$\begin{cases} \dot{u} = k \cdot W^\alpha \cdot D^\beta \\ \alpha = -\frac{\beta}{n} \end{cases} \Leftrightarrow \dot{u} = k \cdot \frac{D^\beta}{W^{\frac{\beta}{n}}} \Leftrightarrow \dot{u} = k \cdot \left( \frac{D}{\sqrt[n]{W}} \right)^\beta \Leftrightarrow \dot{u} = k \cdot (\text{SD})^\beta \quad (\text{Eq. 10})$$

A aplicação da distância escalonada na previsão da atenuação das vibrações apresenta limitações, pois é necessário recorrer a um fator de correção –  $n$ , consoante a geometria da carga. Assim sendo,  $n$  pode adquirir dois valores. Estudos levados a cabo por Hendron e Devine conduziram à seguinte conclusão:

- $n = 2$ , quando a geometria da carga é considerada cilíndrica, permitindo uma melhor estimação a distâncias superiores a 31 metros entre o desmonte e o ponto de interesse. No presente trabalho, este será o modelo empregue pois é o mais utilizado pela indústria em desmontes a céu aberto, bem como é o que se adapta melhor aos objetivos do mesmo;
- $n = 3$ , quando a geometria da carga é considerada esférica, permitindo uma melhor estimação em desmontes subaquáticos e da Onda Aérea.

Assim sendo, com base nos dados recolhidos de uma campanha para análise de vibrações, é possível representar a velocidade de propagação de pico em função da distancia escalonada, como se pode verificar na Figura 13.

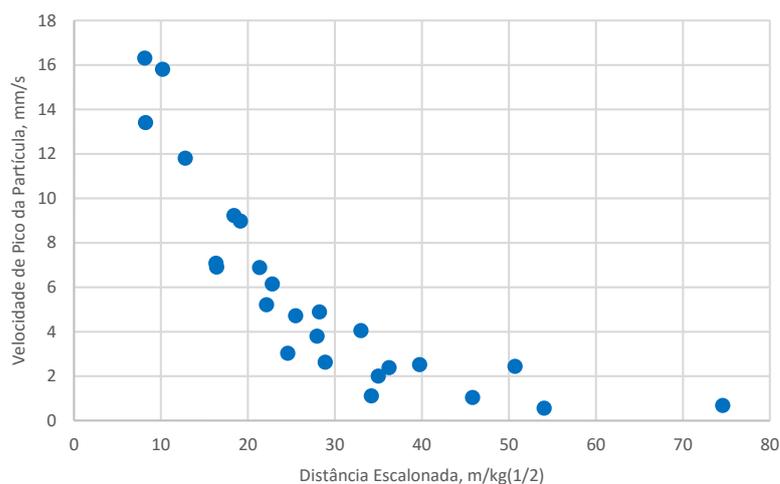


Figura 13 – Dados Recolhidos numa campanha de vibrações

Com o objetivo de proporcionar uma maior simplicidade na determinação da lei de atenuação é possível linearizar os dados, recorrendo ao logaritmo dos dados. Tal é possível, como se pode ver na Equação 11:

$$\dot{u} = k \cdot (SD)^\beta \Leftrightarrow \log \dot{u} = \log k + \beta \cdot \log SD \quad (\text{Eq. 11})$$

Desta forma, estamos perante uma equação linear, em que  $\log k$  é a ordenada na origem e  $\beta$  é o declive da reta. Na Figura 14 estão representados os dados em escala log-log:

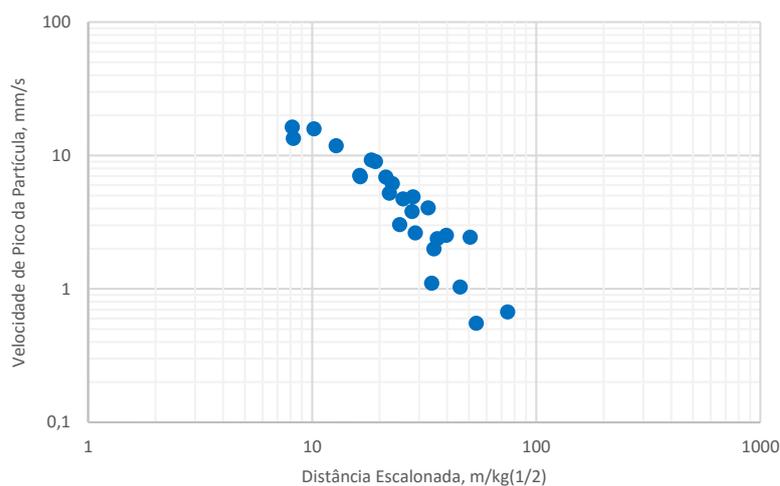


Figura 14 – Representação log-log dos dados recolhidos numa campanha de vibrações

Assim sendo, é possível o ajuste de uma tendência linear. Neste caso, recorreu-se ao método dos mínimos quadrados, com o intuito de determinar o melhor ajuste dos dados a uma reta, minimizado assim a soma dos quadrados das diferenças entre o valor estimado e os dados presentes na Figura 14. Para a obtenção de uma lei de atenuação teórica mais conservativa, Dowding, (1985) defende que fazendo uma translação da reta mantendo o declive, de modo que 95% dos dados estejam posicionados sob esta, seja possível estimar com um nível de confiança de 95% as vibrações de um determinado desmorte. Na Figura 15, é possível observar a reta obtida aquando da utilização do método dos mínimos quadrados e o ajuste a 95%

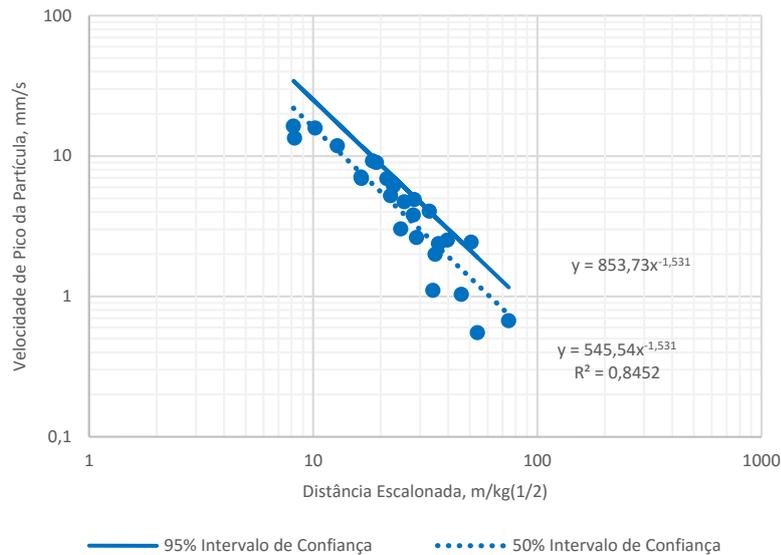


Figura 15 – Método dos Mínimos Quadrados e traslação para um intervalo de confiança de 95%

Desta forma, é possível determinar os parâmetros  $k$  e  $\beta$ , ficando a nova lei de atenuação caracterizada. É necessário ressaltar que, aquando da utilização de uma determinada lei de atenuação definida, só é válida se o tipo de explosivo for o mesmo que foi utilizado na formulação da mesma.

#### 4.4. NORMATIVAS

O contexto legal visa estabelecer os limites admissíveis dos fenómenos vibratórios propagados no terreno tendo como objetivo a minimização de danos provocados em pontos de interesse existentes na envolvente da fonte de vibrações.

Diversos critérios foram desenvolvidos, ao longo do tempo, com base nas características das vibrações. As primeiras formulações desenvolvidas para a determinação dos limites de segurança foram estabelecidas recorrendo à aceleração de vibração das partículas do terreno. Estas foram sendo refinadas e, atualmente é assumido que a relação da velocidade de vibratória de pico e a frequência de vibração é o parâmetro que melhor relaciona o fenómeno vibratório com os danos estruturais.

Na Tabela 8 estão descritos os principais critérios de danos para estruturas submetidas a vibrações:

Tabela 8 – Evolução dos critérios de dano e respetivos autores (Dinis da Gama, 1998)

| Parâmetro                                  | Autores   |
|--|---|
| Aceleração das vibrações                   | Thoenen & Windes (1942)   |
| Relação de energia<br>$RE = a^2/f^2$       | Crandell (1949)   |
| Velocidade de vibração máxima ou de pico   | Langefors (1958)<br>Edwards (1960)<br>Duvall e Fogelson (1962)                                      |
| Velocidade vibratória de pico e frequência | USBM RI 8507(1981)<br>O.S.M. (1983)<br>Office of Surface Mining<br>Norma UNE 22-381(1993) - Espanha |

As Normas têm como objetivo estabelecer limites da magnitude das vibrações, de modo a que, quando as estruturas estão sujeitas à ação destas, não se verifique qualquer tipo de danos. Nesse sentido, foram realizados diversos estudos pelas entidades reguladoras. Uma referência mundial no estudo da resposta estrutural a ações sísmicas provocadas por desmontes a céu aberto é o *Report of Investigations 8507*, realizado pelo *United States Department of Interior*. Neste relatório estão compilados estudos de diversos autores.

#### 4.4.1. NORMA PORTUGUESA NP 2074

A estimativa dos limites admissíveis das vibrações em território português está consagrada na Norma Portuguesa NP 2074, desenvolvida em 1983. Esta tem como base a Norma DIN 4150-1975.

Os valores limites das vibrações são determinados com recurso à velocidade de pico da partícula, e o seu cálculo é descrito na Equação 12:

$$\dot{u}_L = \alpha \cdot \beta \cdot \gamma \cdot 10^{-2} \quad [m/s] \quad (\text{Eq. 12})$$

Em que:

- $\alpha$  é o coeficiente que tem em conta as características do terreno de fundação, destinando-se a acautelar os efeitos de assentamentos diferenciais das fundações;
- $\beta$  é o coeficiente que tem em conta o tipo de construção;
- $\gamma$  é o coeficiente que tem em conta o número médio de solicitações, e que se destina a acautelar a fadiga do edifício.

Os valores dos coeficientes a utilizar para o cálculo da velocidade de pico da partícula limite, encontram-se expostos na Tabela 9:

Tabela 9 – Quadro síntese dos parâmetros utilizados para o cálculo da velocidade de pico das partículas limite disposta na Norma NP2074

|   |  |     |
|---|--|-----|
| <b>Parâmetro <math>\alpha</math><br/>Características do terreno</b> | Rochas e solos coerentes rijos ( $v > 2000 \text{ m/s}$ )  | 2   |
|   | Solos coerentes muito duros, duros e de consistência média; solos incoerentes compactos, areias e misturas areia-seixo bem graduadas, areias uniformes ( $1000 \text{ m/s} < v < 2000 \text{ m/s}$ ) | 1   |
|   | Solos incoerentes soltos, areias e misturas areia-seixo bem graduadas, areias uniformes, solos coerentes moles e muito moles ( $v < 1000 \text{ m/s}$ )  | 0,5 |
| <b>Parâmetro <math>\beta</math><br/>Tipo de Construção</b>          | Construções reforçadas   | 3   |
|   | Construções correntes  | 1   |
|   | Construções que exigem cuidados especiais (Ex.: monumentos históricos, hospitais, depósitos de água, chaminés)   | 0,5 |
| <b>Parâmetro <math>\gamma</math><br/>Número de solicitações</b>     | Número médio diário de solicitações <3   | 1   |
|   | Número médio diário de solicitações >3   | 0,7 |

A Norma Portuguesa distingue-se da generalidade das congêneres regulamentações internacionais, pois recorre às características do terreno de fundação das estruturas, bem como ao número de solicitações médias diárias. Inversamente, a frequência de vibração das partículas não é incorporada no estudo vibratório. Desta forma, foram propostas sugestões para a revisão desta Norma por Moura Esteves, (2003) e Bernardo, et al., (2006), para a inclusão da frequência, juntamente com a amplitude da velocidade de vibração, ao invés da utilização das características do terreno de fundação como parâmetro para a normalização.

#### 4.4.2. NORMAS INTERNACIONAIS

Neste subcapítulo serão abordadas as principais Normas Internacionais, nomeadamente as recomendações norte-americana, espanhola e alemã. Um dos aspetos que se reveste de um elevado interesse é a comparação dos limites admissíveis entre as normas europeias e americana, motivados em grande medida, pela disparidade de idades das construções.

##### 4.4.2.1. Normas Norte-Americana RI 8507

O *United States Bureau of Mines* (USBM) conjuntamente com *Office for Surface Mining Reclamation* (OSMRE) estabeleceram uma norma para o controlo dos danos provocados pelas vibrações geradas no terreno por desmontes superficiais, sendo uma referência mundial. A Norma RI 8507 nasce da revisão dos *Critérios de Segurança das Vibrações em Ambiente Residencial* de 1974, motivado pela dificuldade de cumprimento desses mesmos critérios. Estabelece a velocidade de pico da vibração da partícula máxima em função da frequência de vibração da partícula, como é possível analisar na Figura 16:

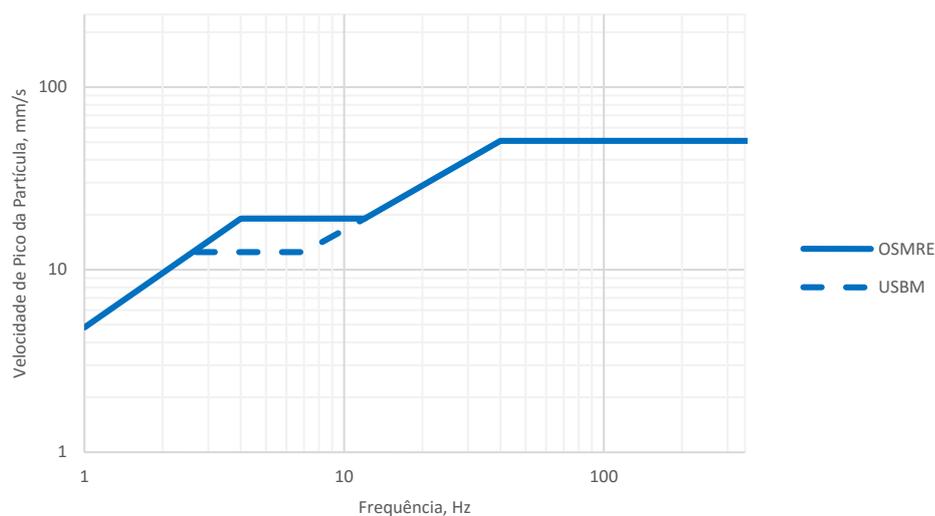


Figura 16 – Limites da velocidade de pico das partículas impostos pela Norma RI 8507

A presente norma distingue diferentes limites máximos da velocidade das partículas para habitações com diferentes características. Efetivamente, a linha a tracejado corresponde à velocidade máxima admitida quando os edifícios são fabricados com revestimentos em madeira ou paredes em gesso.

#### 4.4.2.2. Norma Espanhola UNE 22.381

O critério de prevenção de danos em território espanhol está consagrado na Norma UNE22.381 - *Controlo de vibrações produzidas por desmontes*. O nível de segurança é definido em função da frequência principal e do tipo de estrutura considerada, como se pode comprovar na Figura 17:

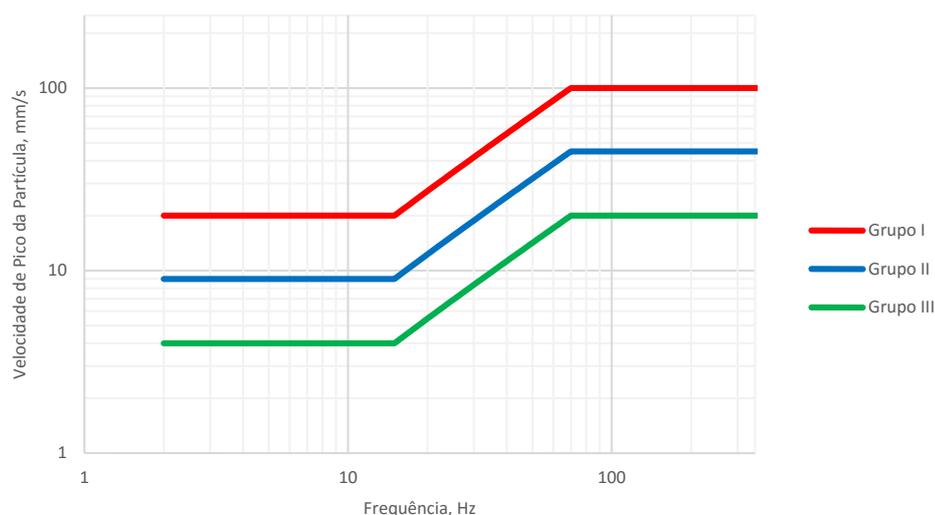


Figura 17 - Limites da velocidade de pico das partículas impostos pela Norma UNE 22.381

A norma distingue as diferentes estruturas nos seguintes grupos:

- **Grupo 1:** Prédios e construções industriais ligeiras com estruturas metálicas ou de betão armado;
- **Grupo 2:** Edifícios residenciais, escritórios, centros comerciais ou instalações recreativas e estruturas de valor histórico ou arqueológico que por sua vez não apresentam sensibilidade especial a vibrações;
- **Grupo 3:** Estruturas de valor histórico ou arqueológico que apresentam especial sensibilidade a vibrações.

#### 4.4.2.3. Norma Alemã DIN 4150

Após a unificação da Alemanha em 1989, a Norma DIN 4150:1990 foi adotada como norma-padrão em todo o território germânico, e considerada como referência por um grande número de países da União Europeia. Após várias atualizações, vigora atualmente a DIN4150:2001 – *Vibrações nos Edifícios*, que é composta por três partes, que dizem respeito à previsão dos parâmetros de vibração, efeitos das vibrações nos indivíduos no interior dos edifícios e efeitos nas estruturas.

Os limites da velocidade de vibração são distintos, consoante o tipo de estrutura. Estes estão descritos na Tabela 10:

Tabela 10 – Limites da velocidade de pico das partículas impostos pela Norma DIN 4150

| Tipos de Estruturas                        | Frequência (Hz) |              |              |                   |
|--|-----------------|--------------|--------------|-------------------|
|  | Fundação        |              |              | Topo da estrutura |
|  | <10             | 10 - 50      | 50 - 100     | 0 - ∞             |
| <b>Industriais</b>                         | 20mm/s          | 20 - 40 mm/s | 40 - 50 mm/s | 40 mm/s           |
| <b>Habitacões</b>                          | 5 mm/s          | 5 - 15 mm/s  | 15 - 20 mm/s | 15 mm/s           |
| <b>Edifícios particularmente delicados</b> | 3 mm/s          | 3 - 8 mm/s   | 8 - 10 mm/s  | 8 mm/s            |

A Figura 18 mostra a representação gráfica dos valores limites da velocidade de vibração das partículas, descritos na norma alemã:

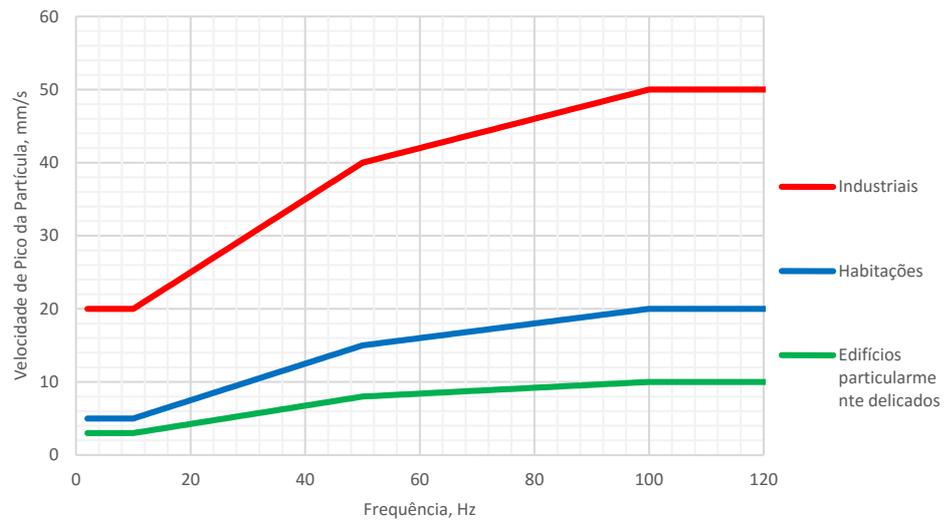


Figura 18 - Limites da velocidade de pico das partículas impostos pela Norma DIN 4150



## 5

## METODOLOGIA PROPOSTA

## 5.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A previsão da magnitude das vibrações aquando da realização de desmontes recorrendo a leis de atenuação é considerado pela indústria o método mais fidedigno e eficiente. Contudo, os procedimentos atualmente empregues pela indústria admitem a formulação de apenas uma Lei de Atenuação das vibrações no terreno com base nos dados provenientes de diversos sismógrafos. Desta forma, é premissa obrigatória assumir que o meio de propagação é isotrópico. O fluxograma presente na Figura 19 descreve a metodologia aplicada na determinação da velocidade de propagação de pico das partículas.

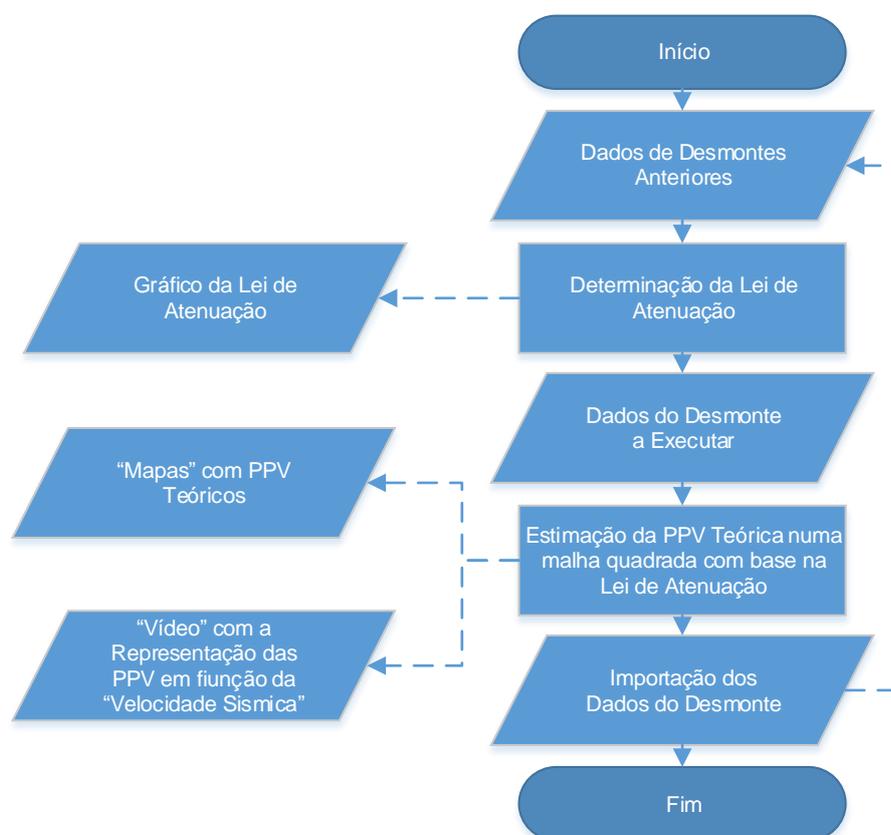


Figura 19 - Fluxograma da Metodologia para a Estimação da Velocidade de Vibração de Pico das Partículas

Mas como só em condições muito específicas é que a isotropia se verifica, a existência de erros de estimação é inevitável, e tanto maior quanto maior for a descontinuidade do meio. Neste sentido, apresentamos uma nova metodologia para a estimação da magnitude das vibrações, cujo objetivo é estabelecer diferentes leis de atenuação locais, decompondo o espaço em estudo em áreas de influência afetas a cada sismógrafo. Assim sendo, minimizamos o efeito das heterogeneidades existentes no meio de propagação. Desta forma, a qualidade da estimação é conseguida evitando o recurso a dados provenientes de regiões com características distintas. A magnitude dos erros provenientes da subestimação ou sobrestimação, é assim minimizada.

Na Figura 20, é possível visualizar um exemplo hipotético da formalização de uma lei de atenuação global vigente num determinado terreno, executada recorrendo a um conjunto de sismógrafos:

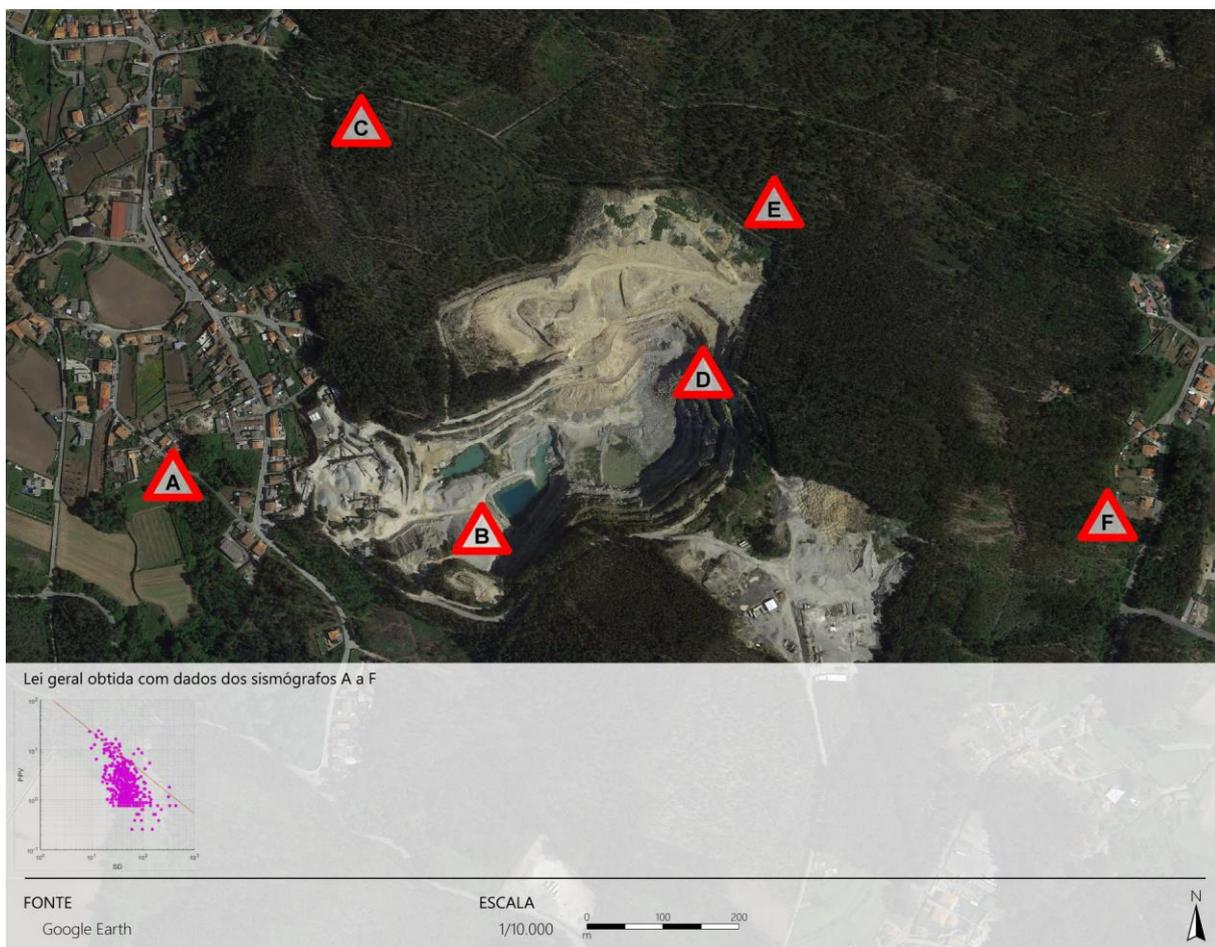


Figura 20 – Localização Hipotética de Sismógrafos numa Área de Pedreira e Lei de Atenuação Global nessa mesma Área

## 5.2. DESCRIÇÃO DA METODOLOGIA PROPOSTA

O método desenvolvido que apresentamos no presente documento propõe-se realizar uma previsão da velocidade de propagação de pico das partículas recorrendo à divisão do terreno a estudar em áreas de influência. A estimação das PPV num ponto é realizada recorrendo à lei de atenuação determinada para

a área de influência em que esse ponto se insere. Essa área de influência é produzida tendo como base pontos onde foram analisadas as características das vibrações decorrentes de desmontes prévios.

O fluxograma apresentado na Figura 21 descreve sucintamente o raciocínio empregue para a resolução do problema em estudo:

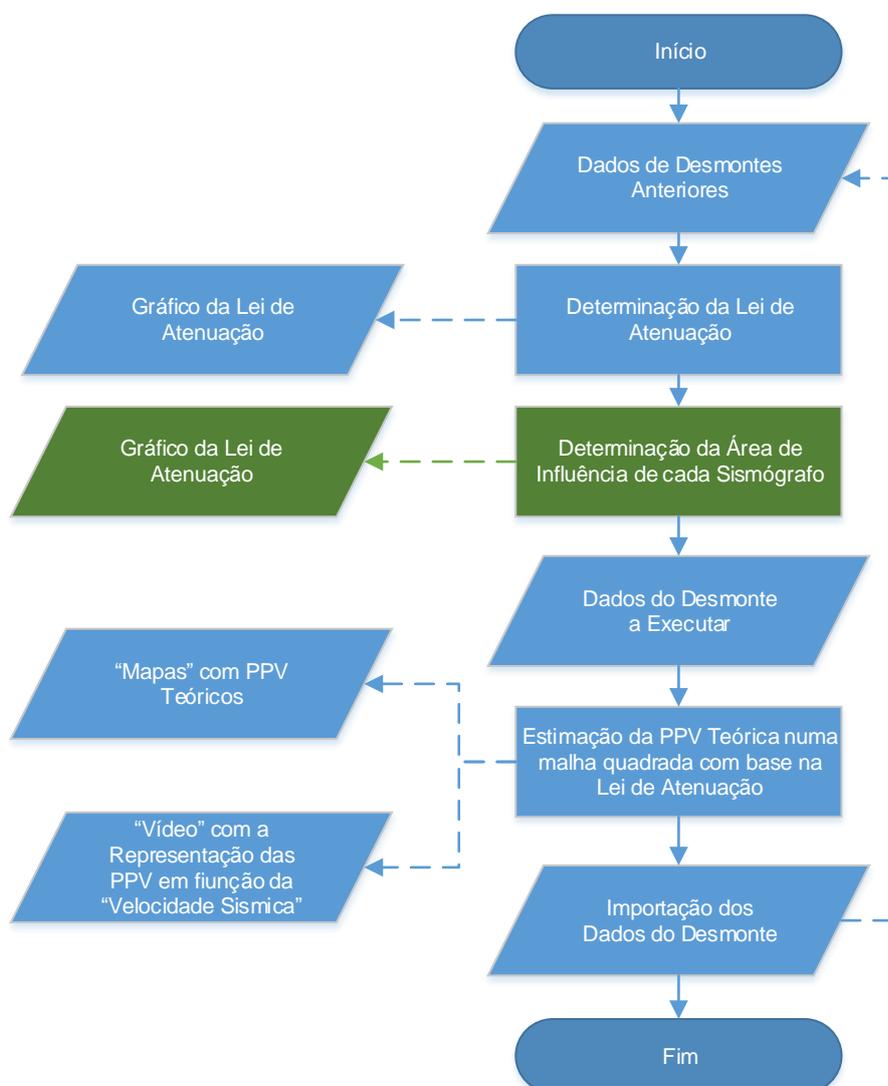


Figura 21 - Fluxograma da Metodologia Proposta

### 5.2.1. CLASSIFICAÇÃO DOS DADOS

Para implementação deste método é necessário ter de antemão dados provenientes de desmontes anteriores, com o objetivo de formular as leis de atenuação vigentes no local. Assim sendo, é necessária amostragem em diversos pontos no terreno. Os pontos amostrados, se cumprirem com o número mínimo de amostras para garantir que estas são representativas da população, serão considerados como pontos geradores de uma área de influência. Contudo, mormente em fases iniciais do projeto ou quando se pretende acrescentar um novo ponto estimador, o número de amostras pode ser insuficiente. Deste modo,

é necessário apelar à sensibilidade do responsável do projeto para a incorporação desses mesmos pontos estimadores.

Concretamente, no modelo proposto, é necessário importar para cada desmonte as coordenadas de cada sismógrafo utilizado, as coordenadas do furo que contém a maior carga detonada em 8 milissegundos e a leitura da máxima velocidade de pico da partícula recolhida por cada sismógrafo.

### 5.2.2. DETERMINAÇÃO DAS LEIS DE ATENUAÇÃO

As leis de atenuação, como foi referido no Capítulo 4.3.2, são determinadas com dados provenientes de desmontes realizados previamente, ressaltando apenas que, neste caso, estamos a utilizar dados recolhidos num determinado ponto para formular uma lei de atenuação. A formulação de leis de atenuação para um ponto estimador pode levar à ocorrência de agrupamento de pontos, principalmente, se a distância entre os desmontes e o geofone forem elevadas. Com o intuito de se obter leis de atenuação mais representativas, deve-se proceder à incorporação de distâncias e/ou cargas máximas instantâneas com alguma variabilidade.

### 5.2.3. DETERMINAÇÃO DAS ÁREAS DE INFLUÊNCIA

Para a execução da estimação das PPV's num determinado ponto do terreno, segundo a metodologia apresentada, recorrer-se-á à lei de atenuação determinada no ponto estimador mais próximo. Assim sendo, com o intuito de evitar o cálculo entre o ponto a estimar e todos os pontos estimadores para determinar o que se encontra mais próximo, propomos de antemão a decomposição da área recorrendo a Diagramas de Voronoi.

O diagrama de Voronoi é um procedimento matemático que permite, com base nos pontos estimadores, criar uma malha de polígonos convexos a qual garante que todos os pontos internos de um determinado polígono estão mais próximos do ponto gerador do polígono, em detrimento de todos os outros.

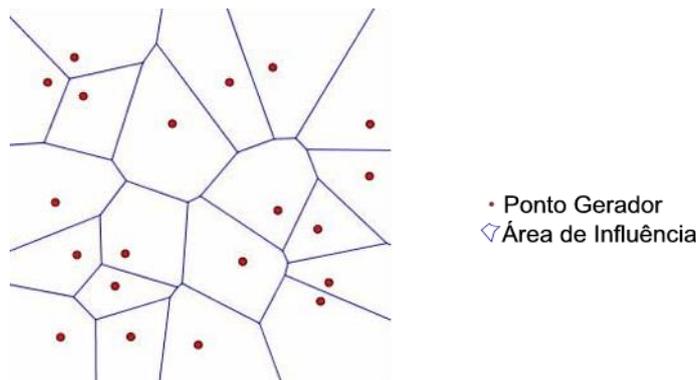


Figura 22 - Diagrama de Voronoi

Na Figura 23 é possível visualizar, tendo em conta o mesmo caso hipotético apresentado na Figura 20, a formalização de uma determinada malha gerada pela posição dos sismógrafos, recorrendo à decomposição celular apresentada por Voronoi, e consequentes leis de atenuação para cada polígono:

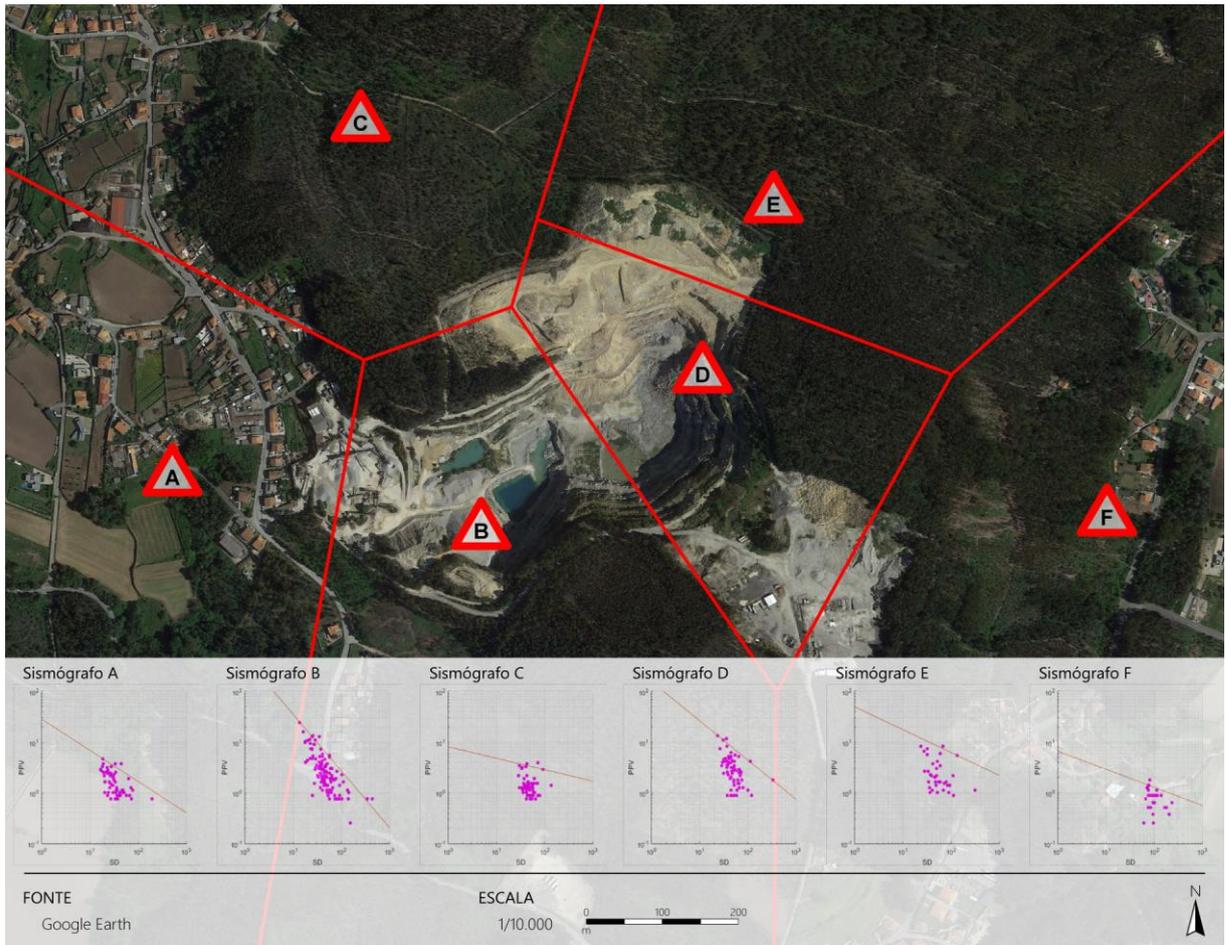


Figura 23 – Decomposição de um Terreno Hipotético e Leis de Atenuação Vigentes em cada Área de Influência

#### 5.2.4. ESTIMAÇÃO DA VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO

Com base nas leis de atenuação previamente calculadas para cada ponto gerador, bem como nos polígonos de influência, é possível estimar a velocidade de propagação de pico das partículas no terreno. Para isso, é necessário incorporar as características do desmonte a executar, sendo estas a carga de explosivo máxima instantânea, bem como as coordenadas do desmonte.

No âmbito da metodologia proposta, executámos uma malha de estimação regular, para a qual estimamos a PPV para cada ponto, com base sua na localização, na lei de atenuação vigente no polígono, na distância entre o desmonte e o ponto estimado e nas características do desmonte. A velocidade de pico da partícula é determinada recorrendo à Equação 13:

$$\hat{u}_t = k_s \cdot \left( \frac{D_t}{\sqrt{W_t}} \right)^{\beta_s} \quad (\text{Eq. 13})$$

Em que:

- $\hat{u}_t$  é a velocidade de pico da partícula estimada num determinado ponto do terreno;
- $D_t$  é a distância teórica entre o desmonte e o ponto em estudo;
- $W_t$  é a massa teórica de explosivo máxima detonada num intervalo de 8 milissegundos;
- $k_s$  e  $\beta_s$  são os parâmetros da lei de atenuação determinada para a área de influência onde se situa o ponto estimado

Desta forma, é então possível determinar a velocidade de pico das partículas nos pontos de uma malha pré-definida. Com base na estimação efetuada, é possível criar gráficos com o comportamento da atenuação da magnitude das vibrações no terreno.

#### 5.2.5. INCORPORAÇÃO DE DADOS DE NOVOS DESMONTES

O modelo apresentado é evolutivo, ou seja, é um modelo que permite, com a inclusão de dados provenientes dos desmontes durante o decurso da execução da obra, melhorar a qualidade da estimação. Desta forma, quando é executado um desmonte, se se proceder à utilização de equipamentos de medição de vibrações, é possível aumentar a fiabilidade da estimação. A melhoria da estimação pode ser executada de duas formas:

- **Melhoria das Leis de Atenuação:** procede-se à melhoria das leis de atenuação, quando se pretende aumentar a confiança destas, ou quando os dados utilizados para a estimação são insuficientes. Aquando da execução de novos desmontes, é possível incorporar os valores da velocidade de propagação de pico obtidos em pontos previamente amostrados. Desta forma, consegue-se uma maior representatividade das leis de atenuação já desenvolvidas.
- **Criação de Novas Áreas de Influência:** procede-se à criação de novas áreas de influência quando se pretende minimizar os efeitos das heterogeneidades em zonas do terreno, criando-se assim novas áreas de influência com novas leis de atenuação. Desta forma, realiza-se a amostragem em pontos não previamente amostrados. De notar que para considerar um ponto como ponto estimador, é necessário garantir o número mínimo de amostras recolhidas.

# 6

## ESTUDO DE CASO

### 6.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Com base na metodologia apresentada, foi criada uma rotina que permite estimar a velocidade de propagação de pico das partículas num determinado terreno. Esta foi desenvolvida em MATLAB. A escolha deste software prima pela versatilidade, permitindo incluir esta rotina em futuras ferramentas informáticas desenvolvidas *à posteriori* na área do desmonte de rocha. Neste capítulo explicaremos sucintamente a rotina desenvolvida.

Os dados utilizados para testar a rotina desenvolvida são baseados em desmontes reais, mas para garantir a confidencialidade dos mesmos, não é divulgada a sua localização precisa. Para a realização desta análise, recorreu-se a 88 amostragens recolhidas numa operação mineira.

### 6.2. DESCRIÇÃO DA ROTINA

#### 6.2.1. INCORPORAÇÃO DOS DADOS

A rotina desenvolvida inicia-se com a importação dos dados relativos dos desmontes ocorridos até à data. A importação dos dados é realizada recorrendo a um ficheiro “.xls” que deverá conter sete colunas, que correspondem às coordenadas do desmonte (x desmonte e y desmonte) e dos sismógrafos (x sismógrafo e y sismógrafo), bem como a velocidade de pico máxima amostrada pelo sismógrafo em estudo (ppv), a distância entre o desmonte e o sismógrafo (distância) e a carga máxima instantânea (carga), respetivamente.

Cada linha do documento de entrada corresponde a uma medição efetuada por cada sismógrafo. Isto significa que, se num desmonte executarmos a amostragem com  $n$  sismógrafos, teremos  $n$  linhas de entrada.

|    | A          | B          | C            | D            | E           | F         | G      |
|----|------------|------------|--------------|--------------|-------------|-----------|--------|
|    | x desmonte | y desmonte | x sismografo | y sismografo | ppv         | distancia | carga  |
| 1  |            |            |              |              |             |           |        |
| 2  | 615 758    | 7 461 949  | 615 558      | 7 461 905    | 12,472 mm/s | 204 m     | 84 Kg  |
| 3  | 615 758    | 7 461 949  | 615 516      | 7 461 785    | 10,095 mm/s | 292 m     | 84 Kg  |
| 4  | 615 758    | 7 461 949  | 615 462      | 7 461 778    | 6,397 mm/s  | 341 m     | 84 Kg  |
| 5  | 615 758    | 7 461 949  | 615 413      | 7 461 761    | 4,370 mm/s  | 393 m     | 84 Kg  |
| 6  | 615 758    | 7 461 949  | 615 324      | 7 461 722    | 4,931 mm/s  | 489 m     | 84 Kg  |
| 7  | 615 758    | 7 461 949  | 615 236      | 7 461 667    | 2,628 mm/s  | 593 m     | 84 Kg  |
| 8  | 615 777    | 7 461 980  | 615 558      | 7 461 905    | 13,386 mm/s | 231 m     | 187 Kg |
| 9  | 615 777    | 7 461 980  | 615 516      | 7 461 785    | 7,328 mm/s  | 325 m     | 187 Kg |
| 10 | 615 777    | 7 461 980  | 615 462      | 7 461 778    | 7,879 mm/s  | 374 m     | 187 Kg |
| 11 | 615 777    | 7 461 980  | 615 413      | 7 461 761    | 5,572 mm/s  | 424 m     | 187 Kg |
| 12 | 615 777    | 7 461 980  | 615 324      | 7 461 722    | 8,159 mm/s  | 521 m     | 187 Kg |
| 13 | 615 777    | 7 461 980  | 615 236      | 7 461 667    | 3,209 mm/s  | 625 m     | 187 Kg |
| 14 | 615 800    | 7 461 887  | 615 558      | 7 461 905    | 1,140 mm/s  | 243 m     | 70 Kg  |
| 15 | 615 800    | 7 461 887  | 615 324      | 7 461 722    | 2,370 mm/s  | 504 m     | 70 Kg  |
| 16 | 615 803    | 7 461 885  | 615 558      | 7 461 905    | 7,036 mm/s  | 246 m     | 75 Kg  |
| 17 | 615 803    | 7 461 885  | 615 516      | 7 461 785    | 3,326 mm/s  | 303 m     | 75 Kg  |
| 18 | 615 803    | 7 461 885  | 615 462      | 7 461 778    | 4,229 mm/s  | 357 m     | 75 Kg  |
| 19 | 615 803    | 7 461 885  | 615 413      | 7 461 761    | 3,490 mm/s  | 409 m     | 75 Kg  |
| 20 | 615 803    | 7 461 885  | 615 324      | 7 461 722    | 4,898 mm/s  | 506 m     | 75 Kg  |
| 21 | 615 803    | 7 461 885  | 615 236      | 7 461 667    | 2,126 mm/s  | 607 m     | 75 Kg  |
| 22 | 615 803    | 7 461 885  | 615 558      | 7 461 905    | 7,036 mm/s  | 246 m     | 145 Kg |
| 23 | 615 803    | 7 461 885  | 615 516      | 7 461 785    | 3,326 mm/s  | 303 m     | 145 Kg |
| 24 | 615 803    | 7 461 885  | 615 462      | 7 461 778    | 4,229 mm/s  | 357 m     | 145 Kg |
| 25 | 615 803    | 7 461 885  | 615 413      | 7 461 761    | 3,490 mm/s  | 409 m     | 145 Kg |
| 26 | 615 803    | 7 461 885  | 615 324      | 7 461 722    | 4,898 mm/s  | 506 m     | 145 Kg |
| 27 | 615 803    | 7 461 885  | 615 236      | 7 461 667    | 2,126 mm/s  | 607 m     | 145 Kg |
| 28 | 615 828    | 7 461 939  | 615 558      | 7 461 905    | 12,627 mm/s | 272 m     | 159 Kg |
| 29 | 615 828    | 7 461 939  | 615 516      | 7 461 785    | 16,756 mm/s | 348 m     | 160 Kg |
| 30 | 615 828    | 7 461 939  | 615 462      | 7 461 778    | 10,702 mm/s | 400 m     | 161 Kg |
| 31 | 615 828    | 7 461 939  | 615 413      | 7 461 761    | 6,830 mm/s  | 451 m     | 162 Kg |
| 32 | 615 946    | 7 462 081  | 615 558      | 7 461 905    | 11,808 mm/s | 426 m     | 143 Kg |
| 33 | 615 946    | 7 462 081  | 615 516      | 7 461 785    | 6,586 mm/s  | 522 m     | 143 Kg |
| 34 | 615 946    | 7 462 081  | 615 462      | 7 461 778    | 8,129 mm/s  | 571 m     | 143 Kg |
| 35 | 615 946    | 7 462 081  | 616 264      | 7 462 150    | 13,290 mm/s | 325 m     | 143 Kg |
| 36 | 615 946    | 7 462 081  | 615 413      | 7 461 761    | 3,521 mm/s  | 621 m     | 143 Kg |
| 37 | 615 946    | 7 462 081  | 616 403      | 7 462 090    | 5,396 mm/s  | 457 m     | 143 Kg |
| 38 | 616 053    | 7 462 177  | 615 558      | 7 461 905    | 5,964 mm/s  | 565 m     | 310 Kg |
| 39 | 616 053    | 7 462 177  | 615 516      | 7 461 785    | 8,118 mm/s  | 665 m     | 310 Kg |

Figura 24 – Forma dos dados de entrada

De seguida, com base nos dados importados, procede-se à determinação da distância escalonada. Na presente rotina, recorreremos à distância escalonada quadrática, pelos motivos mencionados no Capítulo 4.3.2.

### 6.2.2. DETERMINAÇÃO DA LEI DE ATENUAÇÃO DE CADA SISMÓGRAFO

Com os dados importados, executa-se a organização destes em função dos sismógrafos. Assim sendo, para cada sismógrafo que cumpra com o número mínimo de amostras, é criada uma variável denominada “*Sismografo*” onde são armazenadas as características deste. Assim sendo, para cada variável, são armazenadas:

- Coordenadas do sismógrafo;
- Velocidades de propagação de pico amostradas pelo sismógrafo;
- Distâncias entre os desmontes amostrados e o sismógrafo;
- Cargas máximas instantâneas de cada desmonte amostrado;
- Distâncias escalonadas;
- Coordenadas dos desmontes.

Desta forma, com base nos dados armazenados, é possível determinar a lei de atenuação para cada sismógrafo. Para isso, desenvolvemos uma *function* que, recorrendo ao logaritmo das distâncias escalonadas em função do logaritmo das velocidades de propagação de pico amostradas, nos permite ajustar uma reta utilizando o método dos mínimos quadrados, e com base numa técnica numérica, desenvolvida numa outra *function* trasladamos esta até ao intervalo de confiança requerido, sendo neste caso particular, considerado um intervalo de confiança de 95%. Nos Anexos B e C, encontra-se descritas as *functions* enunciadas.

Com base nos dados do presente caso de estudo, foi criado um conjunto de sete variáveis, correspondendo a cada sismógrafo que cumpre com o número mínimo de amostras requeridas.

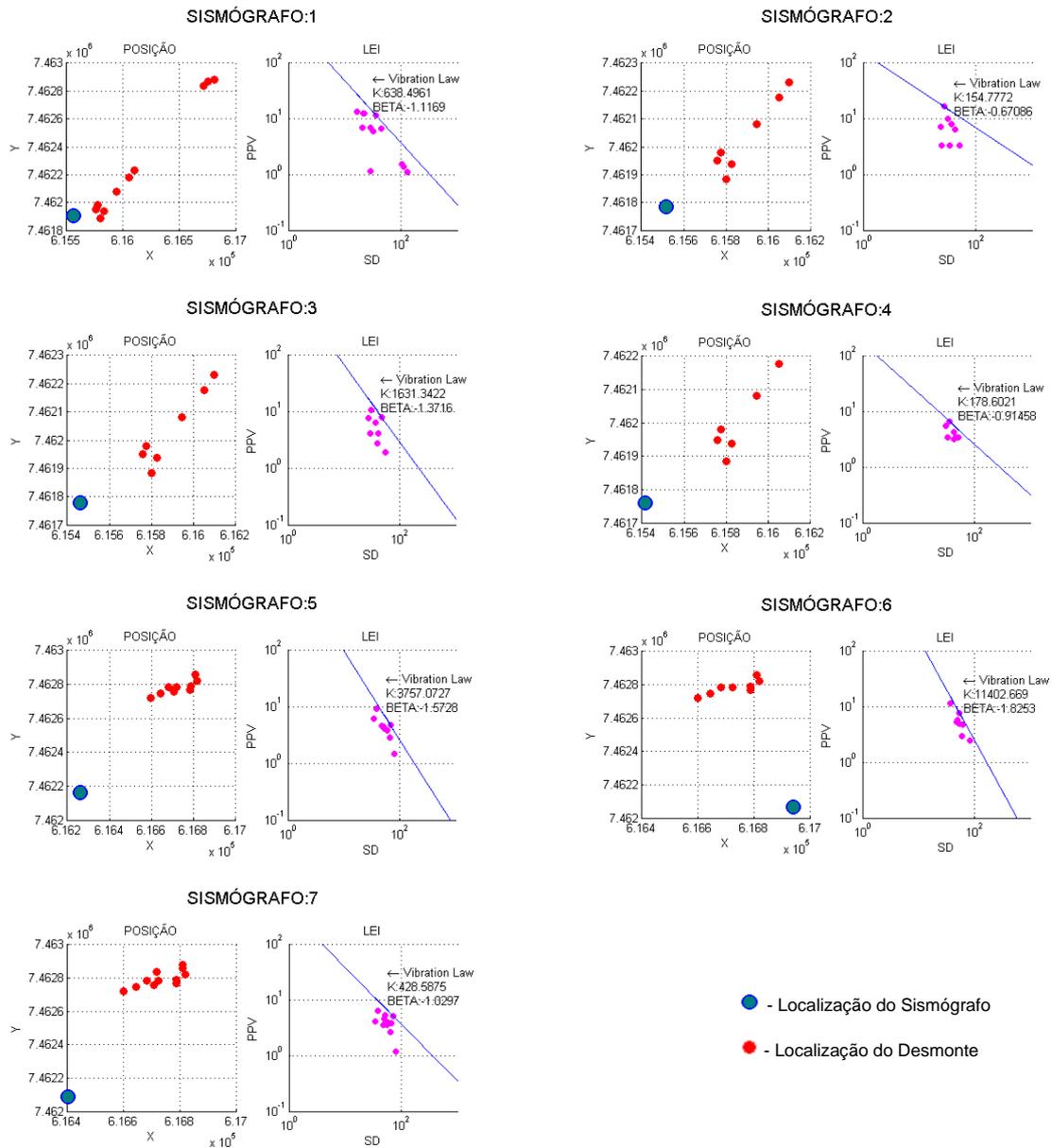


Figura 25 – Localização dos Sismógrafos e Respetivas Leis de Atenuação

São ainda armazenados na variável “*sismografo*”, o  $k$  e  $\beta$  relativo à sua lei de atenuação.

### 6.2.3. DETERMINAÇÃO DAS ÁREAS DE INFLUÊNCIA

A determinação das áreas de influência permite minimizar o esforço de cálculo aquando da escolha da lei de atenuação para a estimação da velocidade de pico na malha definida.

Na rotina desenvolvida, procedeu-se à decomposição espacial de Voronoi. Para isso, recorremos a uma sub-rotina já desenvolvida (`VORONOI`) que permite determinar os limites das áreas de influência. Para garantir que todos os vértices são determinados, procedeu-se à incorporação de pontos auxiliares para garantir o fecho das áreas de influência. Assim sendo, é possível armazenar juntamente com os restantes atributos da variável dos sismógrafos anteriormente criada, os conjuntos de vértices que determinam cada área de influência.

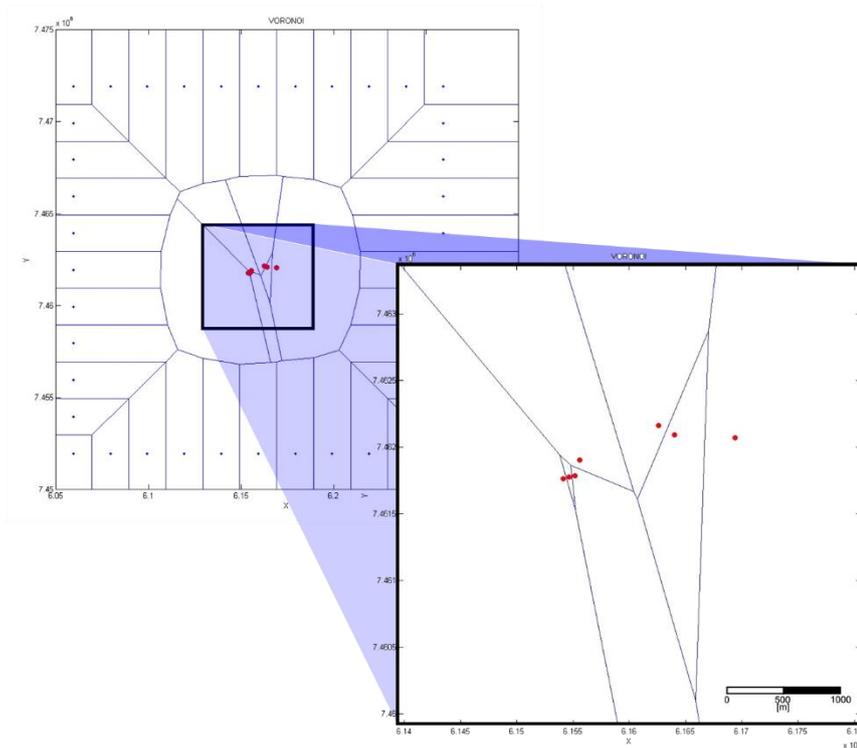


Figura 26 - Metodologia para determinação das áreas de Influência

#### 6.2.4. ESTIMAÇÃO DA VELOCIDADE DE PICO DAS PARTÍCULAS

É, nesta fase que se dá início à estimação da velocidade de pico das partículas no terreno, incorporando os dados da pega de fogo que se pretende estimar. Os dados a incorporar relativos ao desmonte para a realização da estimação são:

- Coordenadas da pega de fogo;
- Carga instantânea máxima;

que são armazenados numa nova variável denominada “pega”.

É ainda criada a malha de estimação em redor da localização da pega de fogo, recorrendo a uma sub-rotina, sendo as matrizes outputs das coordenadas dos pontos estimados também armazenadas na mesma variável.

Seguidamente, realiza-se outra sub-rotina com o propósito de efetuar a estimação das PPV’s para todos os pontos da malha definida anteriormente, recorrendo à Equação 14:

$$\hat{u}_t = k_s \cdot \left( \frac{D_t}{\sqrt[2]{W_t}} \right)^{\beta_s} \quad (\text{Eq. 14})$$

Desta forma, a mesma sub-rotina verifica qual o polígono em que o ponto em estudo se insere, recolhendo o  $k$  e  $\beta$  referente a esse polígono e calcula finalmente a velocidade de pico.

De salientar que o polígono selecionado permite-nos saber qual o sismógrafo com menor distância ao ponto estimado. Conforme foi referido anteriormente, este procedimento permite reduzir o esforço de processamento, evitando o cálculo de todas as distâncias entre o ponto a estimar e os restantes pontos estimadores.

Nos Anexos D e E, encontram-se as *functions* desenvolvidas para a criação da malha de amostragem e para a estimação das velocidades de pico das partículas.

Por último, para uma visualização mais esclarecedora da atenuação das vibrações no terreno, a ferramenta desenvolvida permite obter diversas evidenciações gráficas da estimação executada, como se pode observar através da Figura 27:

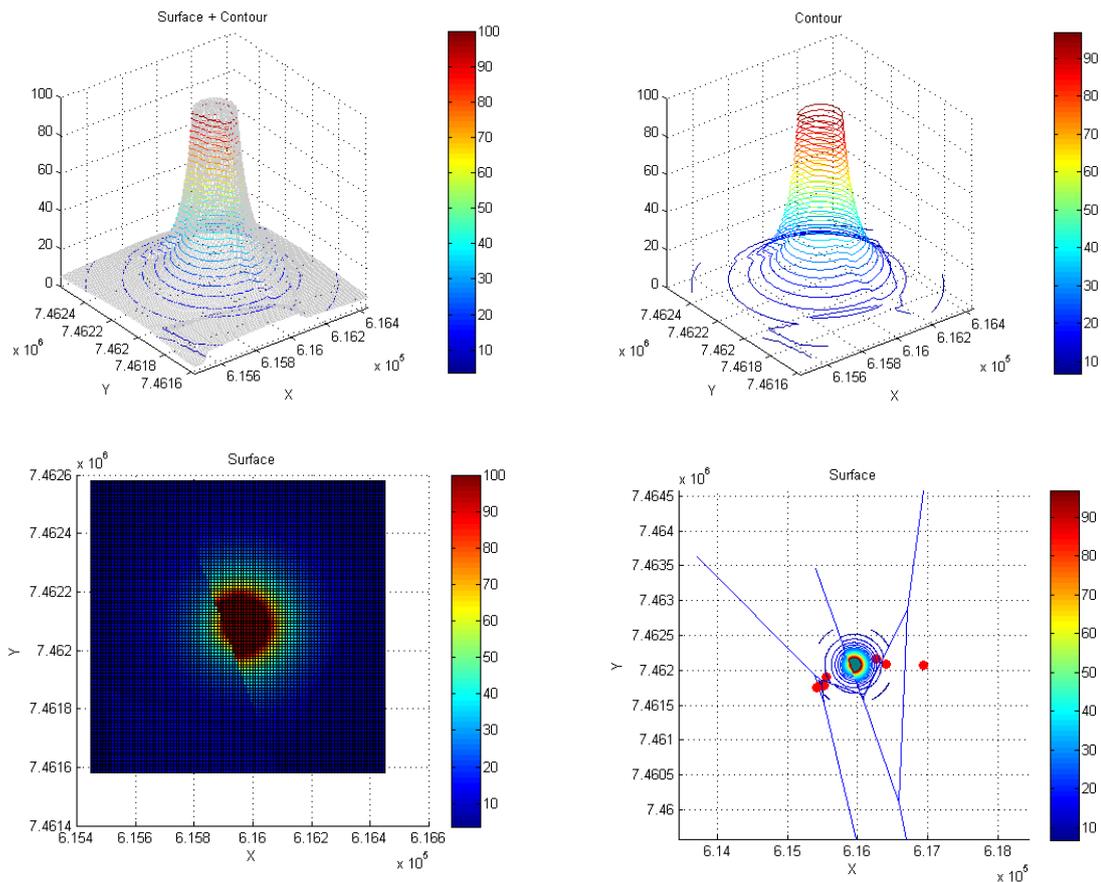


Figura 27 – Demonstrações gráficas da atenuação das vibrações no terreno

### 6.3. ANÁLISE DE RESULTADOS

Na metodologia convencional, o exercício de estimação baseia-se num princípio de isotropia, ou seja, considera-se que as propriedades da área em análise se mantêm constantes em todas as direções. Significa isto, que as vibrações, independentemente da localização onde o desmonte ocorre, tem uma atenuação constante ao longo da área de propagação. Este fenómeno deve-se, sobretudo, ao facto de considerar uniforme toda a área onde a pega de fogo ocorre, isto é, como se das mesmas propriedades do material se tratassem. Seguidamente, demonstra-se graficamente na Figura 28 a metodologia tradicional para simplificar a interpretação dos aspetos enunciados.

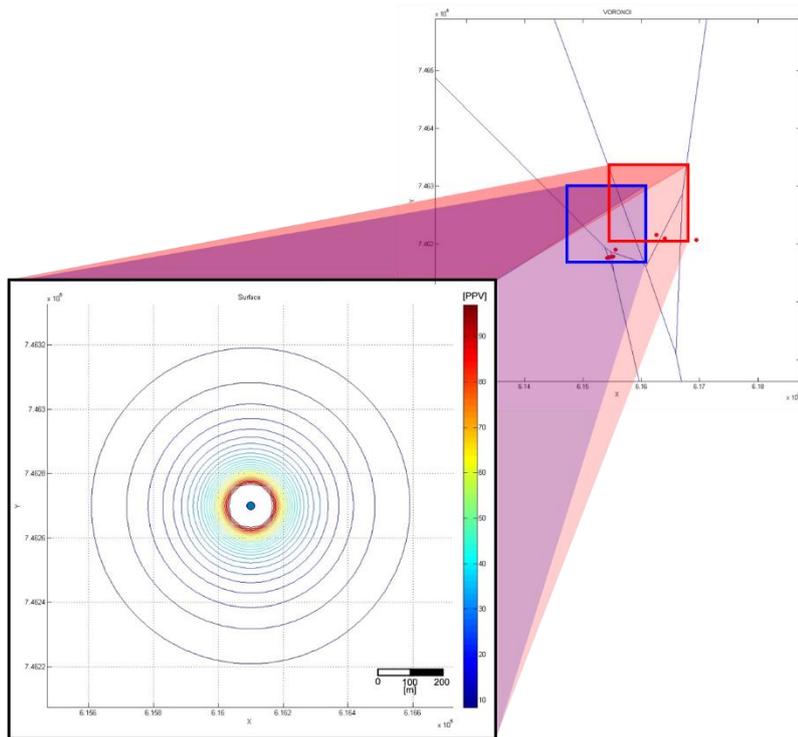


Figura 28 - Estimação da PPV através da metodologia tradicional em localizações diferentes

A representação gráfica, de facto, concorda com os elementos anteriormente explicados. Aqui são ilustradas duas áreas, cada uma com uma localização distinta (quadrado vermelho e o quadrado azul), mas ambas contendo a mesma lei de atenuação de vibrações no terreno,  $\dot{u} = 1081 \cdot (SD)^{-1,249}$ . Quer-se com isto dizer que, independentemente da localização de um desmonte, esta metodologia entende que o comportamento e características das vibrações serão sempre as mesmas. Para uma execução correta desta metodologia, é então condição necessária supor que todo o terreno em estudo seja composto pelo mesmo tipo de material. Tal sucede, por exemplo, com a velocidade de pico da partícula, que sofre uma diminuição gradual, igual em todos os desmontes que ocorrem na área em estudo.

Por outro lado, a abordagem proposta tem em conta a variabilidade espacial das características do terreno. Nesta ótica, de acordo com a nova metodologia apresentada, a área de desmonte não é vista como um todo, mas sim como uma decomposição do terreno em áreas de influência adstritas aos sismógrafos. Estas revelam entre si leis de atenuação próprias e distintas, ou seja, dentro de uma área circundante ao sismógrafo é assumido que as propriedades se mantêm invariáveis - visão isotrópica.

Todavia, quando analisadas em conjunto, concebe-se um cenário anisotrópico, pois as características de cada área podem ser divergentes das adjacentes. Como tal, neste modelo são impostas várias leis de atenuação relativas às várias áreas de influência, o que aumenta o grau de complexidade da análise executada.

Para não se perder o elo de ligação com a demonstração gráfica da metodologia convencional e se conseguir assim também apurar diferenças entre os dois modelos, foram consideradas as mesmas pegadas de fogo com as mesmas características da Figura 28 (carga máxima instantânea e coordenadas) para se representar a nova metodologia

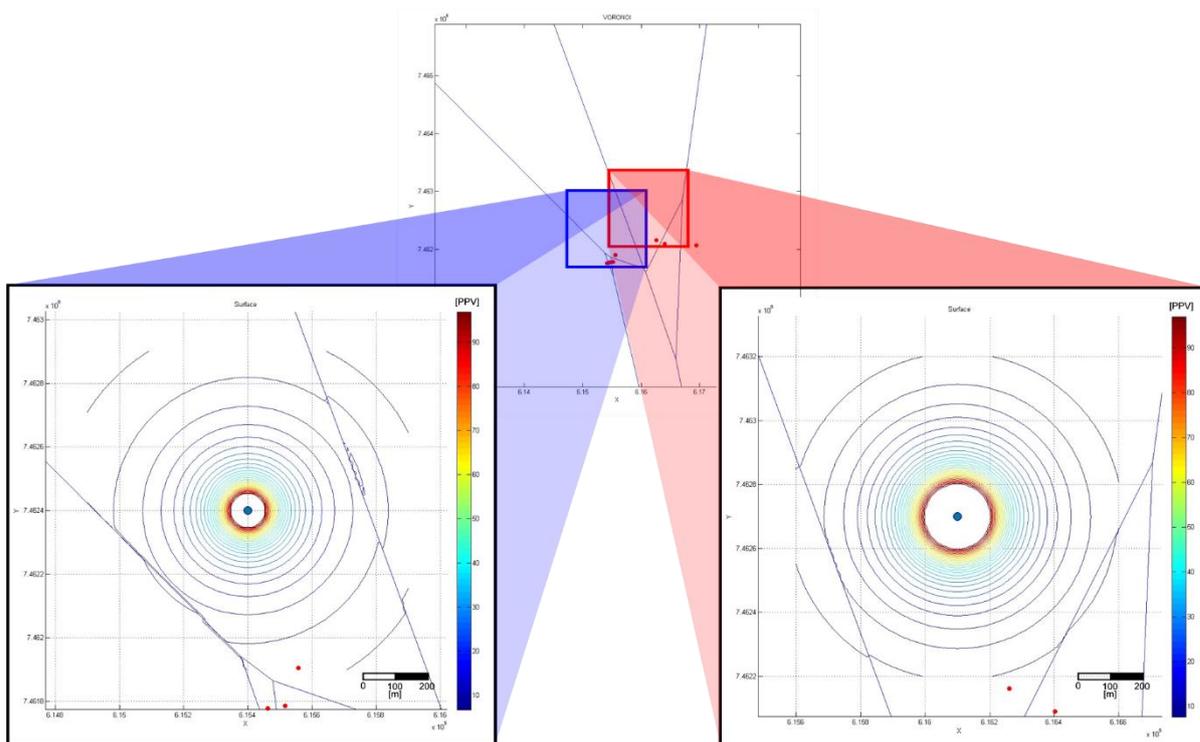


Figura 29 - Estimação da PPV através da nova metodologia em áreas de influência distintas

Na figura 26, ainda que sejam representadas as mesmas áreas da figura 25, verificamos que as leis de atenuação das vibrações têm comportamentos diferentes. No caso da área delimitada a azul correspondendo ao sismógrafo 1, obtemos a lei  $\dot{u} = 638,5 \cdot (SD)^{-1,117}$  e no caso da área a vermelho, correspondendo ao sismógrafo 5, obtemos a lei  $\dot{u} = 3757,1 \cdot (SD)^{-1,573}$ . Demonstra-se assim, que as duas zonas são constituídas por materiais diferentes. Este aspeto reveste-se de extrema importância, pois os terrenos apresentam uma grande diversidade no que toca as características geológicas e geotécnicas que, por sua vez, influenciam grandemente a propagação de vibrações. Defendendo esta linha de raciocínio, do ponto de vista teórico, alcança-se um resultado com um menor erro de estimação do que na abordagem anterior. Efetivamente, este é o ponto de divergência entre a metodologia convencional e a apresentada nesta dissertação, resultando daqui a sua pertinência.

Através de outra representação gráfica (Figura 30), colocando lado a lado as duas metodologias associadas ao mesmo desmorte, é possível comparar mais detalhadamente os resultados obtidos.

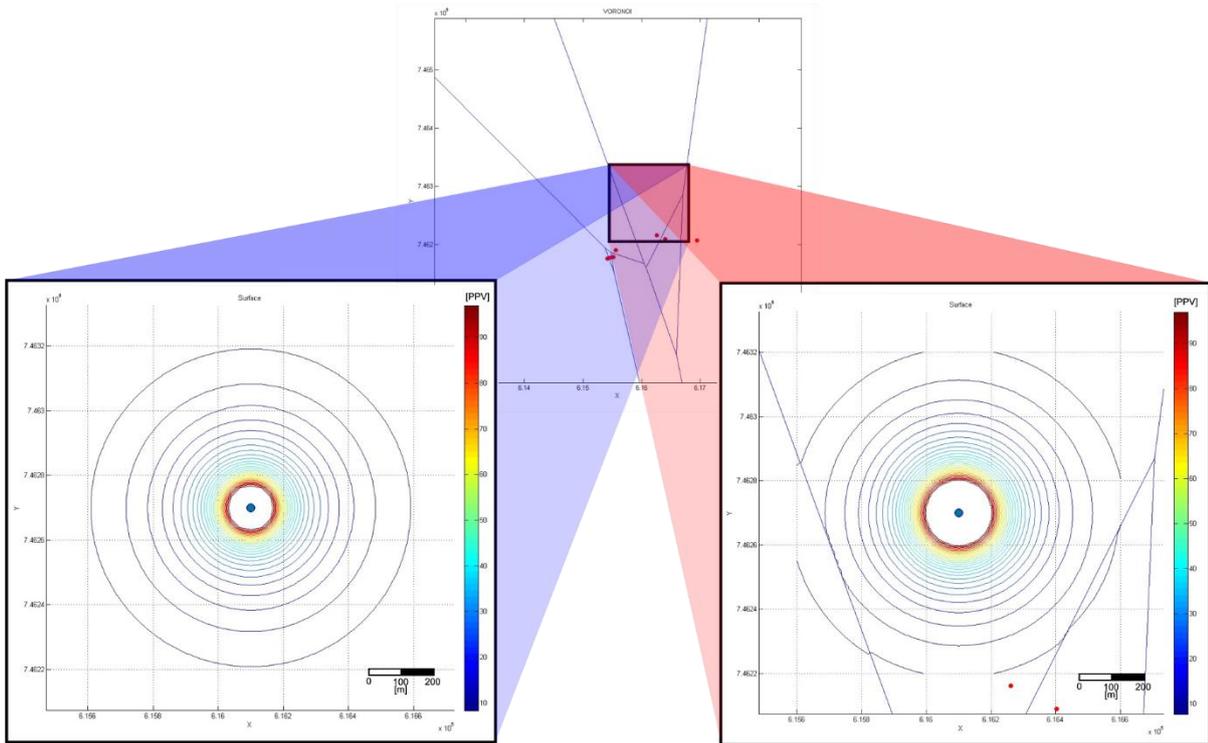


Figura 30 - Previsão da Velocidade de Pico das Partículas das metodologias em estudo no sismógrafo 5

Ao nível da estimação, observa-se uma nítida diferença nos resultados obtidos dos dois modelos (lado esquerdo, modelo convencional e lado direito, novo modelo). O modelo tradicional apresenta uma subestimação nesta área de influência quando comparada com a metodologia proposta. Esta ilação pode ser obtida com maior rigor analisando a Figura 31.

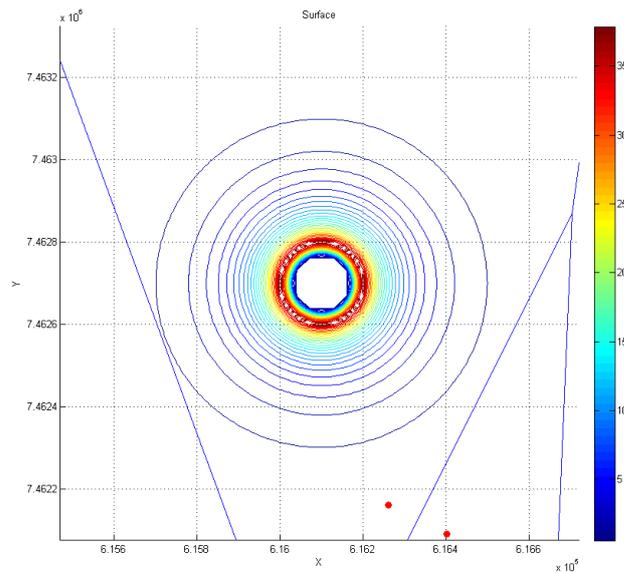


Figura 31 - Diferença das duas metodologias em estudo na área de influência do sismógrafo 5

Com auxílio da figura acima é possível ainda quantificar o erro entre os dois modelos, bastando subtrair os valores estimados. Outro dado observável através da figura 28, é que a maior variabilidade entre as estimativas (zona a vermelho) ocorre na proximidade do desmonte.

No caso concreto da Figura 27 e 28, a diferença entre as velocidades de pico das partículas estimadas chega a ser próxima de 35mm/s, representando uma discrepância relativa de aproximadamente 45%. Deste modo, a nova abordagem prevê que a vibração que atuará sobre o terreno será superior ao modelo convencional. Este dado reveste-se de grande importância, pois assim podemos afirmar com uma maior confiança que os impactos provocados pelo desmorte se situam dentro dos intervalos exigidos por lei e segurança.

No entanto, também se pode atingir uma situação inversa, como no caso da Figura 29, em que o modelo tradicional apresenta uma sobrestimação quando comparada com a metodologia proposta para a mesma área de influência. Significando isto, pela mesma ordem de ideias, que o novo modelo prevê que a magnitude das vibrações seja menor. Esta informação também pode ser vantajosa ao nível da produção, pois com esta estimativa é possível, a título de exemplo, potenciar o aumento da carga explosiva, tendo em vista um aumento da produtividade.

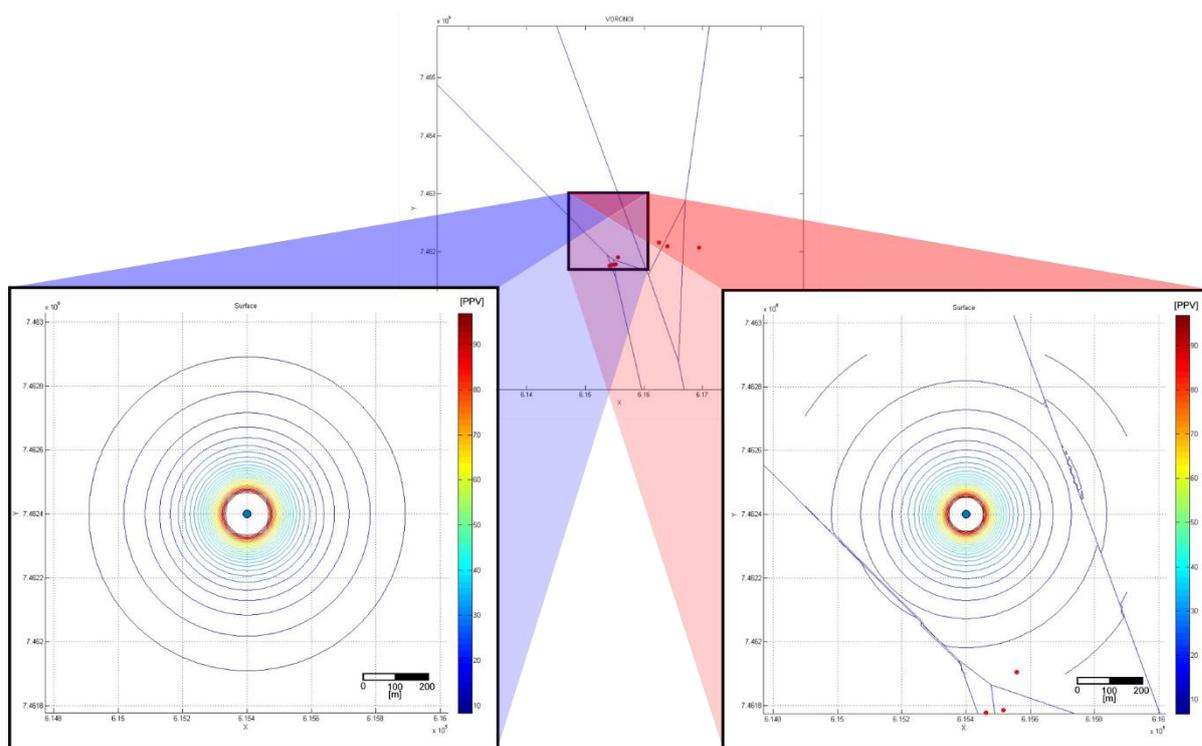


Figura 32 - Previsão da Velocidade de Pico das Partículas das metodologias em estudo no sismógrafo 1

De igual modo, recorrendo ao procedimento descrito para a execução da Figura 31, é possível executar a representação gráfica exposta na Figura 33:

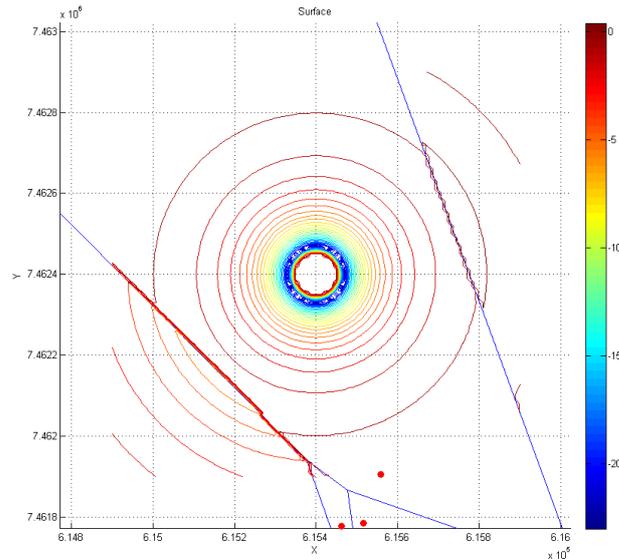


Figura 33 - Diferença das duas metodologias em estudo na área de influência do sismógrafo 1

Analisando este resultado, é possível atestar a existência de uma sobrestimação da velocidade de pico das partículas recorrendo à metodologia tradicional comparativamente com o método de estimação que nos propomos apresentar. Efetivamente, a diferença máxima calculada entre as metodologias apresentadas, nesta área de influência designada, é superior a 20mm/s.

### 6.3.1. VALIDAÇÃO PRELIMINAR DA METODOLOGIA

Para validação do modelo apresentado, optou-se pela execução de uma análise de resíduos, a única técnica estudada para avaliar a exequibilidade deste modelo e qualidade da estimação. A análise centra-se essencialmente na avaliação do erro, ou resíduo, sendo o seu cálculo realizado através da fórmula seguinte:

$$\epsilon_i = \dot{u}_i - \hat{u}_i \quad (\text{Eq. 15})$$

Em que:

- $\dot{u}_i$  corresponde à velocidade de pico das partículas amostrada num determinado desmonte;
- $\hat{u}_i$  corresponde à velocidade de pico das partículas estimada para esse mesmo ponto amostrado, com base na lei de atenuação vigente.

Desta forma, procedeu-se ao cálculo da estimação das PPV's para ambas as metodologias, com base nos parâmetros dos desmontes e do terreno. Assim sendo, seguidamente, apresentam-se as equações para o cálculo dos valores estimados segundo as metodologias tradicional e apresentada, respetivamente:

$$\hat{u}_i = k \cdot \left( \frac{D_i}{\sqrt{W_i}} \right)^\beta \quad (\text{Eq. 16})$$

Em que:

- $D_i$  é a distância entre o desmante e o sismógrafo utilizado na amostragem;
- $W_i$  é a carga instantânea máxima utilizada no desmante amostrado;
- $k$  e  $\beta$  são os parâmetros obtidos para o terreno global.

$$\hat{u}_i = k_s \cdot \left( \frac{D_i}{\sqrt{W_i}} \right)^{\beta_s} \quad (\text{Eq. 17})$$

Em que:

- $D_i$  é a distância entre o desmante e o sismógrafo utilizado na amostragem;
- $W_i$  é a carga instantânea máxima utilizada no desmante amostrado;
- $k_s$  e  $\beta_s$  são os parâmetros obtidos da área de influência onde se situa o sismógrafo utilizado para a amostragem da PPV do desmante em estudo.

Tendo sido efetuado o cálculo dos resíduos, é possível apresentar a distribuição das frequências de forma gráfica, recorrendo a um histograma. Na Figura 34 estão representadas as distribuições de frequência dos resíduos de ambas as metodologias:

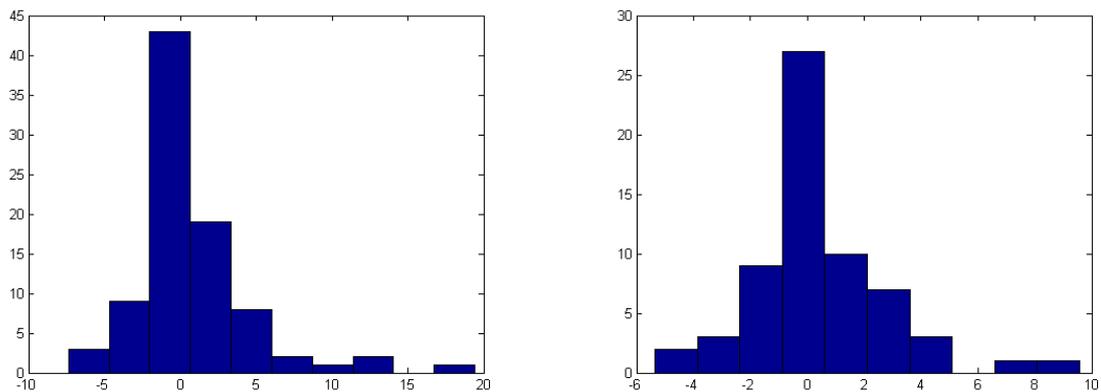


Figura 34 - Histograma dos resíduos segundo o método atual (à esquerda) e apresentada (à direita)

Executando apenas uma análise gráfica dos histogramas, é possível constatar que ambas as distribuições aparentam seguir uma distribuição normal. Esta é condição imperiosa para aceitar a validade da estimação. Prosseguindo com o estudo destes resultados, é legítimo assumir, mais uma vez de forma gráfica, que a variância da dispersão do erro de estimação é menor quando o recurso da metodologia apresentada. Este fator, por si só, já representa uma hipotética melhoria da previsão dos fenómenos vibratórios associados aos desmontes com recurso a explosivos. Contudo, para assegurar convenientemente essa mesma melhoria, comparativamente com os métodos existentes, é necessária a realização de uma análise formal dos resíduos.

### 6.3.2. LIMITAÇÕES DA METODOLOGIA PROPOSTA

A metodologia apresentada, apesar do seu elevado estado de desenvolvimento, apresenta ainda algumas imperfeições que, em tempo oportuno, devem ser limadas.

No que concerne à estimação das PPV's na proximidade dos limites das áreas de influência, a aparição de uma descontinuidade é visível e, quanto maior for a discrepância entre as leis de atenuação contíguas ao limite em estudo, mais é notória essa mesma descontinuidade. Na Figura 35 está descrita uma demonstração representativa deste fenómeno:

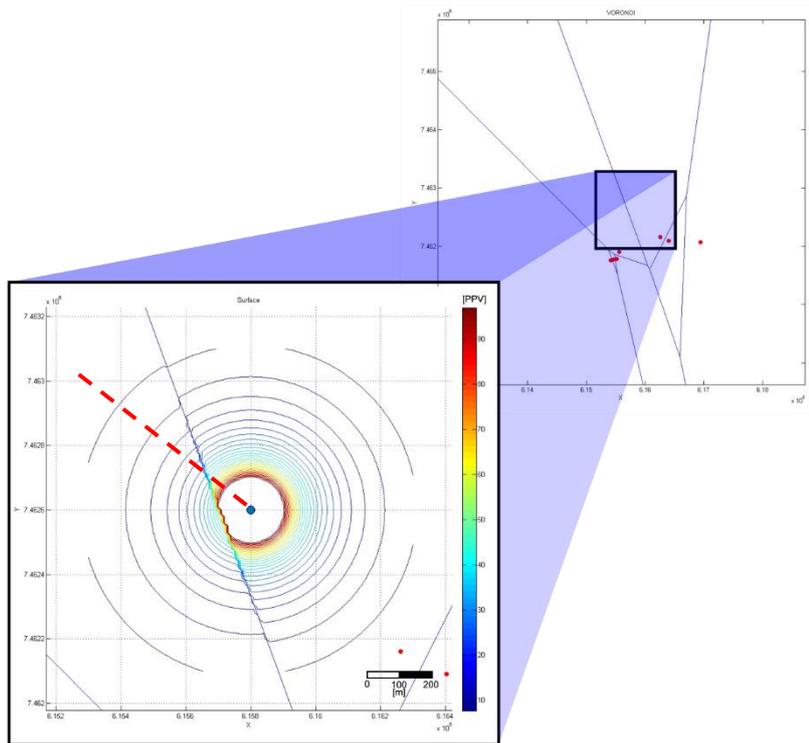


Figura 35 – Descontinuidade na estimação entre duas áreas de influência

Este facto ocorre, pois, quando se executa a estimação numa área de influência que não aquela onde ocorreu o desmonte, esta não tem em conta a atenuação verificada na área anterior. Ou seja, aquando da estimação é assumido que as características do terreno pertencentes à área de influência onde ocorreu o desmonte são iguais às da área onde ocorreu a estimação.

Os gráficos dispostos na Figura 36 apresentam o fator que despoleta a geração desta descontinuidade.

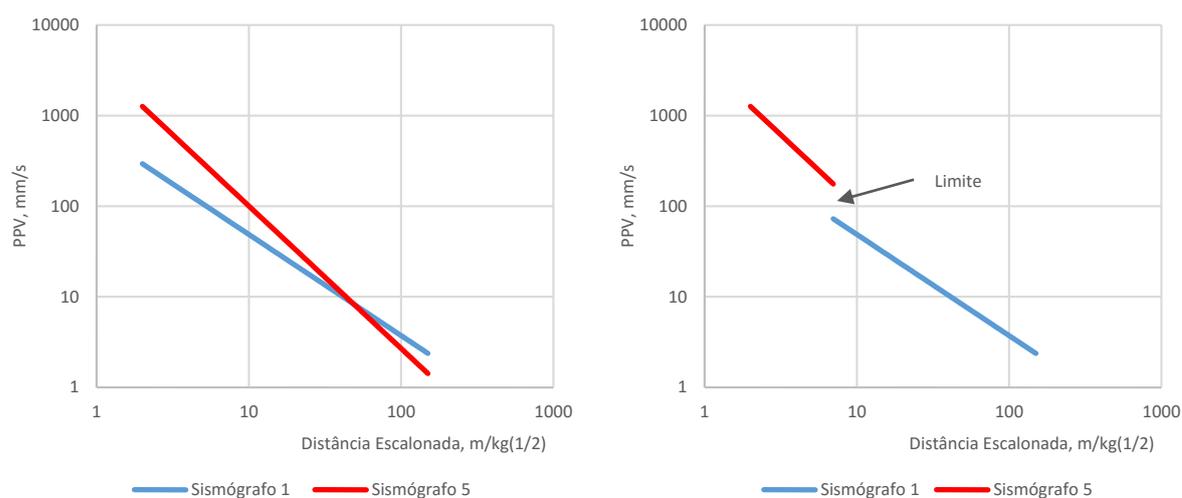


Figura 36 - Leis de Atenuação vigentes nas áreas de influência e Lei de Atenuação na direção assinalada na Figura 35

Para colmatar este defeito na estimação, é necessário incorporar a atenuação verificada na área de influência onde ocorre o desmonte. Do ponto de vista operatório, a resolução deste problema passa pela translação da Lei de Atenuação da área de influência onde ocorre a estimação, de forma a que a interseção das Leis de Atenuação ocorra no contacto entre as áreas de influência.

Desta forma, é obrigatório veicular o conceito de Carga Máxima Instantânea equivalente.

$$W_{eq} = D_L \cdot \left( \frac{k_s}{\dot{u}_L} \right)^{2/\beta_s} \quad (\text{Eq. 18})$$

Em que:

- $W_{eq}$  é a Carga Instantânea Máxima Equivalente a utilizar, no interior na área de influência onde ocorre a estimação;
- $\dot{u}_L$  é a velocidade máxima da partícula estimada no limite entre as duas áreas de influência, calculada recorrendo à lei de atenuação da área onde se insere o desmonte;
- $D_L$  é a distância entre o desmonte e o limite entre as duas áreas de influência;
- $k_s$  e  $\beta_s$  são parâmetros do terreno determinados para a área de influência onde ocorre a estimação.

Executando este procedimento auxiliar, é então possível transladar a Lei de Atenuação vigente na área de influência no local de estimação, com o intuito de garantir que a interseção das duas Leis em estudo se verifique no limite entre as duas áreas de influência.

A Figura 37 demonstra a Lei de Atenuação corrigida, para o cálculo da velocidade de pico das partículas, na direção assinalada na Figura 35:

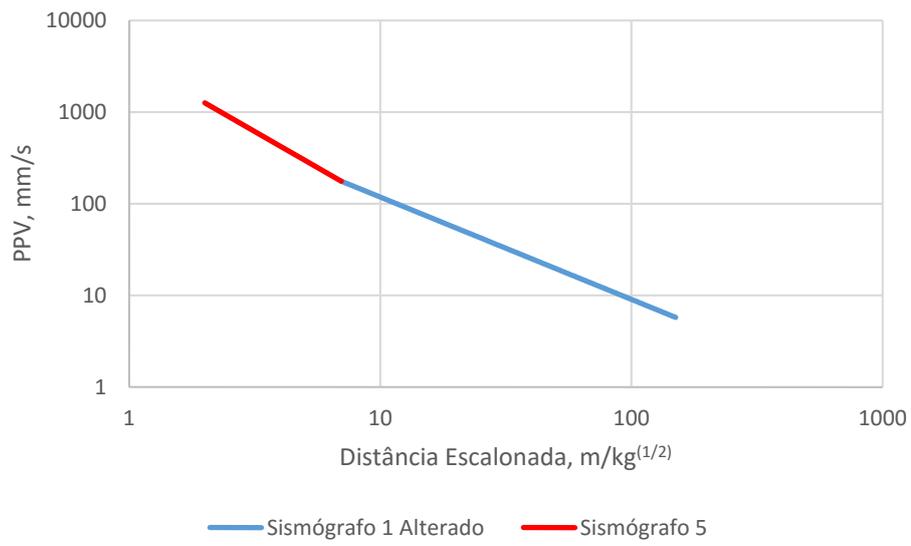


Figura 37 - Lei de Atenuação corrigida na direção assinalada na Figura 35

# 7

## CONCLUSÃO

### 7.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho visa apresentar uma nova metodologia para análise de vibrações provocadas por desmontes com recurso a explosivos. Atualmente, verificamos, de facto, que as práticas tradicionais no setor industrial revelam algumas limitações na precisão deste cálculo das vibrações.

Esta abordagem de decomposição do terreno em áreas de influência, embora se situe meramente no campo teórico, garante que diversas variáveis não controláveis e não consideradas até então nas metodologias tradicionais sejam agora ponderadas, como é caso da variabilidade geológica e geotécnica. Assim, é possível alcançar resultados mais precisos e fidedignos no que concerne às áreas envolventes de desmontes, o que vai ao encontro das necessidades de um sector cada vez mais condicionado por pressões sociais e ambientais.

Em suma, numa avaliação justa de desempenho desta ferramenta, poder-se-á afirmar que os resultados de melhoria obtidos pela conceção teórica deste modelo, convergem vantajosamente com os objetivos gerais a que o projeto se propôs. No entanto, é de salientar que por condicionalismos vários e também por se afastar dos objetivos delimitados nesta dissertação, a execução desta ferramenta não pôde ser alvo de uma implementação prática.

Posto isto, e sabendo à partida que a sua aplicabilidade assenta em moldes mais complexos e que carecem de uma validação prática num contexto industrial, consideramos que uma execução linear e meticulosa de todas as etapas apresentadas neste modelo conduziria a uma modelação mais realista, a qual consideramos que seja um avanço e uma evolução natural pertinente para um sector que prima pelo rigor e transparência de toda a sua atividade.

Por outro lado, sabendo à partida que existe um interesse por parte das empresas em encontrarem soluções cada vez mais seguras, a obtenção de resultados mais precisos e minimizadoras do erro, é vista como uma mais valia, pois pode representar ganhos significativos quer pela otimização de recursos internos para melhores soluções de desmonte, quer pelo cumprimento rigoroso das normas legais do sector. Não se tratando, todavia, de uma proposta final, capaz de contemplar todas as condicionantes existentes no meio ambiente e do sector, com este trabalho procura-se traçar um fio condutor que culmine em ferramentas mais eficientes e eficazes.

## **7.2. TRABALHOS FUTUROS**

Finda a realização deste trabalho, denota-se a existência de um vasto conjunto de temáticas que poderiam complementar o estudo aqui apresentado. No entanto, a variável tempo foi responsável pela incorporação dos limites do âmbito de desenvolvimento desta Dissertação. Desta forma, com o intuito de melhorias futuras, tanto em trabalhos no âmbito académico como no âmbito prático, enunciamos algumas ideias a desenvolver:

- A incorporação da atenuação verificada nas áreas anteriores na rotina desenvolvida, tal como está descrita no presente documento, é uma necessidade para se garantir uma estimacão mais fidedigna;
- Apesar da metodologia assentar em procedimentos lógicos e coerentes, a validacão desta em ambiente prático é necessária para garantir a existência de uma melhoria efetiva do processo de estimacão das vibrações no terreno;
- Independentemente de, em território nacional, a normalizacão vigente não contemplar a frequência de vibração como fator condicionante na análise do movimento oscilatório, julgamos que a incorporacão destas é uma mais valia na complementacão da ferramenta apresentada. Ademais, para a aplicacão desta numa grande parte dos países estrangeiros, é condicão obrigatória a incorporacão da frequência em estudos de vibração;
- Embora a ferramenta apresentada exibia um grau de desenvolvimento bastante elevado, a apresentacão desta sob a forma de uma interface gráfica mais bem construída é necessária para uma melhor experiência, na ótica do utilizador.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

**ABNT. 2005.** *NBR 9653 - Guia para Avaliação dos Efeitos Provocados pelo Uso de Explosivos nas Minerações em Áreas Urbanas - Procedimento.* Rio de Janeiro : s.n., 2005.

**Atlas Copco. 2012.** *Blasthole Drilling in Open Pit Mining.* Garland, TX : Ulf Linder, 2012.

**Aurora, S. and Dey, K. 2010.** Estimation of Near -Field Peak Particle Velocity: A Mathematical Model. *Journal of Geology and Mining Research.* 2010, Vol. 2.

**Austin Powder Company, Inc. 2002.** *The Blaster's Guide: A Resource for the Explosives and Blasting Industry.* Cleveland, OH : s.n., 2002.

**Ayres da Silva, L. 2005.** *A Influência dos Desmontes por Explosivos na Estabilidade dos Taludes.* Córdoba : s.n., 2005.

**Bastos, M. 1998.** *A Geotecnia na Concepção, Projecto e Execução de Túneis em Maciços Rochosos.* Lisboa : Instituto Superior Técnico, 1998.

**Bender, W.** *Understanding Blast Vibration and Airblasts, their Causes, and their Damage Potential.*

**Bernardo, P. and Dinis da Gama, C. 2006.** *Sugestões para Melhoria da Norma Portuguesa de Controle de Vibrações em Construções.* Lisboa : IST, 2006.

**Bernardo, P. 2004.** *Impactes Ambientais do Uso de Explosivos na Escavação de Rochas, com Ênfase nas Vibrações.* Lisboa : Instituto Superior Técnico, 2004.

**Blast Dynamics Inc.** *Predicting and Controlling Blast Vibration.*

**1990.** *Decreto-Lei 162/90.* Lisboa : Casa da Moeda, 1990.

**Deutsches Institut für Normung. 1999.** *DIN 4150: Structural Vibration.* Berlin : s.n., 1999.

**Dinis da Gama, C. 1998.** *Ruídos e Vibrações Ligados à Utilização dos Explosivos e Equipamentos.* Lisboa : Instituto Geológico e Mineiro, 1998. Vol. Comunicações do 1º Seminário de Auditorias Ambientais Internas.

**Dowding, C. 1985.** *Blast Vibration Monitoring and Control.* Englewood Cliffs : Prentice-Hall, Inc., 1985. ISBN 0-13-078197-5.

**Dyno Nobel Asia Pacific Limited. 2011.** *Blasting and Explosives Quick Reference Guide.* Victoria : s.n., 2011.

**Elevly, B. and Arpaz, E. 2010.** *Evaluation of Parameters Affected on the Blast Induced Ground Vibration (BIGV) by using Relation Diagram Method (RDM).* 2010.

**González de Vallejo, L., et al. 2002.** *Ingeniería Geológica.* Madrid : Pearson Educación, 2002.

**Gustafsson, R. 1977.** *Técnica Sueca de Voladuras.* Nora : SPI, 1977.

**Jimeno, C., Jimeno, E. and Carcedo, F. 1995.** *Drilling and Blasting of Rocks.* Rotterdam : A. A. Balkema, 1995.

**Konya, C. 1995.** *Blast Design.* Montville, OH : Intercontinental Development Corporation, 1995.

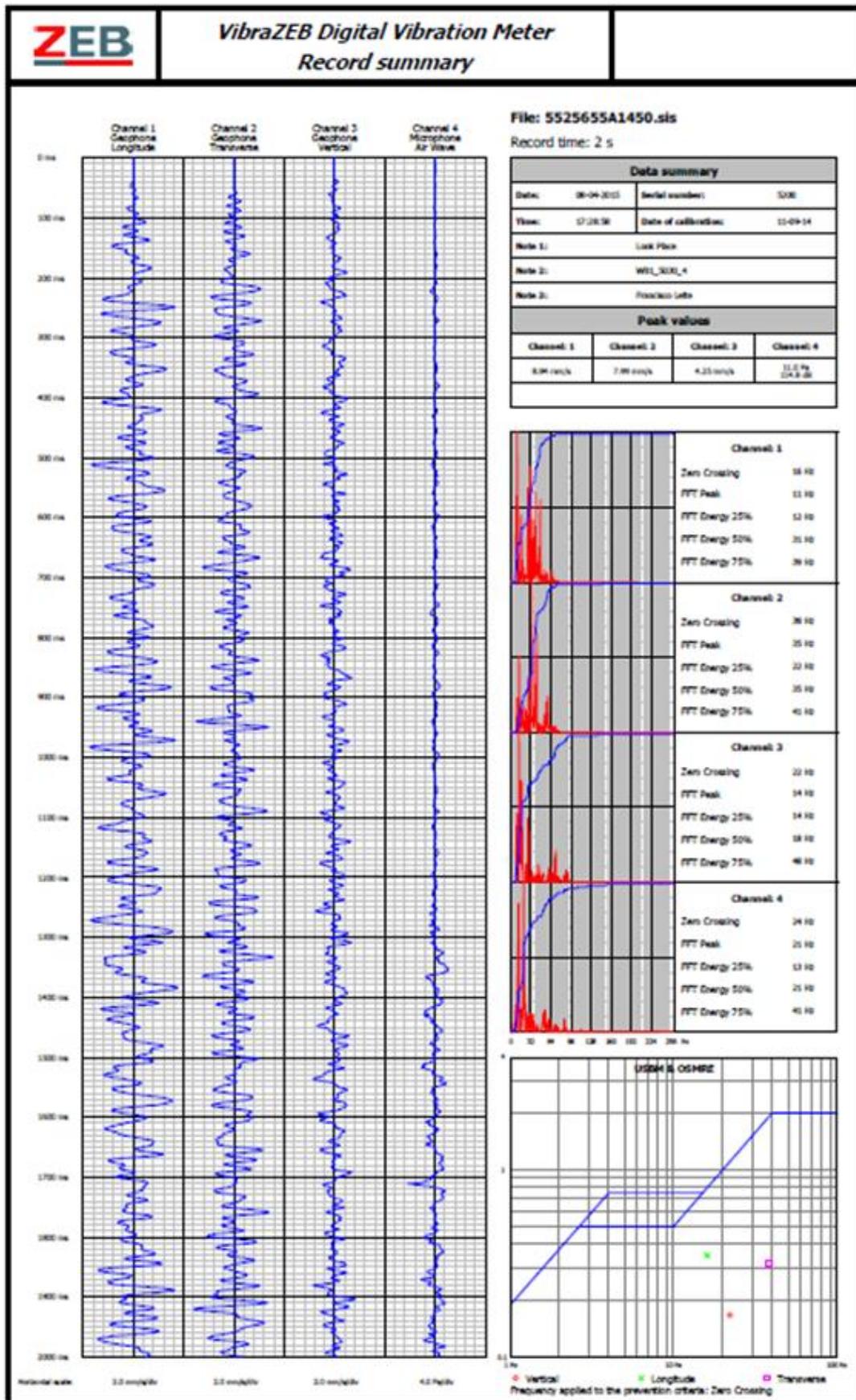
**Kopp, J. and Siskind, D.** *Report of Investigations 1986: Effects of Millisecond-Delay Intervals on Vibration and Airblast From Surface Coal Mine Blasting.* s.l. : United States Department of the Interior.

- Leite, F. 2013.** *Desarrollo de una Herramienta de Diseño de Voladuras en Túneles*. Porto : FEUP, 2013.
- Longo, S. and Dinis da Gama, C.** *Análise de Riscos Inerentes às Vibrações Transmitidas às Estruturas*. Lisboa : s.n.
- Louro, A. 2009.** *Novas Formulações para Leis de Propagação de Vibrações, em Maciços Rochosos, baseados nas Propriedades Termodinâmicas dos Explosivos*. Lisboa : IST Press, 2009.
- Lucca, F. 2003.** *Tight Construction Blasting: Ground Vibration Basics, Monitoring and Prediction*. s.l. : Terra Dinamica LLC, 2003.
- Melo, F. 2010.** *Proposta de Metodologia usando Regressões Lineares no Cálculo dos efeitos Vibratórios do Rebetamento de Explosivos*. Porto : ISEP, 2010.
- Miguens, J. 2011.** *Vibrações Induzidas pela Escavação Subterrânea de Maciços Rochosos com Recurso a Explosivos e seus Eventuais Impactes nas Estruturas*. Vila Real : UTAD, 2011.
- Moura Esteves, J. 2003.** *Sobre a Necessidade de Atualização da Norma Portuguesa 2074*. Lisboa : IST, 2003.
- Richards, A. and Moore, A.** *Blast Vibration Course: Measurement, Assessement, Control*. Eltham : TERROCK Consulting Engineers.
- Rosenthal, M. and Morlock, G. 1987.** *Blasting Guidance Manual*. s.l. : U. S. Department of the Interior, 1987.
- Rustan, A. 1998.** *Rock Blasting Terms and Symbols*. s.l. : A. A. Balkema, 1998.
- Sanchidrián, J. and Muñoz, E. 2000.** *Curso de Tecnología de Explosivos*. Madrid : Fundación Gomez Pardo, 2000.
- Sarsby, R. 2000.** *Environmental Geotechnics*. London : ICE Publishing, 2000.
- Sen, G. 1995.** *Blasting Technology: For Mining and Civil Engineers*. Sydney : University of New South Wales Press Ltd, 1995.
- Silva-Castro, J. 2012.** *Blast Vibration Modeling using Improved Signatures Hole Technique for Bench Blast*. Lexington, Kentucky : Collerge of Engineering at the University of Kentucky, 2012.
- Siskind, D., et al.** *Report of Investigations 8507: Structure Response and Damage Produced by Ground Vibration From Surface Mine Blasting*.
- Spathis, A. 2001.** *Fallacies in Blast Vibration Analysis*. Hunter Valley : s.n., 2001.
- Vallejo, L., et al. 2002.** *Ingeniería Geológica*. Madrid : Pearson Educación, 2002.

**ANEXOS**



# ANEXO A: RELATÓRIO DE VIBRAÇÕES





## ANEXO B: *FUNCTION* GETATTENUATIONLAW

```
function [Beta, K, K0] = getAttenuationLaw(PPV, SD, percentagemDesejada)
    LogSD = log10(SD);
    LogPPV = log10(PPV);

    n=0;
    [n,m] = size(LogSD);

    X = [ones(n,1),LogSD];
    Y = LogPPV;

    %Chamamos o método dos mínimos quadrados
    b = MMQ(X,Y);

    %Devolvemos os valores solicitados
    Beta = b(2);
    K = 10^b(1);
    K0=K;

    K = mudarSignificanciaK(K, Beta, SD, PPV, percentagemDesejada);

end
```



## ANEXO C: *FUNCTION* MUDAR SIGNIFICANCIA K

```
function k = mudarSignificanciaK(K, Beta, SD, PPV, PercentagemDesejada)

    passo = 100;
    [n,m] = size(SD);
    NovoK = K;
    minhaPercentagem = 0;

    while passo > 0.001 || minhaPercentagem < PercentagemDesejada
        vetorTeste = zeros(n,1);
        soma = 0;

        for i= 1:n

            if (NovoK*SD(i)^Beta >= PPV(i))
                vetorTeste(i) = 1;
            end

            soma =soma + vetorTeste(i);
        end

        minhaPercentagem = soma/n;

        if minhaPercentagem >= PercentagemDesejada
            NovoK = NovoK - passo;
            passo = passo/2;
            NovoK = NovoK + passo;
        else
            NovoK = NovoK + passo;
        End

    end
    k = NovoK;

end
```



## ANEXO D: *FUNCTION* MONTARMATRIZATENUACAODEFOGO

```
function [Z, X, Y] = montarMatrizAtenuacaoPegaDeFogo(pega, ...
    listaDeSismografos)

%definimos a extensão das isolinhas
extensao = 1000;
raio = extensao/2;
%malha de 100x100
divisao = 100;

Z = zeros(divisao+1,divisao+1);
X = zeros(divisao+1,divisao+1);
Y = zeros(divisao+1,divisao+1);

for i=0:divisao

    for j=0:divisao
        posicaoX = pega.x - raio + extensao/divisao*i;
        posicaoY = pega.y - raio + extensao/divisao*j;

        X(i+1,j+1)=posicaoX;
        Y(i+1,j+1)=posicaoY;

        Z(i+1,j+1) = getPPV(listaDeSismografos, posicaoX, posicaoY, ...
            pega);
    end
end

end
```



## ANEXO E: *FUNCTION* GETPPV

```
function [ppv] = getPPV(listaDeSismografos, x, y, pega)

[n,m] = size(listaDeSismografos);

for i=1:n
    in = inpolygon(x, y, listaDeSismografos(i).xVoronoi,...
        listaDeSismografos(i).yVoronoi);

    if in == 1
        distancia = ((x-pega.x)^2 + (y-pega.y)^2)^0.5;

        if distancia<10 %a lei de atenuacao nao vale para campos
            proximos, assim que estimamos uma distancia
            minima de 10 m
            distancia = 10;
        end

        SD = distancia/pega.carga^0.5;
        ppv = listaDeSismografos(i).k*SD^listaDeSismografos(i).beta;

        if ppv>100
            ppv=100;
        end
        return;
    end

end

ppv =0;

end
```