

# **Conjugação de métodos de controlo de vibrações em desmontes de rocha com explosivos**

**Maria Nunes Pires**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

**Engenharia Geológica e de Minas**

Orientador: Professor Doutor Pedro Alexandre Marques Bernardo

**Júri**

Presidente: Professora Doutora Maria Matilde Mourão de Oliveira Carvalho Horta  
Costa e Silva

Orientador: Professor Doutor Pedro Alexandre Marques Bernardo

Vogal: Professor Doutor Ruben Sílvio Varela Santos Martins

**Dezembro, 2021**

## **Declaração**

Declaro que o presente documento é um trabalho original da minha autoria e que cumpre todos os requisitos do Código de Conduta e Boas Práticas da Universidade de Lisboa.

# Agradecimentos

Para a realização desta dissertação há várias pessoas e empresas a quem quero agradecer pela oportunidade e apoio que me deram.

Em primeiro lugar ao grupo Secil, em especial à Secil Britas pela oportunidade de estágio e à Orica Mining Services Portugal, S.A., pela cedência de um dos sismógrafos utilizados, do laser 2D e por todo o apoio técnico e disponibilidade apresentada ao longo de todo o trabalho.

Às equipas que me acompanharam nas pedreiras do Vale do Covão e do Outão, por me terem ajudado em tudo o que precisei e me transmitirem tantos conhecimentos, em especial ao Eng.º Sandro Afonso, ao Eng.º João Carvalho, ao António Correia, ao João António, ao João Pedro e ao Bruno Campos.

Nada do que foi feito na pedreira do Outão seria possível sem a autorização, acompanhamento e ajuda do Eng.º José Oliveira. Obrigada pelos almoços na cantina, por todos os trabalhos a mais que me deu, pelas visitas à fábrica e à pedreira, pelas boleias para ir fazer as medições, no geral, por tudo, foi uma pessoa essencial.

Como não me podia esquecer, um agradecimento também ao meu orientador, o Eng.º Pedro Bernardo, por me ter proporcionado esta experiência e por todo o apoio.

A nível pessoal, preciso agradecer aos meus pais, que sempre me apoiaram, incentivaram, acalmaram, deram colo e tornaram possível a realização e finalização desta aventura pela Engenharia, permitindo sempre que eu percorresse os caminhos que escolhia para mim. Ao meu irmão Vasco, simplesmente por ter estado ao meu lado, tornando-me uma pessoa mais forte.

Ao Diogo, por todo o amor e apoio incondicional, pelos conhecimentos e experiências que partilha todos os dias comigo e por ter estado presente desde o primeiro dia, tornando todo este percurso muito mais emocionante.

A toda a minha restante família e amigos, que me apoiam e que hoje estão em festa comigo, um muito obrigada.

Por fim, um agradecimento especial ao meu tio Renato, o pequeno génio da família, o tio e padrinho que estava sempre no mundo dele e que este ano nos apanhou de surpresa e se tornou numa estrelinha brilhante no céu. Graças a ele, o Senhor Professor do Técnico, cresci a ouvir a minha mãe falar nesta escola e no seu prestígio, se não fosse isso nunca teria escolhido à última da hora o curso do Técnico, que até parecia interessante, mas que não fazia ideia do que era, que acabei por gostar e que agora aqui estou a terminar.

Com muito amor, do fundo do coração, obrigada a todos!

Esta página foi deixada propositadamente em branco.

## Resumo

O impacto ambiental correspondente à propagação de vibrações nos terrenos, decorrentes de desmontes a céu aberto com recurso a explosivos, é um dos mais importantes e normalmente o que dá origem ao maior número de queixas provenientes das populações presentes na envolvente de pedreiras.

No presente documento é apresentado um estudo que visa caracterizar a propagação de vibrações em duas pedreiras distintas. Elas localizam-se no Parque Natural da Arrábida e são a pedreira do Outão, onde é extraído calcário e marga e a pedreira do Vale do Covão, onde é extraído apenas calcário.

O trabalho de campo de monitorização de vibrações decorreu entre março e julho de 2021 e resultou na obtenção de 118 registos de vibração e 39 conjuntos de dados laser 2D na pedreira do Outão e 87 registos de vibração e 20 conjuntos de dados laser 2D na pedreira do Vale do Covão.

Para a realização deste estudo recorreu-se ao modelo de Johnson, visando caracterizar a propagação das vibrações nas imediações dos desmontes. Para tal, realizaram-se regressões lineares múltiplas, aos dados de cada pedreira, tendo-se obtido um modelo de previsão de amplitudes de vibração, para cada um dos casos de estudo.

Tentou-se ainda criar um novo modelo, baseado no modelo de Johnson, onde se incluía o afastamento médio da frente de desmonte como variável independente. Este modelo iria conjugar os dados dos registos de vibração com os dados laser 2D, todavia os resultados não foram considerados suficientes, pelo que não foi possível validar o modelo pretendido.

**Palavras-chave:** Desmontes a céu aberto com explosivos; Regressão linear múltipla; Monitorização de vibrações; Modelos de previsão; Pedreira do Outão; Pedreira do Vale do Covão.

## Abstract

The environmental impact resulting from the propagation of blast vibrations in quarries, due to the use of explosives, is of great importance and usually the cause of the most complaints from populations living close to exploitation sites.

In the following document a study is presented with the objective of characterizing the propagation of blast vibrations in two different quarry sites. Both located in Arrabida's Natural Park, they are Outão's quarry, where marl and limestone are exploited, and Vale do Covão's quarry, where only limestone is exploited.

Vibration monitoring field work took place from March to July of 2021 and resulted in obtaining 118 blast vibration records and 39 laser 2D data sets in Outão's quarry and 87 blast vibration records and 20 laser 2D data sets in Vale do Covão's quarry.

For the fulfillment of this study the Johnson Model was used in order to characterize the blast vibrations propagation in the vicinity of the blasts. For such, multiple linear regression was applied to the data sets taken from each quarry, making it possible to develop a prediction model for the vibration's amplitudes for each of the case studies.

In addition, the creation of a new model, based on the Johnson model, taking into account the average burden of the blast pattern as an independent variable was tried. This model would combine blast records data with laser 2d data sets, however the results obtained were considered insufficient and thus didn't allow the validation of such model.

**Keywords:** Surface rock blasting; Multiple linear regression; Vibration monitoring; Prediction models; Outão's quarry; Vale do Covão's quarry.

Esta página foi deixada propositadamente em branco.

# Índice

Resumo.....	iv
Índice de Figuras .....	ix
Lista de Abreviaturas .....	xii
<b>1. Introdução .....</b>	<b>1</b>
1.1. Enquadramento do tema da dissertação .....	1
1.2. Objetivos e organização do estudo .....	2
<b>2. Desmontes a céu aberto .....</b>	<b>3</b>
2.1. Substâncias explosivas na escavação de maciços.....	3
2.1.1. Vibrações.....	6
2.1.2. Importância da frequência nos critérios de dano estrutural .....	9
2.2. Diagrama de fogo .....	11
2.2.1. <i>Laser 2D</i> .....	14
2.3. Medidas de minimização de vibrações .....	15
<b>3. Normas .....</b>	<b>17</b>
3.1. Norma portuguesa NP2074/2015.....	17
3.2. Norma britânica BS 6472-2:2008 Part 2: Blast-induced vibration.....	19
3.3. NP2074/2015 <i>versus</i> Normas similares de outros países .....	21
<b>4. Modelo de previsão de amplitudes de vibrações nos terrenos.....</b>	<b>23</b>
<b>5. Caracterização das pedreiras em estudo e da respetiva envolvente .....</b>	<b>25</b>
5.1. Grupo SECIL .....	26
5.2. Pedreira do Outão - Enquadramento geológico, geográfico e geotécnico .....	27
5.3. Pedreira do Vale do Covão - Enquadramento geológico, geográfico e geotécnico .....	30
<b>6. Metodologia e Monitorização .....</b>	<b>33</b>
6.1. Monitorização na Pedreira do Outão.....	35
6.2. Monitorização na pedreira do Vale do Covão .....	38
<b>7. Caracterização de desmontes realizados .....</b>	<b>41</b>
7.1. Pedreira do Outão .....	41
7.2. Pedreira do Vale do Covão .....	43
<b>8. Análise e discussão dos dados obtidos .....</b>	<b>45</b>
8.1. Registos obtidos <i>versus</i> limites da NP2074 .....	49
8.2. Aplicação do modelo de Johnson aos casos de estudo .....	51
<b>9. Novo modelo de previsão de amplitudes de vibrações .....</b>	<b>57</b>
9.1. Novo modelo incluindo o afastamento médio da frente de desmonte .....	57



<b>10. Conclusões .....</b>	<b>59</b>
10.1. Dificuldades .....	60
10.2. Desenvolvimentos futuros .....	60
<b>Referências .....</b>	<b>61</b>
<b>Anexos.....</b>	<b>65</b>
Anexo A – Procedimento para utilização <i>laser</i> 2D .....	65
Anexo B – Registo de amplitude de vibração exemplificativo ( <i>Event e FFT Report</i> ) .....	66
Anexo C – Base de dados da pedreira do Outão (4 páginas) .....	68
Anexo D – Base de dados da pedreira do Vale do Covão (3 páginas) .....	72
Anexo E – Tabela com dados <i>laser</i> 2D da pedreira do Outão.....	75
Anexo F - Tabela com dados <i>laser</i> 2D da pedreira do Vale do Covão.....	76
Anexo G – Perfil exemplo obtido através dos dados <i>laser</i> 2D.....	77
Anexo H – Relatório de desmonte exemplificativo preenchido pelo técnico responsável .....	78

# Índice de Figuras

Figura 1 - Procedimento a realizar na escavação de maciços com recurso a substâncias explosivas (Bernardo, 2004, adaptado de Dinis da Gama,2003) .....	3
Figura 2 - Zonas que rodeiam uma carga explosiva detonada (segundo Atchison,1968) .....	4
Figura 3 - Sequência temporal de eventos numa detonação em rocha situada na vizinhança de uma face livre (adaptado de Aimone, 1992). .....	5
Figura 4 - Ondas de tensão (Bernardo, 2004) .....	6
Figura 5 - Ondas sísmicas e a sua propagação (Bernardo, 2004) .....	7
Figura 6 - Curvas de amplificação dinâmica (Serra, 2001) .....	10
Figura 7 - Amplificações de vibração, devido a ressonância (adaptado de Jimeno et al, 1995 em Bernardo, 2004).....	10
Figura 8 - Principais parâmetros geométricos de uma escavação a céu aberto (IGM,1999).....	11
Figura 9 - LaserAce1000 Rangefinder a ser utilizado. (Trimble, 2011). .....	14
Figura 10 - Influência do afastamento na geração de vibrações. (Bernardo, 2004).....	15
Figura 11 - Técnicas de redução das vibrações para grandes alturas de bancada (adaptado de Bastos, 2003 em Bernardo, 2004) .....	16
Figura 12 - Comparação dos limites de velocidades para estruturas sensíveis das diferentes normas apresentadas .....	22
Figura 13 - Metodologia para controle de vibrações causadas por detonações em maciços rochosos (Bernardo & Vidal, 2005) .....	24
Figura 14 - Localização geográfica das pedreiras em estudo: a) fotografia aérea de Portugal continental; b) fotografia aérea do Parque Natural da Arrábida; c) fotografia aérea da pedreira Vale do Covão (dentro do polígono vermelho); d) fotografia aérea da pedreira Outão. (Google Earth) .....	25
Figura 15 - Pedreira do Outão.....	27
Figura 16 - Trecho da carta geológica onde se localiza a pedreira do Outão (Carta geológica de Setúbal: 38-B).....	28
Figura 17 - Pedreira do Vale do Covão.....	30
Figura 18 - Trecho da carta geológica onde se localiza a pedreira do Vale do Covão (Carta geológica de Setúbal: 38-B).....	31
Figura 19 - Instalação do sismógrafo Micromate no escritório da pedreira do Vale do Covão .....	33
Figura 20 - Instalação do sismógrafo Minimate no Forte Velho do Outão.....	33
Figura 21 - Geofone triaxial (DIN) utilizado .....	34
Figura 22 - Locais dos desmontes na pedreira do Outão durante a monitorização (AutoCad).....	35

Figura 23 - Localização dos locais de monitorização na pedreira do Outão. (Google Earth) .....	36
Figura 24 - Local A: Bomba de gasolina da pedreira (Outão).....	37
Figura 25 - Local B: Ponte (Outão) .....	37
Figura 26 - Local C: Forte Velho do Outão (Outão) .....	37
Figura 27 - Local D: edifícios de apoio às antenas de telecomunicações (Outão).....	37
Figura 28 Local F: Pateo da Rasca (Outão).....	37
Figura 29 - Local H: Capela do Vale da Rasca (Outão).....	37
Figura 30 - Local I: Edifício de Comando da Fábrica do Outão (Outão).....	37
Figura 31 - Locais dos desmontes na pedreira do Vale do Covão durante a monitorização (Google Earth).....	38
Figura 32- Localização dos locais de monitorização na pedreira Vale do Covão. (Google Earth).....	39
Figura 33 - Local A: Escritório (V. Covão).....	40
Figura 34 - Local B: Antigo refeitório de uma antiga pedreira (V. Covão) .....	40
Figura 35 - Local C: Antigo curral (V. Covão) .....	40
Figura 36 - Local D: Rua Sra. do Carmo (V. Covão) .....	40
Figura 37 - Local E: Escola da aldeia das Pedreiras (V. Covão) .....	40
Figura 38 - Local F: Calçada das Oliveiras (V. Covão).....	40
Figura 39 - Local G: Rua Terras da Eira nº77 (V. Covão) .....	40
Figura 40 - Local H: Rua Terras da Eira nº91 .....	40
Figura 41 - Desmorte nº 108.21 da pedreira do Outão imediatamente após o carregamento dos furos .....	42
Figura 42 - Face livre do desmorte nº 108.21 da pedreira do Outão .....	42
Figura 43 - Temporização do desmorte nº 108.21 da pedreira do Outão.....	42
Figura 44 - Desmorte nº 81.21 da pedreira do Vale do Covão imediatamente após o carregamento dos furos.....	44
Figura 45 - Face livre do desmorte nº 81.21 da pedreira do Vale do Covão .....	44
Figura 46 - Temporização do desmorte nº 81.21 da pedreira do Vale do Covão.....	44
Figura 47 - Representação gráfica das velocidades de vibração do Outão, separadas por intervalos de carga máxima por retardo, com outliers.....	46
Figura 48 - Representação gráfica das velocidades de vibração do Outão, separadas por intervalos de carga máxima por retardo, sem outliers.....	47
Figura 49 - Representação gráfica das velocidades de vibração do Vale do Covão, separadas por intervalos de carga máxima por retardo, com outliers .....	47

Figura 50 - Representação gráfica das velocidades de vibração do Vale do Covão, separadas por intervalos de carga máxima por retardo, sem outliers .....	48
Figura 51 - Confronto entre os registos de vibração da pedreira Outão e a NP2074.....	49
Figura 52 - Confronto entre os registos de vibração da pedreira Vale do Covão e a NP2074.....	50
Figura 53 - Realização da regressão linear múltipla no software SPSS .....	51
Figura 54 - Resultados da regressão linear múltipla realizada no SPSS aos dados do Outão.....	52
Figura 55 - Resultados da regressão linear múltipla realizada no SPSS aos dados do Vale do Covão. ....	53
Figura 56 - Confronto gráfico dos coeficientes teóricos e os obtidos para a pedreira Outão .....	55
Figura 57 - Confronto gráfico dos coeficientes teóricos e os obtidos para o Vale do Covão .....	56

## Índice de Tabelas

Tabela 1 - Dimensionamento geométrico de diagramas de fogo segundo Ash (adaptado Dinis da Gama, 1998).....	12
Tabela 2 - Altura da bancada em função do diâmetro do furo (adaptado de IGM,1999, em Bernardo, 2004).....	12
Tabela 3 - Valores de velocidade limite recomendados na NP2074/2015, em mm/s .....	18
Tabela 4 - Limites de magnitudes para vibrações segundo a resposta humana até três eventos vibratórios por dia (adaptado de BS 6472-2:2008) .....	20
Tabela 5 - Resumo das normas NP2074/2015, USBM RI 8507, DIN 4150 (adaptado Luz, 2017) .....	21
Tabela 6 - Características gerais do diagrama de fogo do desmonte nº 108.21 da pedreira do Outão.....	41
Tabela 7 - Características gerais do diagrama de fogo do desmonte nº 81.21 da pedreira do Vale do Covão .....	43
Tabela 8 - Tabela resumo dos coeficientes a, b e c para cada caso de estudo.....	54
Tabela 9 - Valores característicos para os coeficientes a,b e c do calcário (Dinis da Gama, 1998)....	54
Tabela 10 - Tabela resumo dos coeficientes do novo modelo sugerido.....	58

## Lista de Abreviaturas

Todas as abreviaturas vão sendo descritas à medida que vão aparecendo neste texto, todavia na tabela seguinte é possível ver o significado de todas as utilizadas e as suas unidades do Sistema Internacional.

Abreviatura	Significado	Unidade
$\alpha$	Ângulo de inclinação das bancadas a céu aberto	$^{\circ}$ (grau)
$\beta$	Taxa de amortecimento de uma estrutura	%
$\rho$	Massa volúmica	g/cm <sup>3</sup>
$\sigma$	Tensão	Pa
$\emptyset_f$	Diâmetro da furação	mm
a,b,c	Constantes do modelo de Johnson	adimensionais
A	Afastamento	m
$c_s$	Velocidade de propagação das ondas transversais	m/s
$c_p$	Velocidade de propagação das ondas longitudinais	m/s
D	Distância	m
$f$	Frequência dominante de vibração	Hz
$f_n$	Frequência natural das estruturas	Hz
$f_T$	Frequência filtrada pelo terreno	Hz
G	Subfuração	m
H	Altura da bancada	m
$h_i$	Espessura da camada de terreno	m
$K_i$	Constantes de Ash	adimensionais
L	Comprimento do furo	m
$n$	Relação entre impedâncias	adimensional
N	Número de pisos	adimensional
PPV	Velocidade vibratória de pico	mm/s
PVS	Velocidade vibratória resultante máxima	mm/s
Q	Carga máxima por retardo	kg
$R_d$	Fator de resposta à deformação	adimensional
$R_v$	Fator de resposta dinâmica à velocidade relativa	adimensional
$R_a$	Fator de resposta à aceleração relativa	adimensional
S	Espaçamento	m
$t$	Tempo	s
T	Altura do tamponamento	m
$v$	Velocidade de vibração	mm/s
$v_L$	Velocidade longitudinal	mm/s
$v_V$	Velocidade vertical	mm/s
$v_T$	Velocidade transversal	mm/s
VOD	Velocidade média da detonação, característica da substância explosiva	m/s

Esta página foi deixada propositadamente em branco.

# 1. Introdução

## 1.1. Enquadramento do tema da dissertação

A utilização de explosivos em desmontes a céu aberto tem vindo ao longo dos tempos a ganhar cada vez mais representatividade devido à sua relação custo/benefício, sendo considerado o método de escavação mais económico e rápido. Porém, tem as suas limitações, por exemplo relativas aos impactes ambientais, que são o *conjunto das alterações favoráveis e desfavoráveis produzidas em parâmetros ambientais e sociais, num determinado período de tempo e numa determinada área, resultantes da realização de um projeto, comparadas com a situação que ocorreria, nesse período de tempo e nessa área, se esse projeto não viesse a ter lugar* (Decreto-Lei nº 69/2000). No caso da utilização de explosivos, estes são: as instabilidades causadas ao maciço rochoso remanescente, a projeção de blocos, a produção de poeiras, a propagação da onda aérea e a produção de vibrações no terreno.

Os impactes ambientais têm vindo a representar cada vez mais um fator determinante para a limitação de explorações, designadamente pela utilização de explosivos em desmontes a céu aberto, quer devido à preocupação crescente pelo Ambiente, quer pela crescente proximidade de pedreiras a áreas urbanas ou habitacionais. Dos impactes já mencionados, o que mais se destaca é a geração de vibrações no terreno, sendo este o fator que mais incómodo e queixas origina nas populações, que ocorre com mais frequência e que pode ainda causar danos em estruturas existentes, na envolvente dos locais de aplicação de explosivos.

Por todo o mundo, são diversos os países que criaram normas com o objetivo de limitar os valores máximos de amplitude de vibrações com origem em atividades geotécnicas, que atingem as estruturas da envolvente e Portugal é um deles, desde 1983. Com esta limitação imposta, surgiu a necessidade de criar modelos que permitam prever as amplitudes de vibração, de acordo com a carga de explosivo utilizada e a distância ao recetor, de modo a que os responsáveis pelos desmontes possam ajustar os diagramas de fogo, reduzindo ao máximo o incómodo causado na população e as amplitudes de vibração, garantindo sempre a segurança das estruturas. Todavia, os limites apresentados nas várias normas existentes, são sempre superiores aos da perceção humana, o que faz com que o incómodo das populações prevaleça e que estas muitas vezes associem danos, com diferentes origens, nas estruturas a danos provocados pelos fenómenos vibratórios.

As duas pedreiras em estudo nesta dissertação localizam-se num parque natural, com pequenas populações em volta, existindo forte pressão da população para a redução dos impactes ambientais causados, nomeadamente das vibrações a que estão expostas. São duas pedreiras bastante distintas a vários níveis, como por exemplo: a sua dimensão; a monitorização de vibrações existente; a sua envolvente, sendo que uma se localiza isolada no Outão, junto à localidade Vale da Rasca, em Setúbal e outra no Vale do Covão, pertencente a um conjunto de várias pedreiras existentes, junto à localidade Pedreiras, em Sesimbra.

Para tentar minimizar os fenómenos vibratórios sentidos pelas populações destes dois locais, houve a necessidade de ajustar uma equação de propagação das ondas para cada um deles e tentar melhorar o modelo utilizado, acrescentando outras variáveis relacionadas com o diagrama de fogo, como por exemplo o afastamento. Com a criação deste modelo seria possível prever com maior rigor as cargas máximas a utilizar, de acordo com as distâncias às estruturas na envolvente.

## **1.2. Objetivos e organização do estudo**

De acordo com o mencionado anteriormente e utilizando sismógrafos de engenharia, esta dissertação apresenta um estudo visando a caracterização dos fenómenos de propagação de vibrações, com origem em desmontes de rocha com explosivos existentes nas duas pedreiras em estudo, sendo que numa delas o maciço existente é apenas calcário e na outra é uma zona de transição entre calcário e marga. Com a monitorização efetuada ao longo de quatro meses, o objetivo será propor um modelo de previsão de amplitudes de vibrações para cada uma das pedreiras e propor soluções alternativas no sentido de controlar este relevante impacte ambiental, através da redução de amplitudes vibratórias verificadas, de modo a não ultrapassar os valores propostos na normalização aplicável, as quais dependem das frequências dominantes desses eventos.

A presente dissertação encontra-se dividida em 8 capítulos para além do capítulo da introdução. Os primeiros três capítulos correspondem à revisão do estado da arte, onde são abordados os conceitos teóricos inerentes aos desmontes a céu aberto e à utilização de explosivos, dando especial atenção às vibrações decorrentes de desmontes e às suas consequências em estruturas. É ainda descrito o diagrama de fogo e apresentado o equipamento *laser* 2D utilizado no presente estudo. Posteriormente, são apresentadas e comparadas com a norma portuguesa NP 2074/2015, algumas normas de referência na limitação de velocidades de vibração. Por fim, é apresentado o modelo de previsão de amplitudes de vibração utilizado neste estudo, o modelo de Johnson.

Passando para a segunda parte do trabalho, correspondente aos restantes capítulos, é realizada uma caracterização das duas pedreiras em estudo e do grupo empresarial que as detém, bem como uma breve apresentação da metodologia e descrição da monitorização realizada nos dois casos de estudo. Por fim, os últimos dois capítulos apresentam os resultados do estudo realizado, sendo que no primeiro são apresentados os dados obtidos e o tratamento realizado, são confrontados com os valores limite da NP2074/2015 e são concretizadas as duas leis de propagação de vibrações características, uma para cada pedreira em estudo. No último capítulo é apresentada a análise feita para a criação de um novo modelo proposto, incluindo o afastamento como variável independente.

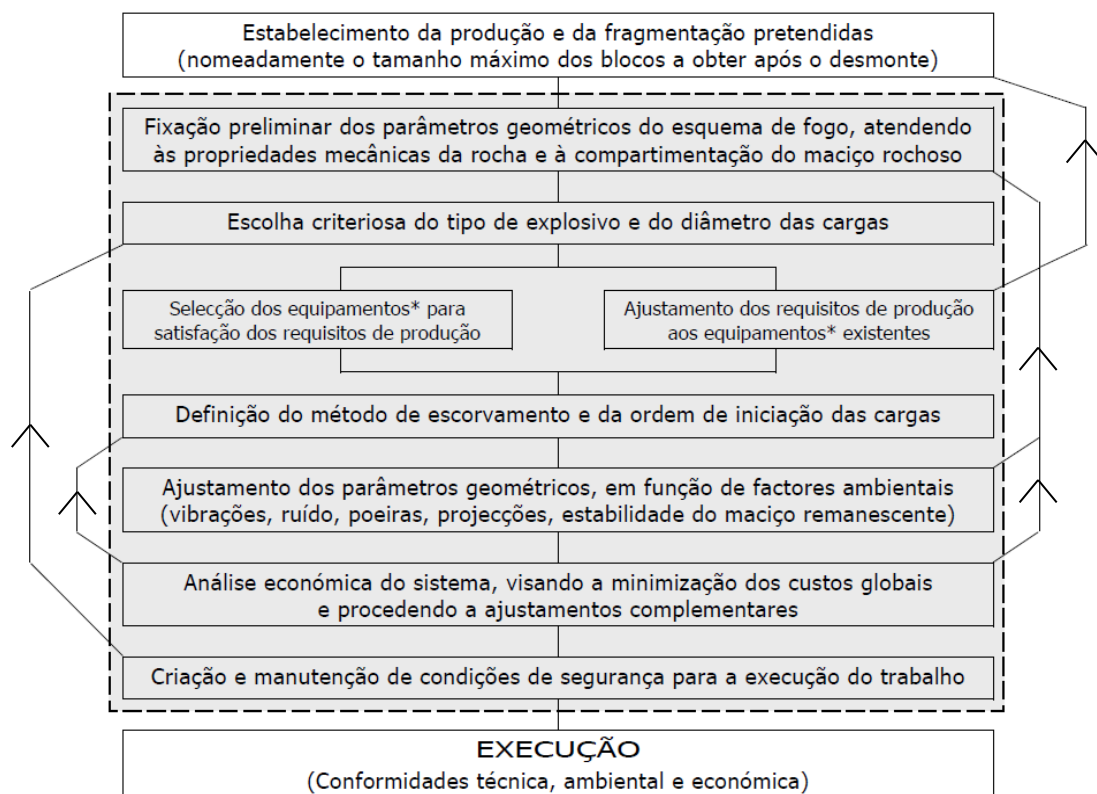


## 2. Desmontes a céu aberto

### 2.1. Substâncias explosivas na escavação de maciços

A utilização de substâncias explosivas na escavação de maciços rochosos gera alguns impactos ambientais eventualmente desfavoráveis para as estruturas e populações na envolvente. Entre os vários existentes e já mencionados anteriormente, são de salientar os fenómenos vibratórios gerados e o ruído. Este último apesar de normalmente não estar na origem de queixas pela população, muitas vezes é o que faz com que esta fique alerta e associe danos às vibrações.

O dimensionamento é um procedimento crucial na aplicação de substâncias explosivas, o qual incide sobre o diagrama de fogo, conceito que será aprofundado mais à frente. Com um bom dimensionamento não só o desmonte tem mais probabilidades de correr como planeado, dentro das expectativas pretendidas, como este é controlado, quer no aspeto de produção e fragmentação, quer no controlo dos impactos ambientais gerados. O fluxograma apresentado na figura 1 apresenta o procedimento que deverá ser realizado, representando os principais passos do processo (Bernardo, 2004).

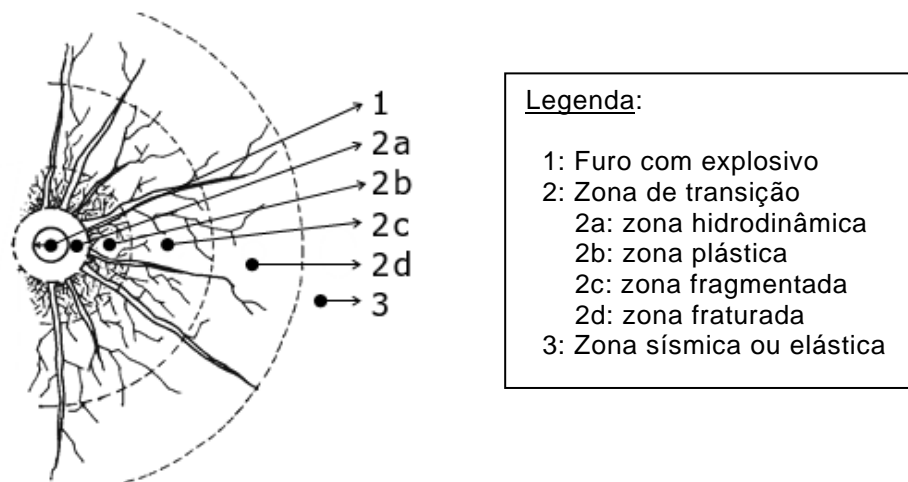


Legenda: Dimensionamento \* equipamentos de perfuração, carregamento, transporte e fragmentação

Figura 1 - Procedimento a realizar na escavação de maciços com recurso a substâncias explosivas (Bernardo, 2004, adaptado de Dinis da Gama, 2003)

Como em todos os projetos, o dimensionamento deverá ser dinâmico, pois no decorrer da exploração as características do maciço rochoso podem ir mudando, bem como o enquadramento do local dos trabalhos em relação à população. Geralmente este processo é baseado inicialmente em dados empíricos e é importante que exista uma monitorização no início dos trabalhos de exploração, deste modo, o dimensionamento será ajustado ao máximo ao maciço existente e saber-se-ão os limites de cargas a utilizar por retardo, num cenário considerado normal, para não gerar perturbações. Quando o dimensionamento não é bem realizado, pode existir excesso de energia empregue no desmonte o que pode originar por sua vez problemas como: tornar o maciço menos resistente, mais deformável e mais permeável e provocar impactes ambientais acrescidos (Bernardo, 2004).

Quando uma detonação ocorre, as zonas em redor podem ser distinguidas como apresentado na figura 2.



*Figura 2 - Zonas que rodeiam uma carga explosiva detonada (segundo Atchison, 1968)*

A primeira zona corresponde maioritariamente ao local de aplicação do explosivo, ou seja, na zona contígua ao furo, onde se consideram a ela associados os comportamentos hidrodinâmicos. De seguida a segunda zona subdivide-se em quatro, que são definidas pelas seguintes características (Dinis da Gama, 2020):

- Zona hidrodinâmica – é a primeira região de rocha que sofreu os efeitos das altas temperaturas e elevadas pressões resultantes da detonação, de tal modo que as rochas aparentam não ter resistência ao corte (como acontece aos fluídos, daí a designação de hidrodinâmica). Esta zona é de pequena dimensão, em torno do furo;
- Zona plástica – imediatamente a seguir, a rocha continua a sofrer a ação de altas pressões. As deformações sofridas são permanentes e podem ser explicadas, com suficiente aproximação, pela variação de densidade sob elevadas condições de pressão (Cook, 1958);
- Zona fragmentada – a rocha é reduzida a pequenos fragmentos que chegam a atingir a dimensão de pó, sem qualquer consistência. A extensão desta área depende altamente da capacidade do material para consumir energia por fragmentação, mas em qualquer caso, essa zona é normalmente bem definida, aumentando o calibre dos fragmentos com a distância à origem da detonação;

- Zona fraturada – com maior extensão que as anteriores, ocorre numa região de rocha atravessada por fraturas essencialmente radiais cortadas por um sistema menos importante de fraturas concêntricas com o furo; esta zona é caracterizada por uma diminuição de densidade de fracturação com o aumento da distância ao ponto de detonação.

Por fim, no processo de fragmentação, existe uma terceira zona bastante distinta das anteriores, a zona sísmica ou elástica, aqui o material encontra-se intacto, não fraturado, podendo afirmar-se que as tensões que por aqui existiram ocorreram abaixo do limite elástico da rocha (Dinis da Gama, 2020). É nesta zona que se dão normalmente os problemas de vibrações nas estruturas e consequentemente onde se realizam planos de monitorização.

Quanto ao processo de deslocamento, este ocorre essencialmente devido aos efeitos causados pela expansão gasosa que sucede à fase dinâmica e que é denominada fase quase-estática. Os efeitos são maioritariamente a dilatação da zona plástica, devido ao alargamento das fissuras que foram criadas na fase anterior, a ampliação da fragmentação, por colisão interna dos blocos em movimento e o aumento do raio da cavidade por deformação plástica (Dinis da Gama, 2020).

Após a definição de todas estas zonas e assumindo a rotura da rocha perto da face livre através da reflexão, é possível definir sequencialmente a ordem dos acontecimentos aquando de uma detonação, apresentada na figura seguinte.

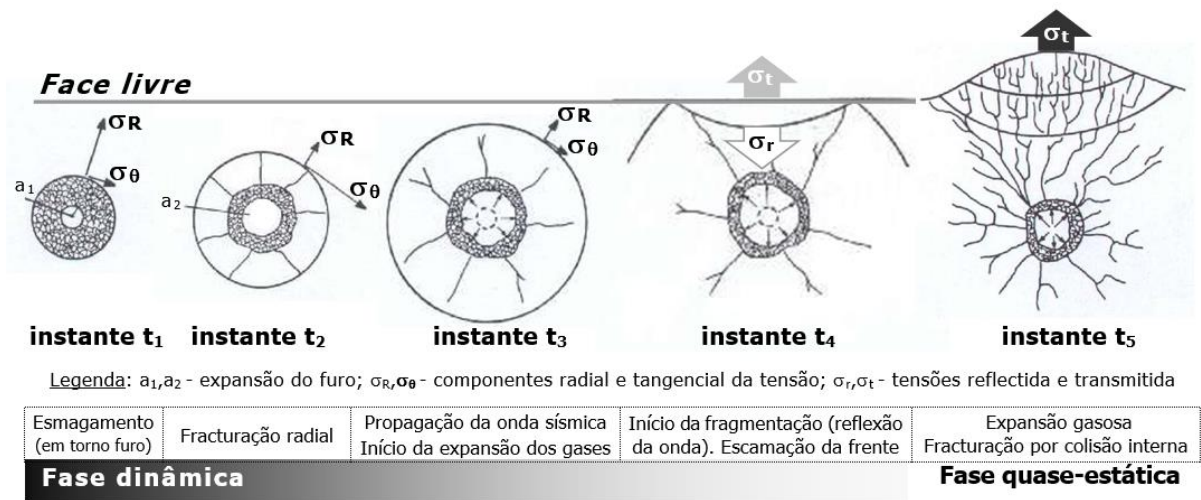


Figura 3 - Sequência temporal de eventos numa detonação em rocha situada na vizinhança de uma face livre (adaptado de Aimone, 1992).

É ainda relevante mencionar a importância da razão entre as impedâncias características dos dois meios em contacto na transmissão de energia aquando de uma detonação. Os dois meios em contacto que se pretende ter são a rocha e o explosivo, sendo que para permitir a transmissão máxima de energia e reduzir a influência da interface explosivo/rocha, as impedâncias características deverão ser da mesma ordem de grandeza, deste modo, a relação entre elas será de um e as amplitudes das ondas incidente e transmitida serão iguais, como é possível deduzir da equação (1).

$$\sigma_t = \frac{2}{1+n} \sigma_i \quad (1)$$

Em que  $n$  representa o rácio de impedâncias entre os meios em questão,  $\sigma_t$  a amplitude da onda transmitida à rocha (Pa) e  $\sigma_i$  a amplitude da onda incidente (Pa).

Contudo, algumas vezes, existem volumes de ar entre os dois meios anteriores, o que resulta na introdução de um meio de baixa impedância e conseqüentemente numa transmissão deficiente de energia (Dinis da Gama, 2020).

A razão de impedâncias, por sua vez, é dada pela equação seguinte, no caso da interface explosivo/rocha:

$$n = \frac{\rho_{\text{explosivo}} \times VOD}{\rho_{\text{rocha}} \times c_p} \quad (2)$$

Em que  $\rho$  representa as massas volúmicas dos respetivos meios ( $\text{g/m}^3$ ),  $VOD$  representa a velocidade média de detonação característica da substância explosiva (m/s) e  $c_p$  representa a velocidade de propagação das ondas longitudinais na rocha (m/s).

Se existir ar na interface, não só existirá a transmissão deficiente de energia já referida, sendo possível verificar se aplicadas as equações (2) e (1) a esse caso, como também se o atacamento for mal realizado, poderá originando ruído, através da expulsão de gases pela boca do furo, que como já mencionado é o que várias vezes desperta a atenção das populações para os fenómenos vibratórios.

### 2.1.1. Vibrações

A vibração consiste num movimento oscilatório de um dado material, que foi afastado da sua posição de equilíbrio, logo é como que uma resposta elástica do terreno à passagem de uma onda de tensão que pode ter origem direta ou indireta numa solicitação dinâmica, de génese natural ou artificial (Bernardo, 2020). As principais características das vibrações no terreno, segundo Kramer (1996), são a amplitude (expressa através das grandezas físicas presentes no fenómeno ondulatório: deslocamentos, velocidades ou acelerações), a frequência e a duração.

Após a solicitação de origem, ocorre a propagação de ondas volumétricas e de superfície em todas as direcções, sendo essas as ondas a que chamamos de vibração e que irão atingir os alvos nas proximidades, como pessoas ou edifícios, como é possível verificar na figura 4.

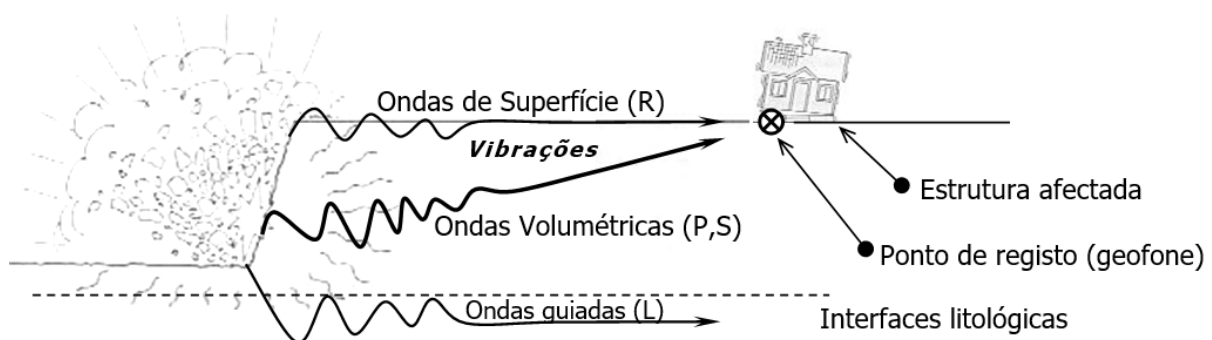


Figura 4 - Ondas de tensão (Bernardo, 2004)

As ondas volumétricas são as ondas que predominam nas proximidades de um desmorte e são caracterizadas por se transmitirem radialmente através do maciço, terem frequências relativamente elevadas (10 a 40 Hz) e por terem uma rápida atenuação, elas podem ser de dois tipos, longitudinais (ondas "P") ou transversais (ondas "S"). Já as ondas de superfície, podem ser ondas de Rayleigh (ondas "R") ou de Love (ondas "L") e são caracterizadas por terem baixas frequências (2 a 8 Hz), serem sentidas a grandes distâncias, dependerem das interfaces entre meios distintos para se propagar e terem uma velocidade inferior às ondas volumétricas (Bernardo, 2004). Na figura 5 é possível verificar os diferentes tipos de ondas mencionados, bem como a direção de propagação das mesmas e o movimento das partículas que originam.

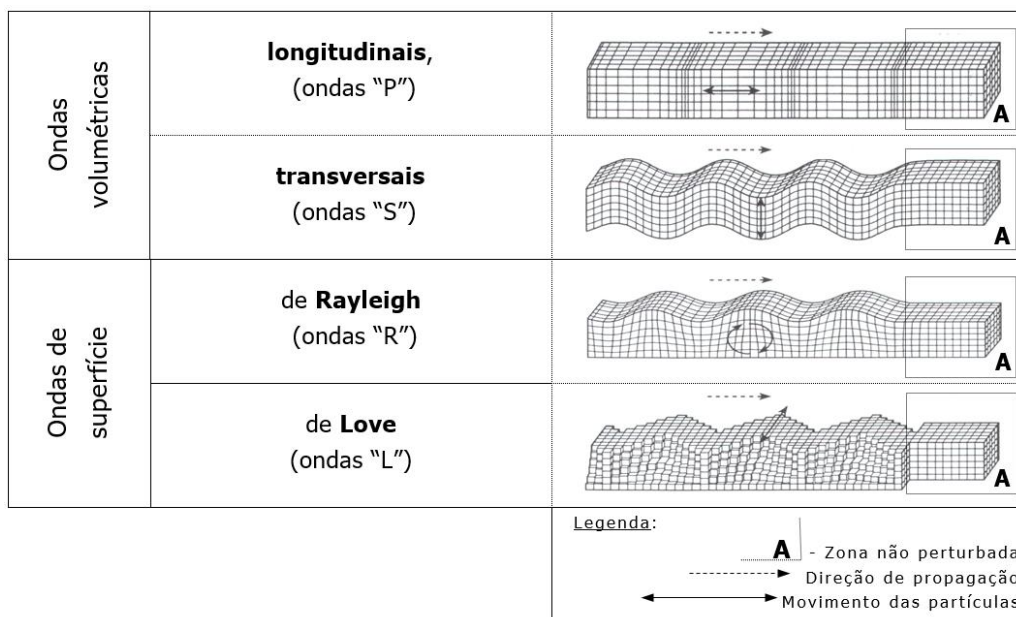


Figura 5 - Ondas sísmicas e a sua propagação (Bernardo, 2004)

Habitualmente a vibração tende a diminuir com a distância, sendo atenuada através de vários fatores, porém, na prática, este fenómeno muitas vezes não se verifica. São exemplos meios estratificados onde, se a sua geometria assim o favorecer, as ondas podem concentrar-se ou sobrepor-se a outras refletidas, fazendo desta forma com que se verifiquem valores de vibração maiores em pontos mais distantes da fonte, os chamados fenómenos de amplificação local (Azevedo & Patrício, 2003).

As vibrações podem ser classificadas, segundo Sarsby (2000), em três grupos distintos:

- Contínuas – quando um nível de vibração aproximadamente constante é mantido por um longo período de tempo (caso dos maciços de fundação de máquinas de regime alternativo, como bombas ou compressores, em funcionamento regular);
- Transitórias – se os níveis de vibração resultam de um impacto súbito, seguido de um tempo de repouso relativamente prolongado (caso dos terrenos submetidos a compactação dinâmica ou a detonação de cargas explosivas isoladas);
- Intermitentes – no caso de se verificar uma sucessão de eventos vibratórios, cada um dos quais com pequena duração (caso da detonação de cargas explosivas microrretardadas, ou perfurações com percussão).

A passagem das vibrações nas fundações das estruturas pode causar efeitos permanentes ou transitórios, de acordo com os deslocamentos ocorridos, sendo que essencialmente, os primeiros são para deslocamentos efetivos e onde a deformação não é recuperável e os outros para quando as partículas, após a passagem da onda de tensão dinâmica, voltam à sua posição original. A resposta das estruturas pode ser classificada em três classes de dano (propostas por Siskind *et al.*, 1980 e referidas por Dowding, 1992) que são, por ordem decrescente de severidade e por ordem crescente da distância aos trabalhos de escavação:

- Graves (deformações permanentes) – intenso enfraquecimento da integridade da estrutura, do qual resultam fendas de considerável abertura, perda do prumo das paredes, e/ou assentamentos diferenciais das fundações (resultantes da redistribuição das cargas na superestrutura, devida à distorção);
- Moderados (abertura de fissuras) – danos superficiais, nos elementos mais frágeis (e não solidários com a estrutura) do edifício, como janelas de vidro, paredes e revestimentos exteriores ou interiores (especialmente de estuque);
- Mínimos – prolongamento de fissuras pré-existentes antes dos desmontes (cosméticas, geralmente com espessura capilar) e oscilações de objetos soltos (candeeiros, móveis, etc.).

Aquando do dimensionamento de um desmonte pretende-se sempre que os efeitos sentidos nas estruturas da envolvente sejam controlados e os menores possíveis, se isto não puder ser garantido, espera-se que no máximo sejam causados danos mínimos, mais concretamente danos cosméticos que não comprometam a segurança da estrutura. Todavia é importante salientar que estes danos, bem como os estruturais, podem ser agravados por agentes que em nada estão relacionados com a utilização de explosivos, como agentes meteorológicos ou a própria degradação da estrutura devido à sua má construção ou à passagem do tempo. Como já mencionado, muitas vezes os queixosos não relacionam os danos nas suas estruturas a estes agentes externos aos desmontes, mas sim à utilização de explosivos nas proximidades, não só por ser de mais fácil justificação e ter soluções mais cómodas, por intermédio de indemnizações, mas também porque estes danos externos são mais prolongados, ou seja, demoram mais tempo a notarem-se (Bernardo, 2004).

A percepção e a sensibilidade humana são fatores a ter em consideração na análise de vibrações de queixas ocorridas e estão na base do desconforto ambiental. Para garantir que não iria surgir incómodo aquando de um desmonte, deveriam ser garantidos valores de amplitude de vibração mais baixos do que o limiar da percepção humana, porém é de muito difícil normalização, variando de pessoa para pessoa, do seu cenário socioeconómico e cultural. Foram sugeridas várias definições para este, inclusive a subdivisão em classes da incomodidade decorrente da percepção, por Azevedo & Patrício (2003), sendo elas:

- Sensível, no sossego da habitação, ou em outros locais de lazer ou repouso;
- Inconveniente, eventualmente tolerável em situações transitórias;
- Excessiva ou impeditiva da realização normal de trabalho;
- Nociva para a saúde, geralmente envolvendo ferramentas vibratórias em contacto com o corpo humano.

A monitorização de vibrações é um procedimento essencial para as explorações perto de zonas urbanas.

### 2.1.2. Importância da frequência nos critérios de dano estrutural

A frequência é bastante importante nos critérios de dano estrutural devido ao efeito de ressonância que pode originar, ou seja, o efeito de amplificação da vibração que chega a uma estrutura, devido à proximidade da frequência dominante do evento e da frequência natural da estrutura. Assim sendo, a frequência dominante de um evento vibratório é um parâmetro bastante importante e, como será referido mais à frente, é em função deste que o critério da norma em vigor (atualmente em Portugal, a NP 2074/2015) limita a velocidade/amplitude vibratória.

A frequência natural de uma estrutura ( $f_n$ ) é, segundo estudos de Engenharia Sísmica realizados (Newmark *et al.*, 1982, citados por Bernardo, 2004), *uma função inversa da sua altura, normalmente definida em termos do número de pisos (N) dessa edificação, e não excede os 10 Hz*, sendo determinada pela equação seguinte, todavia é recomendada apenas para estruturas residenciais baixas.

$$f_n = \frac{10}{N} \quad (3)$$

Concluiu-se que a aplicabilidade da equação apresentada era reduzida e procurou-se uma solução para determinar a frequência natural de estruturas mais esbeltas. Verificou-se que a porosidade da estrutura, determinada a partir da razão entre o volume de vazios e o volume total, condicionava imenso a frequência natural associada, passando assim a ser um dos fatores a ter em conta na determinação desta. Foi também aconselhado que, em edifícios com esbeltez muito elevada, o estudo deveria ser característico e detalhado da própria estrutura em causa (Bernardo, 2004).

Habitualmente as pedreiras, onde são aplicados explosivos, não se encontram inseridas ou perto de grandes centros urbanos, sendo pouco provável que existam na sua envolvente edifícios muito esbeltos. Normalmente apenas existem habitações ou estruturas que na sua maioria tem poucos andares, logo, na maior parte dos casos, a frequência natural da estrutura pode ser determinada a partir da equação (3).



Quando ocorre o fenômeno de ressonância, ocorre uma amplificação significativa da vibração que atinge a estrutura, tornando uma sollicitação dinâmica, que inicialmente poderia ser considerada inofensiva, prejudicial. Na figura 6 são apresentadas as curvas de amplificação, que demonstram que na situação de igualdade de frequências (natural da estrutura e dominante da sollicitação) é quando ocorrem as maiores amplificações dinâmicas, sendo essa a zona de maior perigo para as estruturas, de salientar que  $\beta$  representa a taxa de amortecimento,  $R_d$  o fator de resposta à deformação,  $R_v$  o fator de resposta dinâmica à velocidade relativa e  $R_a$  o fator de resposta à aceleração relativa (Bernardo, 2004).

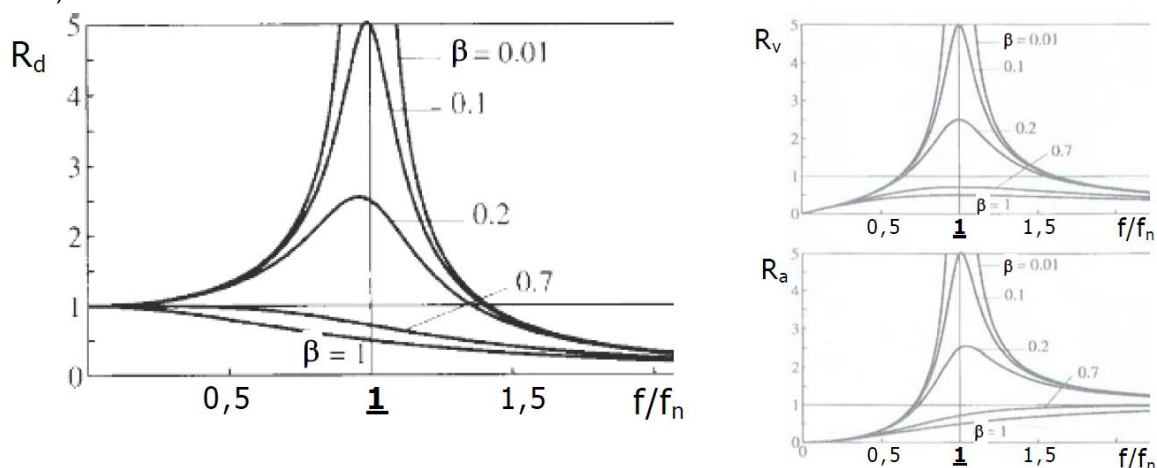


Figura 6 - Curvas de amplificação dinâmica (Serra, 2001)

Contudo as características do terreno também influenciam as sollicitações que são transmitidas às estruturas. No caso de existirem interfaces no terreno, a igualdade entre a frequência filtrada por este ( $f_T$ ) e a frequência natural da estrutura pode originar também o fenômeno de ressonância, causando danos em estruturas que estejam a uma maior distância da sollicitação, que outras que não foram afetadas. Este fenômeno é ilustrado na figura 7, onde ocorre uma situação de resposta dinâmica agravada (estrutura 2) a maior distância que outra (estrutura 1) que não vibra, o que só se explica no domínio da frequência.

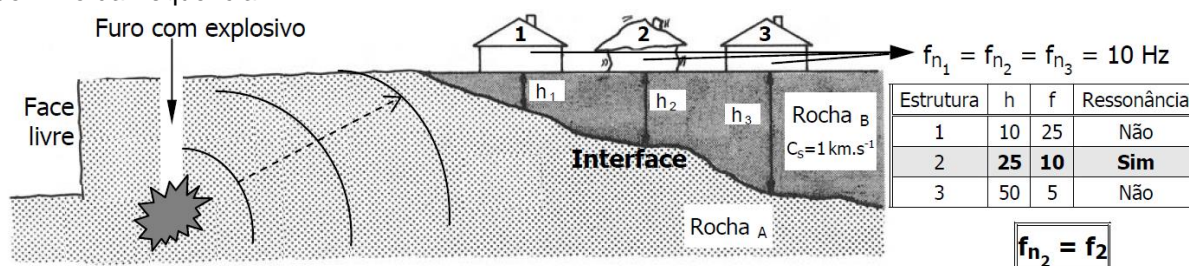


Figura 7 - Amplificações de vibração, devido a ressonância (adaptado de Jimeno et al, 1995 em Bernardo, 2004)

A frequência filtrada pelo terreno é dada pela equação (4), em que  $C_s$  representa a velocidade de propagação de ondas transversais (m/s) e  $h_i$  a espessura da camada considerada (m) (Esteves, 1993 ou Diogo Pinto, 2003, citados por Bernardo, 2004).

$$f_T = \frac{C_s}{4h_i} \quad (4)$$



## 2.2. Diagrama de fogo

O diagrama de fogo convencional a céu aberto pretende ajustar a fragmentação e controlar a deslocação do material a desmontar, mediante aplicação de explosivo nos furos (Jimeno *et al.*, 2003). Este é apresentado esquematicamente na figura seguinte, bem como os vários parâmetros importantes no seu dimensionamento.

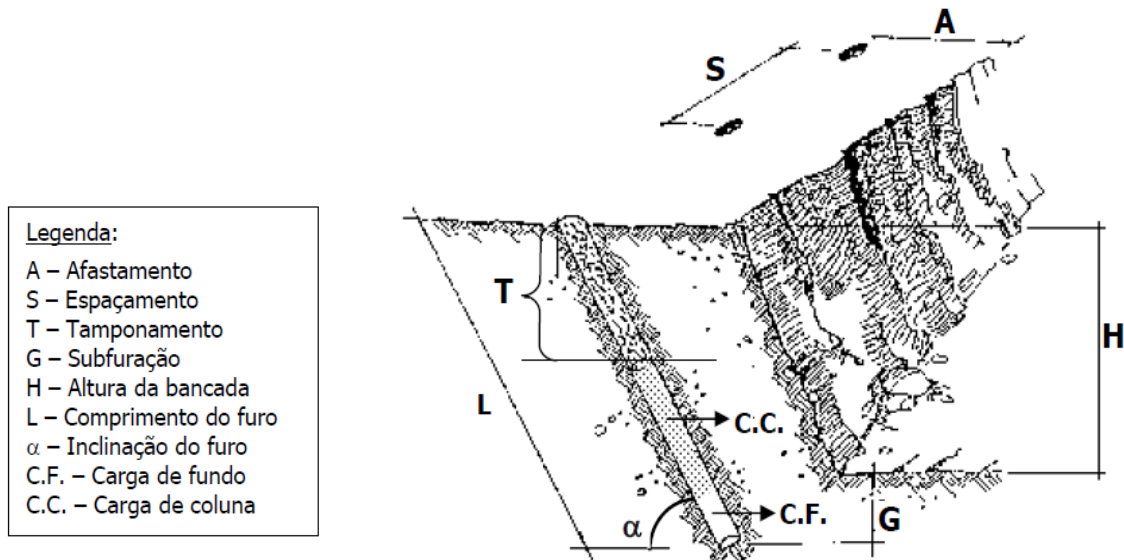


Figura 8 - Principais parâmetros geométricos de uma escavação a céu aberto (IGM, 1999)

Ash estabeleceu as relações numéricas lineares entre as especificações geométricas, referidas para desmontes a céu aberto em bancadas. Estas foram posteriormente confirmadas em inúmeras pedreiras a nível mundial por diversos especialistas, compreendendo diversas geometrias de furação e escavação, diâmetros de furos, diferentes litologias e distintos tipos de explosivo (Bernardo 2004), verificando-se a sua aplicabilidade à otimização de diagramas de fogo.

As expressões de Ash propõem a utilização de uma série de constantes empíricas ( $K_i$ ) para o dimensionamento ótimo dos parâmetros geométricos do diagrama de fogo, estas são válidas uma vez bem definidos os intervalos de variação e as situações de aplicabilidade, sendo que para isso é necessário considerar as particularidades das várias situações (Bernardo, 2004), como expresso na tabela 1.

Tabela 1 - Dimensionamento geométrico de diagramas de fogo segundo Ash (adaptado Dinis da Gama, 1998)

Parâmetro	Constante Empírica	Expressão	Intervalo de variação	Dependente de:
<b>Afastamento (A)</b>	$K_A$	$A = K_A \times \phi_f$	$25 \leq K_A \leq 40$	Densidade do explosivo e da resistência do maciço
<b>Espaçamento (S)</b>	$K_S$	$S = K_S \times A$	$1,25 \leq K_S \leq 5$	Simultaneidade da temporização
<b>Altura de Bancada (H)</b>	$K_H$	$H = K_H \times A$	$1,5 \leq K_H \leq 4$	Produção (volume)
<b>Tamponamento (T)</b>	$K_T$	$T = K_T \times A$	$0,5 \leq K_T \leq 1$	Preocupação ambiental com ruído e projeções
<b>Subfuração (G)</b>	$K_G$	$G = K_G \times A$	$0,2 \leq K_G \leq 0,5$	Altura das bancadas/Correção de repés

A determinação dos vários parâmetros do diagrama de fogo deverá seguir uma ordem, sendo que estes serão calculados uns em função dos outros, como é possível verificar pela consulta da tabela anterior, sendo que, o primeiro a determinar deverá ser o diâmetro dos furos. A altura da bancada muitas vezes é também um parâmetro pré-definido, sendo que por lei este não deverá em condições normais exceder os 15 metros de altura (Decreto-Lei nº162/90, Alínea a), do ponto 1, do Artigo 126º).

O diâmetro de furação depende de alguns fatores, sendo fundamental estar bem articulado com a altura da bancada. Os fatores são a geologia estrutural do local, pois quanto mais inclinadas as camadas forem, maior terá de ser o diâmetro de furação para evitar que ocorra a flexão das varas e consequentes desvios nos furos, sendo que quanto maior a altura do furo, maior a importância deste fator e por fim, o diâmetro de furação depende da tecnologia e capacidade dos equipamentos escolhidos para o projeto, nomeadamente as varas e os seus materiais constituintes, na tabela 2 são apresentadas alguns exemplos de relação utilizada entre diâmetro de furo, altura da bancada e dureza da rocha.

Tabela 2 - Altura da bancada em função do diâmetro do furo (adaptado de IGM, 1999, em Bernardo, 2004)

Altura da bancada (m)		Diâmetro do furo recomendado (mm) [polegadas]
Rocha dura	Rocha branda	
3,5	5,0	38 [≈1 <sup>1/2</sup> ]
4,6	10,0	51 [≈2]
5,8	12,0	64 [≈2 <sup>1/2</sup> ]
6,7	15,0	75 [≈3]

Uma vez definido o diâmetro de furação, pode-se então calcular os restantes parâmetros geométricos do diagrama de fogo (a partir das fórmulas de dimensionamento, apresentadas anteriormente na tabela 1), considerando uma série de aproximações (iterativas) para as constantes empíricas, em função do contexto de aplicação e dos resultados entretanto obtidos.

A utilização de furos inclinados é uma prática bastante comum em escavações a céu aberto e que comprovadamente se traduz em melhores resultados a nível de estabilidade de taludes, fragmentação e diminuição do consumo de explosivo (Bernardo, 2004), ainda que, exija maior cuidado com a qualidade da furação, nomeadamente com os desvios na base da bancada e aumente o risco e a frequência de projecções de blocos.

O atacamento ou tamponamento, deverá ser feito com material inerte adequado, geralmente é escolhida brita de calibre que permita o correto tamponamento do furo e não promova a projecção de blocos, para tal é geralmente aconselhado que esta tenha a designação da metade do diâmetro do furo em polegadas, por exemplo, em furos de quatro polegadas é aconselhado que se utilize brita 2, ou seja, brita com partículas entre os 1,5 e 2,5 centímetros.

Com todos os parâmetros calculados, define-se por fim o número de furos e fiadas a aplicar no desmonte em função da produção pretendida.

### 2.2.1. Laser 2D

O *laser* 2D utilizado para a realização deste trabalho foi o *LaserAce1000*, apresentado na figura 9, cedido pela Orica Mining Services Portugal, S.A. Com a utilização deste *laser* foi possível identificar:

- a altura da bancada (não considerando a inclinação);
- o ângulo desde o primeiro ao último ponto de disparo do *laser*, sendo considerado como o ângulo de inclinação da bancada (positivo se o último ponto estiver mais próximo horizontalmente do utilizador que o primeiro, negativo se ocorrer o contrário); e
- o afastamento existente nos vários pontos de disparo do *laser*.



Figura 9 - *LaserAce1000 Rangefinder* a ser utilizado. (Trimble, 2011).

O procedimento criado e realizado para a utilização do *laser* 2D encontra-se no anexo A. Resumidamente a utilização passa por inserir as características do furo no equipamento, como a inclinação, profundidade do furo e afastamento mínimo autorizado ao longo da bancada, realizar dois primeiros disparos de referência do furo com o *laser*, seguidos de vários disparos ao longo da vertical do furo para realizar o *profile*/perfil deste, por fim, repetir todos os passos nos vários furos seleccionados da pega de fogo em estudo, deste modo é possível obter uma amostra representativa do desmonte.

A utilização deste equipamento forneceu dados importantes para o estudo desenvolvido, porém o equipamento usado tinha limitações, principalmente por ser 2D, sendo que as mais sentidas foram: a não leitura dos pontos de referência dos topos da bancada devido à cor do material da frente ou à reflexão do Sol no material, o que inviabilizou a leitura de vários furos e até mesmo de alguns desmontes; o equipamento não estar fixo num ponto ou tripé para a leitura de todos os furos; e ser necessário marcar pontos de referência no material existente na frente da bancada e ser uma tarefa com bastantes riscos associados. No geral a utilização do equipamento depende muito da sensibilidade e cuidado do utilizador, podendo assim originar facilmente erros ou desvios no valor lido, que não são desejáveis e que com equipamentos mais atuais, como os *lasers* 3D, seriam reduzidos drasticamente. Com este equipamento não é possível realizar uma leitura ao perfil do furo real, ou seja, o equipamento

considera que o furo é perfeito, que os dados fornecidos são os reais, porém muitas vezes na realização dos furos ocorrem desvios, erros nas profundidades de furação e existência de buracos ou cavernas ao longo do furo, por esse motivo para um estudo mais pormenorizado e fiel à realidade seria aconselhável também a utilização de um equipamento como o *Boretrak* em conjunto com o *laser*, o que não foi possível neste estudo.

### 2.3. Medidas de minimização de vibrações

Existem vários procedimentos para a otimização das amplitudes de vibrações, alguns mais práticos e de menores custos, outros com recurso a tecnologias mais desenvolvidas e conseqüentemente mais dispendiosos. Numa primeira abordagem, *devem ser cuidadosamente dimensionadas* (Bernardo, 2004):

- a geometria do diagrama de fogo,
- os sistemas de iniciação a aplicar e
- o tipo de pré-corte a realizar.

Em relação ao primeiro ponto, existem vários parâmetros a dimensionar no diagrama de fogo e para além da geometria, deverá ser tida em consideração a orientação das frentes de escavação. No que toca à geometria do diagrama de fogo, o afastamento é um dos parâmetros mais importantes e que mais influi na geração de vibrações, pois é através deste que se maximiza a utilização da energia das cargas explosivas para a fragmentação da rocha e se minimiza a propagação de energia sísmica no maciço, como sugerido na figura 10. É importante notar que a prática de afastamentos excessivamente baixos, apesar de reduzir vibrações, não é justificável pois aumenta consideravelmente o custo associado e potencia efeitos indesejados, como a projeção de blocos (Bernardo, 2004).

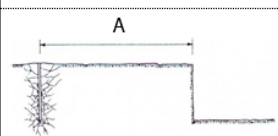
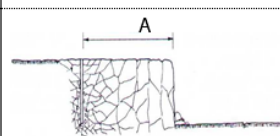
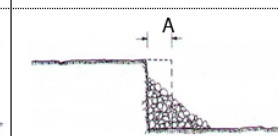
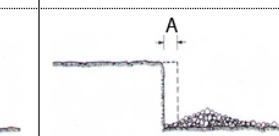
$A \gg 60\varnothing_f$	$A \approx 60\varnothing_f$	$25\varnothing_f < A < 40\varnothing_f$	$A < 20\varnothing_f$
			
Intensidade de <u>vibração muito significativa</u> . Sem desmonte, e com fragmentação localizada nas imediações do furo	Intensidade de <u>vibração significativa</u> . Sem desmonte, mas com intensa fragmentação entre o furo e a face livre	Intensidade de <u>vibração pouco significativa</u> . Com desmonte, da rocha entre o furo e a face livre, equilibrado e bem deslocado	Intensidade de <u>vibração insignificante</u> . Desmonte, da rocha entre o furo e a face livre, sobre fragmentado e deslocado
Sobredimensionado		Correto	Subdimensionado

Figura 10 - Influência do afastamento na geração de vibrações. (Bernardo, 2004)

Outras medidas que minimizam as vibrações são a redução da altura das bancadas ou utilização de sistemas de iniciação múltipla, reduzindo a carga explosiva disparada por retardo, como esquematizado na figura 11.

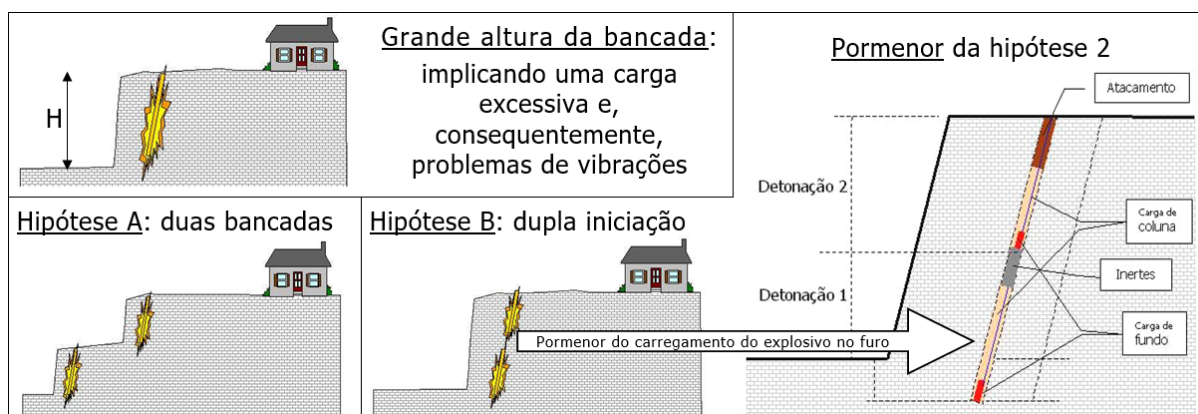


Figura 11 - Técnicas de redução das vibrações para grandes alturas de bancada (adaptado de Bastos, 2003 em Bernardo, 2004)

Para o uso de sistemas de iniciação múltipla é necessário realizar separações físicas entre cargas explosivas, essas separações são usualmente realizadas com recurso a inertes, realizando *decks* que são intercalações de inertes, entre as cargas explosivas (ver pormenor na figura anterior). Cada carga será iniciada pelo seu respetivo detonador sendo que cada um terá uma temporização diferente, normalmente a menor temporização será a da carga a uma cota mais elevada do furo, detonando por ordem até à carga que esteja na cota mais baixa do furo, ou seja, no fundo. O *deck* poderá ter apenas a dimensão de aproximadamente 50 centímetros, embora geralmente se recomende e se utilize a dimensão de 1 metro, sendo que o importante é garantir que este cria uma separação entre cartuchos abaixo e acima do *deck*, e que estes não se irão iniciar um ao outro, mas serão sim iniciados pelo respetivo detonador. Poderá existir mais que um *deck* num só furo, quantos mais existirem, mais repartida será a carga total por furo. A carga de explosivo deverá ser repartida equilibradamente, garantindo que existirão, por exemplo, 2 cartuchos de carga de fundo acima do *deck* para que estes iniciem a carga de coluna correspondente.

## 3. Normas

Neste capítulo são apresentadas a norma portuguesa em vigor para a avaliação da influência de vibrações impulsivas em estruturas e a norma britânica para a incomodidade humana em edifícios, decorrente de vibrações provocadas por detonações em maciços rochosos.

### 3.1. Norma portuguesa NP2074/2015

A norma portuguesa NP2074/2015, atualmente em vigor no território português, surgiu como atualização da norma de 1983, para a avaliação da influência de vibrações impulsivas em estruturas. Esta norma é muitas vezes utilizada em países onde esta normalização ainda não foi realizada, como por exemplo, em alguns países lusófonos, como Cabo Verde.

*O seu objetivo é estabelecer um critério de limitação de valores das grandezas físicas características das vibrações impulsivas e com um número de ocorrências limitado para que não originem quaisquer danos nas estruturas. Este critério de limitação criado é em função da frequência, tendo sido esta uma das principais alterações realizadas face ao documento de 1983. O campo de aplicação desta norma são todas as estruturas sujeitas a vibrações causadas por solicitações, excluindo solicitações realizadas entre as 20 e as 7 horas e a avaliação da influência destas vibrações em equipamentos sensíveis e eventualmente existentes em hospitais, laboratórios, etc., os quais podem ser objeto de valores limite mais restritivos sugeridos pelos fabricantes (NP2074/2015).*

As estruturas são caracterizadas em três classificações distintas, sendo estas, sensíveis, correntes ou reforçadas. As sensíveis são estruturas com valor patrimonial, grande esbeltez ou estruturas antigas com preocupações relevantes ao nível do estado de conservação. As correntes são estruturas comuns, que não sejam demasiado esbeltas, como por exemplo habitações. E, por fim, as reforçadas são consideradas as estruturas *recentes em betão armado ou com elementos estruturais de natureza metálica, e dentro destes, os que tenham uma finalidade puramente industrial* (NP2074/2015). É ainda aconselhado, num capítulo dedicado da norma, a realização de uma avaliação prévia, ou seja, uma inspeção às estruturas na envolvente antes do início da geração de solicitações, fazendo assim um levantamento de todas as patologias existentes a essa altura, ficando devidamente registado. No caso das estruturas sensíveis existe uma lista de recomendações adicionais num anexo da norma.

Para a monitorização deste efeito existem sistemas de medição aconselhados pela norma, sendo que deverá ser seguida a Norma ISO 5348 no que toca à localização do transdutor utilizado, ou seja, este deverá ser colocado num elemento da estrutura que seja solidário com a fundação, não poderá estar a mais de 0,5 metros do nível do terreno exterior e deverá ser colocado dirigido o mais possível para o local da solicitação (NP2074/2015).

Quanto ao valor de velocidade máxima de vibração a considerar na medição,  $V_{\text{máx}}$ , será o maior valor medido durante o período de registo, sendo obtido através da equação (5), onde  $v_L$ ,  $v_V$  e  $v_T$  representam as velocidades registadas nas três componentes do terreno, respetivamente, longitudinal, vertical e transversal (NP2074/2015).

$$v = \sqrt{v_L^2(t) + v_V^2(t) + v_T^2(t)} \quad (5)$$

Esta velocidade máxima deve ser calculada pelo sistema de medição de vibrações, identificando o instante de tempo ( $t$ ) em que decorre, não podendo ser calculada através da soma vetorial dos valores máximos, em cada direção, já que estes ocorrem em instantes distintos ( $t_A$ ,  $t_B$  e  $t_C$ ) e por isso não podem ser somados vetorialmente, como apresentado na equação (5) (NP2074/2015).

$$v < \sqrt{\text{máx}[v_L^2(t_A)] + \text{máx}[v_V^2(t_B)] + \text{máx}[v_T^2(t_C)]} \quad (6)$$

Os valores limite recomendados na norma, são para o somatório vetorial da velocidade de vibração (de pico – PVS: *peak vector sum*), definidos em função das frequências dominantes registadas ( $f$ ) e do tipo de estrutura, sendo apresentados na tabela 3 (NP2074/2015).

Tabela 3 - Valores de velocidade limite recomendados na NP2074/2015, em mm/s

Tipo de estruturas	Frequência dominante, $f$		
	$f \leq 10$ Hz	$10 \text{ Hz} < f \leq 40$ Hz	$f > 40$ Hz
Sensíveis	1,5	3,0	6,0
Correntes	3,0	6,0	12,0
Reforçadas	6,0	12,0	40,0

Os valores limite desta norma são um pouco conservadores, o que poderá ser analisado na comparação com outras normas internacionais mais à frente, ainda assim se comparados com a versão de 1983 da presente norma podem ser considerados próximos, em que o limite mais restritivo era de 1,75 mm/s, ou seja, superior ao atual.

Como já mencionado, a norma de 2015 trouxe algumas alterações à normalização existente, sendo que para além da limitação criada em função da frequência dominante e de estabelecer valores limite mais conservadores, deixou-se também de considerar as características do terreno onde as estruturas estão fundadas, pois foi considerado desnecessário e impróprio, visto que a medição da velocidade de vibração deveria ser realizada em elementos da fundação da estrutura ou solidários à mesma, já incorporando por isso os efeitos do terreno (Bernardo, 2004).



### 3.2. Norma britânica BS 6472-2:2008 Part 2: Blast-induced vibration

A norma britânica *BS 6472-2:2008 Part 2: Blast-induced vibration* é a norma que apresenta orientações sobre a exposição humana, em edifícios, a vibrações provocadas por detonações. É principalmente aplicada a desmontes associados à extração mineral e não abrange trabalhos com recurso a desmontes únicos para demolições ou trabalhos em pontes, nem o risco de dano de estruturas, existindo uma norma dedicada a este último, a norma BS 7385 (BS 6472-2:2008). De salientar que esta normalização não é de aplicação obrigatória em Portugal.

Nesta norma são apresentadas primeiramente definições de termos importantes para a compreensão do restante documento, sendo depois feita uma introdução sobre a monitorização e previsão de vibrações e outra sobre o mesmo, mas referente à onda aérea, e só depois são dados valores limites correspondentes aos dois temas.

Começando pela medição das vibrações, as recomendações feitas são que estas deverão ser realizadas no exterior do edifício, numa superfície que tenha uma boa fundação e que seja o mais próxima possível do edifício em estudo. No que toca à previsão, é aconselhada a realização de uma campanha de ensaios teste, como é habitual (BS 6472-2:2008).

Sobre a onda aérea, esta é sempre criada e transmitida aquando de uma detonação, a maior parte da energia desta é transportada abaixo de 20 Hz e é, portanto, inaudível ao ouvido humano, mas possível de sentir através do abalo ou da pressão causada. A onda aérea pode causar vibrações secundárias que poderão ser audíveis nos edifícios e que muitas vezes são a origem de queixas. De notar que esta tem uma velocidade de propagação menor que as vibrações no solo e por isso é sentida por último. Acerca da monitorização e previsão deste impacte, é importante mencionar que as condições meteorológicas têm uma influência bastante relevante, afetando a sua magnitude em qualquer localização da sua propagação (BS 6472-2:2008).

Focando nos limites apresentados para as vibrações, estes são acerca da velocidade de pico da partícula (PPV: *peak particle velocity*) em função do local em estudo, se é residencial ou de escritórios, e do período do dia. São definidos dois períodos, o de horas de trabalho normais, das 8 horas às 18 horas de segunda a sexta-feira e das 8 horas às 13 horas aos sábados, e o período de noite, das 23 horas às 7 horas. Por sua vez, os limites são os apresentados na tabela 4, para até três eventos vibratórios por dia, se forem mais, o limite apresentado deverá ser multiplicado pelo fator descrito na equação (7) (BS 6472-2:2008).

Tabela 4 - Limites de magnitudes para vibrações segundo a resposta humana até três eventos vibratórios por dia (adaptado de BS 6472-2:2008)

Local em estudo	Período do dia	Amplitude satisfatória de PPV [mm/s]
Residencial	Horas de trabalho normais (de segunda a sexta das 8 às 18 horas e sábados das 8 às 13 horas)	6,0 a 10,0 <sup>b)</sup>
	Noite (das 23 às 7 horas)	2,0
	Outras horas	4,5
Escritórios <sup>a)</sup>	Qualquer período	14,0

*a) Áreas de trabalho críticas, onde tarefas delicadas impõem critérios mais rigorosos do que o conforto humano, estão fora de aplicação desta norma.*

*b) Em propriedades residenciais, as pessoas exibem uma ampla variação de tolerância à vibração. Os valores específicos dependem de fatores sociais e culturais, atitudes psicológicas e do grau esperado de intrusão. Na prática, a amplitude satisfatória mais baixa deve ser usada com a mais alta sendo justificada caso a caso.*

*Nota 1: Esta tabela recomenda amplitudes de vibração abaixo das que apresentam probabilidade de originar comentários adversos (não sendo considerado qualquer ruído causado por vibrações da estrutura).*

*Nota 2: Duplicar as amplitudes de vibração sugeridas poderá resultar em comentários adversos, aumentando significativamente se as amplitudes forem quadruplicadas.*

$$F = 1,7 \times N_0^{-0,5} \times T^{-d} \quad (7)$$

Em que  $N_0$  representa o número de eventos vibratórios por dia;  $T$  a duração média do evento vibratório (s);  $d$  é zero se  $T$  for menor que 1 segundo, se for maior, será 0,32 se o piso for de madeira ou 1,22 se o piso for de cimento.

Por fim, sobre os limites para a onda aérea, apesar de não ser o impacte ambiental em estudo nesta dissertação, não são apresentados limites concretos, apenas apresentados valores considerados de referência, como o valor necessário para a quebra de uma janela que não esteja bem fixa de 150 dB (lin) e para a maioria das janelas de 170 dB (lin). É ainda deixada a nota que, o principal cuidado e objetivo a ter é a minimização da onda aérea na fonte, dando especial atenção no dimensionamento e concretização do diagrama de fogo.

Comparando com a NP2074/2015, estas têm campos de aplicação distintos, sendo a portuguesa referente apenas à proteção estrutural e a britânica apresentada referente à incomodidade humana, contudo a portuguesa é mais conservadora. Outras divergências são quanto aos valores limite apresentados, sendo da presente norma em relação ao PPV e não ao PVS, são delimitados por períodos do dia e não por classificação de estruturas e ainda, têm em consideração o número de eventos diários, o que não acontece na norma portuguesa.

### 3.3. NP2074/2015 versus Normas similares de outros países

Na tabela 5, é realizado um breve confronto entre a NP 2074/2015 e normas de outros países que sejam similares a esta, como a americana USBM RI 8507 ou a alemã DIN 4150. Estas apresentam valores menos conservadores, são menos pormenorizadas no que diz respeito à classificação das estruturas e apresentam intervalos de frequência maiores para os diferentes limites apresentados (Luz, 2017).

Tabela 5 - Resumo das normas NP2074/2015, USBM RI 8507, DIN 4150 (adaptado Luz, 2017)

Normas	Tipos de estruturas	Valores de velocidade limite	Particularidades
NP2074/2015	Sensíveis	1,5 mm/s – $f \leq 10$ Hz 3 mm/s – $10 < f \leq 40$ Hz 6 mm/s – $f > 40$ Hz	Aconselha o uso de detonadores eletrónicos em casos especiais
	Correntes	3 mm/s – $f \leq 10$ Hz 6 mm/s – $10 < f \leq 40$ Hz 12 mm/s – $f > 40$ Hz	
	Reforçadas	6 mm/s – $f \leq 10$ Hz 12 mm/s – $10 < f \leq 40$ Hz 40 mm/s – $f > 40$ Hz	
USBM RI 8507	Estruturas antigas: paredes interiores com gesso ou revestimento de madeira	12,7 mm/s – $f < 40$ Hz 50 mm/s – $f \geq 40$ Hz	Apenas duas categorias de estruturas e só considera frequências superiores ou inferiores a 40 Hz
	Estruturas modernas: paredes interiores pré-moldadas em gesso, sem revestimento	19 mm/s – $f < 40$ Hz 50 mm/s – $f \geq 40$ Hz	
DIN 4150	Edifícios delicados	3 mm/s – $f < 10$ Hz 3 – 8 mm/s – $10 < f < 50$ Hz 8 – 10 mm/s – $50 \leq f < 100$ Hz No andar mais alto do edifício: 8 mm/s – qualquer frequência	Limita a amplitude da vibração no piso, em $v_z = 20$ mm/s, e nas canalizações antigas
	Habitações	5 mm/s – $f < 10$ Hz 5 – 15 mm/s – $10 < f < 50$ Hz 15 – 20 mm/s – $50 \leq f < 100$ Hz No andar mais alto do edifício: 15 mm/s – qualquer frequência	
	Industrial	20 mm/s – $f < 10$ Hz 20 – 40 mm/s – $10 < f < 50$ Hz 40 – 50 mm/s – $50 \leq f < 100$ Hz No andar mais alto do edifício: 40 mm/s – qualquer frequência	

Como mencionado, é possível constatar que a USBM RI 8507 apenas faz distinção entre dois tipos de estruturas, ao contrário da portuguesa e da DIN 4150, não apresentando limites de valores para estruturas reforçadas ou consideradas de uso industrial. Quanto aos intervalos de frequências dominantes que definem os limites apresentados, a que mais se assimila à norma portuguesa é a DIN 4150, sendo igualmente a que mais se aproxima dos valores limites de velocidade de vibração, contudo estes valores correspondentes são sempre mais elevados, sendo que quanto mais competente for considerada a estrutura, maior é o intervalo de distância entre os valores limites das duas normas.

Constata-se que a norma portuguesa é bastante mais conservadora que as restantes, apresentando valores de velocidade de vibração limite mais baixos em todos os tipos de estruturas.

No gráfico da figura seguinte, são apresentados os valores de vibração limite das várias normas apresentadas para estruturas sensíveis, sendo possível verificar que quanto maior a frequência dominante maior a disparidade de valores limites entre normas, sendo a USBM RI 8507 a mais permissiva de todas.

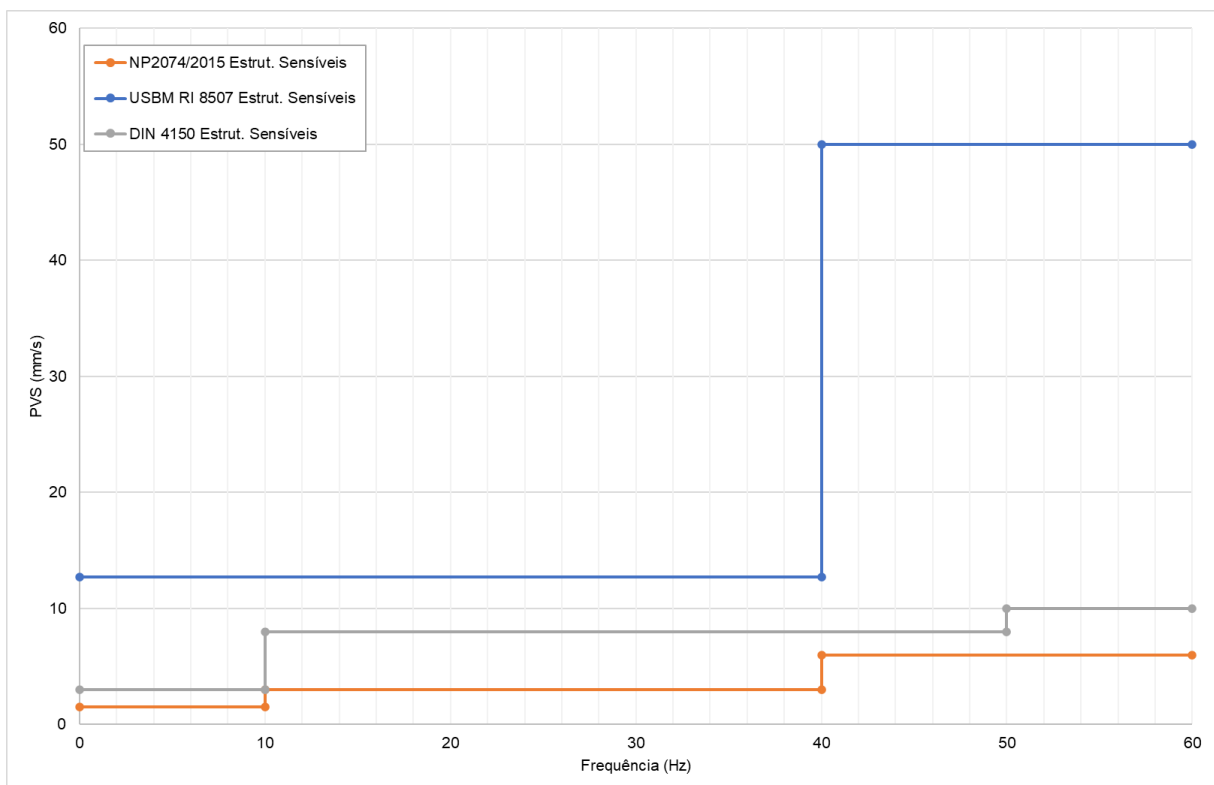


Figura 12 - Comparação dos limites de velocidades para estruturas sensíveis das diferentes normas apresentadas

## 4. Modelo de previsão de amplitudes de vibrações nos terrenos

Como o próprio nome indica, o tipo de modelos abordado neste capítulo tem como principal objetivo prever as amplitudes de vibrações nos terrenos, que têm origem em detonações. Deste modo, irá ser facilitada a adaptação dos diagramas de fogo e o seu dimensionamento de acordo com os limites legais ou pretendidos para as amplitudes em questão.

Ao longo da história foram vários os autores que tentaram chegar a modelos mais precisos, para isso criaram alguns modelos de raiz ou foram fazendo adaptações a modelos pré-existentes. Um dos primeiros estudos foi realizado em 1927, por Rockwell (Nicholls *et al.*, 1970), mas alguns outros nomes ficaram igualmente marcados na história devido aos seus contributos nesta área, como por exemplo, Ambraseys e Hendron ou Langefors e Kihlstrom.

Atualmente ainda não se chegou ao modelo de previsão perfeito, mas a equação definida por Johnson em 1971, apresentada na equação (8), é a reconhecida por vários autores (Dinis da Gama, 1978; Jimeno *et al.*, 1995; Hustrulid, 1999; *etc*) como a mais utilizada devido à sua versatilidade e facilidade de aplicação (Bernardo, 2004). Com a evolução dos métodos estatísticos já existiram estudos para introdução de variáveis qualitativas, bem como de novas variáveis quantitativas, porém a sua estrutura de duas variáveis independentes e três constantes, como apresentado na equação em baixo, continua a ser a mais utilizada.

$$v = aQ^bD^c \quad (8)$$

Onde:

- $v$  - Velocidade vibratória resultante (PVS) [mm/s]
- $Q$  – Carga máxima de explosivo por retardo [kg]
- $D$  – Distância entre os pontos de detonação e de registo [m]
- $a, b$  e  $c$  – Constantes características do local e dos desmontes

Para determinar as constantes  $a$ ,  $b$  e  $c$ , que são características do local e do diagrama de fogo, é necessário seguir uma metodologia como a exemplo, apresentada na figura 13, ou seja, é necessário construir uma base de dados de registos de desmontes com recurso a sismógrafos de engenharia no local (Bernardo & Vidal, 2005). De seguida essa base de dados deverá ser analisada, deverão ser retirados os valores considerados anómalos que não excedam 10% do número total de registos e por fim realizar uma regressão linear múltipla. Deverão ser realizadas várias tentativas, variando os valores considerados anómalos, comparando os coeficientes de determinação entre si e a equação que apresentar um coeficiente mais próximo de 100% deverá ser a escolhida como lei de atenuação característica do local.

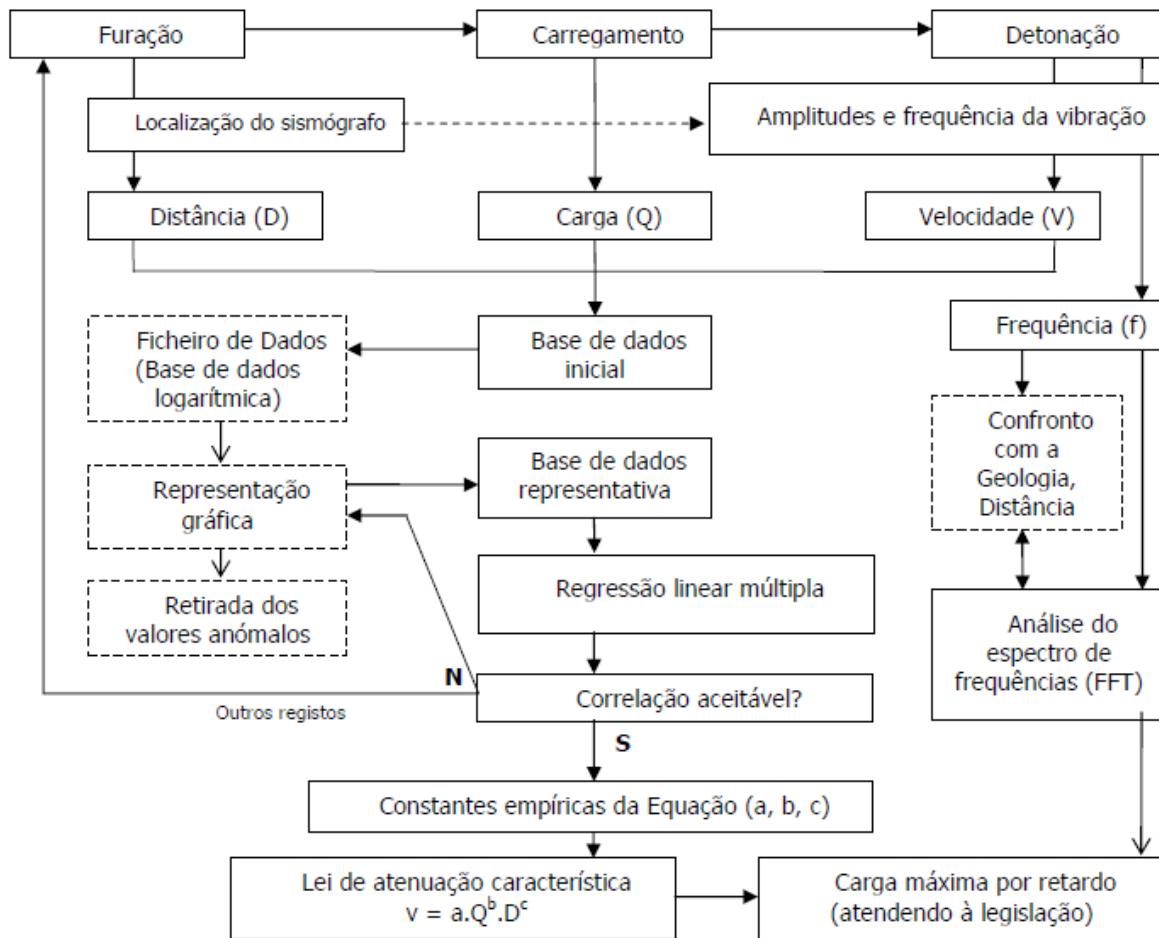


Figura 13 - Metodologia para controle de vibrações causadas por detonações em maciços rochosos (Bernardo & Vidal, 2005)

Na metodologia apresentada existem fatores que não são controláveis, ou seja, não podem ser adaptados facilmente às necessidades do estudo ou trabalho, nomeadamente a distância (D) entre a solicitação e o recetor, ou estrutura a monitorizar. Por sua vez, existe um fator controlável que é a carga máxima por retardo (Q), isto acontece com a implementação de iniciação múltipla por furo ou pela adaptação da altura das bancadas. Por fim, o último fator, a velocidade de vibração (v) é uma variável dependente dos fatores anteriormente mencionados. Com a conjugação dos três, é possível realizar uma regressão linear múltipla, por consequência criar uma lei de atenuação característica e posteriormente adaptar o fator controlável, a carga máxima por retardo, aos resultados pretendidos. De salientar que as constantes determinadas deverão estar na mesma ordem de grandeza das já determinadas na bibliografia da especialidade para a litologia em questão (Bernardo, 2004).

## 5. Caracterização das pedreiras em estudo e da respetiva envolvente

As pedreiras em estudo são propriedade do grupo Secil, sendo a pedra do Outão da responsabilidade da Secil Cimentos e a pedra do Vale do Covão, da responsabilidade da Secil Britas. Ambas as pedreiras em estudo, como já mencionado anteriormente, localizam-se no Parque Natural da Arrábida, como é possível verificar na figura 14, têm pequenas populações na envolvente e são alvo de queixas (frequentes, embora discutíveis) devido às vibrações provocadas pelo uso de explosivos.

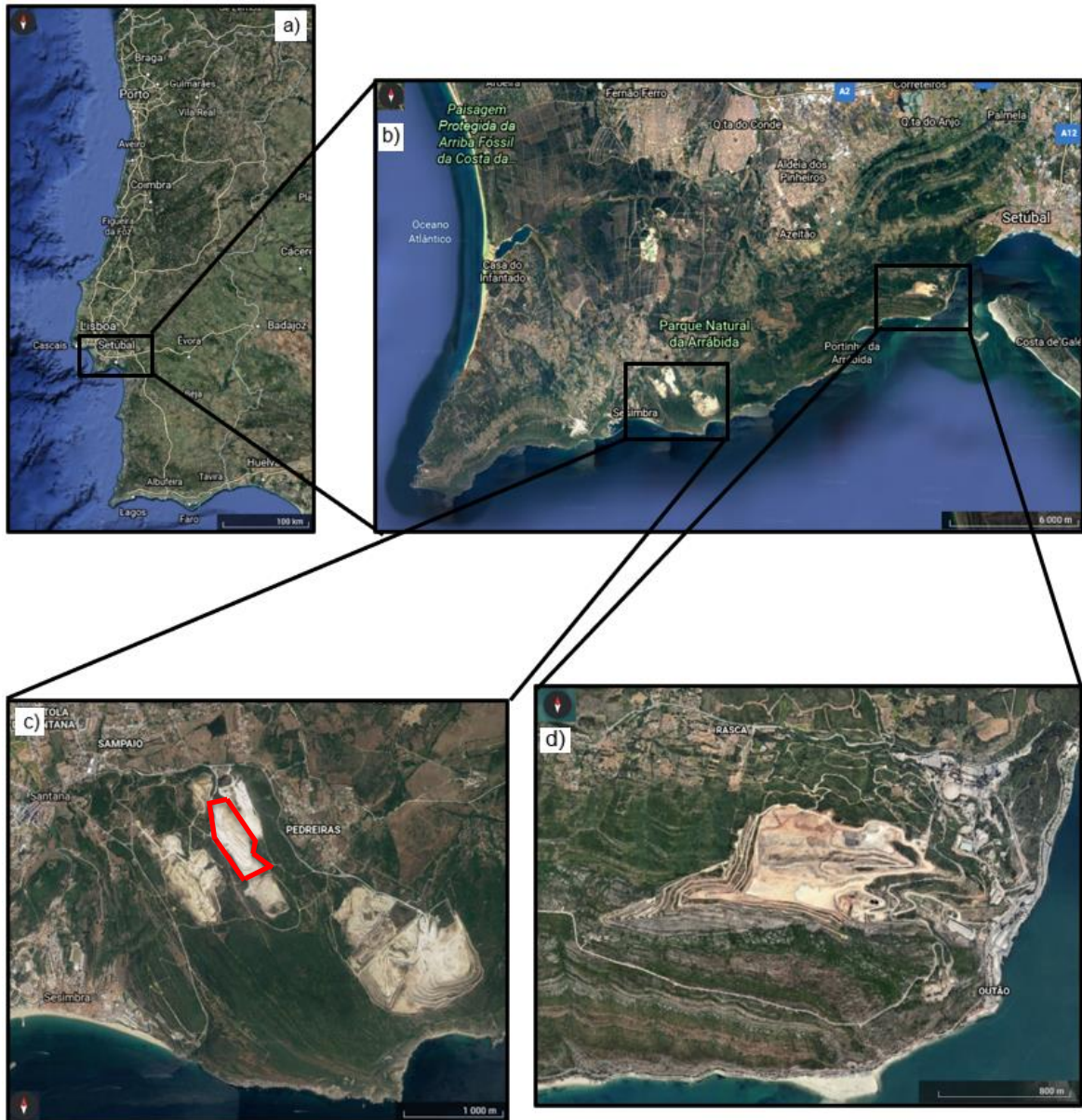


Figura 14 - Localização geográfica das pedreiras em estudo: a) fotografia aérea de Portugal continental; b) fotografia aérea do Parque Natural da Arrábida; c) fotografia aérea da pedra Vale do Covão (dentro do polígono vermelho); d) fotografia aérea da pedra Outão. (Google Earth)



## 5.1. Grupo SECIL

O grupo SECIL é um grupo empresarial que integra várias empresas de áreas complementares à sua atividade principal que é a produção e comercialização de cimento, betão pronto, agregados, argamassas, prefabricados de betão e cal hidráulica. O grupo é originário de Portugal e atualmente está presente em mais sete países (Angola, Espanha, Tunísia, Líbano, Cabo Verde, Holanda e Brasil). Em Portugal opera atualmente três fábricas de cimento, sendo elas a do Outão, a de Maceira e a de Pataias, que juntamente com mais 5 espalhadas pelo mundo, têm uma capacidade anual de produção superior a 9 milhões de toneladas. Os seus principais valores são: as pessoas, a integridade, a responsabilidade, a colaboração e o desempenho (Secil, Empresa, 2021).

A fundação deste grupo remonta a 1904 com o nome *Companhia de Cimentos de Portugal* e com a instalação da fábrica do Outão, que se encontrava numa localização singular, com a possibilidade de expedição por terra e mar e com a existência da matéria-prima necessária no filão de calcários e margas existente na serra da Arrábida, ainda dentro do perímetro fabril. A marca Secil apenas foi criada depois em 1925, tendo sido em 1930 a constituição da atual *Secil – Companhia Geral de Cal e Cimento S.A* (Secil, História, 2021).

A Secil Britas é uma empresa do grupo Secil que tem como principal atividade a exploração de pedreiras para o fornecimento de materiais para a indústria da construção civil. Possui 12 pedreiras espalhadas pelo país, onde explora materiais como o granito e o calcário, tendo a capacidade de exploração anual de 7 500 000 toneladas de agregados industriais e 150 000 toneladas de blocos. A empresa presta ainda alguns serviços a terceiros como desmonte, carga e transporte, britagem e gestão de resíduos, sendo que no caso específico do desmonte é responsável por este serviço nas pedreiras de todo o país do grupo Secil, inclusive a do Outão, em Setúbal, onde os trabalhos desta dissertação se desenvolveram (Secil Britas, 2021).



## 5.2. Pedreira do Outão - Enquadramento geológico, geográfico e geotécnico

A pedreira do Outão, presente na figura 15, localiza-se no parque natural da Arrábida, junto à fábrica de cimento da Secil, a poucos quilómetros de Setúbal, a sudeste da aldeia do Vale da Rasca e a noroeste do Forte Velho do Outão. Tem a capacidade de produção anual de aproximadamente 2 milhões de toneladas.



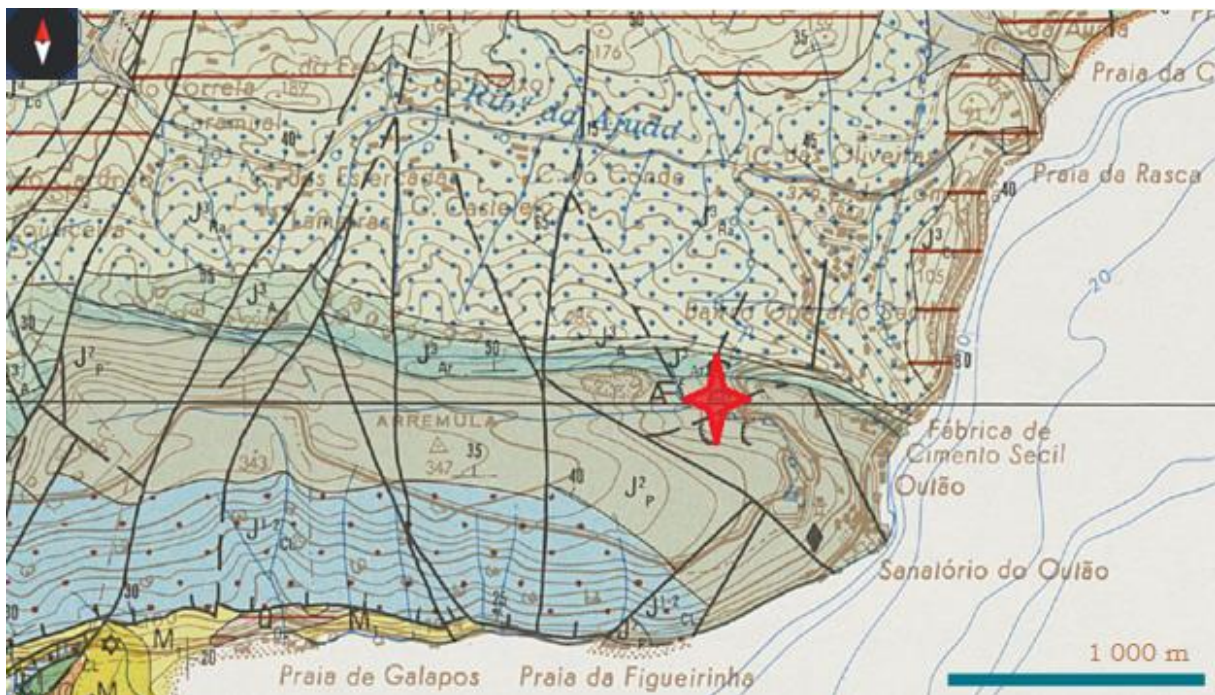
Figura 15 - Pedreira do Outão.

Os explosivos utilizados habitualmente nesta pedreira são as emulsões encartuchadas, sendo utilizado para a carga de fundo o produto *Senatel Pulsar™* e para a carga de coluna o *Senatel Powerpac™*, ambos da Orica Mining Services Portugal, S.A. Durante o inverno e em períodos de chuva, em que é mais provável a existência de água nos furos, é adicionado à carga de coluna o produto *Senatel Magnafrac™* pois o *Senatel Powerpac™* tem densidade de 0,98 e por isso flutua. Habitualmente são utilizados detonadores não elétricos nos desmontes, os *Exel™ MS*.

Para redução dos impactes ambientais, em concreto das amplitudes de vibração, já são aplicadas diversas medidas de minimização, já apresentadas neste documento, que são: a redução das alturas das bancadas, o cuidado na escolha da geometria do diagrama de fogo e a utilização de iniciação múltipla. Esta última medida é a de mais fácil introdução e tem vindo a ser aplicada em bancadas cada vez mais baixas (recentemente para bancadas a partir dos 12 metros de altura), com o objetivo de reduzir ao máximo o incómodo causado nas populações envolventes.

A pedreira atualmente tem um *layout* uniforme de apenas uma, como é possível verificar na figura anterior, mas na verdade é o conjunto de duas pedreiras de materiais distintos, a Vale de Mós A, que extrai margá e a Vale de Mós B, que extrai calcário. Todo o material explorado é encaminhado como matéria-prima para a fábrica de cimento da Secil também localizada no Outão.

O local desta pedreira é representado na carta geológica de Setúbal (carta 38-B), sendo possível observar o excerto correspondente na figura seguinte. Fazendo uma análise inicial, do lado norte a rocha existente é maioritariamente marga e do lado sul, calcário.



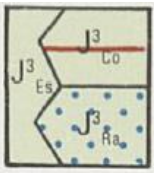

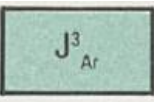

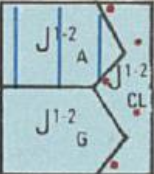

Legenda:			
	Calcários, grés e margas de Espichel ( $J^3_{Es}$ ); Conglomerados de Comenda ( $J^3_{Co}$ ); Argilas, grés, conglomerados e calcários de Vale de Rasca ( $J^3_{Ra}$ ). (Jurássico, Titoniano e Kimeridgiano)		Calcários de Azóia ( $J^3_A$ ); Calcários e grés intercalado de Risco ( $J^3_R$ ); Dolomitos de Forte da Baralha ( $J^3_{Ba}$ ). (Jurássico, Kimeridgiano a Oxfordiano médio).
	Margas, argilas, calhaus negros e conglomerados de Arrábida. (Jurássico, Oxfordiano médio a superior)		Calcários de Pedreiras (Jurássico, Caloviano p.p. a Batoniano superior)
	Dolomitos de Cabo de Ares ( $J^{1-2}_A$ ); Margas, calcários oolíticos e dolomitos com Gervília ( $J^{1-2}_G$ ); Dolomitos do Convento e S. Luís ( $J^{1-2}_{CL}$ ). (Jurássico, Batoniano médio e inferior a Toarciano inferior)		Pedreira do Outão

Figura 16 - Trecho da carta geológica onde se localiza a pedreira do Outão (Carta geológica de Setúbal: 38-B)

Todas as unidades geológicas presentes no local da pedreira são pertencentes ao Jurássico e são: calcários de Pedreiras e de Azóia; margas, argilas, calhaus negros e conglomerados de Arrábida; e na extremidade norte da pedreira, argilas, grés, conglomerados e calcários de Vale da Rasca.

As margas, argilas, calhaus negros e conglomerados de Arrábida são informalmente denominados por Brecha da Arrábida, esta litologia é caracterizada por ser um conglomerado carbonatado polimítico, com matriz argilosa vermelha. Já as margas e os calcários são lacustres, com presença de carófitas. Existe ainda uma ausência de fósseis de idade e uma falta de ligação cartográfica, que dificultam a realização de uma relação estratigráfica entre as várias unidades geológicas existentes (Kullberg, *et al*, 2006).

Geoquimicamente nesta pedreira é possível obter sílica ( $\text{SiO}_2$ ), alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), óxido de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), óxido de cálcio ( $\text{CaO}$ ) e óxido de magnésio ( $\text{MgO}$ ), elementos estes que *desempenham um papel fundamental na composição do cru, material que resulta da homogeneização e moagem das matérias-primas e que, depois de cozido, se transforma em clínquer*, o principal componente do cimento (Vermelhudo, N. *et al*, 2003).

A zona da pedreira do Outão onde existe marga, correspondente à Vale de Mós A, é a zona onde existe uma maior heterogeneidade geoquímica, ou seja, onde os valores apresentam maior amplitude e variabilidade, pois é constituída na realidade por calcários margosos e margas, intercalados com conglomerados calcários (Vermelhudo, N. *et al*, 2003).

Apesar de existir uma convergência de materiais distintos nesta pedreira, a análise realizada neste estudo considerou a pedreira num só elemento, não fazendo distinção do material geológico presente. Esta escolha deveu-se, não só porque os dados quando analisados em separado não foram conclusivos, mas também por falta de valores bibliográficos de referência para a confirmação dos coeficientes referentes à marga, por fim, como é possível concluir da análise da carta geológica, existem várias litologias na zona em causa, ou seja, o maciço em estudo acabou por ser o conjunto de todas estas estruturas geológicas num todo.



### 5.3. Pedreira do Vale do Covão - Enquadramento geológico, geográfico e geotécnico

A pedreira do Vale do Covão, presente na figura 17, é uma pedreira de calcário, localizada no Lugar do Covão, na zona de Santana, em Sesimbra. Tem a capacidade de produção anual de cerca de 700 mil toneladas e o seu raio de ação é a grande Lisboa, a região de Setúbal e o Alentejo. O material explorado nesta pedreira está certificado para o fabrico de betão, misturas betuminosas, bases e sub-bases para pavimentos rodoviários e enrocamentos (Secil Britas, Pedreiras Sesimbra, 2021).



*Figura 17 - Pedreira do Vale do Covão*

Os explosivos utilizados habitualmente nesta pedreira são as emulsões encartuchadas, como na pedreira anterior, sendo utilizado igualmente para a carga de fundo o produto *Senatel Pulsar™* e para a carga de coluna o *Senatel Powerpac™*, ambos da Orica Mining Services, S.A. Quanto aos detonadores, são utilizados maioritariamente detonadores não elétricos, os *Exel™ MS*.

Geologicamente esta pedreira é representada também na carta de Setúbal (carta 38-B) e na figura 18 é apresentado o excerto da carta referente à pedreira do Vale do Covão, ao analisá-lo é possível afirmar que os materiais explorados são apenas calcários de Pedreiras, do Jurássico. A formação geológica desta zona, segundo Kullberg, *et al*, 2006, regista o início de um novo período de invasão marinha, ainda que confinada.



Legenda:

	Margas, argilas, calhaus negros e conglomerados de Arrábida. (Jurássico, Oxfordiano médio a superior)		Calcários de Pedreiras (Jurássico, Caloviano p.p. a Batoniano superior)
	Dolomitos de Cabo de Ares (J¹-² <sub>A</sub> ); Margas, calcários oolíticos e dolomitos com Gervilia (J¹-² <sub>G</sub> ); Dolomitos do Convento e S. Luís (J¹-² <sub>CL</sub> ). (Jurássico, Batoniano médio e inferior a Toarciano inferior)		Pedreira do Vale do Covão

Figura 18 - Trecho da carta geológica onde se localiza a pedreira do Vale do Covão (Carta geológica de Setúbal: 38-B)

Para o fabrico de betão, os agregados calcários são dos mais utilizados e dão origem a betões comuns, com aplicações com função de resistência, como betão estrutural. Importante referir que as propriedades dos agregados que têm maior repercussão no comportamento do betão são, entre outras: a porosidade, a absorção, a elasticidade e a resistência mecânica (Coutinho, J. S., 1999).

Quanto à utilização destes agregados para bases e sub-bases para pavimentos é sabido que estes apresentam resistência elevada em ensaios triaxiais para medidas de deformações permanentes (Malysz, 2004).

Esta página foi deixada propositadamente em branco.



## 6. Metodologia e Monitorização

A metodologia aplicada na realização deste estudo divide-se em duas partes, o trabalho de campo e posteriormente o tratamento de dados.

Quanto ao trabalho de campo este consistiu maioritariamente: no acompanhamento do carregamento dos desmontes; na obtenção de dados relativos ao afastamento das frentes de desmonte, utilizando o equipamento *laser* já caracterizado neste documento; na monitorização das vibrações causadas pelos desmontes.

A monitorização das vibrações realizou-se entre o dia 1 de março e 3 de julho de 2021, dividindo-se durante este período entre as duas pedreiras em estudo. Para a sua realização utilizaram-se vários sismógrafos de engenharia da marca *Instantel*, devidamente calibrados e seguindo os requisitos apresentados na norma portuguesa 2074/2015. Na maioria dos ensaios utilizaram-se dois sismógrafos para a monitorização simultânea em locais distintos. No anexo B é apresentado um exemplo de registo de amplitude de vibração fornecido pelo *software* utilizado (*THOR*, da *Instantel*), após uma monitorização.

Os sismógrafos utilizados e a forma como estes foram instalados para a monitorização é apresentada nas figuras 19 e 20, de referir que em nenhuma destas é possível observar o geofone, pois este encontra-se por baixo do saco de areia que serviu para evitar oscilações.



Figura 19 - Instalação do sismógrafo Micromate no escritório da pedreira do Vale do Covão



Figura 20 - Instalação do sismógrafo Minimate no Forte Velho do Outão

Na figura 21 é apresentado o tipo de geofone triaxial (DIN) utilizado em toda a campanha de monitorização.



Figura 21 - Geofone triaxial (DIN) utilizado

Os locais escolhidos para a colocação dos sismógrafos foram estratégicos, tentando abranger todas as direções em volta de cada uma das pedreiras e o máximo de intervalos de distâncias possíveis. Todavia, existiram algumas limitações para a localização dos pontos de monitorização, principalmente devido às características da envolvente, quer devido à intensa vegetação existente, quer ao terreno não apresentar condições para a instalação do sismógrafo, bem como à ausência de estruturas em alguns locais.

Para calcular as distâncias entre os pontos de monitorização e os locais de desmorte, foram utilizados dois métodos distintos, para o Outão utilizou-se um modelo topográfico em formato *AutoCad* para retirar as coordenadas de cada local de monitorização e para a marcação de cada desmorte, calculando com recurso às coordenadas fornecidas a distância entre pontos. Já na pedreira do Vale do Covão, como não existe um modelo topográfico que inclua os locais de monitorização escolhidos, recorreu-se ao *Google Maps* para marcação de cada desmorte e respetivos locais de monitorização, calculando através dos dados fornecidos pela aplicação a distância entre eles.

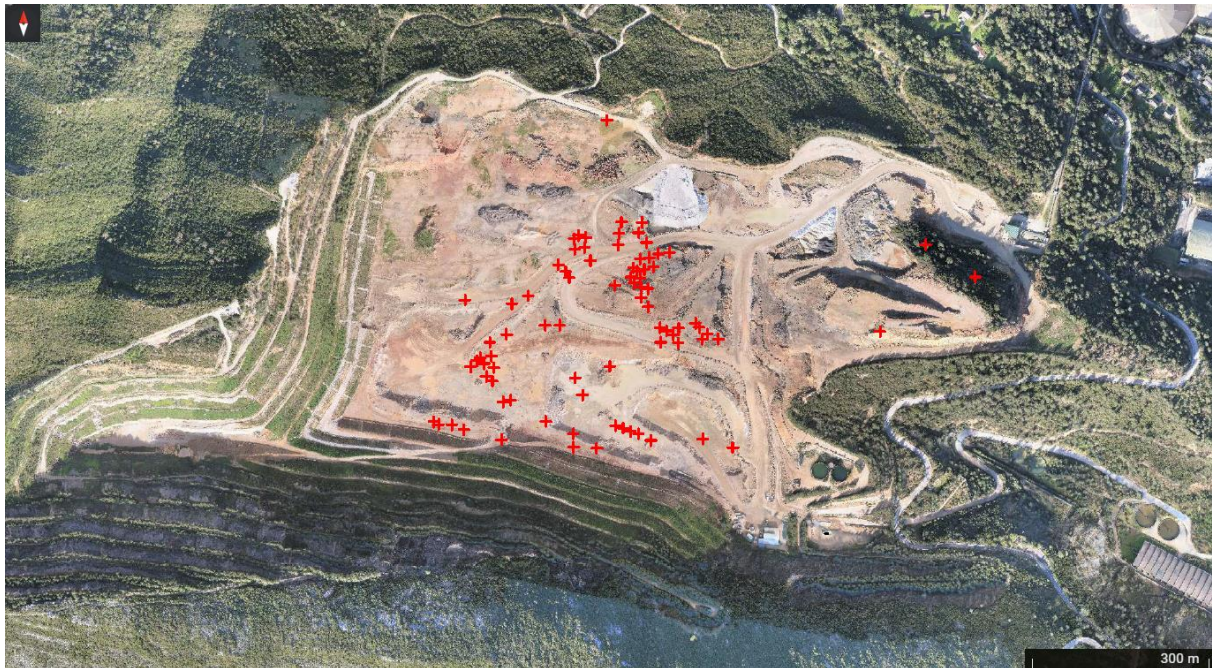
Após o trabalho de campo criou-se uma base de dados para cada um dos casos de estudo, estas bases de dados foram analisadas, retiraram-se os dados considerados anómalos (*outliers*) e realizou-se uma regressão linear múltipla dos dados, recorrendo ao *software SPSS*, com o objetivo de criar um modelo de propagação de vibrações para cada uma das pedreiras.

Por fim, com os dados *laser 2D*, criou-se uma outra base de dados onde se juntaram estes novos dados aos restantes dados dos desmontes em causa. Com estes dados realizou-se novamente a análise descrita no parágrafo anterior e outra semelhante, mas desta vez adicionando a variável afastamento médio à regressão linear múltipla, tendo comparado no fim os resultados obtidos.



## 6.1. Monitorização na Pedreira do Outão

Na figura seguinte são apresentados os desmontes, representados por cruzes vermelhas, realizados na pedreira do Outão durante toda a monitorização.



*Figura 22 - Locais dos desmontes na pedreira do Outão durante a monitorização (AutoCad)*

Nesta pedreira é importante notar que a zona envolvente a oeste e sudoeste é constituída por vegetação densa e grandes declives, deste modo o único local que se considerou possível realizar o registo de vibrações nestas direções foi num edifício de apoio às antenas de telecomunicações, identificado pela letra D, na figura 23. Ainda assim, a diferença de cotas entre este local e os locais habituais de desmonte é bastante acentuada, sendo o local de medição a uma altitude bastante mais elevada, por esse motivo na tentativa realizada de monitorização (com a detonação de um desmonte na área da pedreira mais próxima deste local), o equipamento de medição não conseguiu registar valor de amplitude de vibração e não se sentiu qualquer efeito de onda aérea, por esse motivo existe uma lacuna na monitorização dessa zona envolvente da pedreira, embora a ausência de registos esteja associado a ausência de reclamações.

Na figura 23, é possível localizar os nove pontos de monitorização realizados. Estes foram codificados por letras e cores, de acordo com as classificações das estruturas, sendo elas:

- estruturas sensíveis, apresentadas com a cor vermelha: A, B, C e H;
- estruturas correntes, apresentadas a amarelo: D, E, F e G;
- e estruturas reforçadas, apresentadas a verde: I.



*Figura 23 - Localização dos locais de monitorização na pedreira do Outão. (Google Earth)*

Durante todo o período de monitorização foi dada mais importância e atenção aos locais na aldeia do Vale da Rasca. Por questões puramente práticas, os locais onde foram realizadas mais monitorizações foram os F e H, pois são de acesso público, representativos dos efeitos sentidos na zona populacional e de classificações de estruturas diferentes.

No local I sentiram-se por vezes dificuldades na monitorização, devido às perturbações de vibrações provocadas pelo funcionamento de equipamentos da fábrica de cimento, originando registos de amplitude de vibração pouco claros e fidedignos para a utilização neste estudo.

Nas figuras seguintes são apresentadas as instalações realizadas nos diversos locais de monitorização, com a respetiva identificação do local. De salientar que não estão representados dois locais, o E e o G, pois correspondem a habitações privadas, onde não foi possível fazer o registo de imagem.





Figura 24 - Local A: Bomba de gasolina da pedreira (Outão)



Figura 25 - Local B: Ponte (Outão)



Figura 26 - Local C: Forte Velho do Outão (Outão)



Figura 27 - Local D: edifícios de apoio às antenas de telecomunicações (Outão)



Figura 28 Local F: Pateo da Rasca (Outão)



Figura 29 - Local H: Capela do Vale da Rasca (Outão)



Figura 30 - Local I: Edifício de Comando da Fábrica do Outão (Outão)

## 6.2. Monitorização na pedreira do Vale do Covão

Na figura 31 são apresentados os desmontes, representados a vermelho, realizados na pedreira do Vale do Covão durante toda a monitorização.

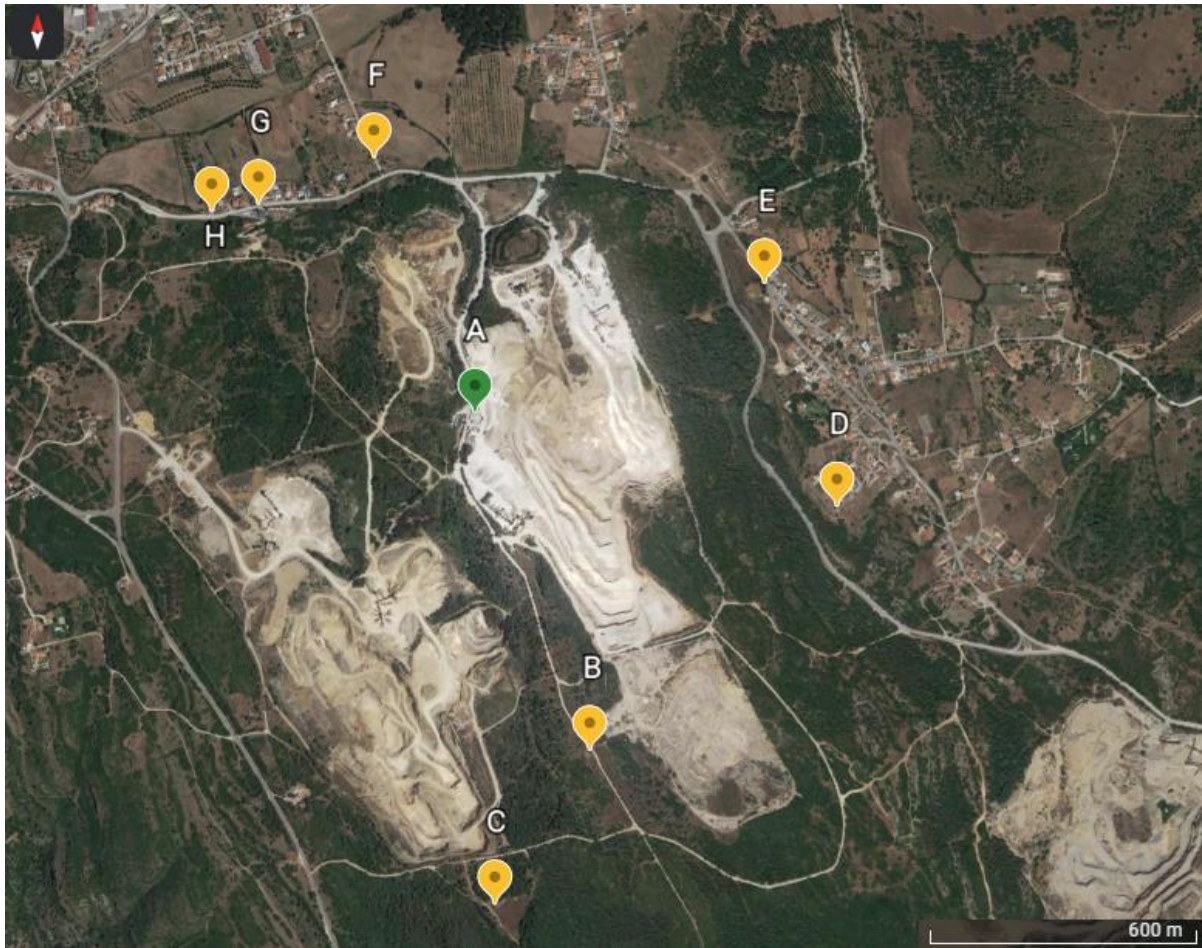


*Figura 31 - Locais dos desmontes na pedreira do Vale do Covão durante a monitorização (Google Earth)*



Para a monitorização na pedreira do Vale do Covão, foram utilizados oito locais de monitorização, estando apresentados na figura 32, utilizando a mesma metodologia que na pedreira do Outão:

- a vermelho são locais referentes a estruturas sensíveis, não existindo nenhum;
- a amarelo, locais referentes a estruturas correntes: B, C, D, E, F, G e H;
- e a verde a única estrutura reforçada: A.



*Figura 32- Localização dos locais de monitorização na pedreira Vale do Covão. (Google Earth)*

A maior limitação na monitorização foi a existência de outras pedreiras nas proximidades e a dificuldade de acesso às zonas a sudeste e a oeste da pedreira, uma vez que os caminhos são bastante antigos, de terra e degradados.

De seguida são apresentadas, como no caso de estudo anterior, as instalações realizadas nos diversos locais de monitorização, com a respetiva identificação do local.





Figura 33 - Local A: Escritório (V. Covão)



Figura 34 - Local B: Antigo refeitório de uma antiga pedreira (V. Covão)



Figura 35 - Local C: Antigo curral (V. Covão)



Figura 36 - Local D: Rua Sra. do Carmo (V. Covão)



Figura 37 - Local E: Escola da aldeia das Pedreiras (V. Covão)



Figura 38 - Local F: Calçada das Oliveiras (V. Covão)



Figura 39 - Local G: Rua Terras da Eira nº77 (V. Covão)



Figura 40 - Local H: Rua Terras da Eira nº91 (V. Covão)

## 7. Caracterização de desmontes realizados

Para exemplificar a recolha de dados realizada durante o trabalho de campo, os desmontes realizados no dia 18 de junho de 2021 em ambas as pedreiras foram os escolhidos para serem caracterizados ao detalhe.

No anexo C é possível consultar a tabela de dados referente à pedreira do Outão e no anexo D a tabela referente à pedreira do Vale do Covão. O número do desmorte, indicado nas tabelas, corresponde ao número deste desde o início do ano, indicado após o ponto (.), ou seja, por exemplo, se for o desmorte nº 35.21 significa que foi o 35º desmorte na pedreira, no ano de 2021.

### 7.1. Pedreira do Outão

Começando pela pedreira do Outão, o desmorte apresentado é o nº 108.21, ou seja, o 108º desmorte realizado na pedreira desde o início do ano de 2021. Na tabela 6 são apresentadas as características gerais do respetivo diagrama de fogo.

*Tabela 6 - Características gerais do diagrama de fogo do desmorte nº 108.21 da pedreira do Outão*

<b>Tipo de rocha</b>	Marga
<b>Piso da bancada</b>	130
<b>Nº de furos</b>	7
<b>Nº de fiadas</b>	1
<b>Iniciação múltipla</b>	Sim
<b>Nº de detonadores por furo</b>	2
<b>Detonadores utilizados</b>	Não elétricos de 500 e de 475 milissegundos (ms)
<b>Carga máxima por retardo</b>	39 quilogramas
<b>Carga de Fundo</b>	<i>Senatel Pulsar™</i> ,
<b>Carga de Coluna</b>	<i>Senatel Powerpac™</i> ,
<b>Inclinação de furação</b>	20 graus
<b>Altura da bancada</b>	11,5 metros
<b>Altura dos furos</b>	12 metros
<b>Distância à frente</b>	4,5 metros
<b>Espaçamento</b>	5,8 metros
<b>Consumo específico de explosivo</b>	105 g/ton
<b>Temporização de ligadores</b>	42 ms
<b>Locais de monitorização</b>	H

Este desmorte teve apenas um local de monitorização sendo ele o H, que corresponde à Capela do Vale da Rasca, que se encontrava nas costas do desmorte.



Na figura 41 é possível observar o topo da bancada, logo após o carregamento dos furos e na figura 42 a face livre do diagrama de fogo em causa.



Figura 41 - Desmorte nº 108.21 da pedreira do Outão imediatamente após o carregamento dos furos



Figura 42 - Face livre do desmorte nº 108.21 da pedreira do Outão

Durante o trabalho de campo foi ainda registada a esquematização da temporização realizada no desmorte, sendo apresentada na figura 43, para que se confirmasse que não iriam ocorrer repetições e qual a carga máxima por retardo a ter em consideração, pois no caso de existirem repetições de temporização esta seria a carga de explosivo do conjunto de furos a disparar no mesmo retardo.

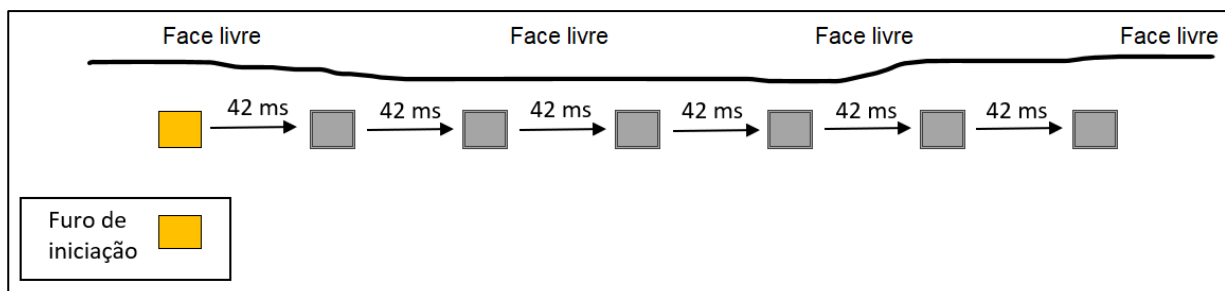


Figura 43 - Temporização do desmorte nº 108.21 da pedreira do Outão



## 7.2. Pedreira do Vale do Covão

Caracterizando agora o desmonte nº 81.21 da pedreira do Vale do Covão, temos a tabela 7 onde são apresentadas, tal como anteriormente, as características gerais do respetivo diagrama de fogo.

*Tabela 7 - Características gerais do diagrama de fogo do desmonte nº 81.21 da pedreira do Vale do Covão*

<b>Tipo de rocha</b>	Calcário
<b>Piso da bancada</b>	175
<b>Nº de furos</b>	12
<b>Nº de fiadas</b>	2
<b>Iniciação múltipla</b>	Não
<b>Nº de detonadores por furo</b>	1
<b>Detonadores utilizados</b>	Não elétricos de 475 milissegundos (ms)
<b>Carga máxima por retardo</b>	58 quilogramas
<b>Carga de Fundo</b>	<i>Senatel Pulsar™</i> ,
<b>Carga de Coluna</b>	<i>Senatel Powerpac™</i> ,
<b>Inclinação de furação</b>	18 graus
<b>Altura da bancada</b>	9 metros
<b>Altura dos furos</b>	10 metros
<b>Distância à frente</b>	4 metros
<b>Espaçamento</b>	4,5 metros
<b>Consumo específico de explosivo</b>	105 g/ton
<b>Temporização de ligadores</b>	17 e 25 ms
<b>Locais de monitorização</b>	D

Por coincidência, este desmonte, tal como o anteriormente, só tem um local de monitorização, pois neste dia de trabalho apenas esteve disponível um sismógrafo. O local escolhido foi o D, correspondente à Rua Sra. do Carmo na aldeia de Pedreiras, por ser o local mais próximo do desmonte, estar localizado nas costas do mesmo e por isso ser o local onde se esperava sentir uma maior amplitude de vibração.

Nas figuras 44 e 45 são apresentados respectivamente, tal como no exemplo anterior, o topo da bancada logo após o carregamento dos furos e a face livre do diagrama de fogo em causa.



Figura 44 - Desmorte nº 81.21 da pedreira do Vale do Covão imediatamente após o carregamento dos furos



Figura 45 - Face livre do desmorte nº 81.21 da pedreira do Vale do Covão

A ligação realizada neste desmorte foi em espinha, sendo apresentada a esquematização de temporizações na figura seguinte.

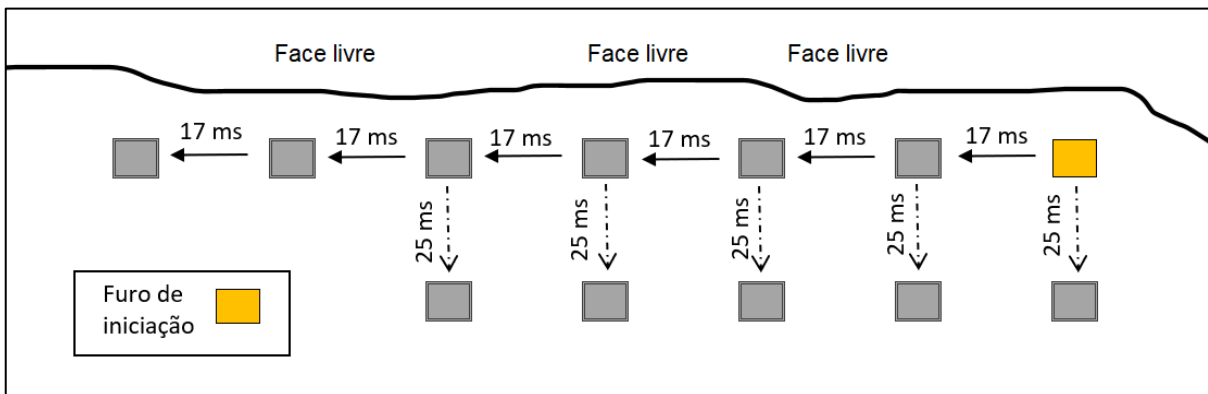


Figura 46 - Temporização do desmorte nº 81.21 da pedreira do Vale do Covão

## 8. Análise e discussão dos dados obtidos

Após 4 meses de trabalho de campo, foram obtidos 118 registros de vibrações e 39 conjuntos de dados *laser* 2D na pedreira do Outão e 87 registros de vibrações e 20 conjuntos de dados *laser* 2D na pedreira do Vale do Covão. A partir dos registros de vibrações reuniram-se a velocidade vibratória e a frequência dominante dos eventos e a partir dos dados *laser* 2D obtiveram-se os pontos já identificados no capítulo dedicado a este equipamento. O *trigger* utilizado, ou seja, o valor mínimo de ativação de início de registro pelo sismógrafo, foi sempre perto do mínimo permitido pelo equipamento, 0,150 mm/s, como é possível verificar no anexo B.

Os valores de velocidade vibratória utilizados neste estudo foram os equivalentes ao  $V_{m\acute{a}x}$  apresentado na equação (5), também denominado de PVS (*peak vector sum*). A frequência dominante do evento foi determinada analisando as frequências dominantes de cada componente do terreno (longitudinal, transversal e vertical), sendo selecionada a frequência correspondente à onda de maior amplitude, no caso de existirem amplitudes máximas iguais, a frequência dominante escolhida foi a menor das componentes em causa.

Para o presente estudo, o modelo de Johnson, já apresentado, foi o empregue por ser considerado suficiente e eficaz na criação de modelos de previsão para os dois casos de estudo e adequado para o estudo da influência do afastamento que se pretendia realizar e que será mencionado mais à frente.

O critério utilizado para avaliar a qualidade do ajuste das várias regressões lineares foi o coeficiente de determinação ( $R^2$ ). Este coeficiente é uma medida que avalia a capacidade de um modelo prever ou explicar um resultado, sendo que diz quão próximos os valores observados estão dos valores previstos pela regressão. Ele é apresentado em percentagem, sendo que, em regra geral, quanto maior esta for, melhor será o ajuste da regressão para os dados em causa. Importante notar que este coeficiente apenas nos indica a magnitude da associação (Enders, 2020).

O primeiro tratamento dos dados obtidos foi a extração de valores anómalos, ou também denominados por *outliers*. Para ser possível a extração de valores anómalos com recurso a processos gráficos foi necessário fixar um dos parâmetros dos dados, visto que existiam variações em todos, tendo-se escolhido a carga máxima por retardo (Q) para esse efeito, contudo em vez se fixar um valor de Q para cada representação gráfica, optou-se por dividir os dados em intervalos de Q, analisando a taxa de variação de cada um para que esta fosse o mais reduzida possível, garantindo um intervalo razoável e com dados suficientes para representar e analisar graficamente.

Para a extração de valores anómalos, teve-se em consideração um valor limite de 10% dos dados, ou seja, não se poderia extrair mais de 10% do total de dados de cada caso de estudo, para que essa percentagem fosse distribuída em toda a extensão da amostra, aplicou-se a mesma regra para cada intervalo de Q, ou seja, para cada representação gráfica.

Na pedreira do Outão foram criados três intervalos de Q, apresentados na figura 47, sendo eles:

- Q's menores que 40 kg – conjunto de 40 dados, taxa de variação de 18% e  $R^2$  de 41%;
- Q's entre 40 kg (inclusive) e 50 kg (exclusive) – conjunto de 48 dados, taxa de variação de 5% e  $R^2$  de 24%;
- Q's superiores a 50 kg (inclusive) – conjunto de 30 dados, taxa de variação de 13% e  $R^2$  de 55%.

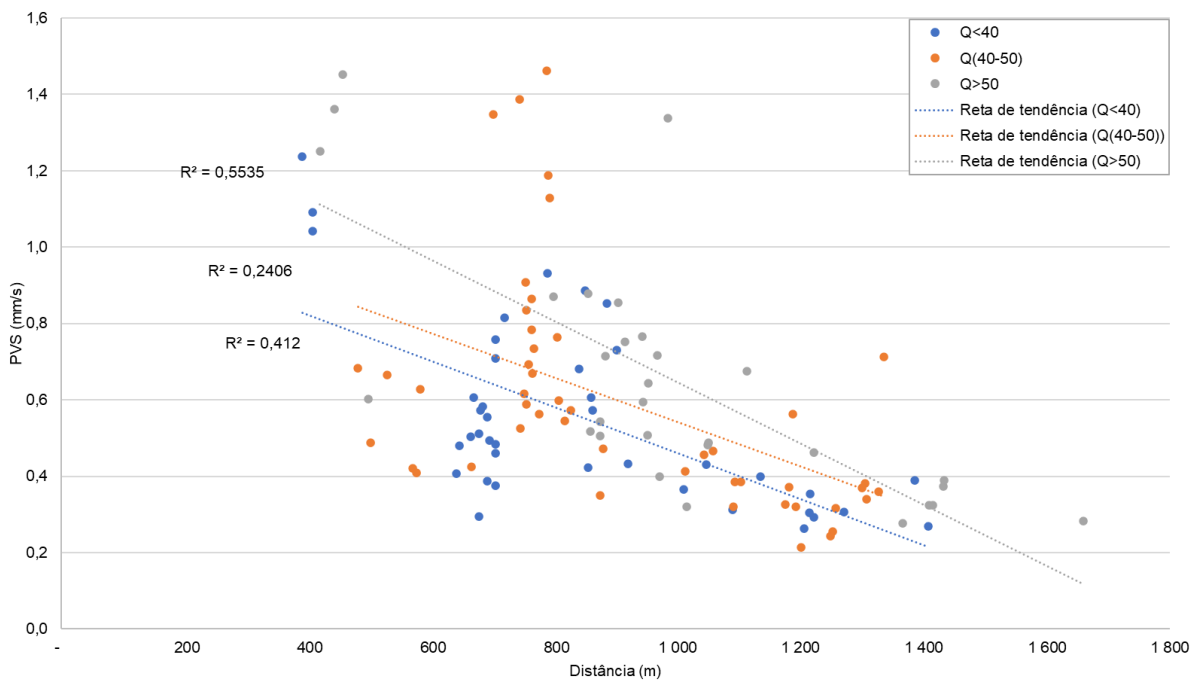


Figura 47 - Representação gráfica das velocidades de vibração do Outão, separadas por intervalos de carga máxima por retardo, com outliers

Neste caso de estudo foram retirados: um valor do primeiro intervalo, melhorando o  $R^2$  para 45%; seis do segundo intervalo, melhorando o  $R^2$  para 43%; e três do último intervalo apresentado, melhorando o  $R^2$  para 74%. Resultando assim, na extração de 10 valores anómalos no total de 118 registros realizados, conjunto menor que 10% da amostra, porém a retirada de mais valores não melhorou os coeficientes de determinação. Na figura 48 é apresentada a representação gráfica dos dados sem outliers e com os respectivos coeficientes de determinação.

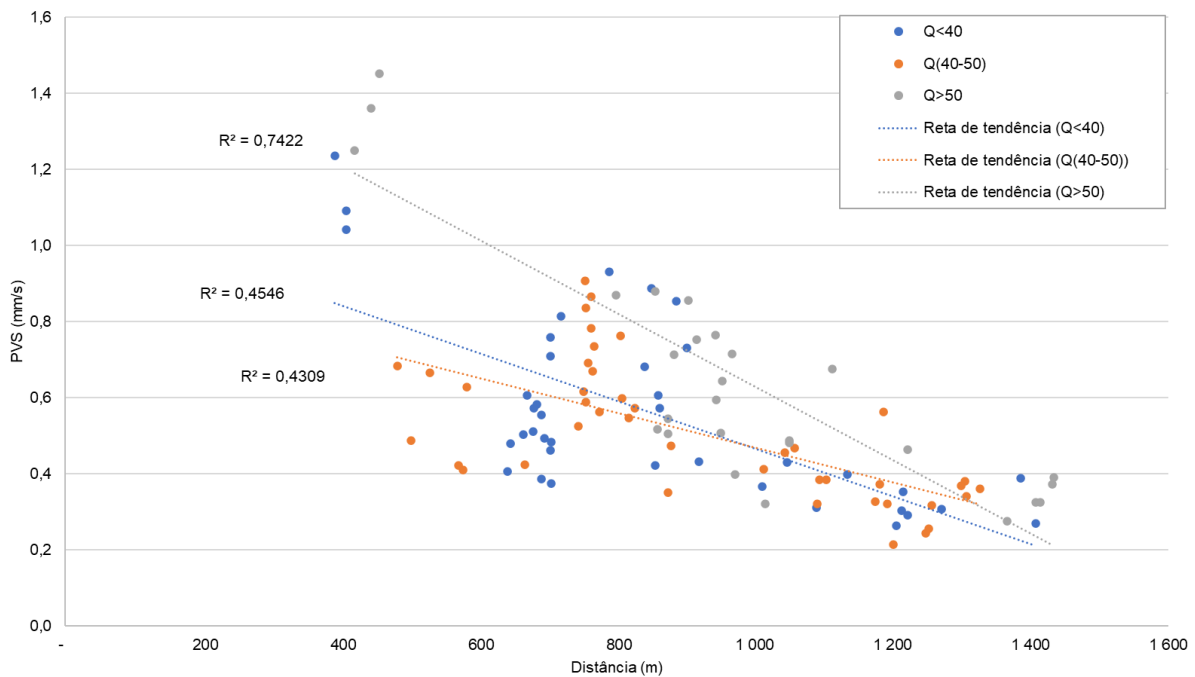


Figura 48 - Representação gráfica das velocidades de vibração do Outão, separadas por intervalos de carga máxima por retardo, sem outliers

No caso de estudo da pedraira do Vale do Covão, foram criados igualmente três intervalos, apresentados na figura 49, porém com valores distintos, sendo eles:

- Q menores que 50 kg (exclusive) – conjunto de 28 dados, taxa de variação de 8% e  $R^2$  de 51%;
- Q entre 50 kg (inclusive) e 80 kg (exclusive) – conjunto de 34 dados, taxa de variação de 12% e  $R^2$  de 34%;
- Q superiores a 80 kg (inclusive) – conjunto de 25 dados, taxa de variação de 11% e  $R^2$  de 71%.

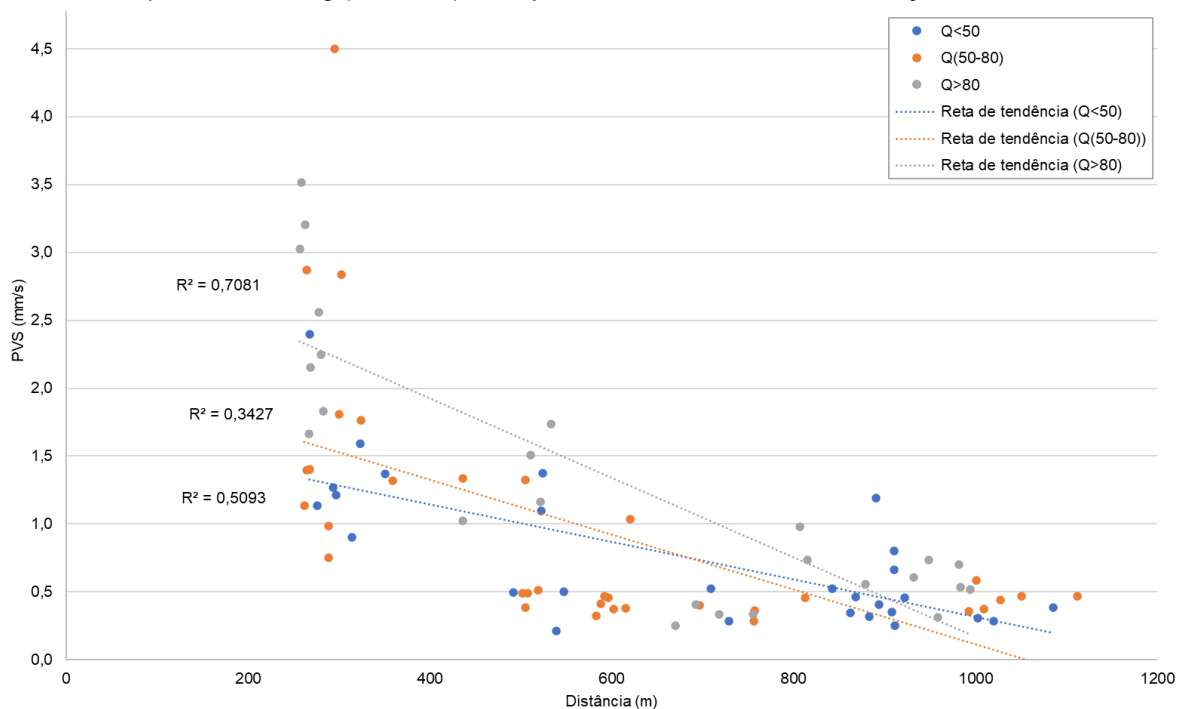


Figura 49 - Representação gráfica das velocidades de vibração do Vale do Covão, separadas por intervalos de carga máxima por retardo, com outliers

Nesta pedreira, foram extraídos: três valores de cada um dos primeiros dois intervalos, melhorando o  $R^2$  para, respectivamente, 67% e 44%; e nenhum valor do último intervalo apresentado; resultando na extração de 6 valores anômalos no total de 87 registos, como na pedreira anterior, os dados extraídos são menos que 10% da amostra, pois a extração de mais valores não resultou num melhor coeficiente de determinação. Na figura 50 é apresentada a representação gráfica após a extração dos *outliers*.

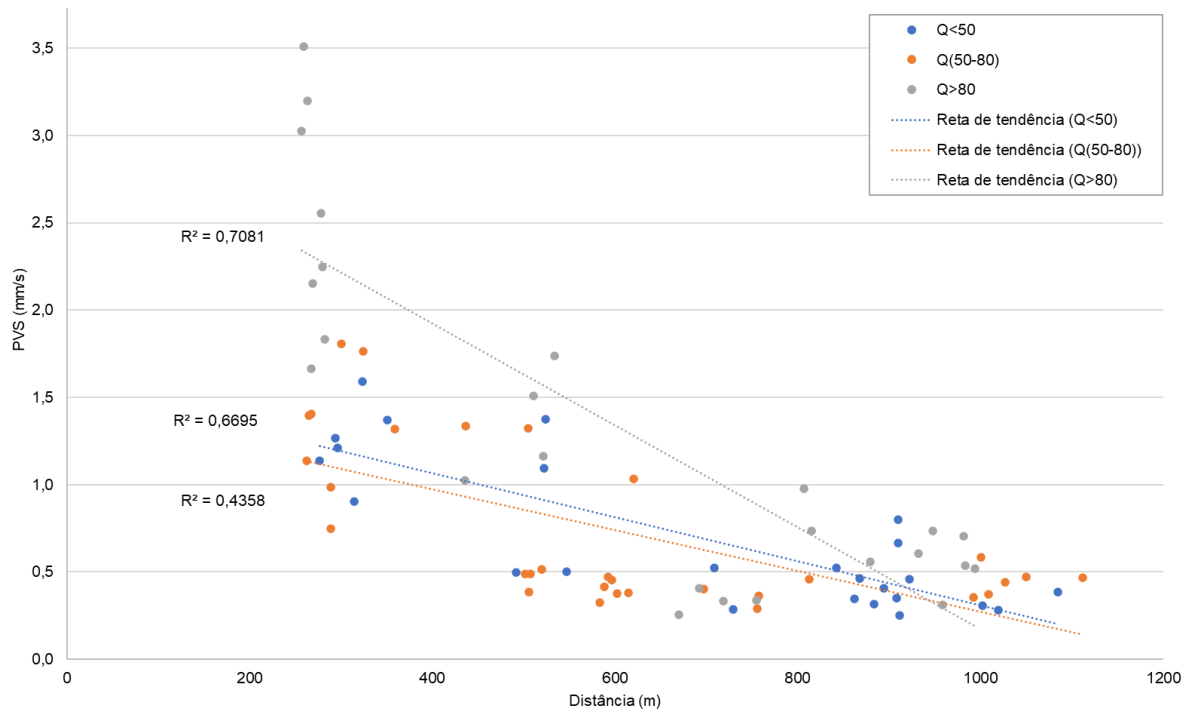


Figura 50 - Representação gráfica das velocidades de vibração do Vale do Covão, separadas por intervalos de carga máxima por retardo, sem outliers

## 8.1. Registos obtidos versus limites da NP2074

Confrontando os dados obtidos através dos registos de vibrações com os limites mais restritivos da norma em vigor NP2074, ou seja, os limites apresentados para eventos com frequências dominantes iguais ou inferiores a 10 Hz, temos as figuras 51 e 52.

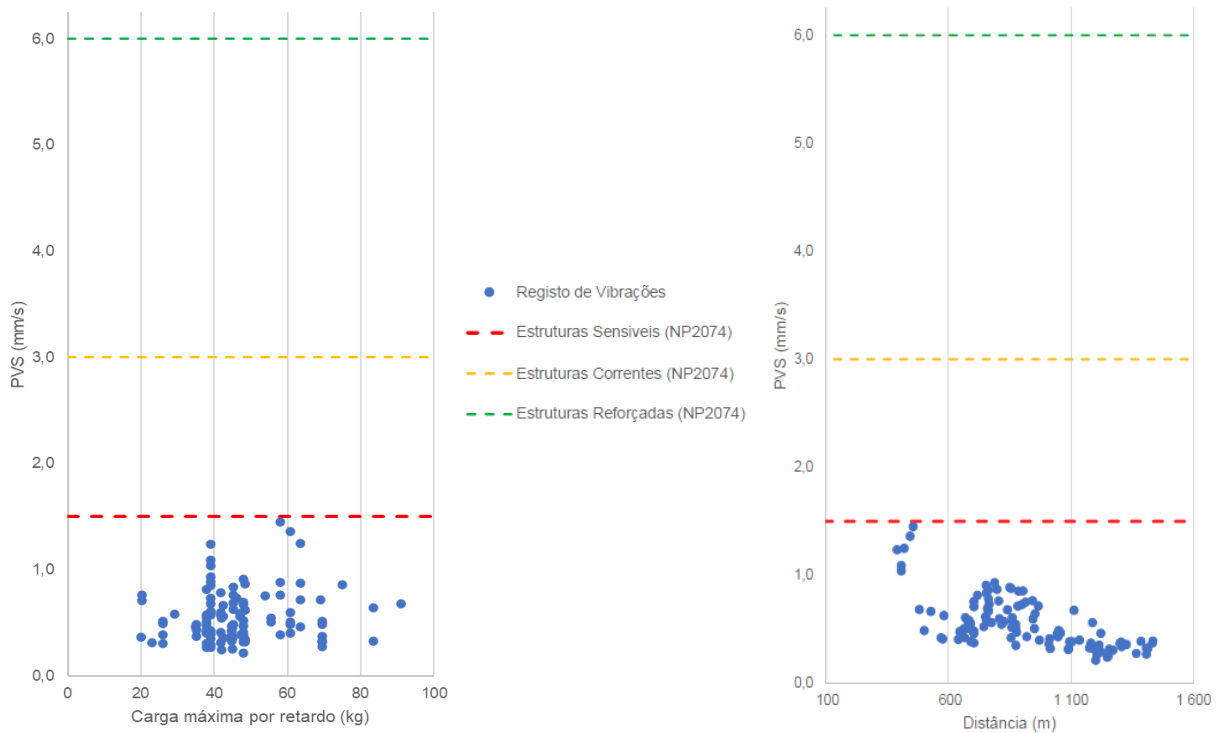


Figura 51 - Confronto entre os registos de vibração da pedraira Outão e a NP2074.

Analisando a primeira figura, referente à pedraira do Outão, é possível afirmar que nenhum evento ultrapassou o limite mais restritivo da norma, independentemente da estrutura em causa ou da frequência dominante do evento. Isto significa que durante todo o período de monitorização as estruturas consideradas reforçadas e correntes, por exemplo as habitações do Vale da Rasca, sofreram velocidades de vibrações bastante menores do que o limite para elas apresentado, podendo ter sido tratadas como estruturas sensíveis, de valor patrimonial ou mau estado de conservação e tendo sido reduzido ao máximo qualquer impacto negativo que as vibrações pudessem causar.

De salientar ainda, que no gráfico da esquerda da figura 51, onde o eixo das abcissas corresponde à carga máxima por retardo, os valores de PVS mais elevados correspondem a valores de carga intermédios porque, os três registos que se destacam, fazem parte do grupo de registos em estruturas a menores distâncias das solicitações.



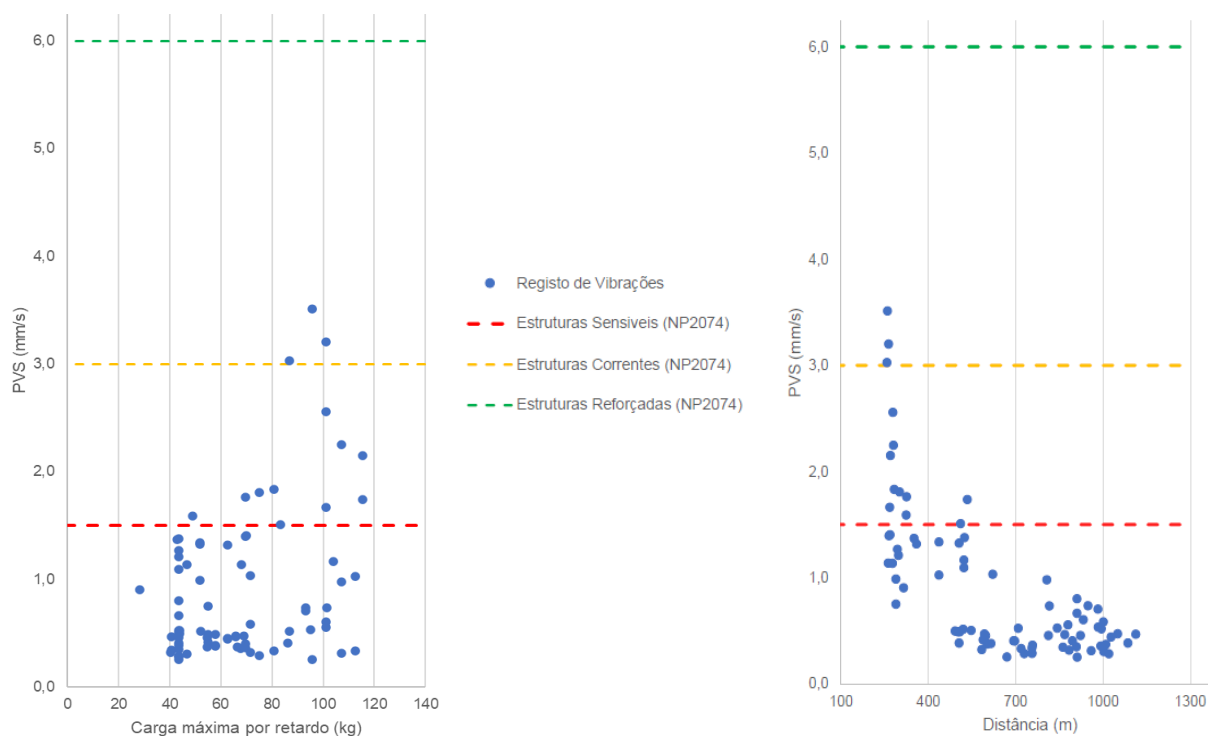


Figura 52 - Confronto entre os registos de vibração da pedreira Vale do Covão e a NP2074.

Ao analisar a figura 52, referente à pedreira do Vale do Covão, é possível notar que existem velocidades de vibração acima dos limites mais restritivos da norma para as estruturas sensíveis e correntes. Isto obrigou à realização de uma análise mais detalhada dos dados, recorrendo às respetivas tabelas. Relembrando que não existe qualquer estrutura monitorizada considerada sensível na envolvente da pedreira, os únicos valores que se tornam preocupantes são os superiores ao limite apresentado para as estruturas correntes, contudo os registos que se encontram nesta situação correspondem à estrutura A, considerada reforçada, por serem os escritórios de apoio à pedreira. Assim sendo, é possível afirmar que todas as estruturas monitorizadas na envolvente desta pedreira sentiram velocidades de vibração dentro dos respetivos limites apresentados na norma.



## 8.2. Aplicação do modelo de Johnson aos casos de estudo

Com uma base de dados isenta de valores anómalos, passou-se à determinação dos coeficientes  $a$ ,  $b$  e  $c$  referentes ao modelo de Johnson e característicos de cada caso de estudo. Para este processo recorreu-se, como já mencionado, ao *software* estatístico SPSS, onde foram realizadas as regressões lineares múltiplas necessárias e adquiridos os respetivos resultados e parâmetros de qualidade dos modelos.

Para a aplicação da regressão linear ao modelo de propagação das vibrações foi necessário aplicar logaritmos a todos os termos da equação em causa, para que os expoentes se tornassem coeficientes, deste modo, adaptando a equação (8), obteve-se a equação seguinte.

$$\log(v) = \log(a) + b \log(Q) + c \times \log(D) \quad (9)$$
$$\equiv$$
$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2$$

Para a utilização do *software* SPSS foi necessário, como apresentado na figura 53, escolher que regressão se pretendia realizar e depois definir que a variável dependente era o  $\log(v)$  e as independentes o  $\log(Q)$  e o  $\log(D)$ .

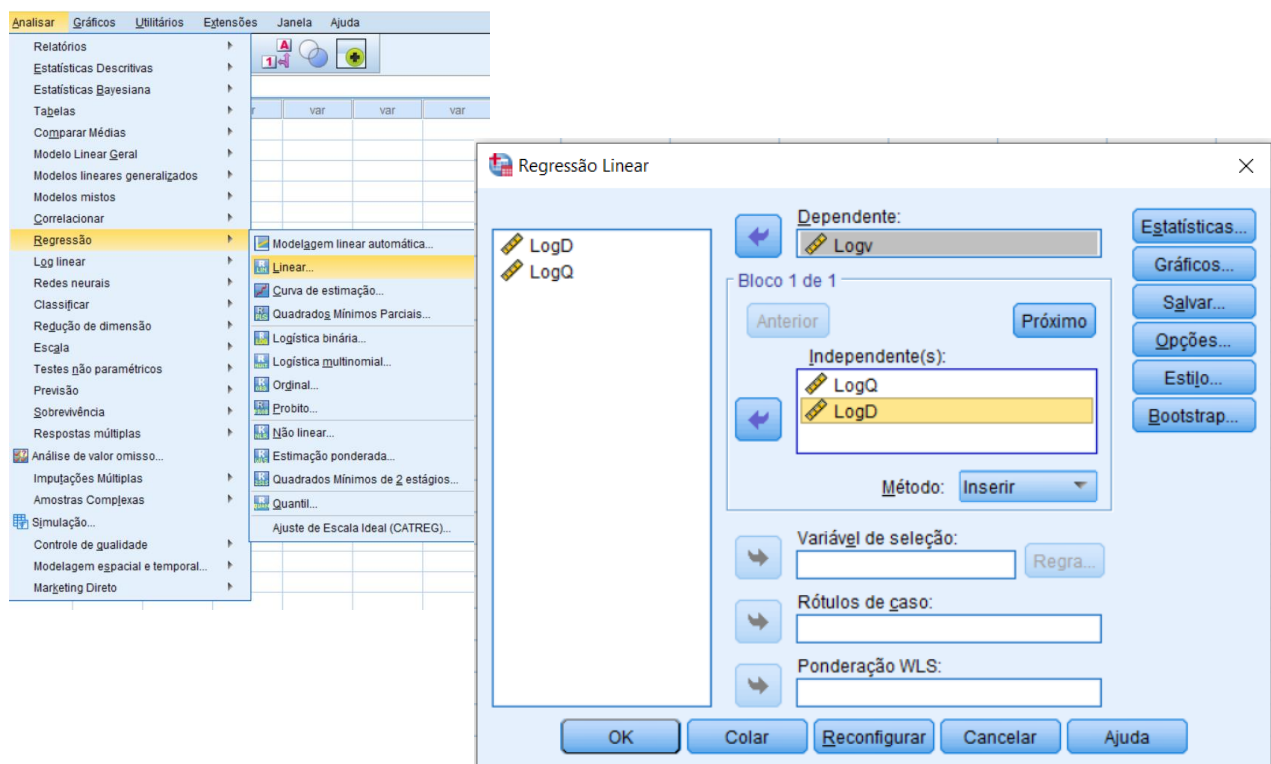


Figura 53 - Realização da regressão linear múltipla no *software* SPSS

Nas figuras seguintes são apresentados os resultados obtidos pelo SPSS para os dois casos de estudo desta dissertação.

### Variáveis Inseridas/Removidas<sup>a</sup>

Modelo	Variáveis inseridas	Variáveis removidas	Método
1	LogQ, LogD <sup>b</sup>	.	Inserir

a. Variável Dependente: Logv

b. Todas as variáveis solicitadas inseridas.

### Resumo do modelo

Modelo	R	R quadrado	R quadrado ajustado	Erro padrão da estimativa
1	,743 <sup>a</sup>	,553	,544	,11817

a. Preditores: (Constante), LogQ, LogD

### ANOVA<sup>a</sup>

Modelo		Soma dos Quadrados	df	Quadrado Médio	Z	Sig.
1	Regressão	1,810	2	,905	64,820	,000 <sup>b</sup>
	Resíduo	1,466	105	,014		
	Total	3,276	107			

a. Variável Dependente: Logv

b. Preditores: (Constante), LogQ, LogD

### Coefficientes<sup>a</sup>

Modelo		Coefficients não padronizados		Coefficients padronizados		Sig.
		B	Erro Erro	Beta	t	
1	(Constante)	1,978	,270		7,330	,000
	LogD	-,969	,086	-,750	-11,268	,000
	LogQ	,353	,093	,251	3,777	,000

a. Variável Dependente: Logv

Figura 54 - Resultados da regressão linear múltipla realizada no SPSS aos dados do Outão.

**Variáveis Inseridas/Removidas<sup>a</sup>**

Modelo	Variáveis inseridas	Variáveis removidas	Método
1	LogQ, LogD <sup>b</sup>	.	Inserir

a. Variável Dependente: LogV

b. Todas as variáveis solicitadas inseridas.

**Resumo do modelo**

Modelo	R	R quadrado	R quadrado ajustado	Erro padrão da estimativa
1	,815 <sup>a</sup>	,664	,656	,17503

a. Preditores: (Constante), LogQ, LogD

**ANOVA<sup>a</sup>**

Modelo		Soma dos Quadrados	df	Quadrado Médio	Z	Sig.
1	Regressão	4,732	2	2,366	77,226	,000 <sup>b</sup>
	Resíduo	2,390	78	,031		
	Total	7,121	80			

a. Variável Dependente: LogV

b. Preditores: (Constante), LogQ, LogD

**Coefficientes<sup>a</sup>**

Modelo		Coefficients não padronizados		Coefficients padronizados		Sig.
		B	Erro Erro	Beta	t	
1	(Constante)	2,003	,368		5,438	,000
	LogD	-1,081	,094	-,761	-11,540	,000
	LogQ	,465	,132	,228	3,457	,001

a. Variável Dependente: LogV

Figura 55 - Resultados da regressão linear múltipla realizada no SPSS aos dados do Vale do Covão.

Após a realização da regressão linear múltipla, foi necessário converter os resultados fornecidos pelo SPSS nos coeficientes originais,  $a$ ,  $b$  e  $c$ , para isso  $a = 10^{b_0}$ ,  $b = b_1$  e  $c = b_2$ . Importante referir que os dados apenas foram validados se, como era de esperar, o coeficiente  $b$ , referente à carga explosiva, fosse positivo, pois o aumento desta origina o consequente aumento da velocidade de vibração verificada, e o coeficiente  $c$ , referente à distância entre o local de registo e de desmonte, fosse negativo pois a relação entre a distância e a velocidade de vibração é sempre inversa. Obteve-se então a tabela resumo apresentada de seguida.

Tabela 8 - Tabela resumo dos coeficientes a, b e c para cada caso de estudo

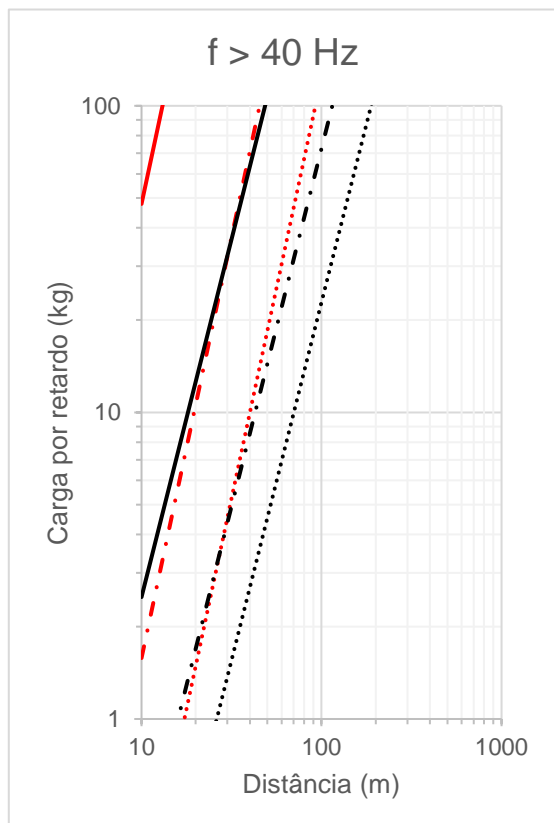
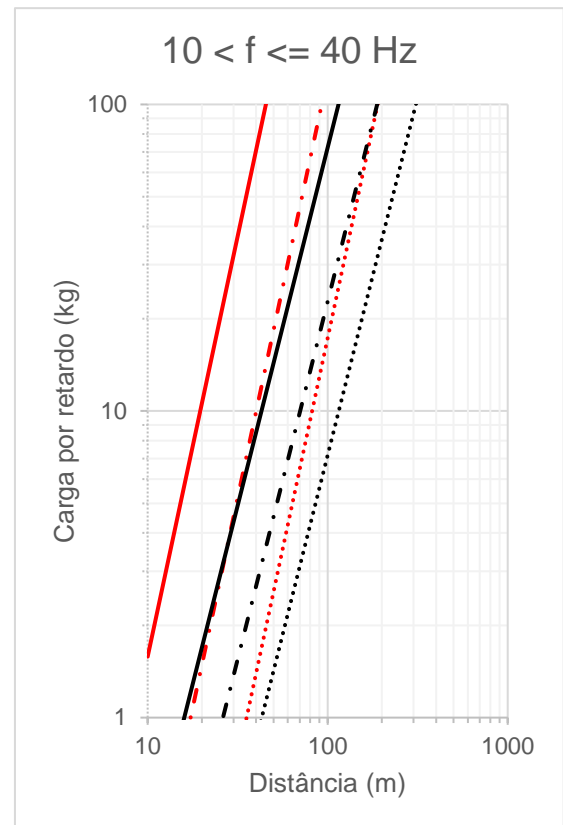
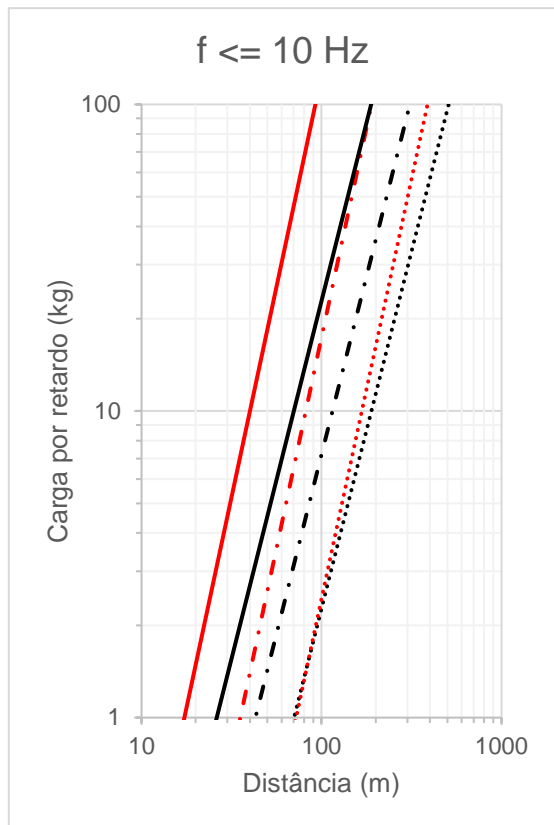
Equação	Coeficientes			Coeficiente de determinação da regressão
<u>Pedreira do Outão</u>				
$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2$	$b_0 = 1,978$	$b_1 = 0,353$	$b_2 = -0,969$	$R^2 \approx 55\%$
Equivalência	$a = 10^{b_0}$	$b = b_1$	$c = b_2$	
$v = aQ^bD^c$	$a = 95,061$	$b = 0,353$	$c = -0,969$	
$v = 95,061 \times Q^{0,353} \times D^{-0,969}$				
<u>Pedreira do Vale do Covão</u>				
$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2$	$b_0 = 2,003$	$b_1 = 0,455$	$b_2 = -1,081$	$R^2 \approx 66\%$
Equivalência	$a = 10^{b_0}$	$b = b_1$	$c = b_2$	
$v = aQ^bD^c$	$a = 100,693$	$b = 0,455$	$c = -1,081$	
$v = 100,693 \times Q^{0,455} \times D^{-1,081}$				

Analisando os coeficientes de determinação de cada regressão linear, é possível observar que o referente à pedreira do Outão é menor, isto deve-se à análise realizada considerar a pedreira um só elemento, não fazendo distinção do material geológico presente. Assim sendo, a heterogeneidade geológica existente pode originar fenómenos de amplificação local ou filtração de ondas de propagação de vibrações, afetando consequentemente os resultados obtidos.

Para o presente estudo, não foi possível realizar a caracterização dinâmica dos maciços em questão, por esse motivo os valores obtidos nos dois casos de estudo, apesar das características da pedreira do Outão, foram confrontados com os valores de referência da bibliografia para o calcário, apresentados na tabela 9. Esse confronto, apresentado nas figuras 56 e 57, foi realizado graficamente, recorrendo a linhas isocinéticas das equações obtidas e da teórica.

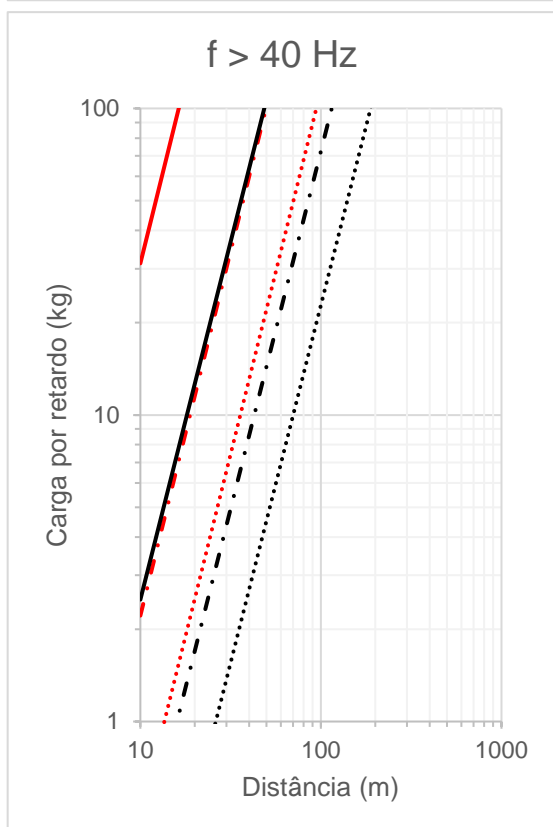
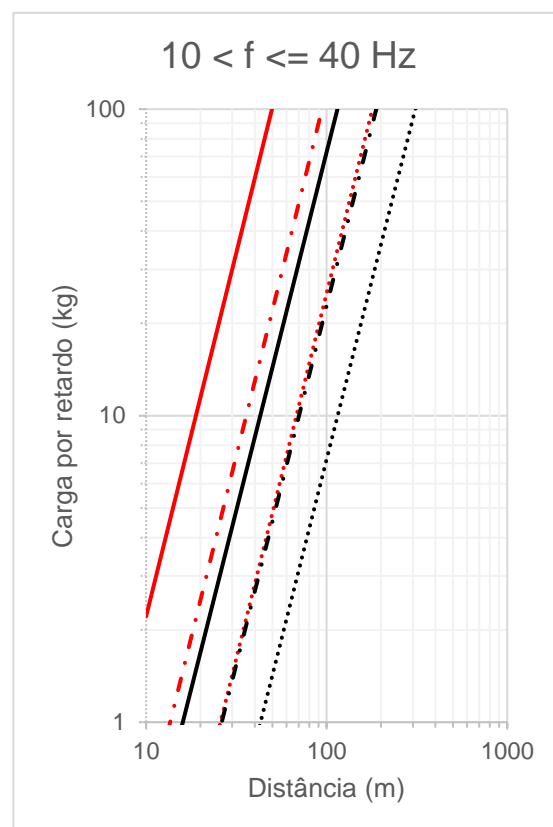
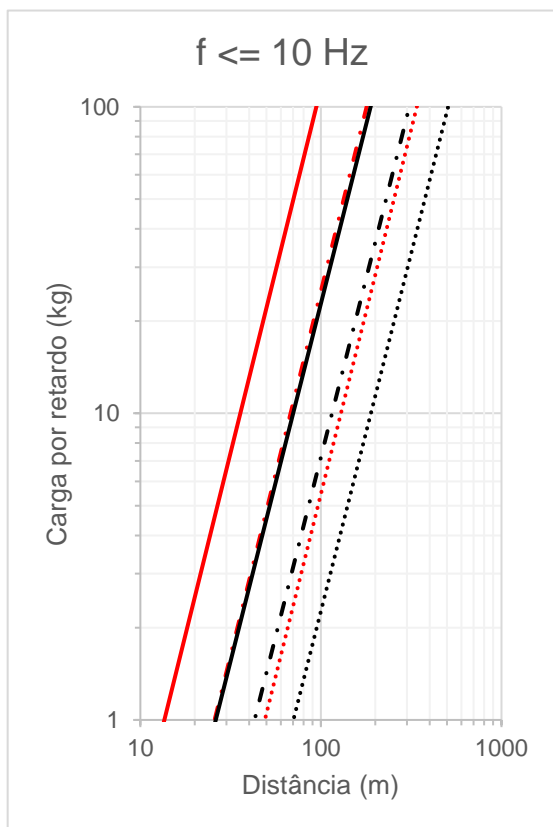
Tabela 9 - Valores característicos para os coeficientes a, b e c do calcário (Dinis da Gama, 1998)

Maciço Rochoso	a	b	c
Calcário (tipo não especificado)	580	0,6	-1,4



- ..... Estrut. Sensíveis Teórica
- ..... Estrut. Sensíveis Outão
- . - Estrut. Correntes Teórica
- . - Estrut. Correntes Outão
- Estrut. Reforçadas Teórica
- Estrut. Reforçadas Outão

Figura 56 - Confronto gráfico dos coeficientes teóricos e os obtidos para a pedraira Outão



- ..... Estrut. Sensíveis Teórica
- ..... Estrut. Sensíveis Covão
- . - Estrut. Correntes Teórica
- . - Estrut. Correntes Covão
- Estrut. Reforçadas Teórica
- Estrut. Reforçadas Covão

Figura 57 - Confronto gráfico dos coeficientes teóricos e os obtidos para o Vale do Covão

Analisando os gráficos apresentados na figura 56, referentes à pedreira do Outão, é possível verificar que as isocinéticas, teóricas e da equação obtida, tendem a aproximar-se para cargas por retardo menores e a afastar-se para cargas por retardo maiores, não sendo totalmente paralelas. Este fenómeno já era esperado pois, como mencionado anteriormente, a pedreira do Outão não tem apenas calcários na sua constituição, havendo influência de outras litologias, como margas, dolomitos e argilas, notando que os valores teóricos apresentados são para calcários apenas. Assim sendo, esta representação não invalida os resultados obtidos, até pelo contrário, valida-os pois ambas as isocinéticas estão na mesma gama de valores e mostra que existe a singularidade da existência de alguma heterogeneidade litológica.

No caso dos gráficos da figura 57, referentes à pedreira do Vale do Covão, constituída apenas por calcários de pedreira e sendo os valores teóricos apresentados referentes a calcário, é possível validar a equação pois, apesar das isocinéticas não serem coincidentes, são paralelas e estão na mesma gama de valores, o que seria de esperar pois a equação é o ajuste às características reais do maciço em estudo.

## 9. Novo modelo de previsão de amplitudes de vibrações

### 9.1. Novo modelo incluindo o afastamento médio da frente de desmonte

Para a concretização deste capítulo, criou-se uma nova base de dados onde se adicionou, aos dados obtidos pelo *laser 2D*, os respetivos registos de vibração.

Esta parte do estudo tinha como objetivo comprovar a influência do afastamento do diagrama de fogo na geração de vibrações, como já é bastante considerado nos trabalhos do dia a dia e teoricamente referido em inúmeras fontes bibliográficas.

A nova base de dados sofreu igualmente a extração de *outliers*, seguindo a mesma metodologia realizada anteriormente. Relativamente à pedreira do Outão foram considerados 5 valores anómalos, de 65, tendo ficado como amostra 60 conjuntos de dados. No caso da pedreira do Vale do Covão, foram considerados 3 *outliers*, ficando com uma amostra de 32 conjuntos de dados.

Realizou-se primeiro a regressão linear múltipla, utilizando apenas duas variáveis independentes, como anteriormente e só depois se realizou uma nova regressão linear múltipla, desta vez, com a introdução do parâmetro afastamento médio à equação, como variável independente, dando origem assim à equação (10), que para aplicação da regressão foi transformada na equação (11).

$$v = aQ^b D^c A^d \quad (10)$$

$$\log(v) = \log(a) + b \times \log(Q) + c \times \log(D) + d \times \log(A) \quad (11)$$

$$\equiv$$

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3$$

Obtiveram-se então os resultados apresentados na seguinte tabela. Analisando-os, chegou-se à conclusão que não era possível validá-los, pois o coeficiente relativo ao afastamento é negativo, sendo de esperar que este fosse positivo, devido a toda teoria já apresentada, pois tal como a carga máxima por retardo, quanto maior for o afastamento maior se espera que seja a velocidade de vibração. Por outro lado, o coeficiente de determinação na pedraira do Outão não apresenta melhorias significativas com a adição de uma variável independente, o que seria igualmente de esperar, até pelo contrário, na pedraira do Vale do Covão verificou-se um coeficiente de determinação pior com a adição da nova variável. Por fim, analisando os resultados obtidos para a pedraira do Vale do Covão, a ordem de grandeza dos coeficientes obtidos está bastante distante dos teóricos, o que à partida é razão suficiente para não validar resultados.

*Tabela 10 - Tabela resumo dos coeficientes do novo modelo sugerido.*

<b>Equação</b>	<b>Coeficientes</b>				<b>Coeficiente de determinação da regressão</b>
<u>Pedreira do Outão</u>					
Equivalência	$a = 10^{b_0}$	$b = b_1$	$c = b_2$	$d = b_3$	
$v = aQ^bD^c$	$a = 56,885$	$b = 0,367$	$c = -0,905$		$R^2 \approx 59\%$
$v = aQ^bD^cA^d$	$a = 97,051$	$b = 0,430$	$c = -0,924$	$d = -0,415$	$R^2 \approx 60\%$
<u>Pedreira do Vale do Covão</u>					
Equivalência	$a = 10^{b_0}$	$b = b_1$	$c = b_2$	$d = b_3$	
$v = aQ^bD^c$	$a = 25,763$	$b = 0,491$	$c = -0,885$		$R^2 \approx 72\%$
$v = aQ^bD^cA^d$	$a = 26,546$	$b = 0,493$	$c = -0,884$	$d = -0,028$	$R^2 \approx 71\%$

De salientar, que os resultados, referentes à equação que não considera o afastamento, são diferentes dos obtidos no capítulo anterior devido à base de dados, utilizada para o capítulo referente ao novo modelo de previsão de amplitudes de vibrações, ter sido reduzida aos eventos em que existiu registo *laser 2D*.



## 10. Conclusões

A realização desta dissertação tinha como principal objetivo construir um modelo de previsão das amplitudes de vibração para cada uma das pedreiras em estudo, recorrendo a técnicas de regressão linear múltipla e utilizando como base o modelo de Johnson (1971). Estes modelos permitem assim simular situações em tempo real, sempre que pertinente e necessário.

No estado da arte foram apresentados os principais conceitos inerentes às vibrações e ao controlo destas em desmontes com recursos a explosivos, bem como algumas normas existentes em Portugal e noutros países. Algumas das referências bibliográficas consideradas, embora não sejam recentes, continuam bastante atuais, sendo que nesta área de estudo, apesar de existirem já bastantes artigos publicados, cada caso de estudo é singular, tendo as suas próprias características, por exemplo geológicas, que influenciam diretamente a propagação das vibrações.

Os casos de estudo foram duas pedreiras do grupo Secil, localizadas no parque natural da Arrábida, perto de pequenas zonas habitacionais, sendo por isso, ambas, alvo de bastante atenção em termos de impactes ambientais. As campanhas de monitorização nas duas pedreiras tiveram a duração de aproximadamente 4 meses e deram origem a cerca de 205 eventos observados. Com esta monitorização foi possível verificar que a norma portuguesa 2074 de 2015 está a ser cumprida nos dois casos de estudo, sendo que ambos têm como objetivo não ultrapassar o limite mais restritivo desta norma, reduzindo ao máximo os impactes decorrentes.

Com recurso ao *software* SPSS, o principal objetivo desta dissertação foi concretizado. Foram obtidos dois modelos de previsão de amplitudes de vibração, sendo eles:

- Pedreira do Outão:  $v = 95,061 \times Q^{0,353} \times D^{-0,969}$ , com  $R^2 \approx 55\%$ ;
- Pedreira do Vale do Covão:  $v = 100,693 \times Q^{0,455} \times D^{-1,081}$ , com  $R^2 \approx 66\%$ .

O modelo criado para a pedreira do Vale do Covão tem um coeficiente de determinação melhor, sendo de esperar que, por consequência, o modelo seja mais preciso que o da pedreira do Outão. Apesar dos resultados terem sido validados, os coeficientes de determinação não foram tão elevados quanto era pretendido, contudo são superiores a 50% e se comparados com a interpretação existente na bibliografia do coeficiente de correlação, que é um coeficiente estatístico que indica a força da correlação entre variáveis, este é moderado entre 40 e 60% e forte entre 60 e 80% (Patrício *et al*, 2017).

O coeficiente de determinação referente à equação do Outão, de apenas 55%, poderá ser explicado pelo facto da análise realizada considerar a pedreira um só elemento, não tendo em conta a heterogeneidade geológica existente que poderá afetar os resultados obtidos através das características físicas do terreno.

Quanto ao novo modelo, incluindo como nova variável o afastamento médio da bancada, este não foi validado. Os coeficientes de determinação entre os modelos sem e com a nova variável não melhoraram significativamente e o coeficiente da equação correspondente ao afastamento foi sempre

negativo o que, segundo a teoria apresentada, não é possível pois quanto maior o afastamento, maior deverá ser a velocidade de vibração gerada.

### **10.1. Dificuldades**

A obtenção dos dados *laser* 2D foi uma operação com vários riscos associados, devido à movimentação de máquinas na pedreira, aos procedimentos necessários perto das extremidades das bancadas e por vezes à falta de atempada limpeza (leia-se remoção de material desmontado) das frentes livres. Estes fatores originaram uma base de dados fraca, sem dados representativos dos desmontes realizados habitualmente nas pedreiras, principalmente na pedreira do Vale do Covão, onde estas limitações foram mais sentidas. Outras dificuldades com o equipamento *laser*, foi a precisão da sua utilização no início dos trabalhos, visto que depende totalmente da acuidade do utilizador. Por consequência de tudo o que já foi mencionado, não foi possível estimar os novos modelos de previsão de vibrações com uma nova variável, como se pretendia no início da dissertação.

Na monitorização, como já foi referido, a grande dificuldade sentida foi a impossibilidade de realizar registos em algumas direções das pedreiras devido às características da envolvente, como vegetação densa, declives elevados, estradas bastante degradadas ou ausência de estruturas em alguns locais.

Foi ainda pretendido recolher dados geomecânicos das duas pedreiras, contudo o equipamento (martelo de *Schmidt*) disponível estava danificado, impossibilitando a caracterização dos maciços.

Por fim, apesar de todas estas dificuldades, considera-se que o principal objetivo deste estudo foi cumprido.

### **10.2. Desenvolvimentos futuros**

Para trabalhos futuros sugere-se que, para a criação de um novo modelo de previsão de amplitudes de vibração incluindo o afastamento médio da bancada, se utilize equipamentos *laser* 3D recentes, que não dependam totalmente da acuidade do utilizador, juntamente com um equipamento *boretrak*, para avaliação da qualidade e precisão dos furos considerados.

É sugerido também, que seja realizado um novo modelo de previsão de amplitudes de vibração incluindo o consumo específico de explosivo, fazendo assim uma análise equiparada à realizada com o fator afastamento neste estudo. Para esse novo modelo o consumo específico terá de variar consideravelmente ao longo do período de monitorização, caso contrário não fornecerá quaisquer dados construtivos para o modelo, algo que é de muito difícil aplicação num contexto de condições normais de laboração de uma pedreira.

Por fim, para o caso de estudo da pedreira do Outão, é sugerido que seja realizada uma base de dados consideravelmente maior, sendo aplicado um modelo de previsão de amplitudes de vibração onde se considere as diferentes características geológicas, do local dos recetores e da origem das solicitações, percebendo assim que influência têm no modelo criado.

## Referências

- Aimone, C. T. (1992). "Rock Breakage: Explosives – Blast Design". SME Mining Engineering Handbook. Society for mining, Metallurgy and Exploration, Inc. Hartmann H. L. (Editor). 2ª Edição. Vol.1, pp 722-746. Littleton, Colorado. E.U.A.
- Ash, R. L. (1963). "The Mechanics of Rock Breakage. Pit and Quarry", nº 56.
- Atchison, T. C. (1968). "Fragmentation Principles". In Surface Mining. Ed. E. P. Pfeider. AIME. Nova Iorque. E.U.A.
- Azevedo, F. S. & Patrício, J. (2003). "Critérios de Danos e de Incomodidade no Domínio das Vibrações Ambientais". Ingenium, Revista da Ordem dos Engenheiros, II série, nº72, janeiro de 2003, pp 85-88. Lisboa.
- Bernardo, P. A. M. (2004). "Impactes Ambientais do Uso de Explosivos na Escavação de Rochas, com Ênfase nas Vibrações". Dissertação para obtenção do grau de Doutor em Engenharia de Minas. Instituto Superior Técnico (IST) – Universidade Técnica de Lisboa (UTL), Lisboa.
- Bernardo, P. A. M. & Torres, V. N. (2005). "Metodologia para a prevenção de danos e controle ambiental de vibrações causadas por detonações em maciços rochosos". XV Encontro Nacional do Colégio de Engenharia Geológica e de Minas da Ordem dos Engenheiros, Ponta Delgada, Açores.
- Bernardo, P. A. M. (2020). "Abordagem quantitativa dos impactes ambientais de desmontes- projeções e vibrações". Instituto Superior Técnico, 11º Curso sobre explosivos para responsáveis técnicos de pedreiras e obras de escavação, Lisboa.
- British Standards Institution (2008). "BS6472, Part 2: Guide to evaluation of human exposure to vibration in buildings. Part 2: Blast-induced vibration.". *British Standards*.
- Carta geológica 38-B de Setúbal (1994). Geoportal, Energia e Geologia. Disponível em: [https://geoportal.ineg.pt/pt/dados\\_abertos/cgp50k/38-B](https://geoportal.ineg.pt/pt/dados_abertos/cgp50k/38-B) . Consultado em abril de 2021.
- Cook, M. A. (1958). "The Science of High Explosives". Reinhold Publishing Corporation. Nova Iorque. E.U.A.
- Coutinho, J. S. (1999). "Materiais de Construção 1 – Agregados para argamassas e betões". Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP).
- Decreto-Lei nº 69/2000 de 3 de maio. Diário da República nº 102/2000, Série I-A de 2000-05-03. Ministério do Ambiente e do Ordenamento do Território, Portugal.

Decreto-Lei nº 162/90 de 22 de maio. Diário da República n.º 117/1990, Série I de 1990-05-22. Ministério da Indústria e Energia, Portugal.

Dinis da Gama, C. (2020). “Definições gerais, caracterização das pedreiras e obras de escavação” & “Dinâmica das Rochas: fundamentos”. Textos de apoio ao curso “11º Curso sobre explosivos para responsáveis técnicos de pedreiras e obras de escavação” (Coordenador: Dinis da Gama), IST, Lisboa.

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

Diogo Pinto, A. (2003). “Amplificação e Atenuação das vibrações nas formações geológicas”. Textos de apoio ao curso “Vibrações em geotecnia – geração, monitorização, impactes ambientais, critérios de dano e sua mitigação”. Curso da FUNDEC (Coordenador: Dinis da Gama). 24 e 25 de junho de 2003. IST, Lisboa.

Dowding, C. H. (1992). “Suggested method for blast vibration monitoring”. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and*, 29(2), 145-156.

Enders, Felicity Boyd. "Coefficient of determination". Encyclopedia Britannica, 26 de maio de 2020, <https://www.britannica.com/science/coefficient-of-determination>. Consultado em outubro de 2021.

Esteves, J. Moura (2003). “Sobre a necessidade de atualização da Norma Portuguesa 2074”. Textos de apoio ao curso “Vibrações em geotecnia – geração, monitorização, impactes ambientais, critérios de dano e sua mitigação”. Curso da FUNDEC (Coordenador: Dinis da Gama). 24 e 25 de junho de 2003. IST, Lisboa.

IGM – Instituto Geológico e Mineiro (1999). “Regras de Boa Prática no Desmonte a Céu Aberto”.

Jimeno, E. L., Jimeno, C. L. & Bermudez, P. G. (2003). “Manual de Perforación y Voladura de Rocas”. *ITGE*. 2ª Edição. Espanha.

Kramer, S. L. (1996). “Geotechnical Earthquake Engineering”. Ed. Prentice-Hall, Inc. New Jersey. E.U.A.

Kullberg, J. C., *et al* (2006). “Arrábida e Sintra: dois exemplos de tectónica pós-rifting da Bacia Lusitaniana”. Geologia de Portugal no contexto da Ibéria, *Universidade de Évora*, Évora.

Luz, C. (2017). “Contribuição para o desenvolvimento de novos modelos de previsão das amplitudes de vibrações produzidas por detonações em maciços rochosos”. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Geológica e de Minas. *IST, Universidade de Lisboa (UL)*, Lisboa.

- Malysz, R. (2004). "Comportamento mecânico de britas empregadas em pavimentação". Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre.
- Nicholls HR, Johnson CF, Duvall WI. (1970). "Blasting vibrations and their effects on structures". *United States Department of Interior, USMB, Bulletin 656*, 1971.
- Norma portuguesa NP 2074 (2015). "Avaliação da influência de vibrações impulsivas em estruturas". *Instituto Português da Qualidade (IPQ)*, Lisboa.
- Patrício M., Loureiro M., Caramelo F. (2017). "Bioestatística com SPSS abordagem prática". *Plátano Editora*, Lisboa.
- Sarsby, R. (2000). "Environmental Geotechnics". *Thomas Telford*, Londres. Reino Unido.
- Secil, Empresa (2021). Disponível em: <https://www.secil-group.com/missao-visao-valores/> . Consultado em agosto de 2021.
- Secil, História (2021). Disponível em: <https://www.secil-group.com/missao-visao-valores/historia/> . Consultado em agosto de 2021.
- Secil Britas (2021). Disponível em: <https://secil-britas.pt/> . Consultado em agosto de 2021.
- Secil Britas, Pedreiras Sesimbra (2021). "Pedreiras Sesimbra – Vale do Covão e Mata Redonda". Disponível em: <https://secilpro.com/upload/documents/5554b9ae0479a.pdf> . Consultado em agosto de 2021.
- Serra, J. P. B. (2001). "Textos de apoio à disciplina de Engenharia Sísmica (2001/2002)" Departamento de Engenharia Civil (Secção de Geotecnia). *Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa (UNL)*.
- Siskind D.E., Stagg M.S., Kopp J.W., Dowding C.H. (1980): "Structure Response and Damage Produced by Ground Vibration from Surface Mine Blasting". *U.S. Bureau of Mines, Report of Investigation RI 8507*, US Bureau of Mines, Washington, DC. E. U. A.
- Trimble (2011). "LaserAce™ Rangefinder User Guide", Version 1, Revision B. Westminster, E.U.A.
- Vermelhudo, N., Almeida, J., Teixeira, A. (2003). "Caracterização geoquímica da matéria prima extraída de uma pedra de marga na Arrábida para o fabrico do cimento". *VI Congresso Nacional de Geologia, Universidade Nova de Lisboa (UNL)*.

Esta página foi deixada propositadamente em branco.

# Anexos

## Anexo A – Procedimento para utilização *laser* 2D

No piso superior:

1. Identificação dos furos do diagrama de fogo onde é expectável que seja possível a realização de todos os passos do procedimento. Esta identificação passa por observar a fracturação existente na frente do furo, se não existe nenhum furo entre o seleccionado e a frente, analisar visualmente a possibilidade de queda de material na frente da bancada, entre outros aspetos principalmente relacionados com a segurança do utilizador do *laser*;
2. Pintar ou identificar um ponto de referência no topo da bancada que corresponda à localização do furo e que seja visível no piso inferior, onde será realizada a leitura pelo *laser*;
3. Medir e apontar a distância do ponto de referência do topo da bancada ao centro do furo em questão;
4. Repetir as etapas 2 e 3 para todos os furos seleccionados, ou seja, onde será realizada a leitura da frente pelo *laser*;

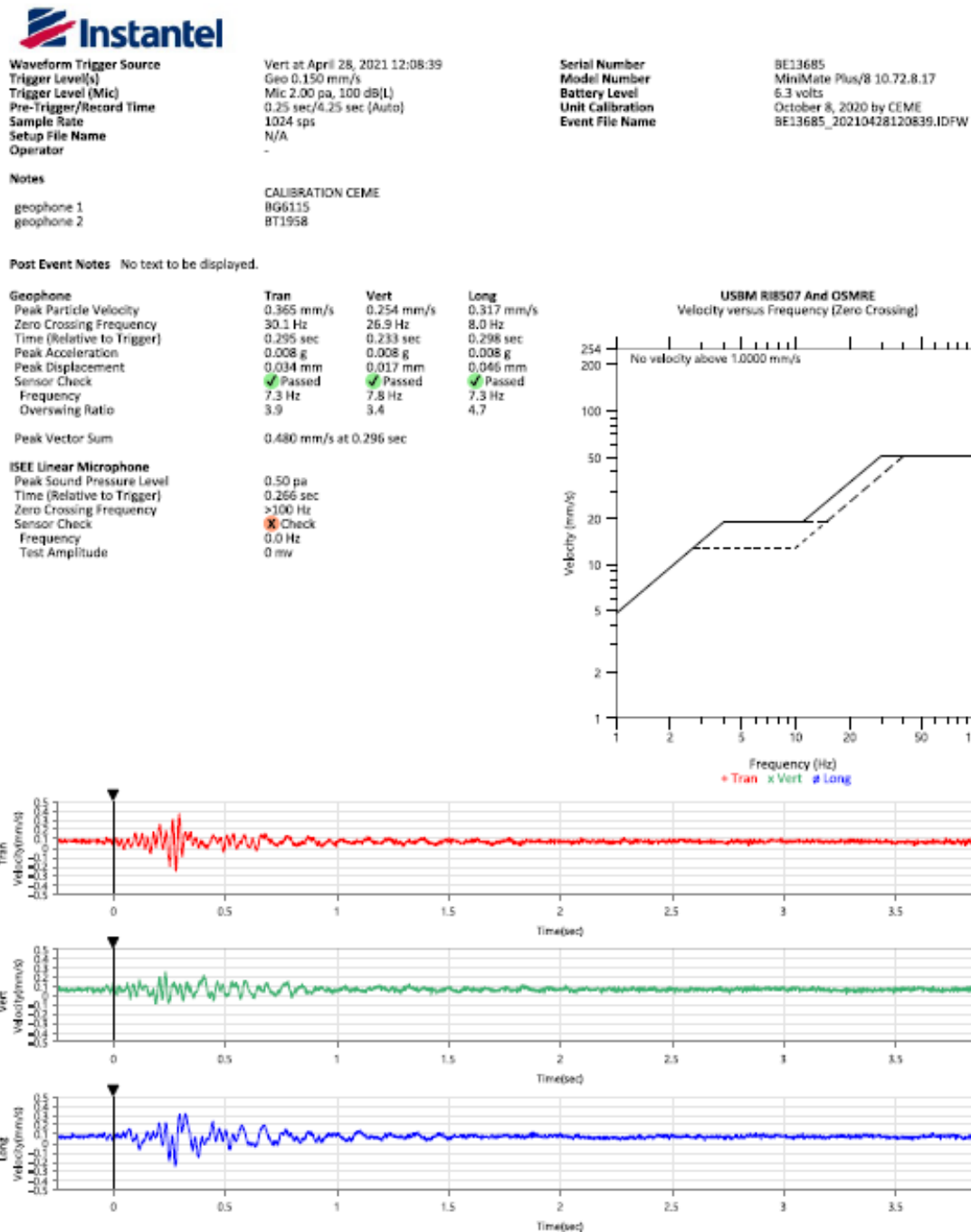
No piso inferior:

5. Em linha reta do ponto de referência do topo da bancada, marcar o ponto de referência do fundo da bancada. Os vários pontos de referência do fundo deverão criar a aproximação de uma linha imaginária entre si, acompanhando o chão do nível onde nos encontramos;
6. O utilizador deverá afastar-se uma distância razoável em linha reta da frente da bancada, localizando-se num local onde seja possível ver com facilidade e em linha reta e em ângulo de 90° com o solo, os dois pontos de referência anteriormente marcados;
7. O utilizador deverá ligar o equipamento *laser*, escolher o menu desejado para a leitura dos parâmetros já mencionados, seleccionar o número da face e o do furo que será realizado e agarrando o equipamento com a mão direita, posicioná-lo no olho direito para observar os pontos através da mira;
8. Apontar o equipamento para o ponto de referência do topo da bancada do furo em questão e realizar o primeiro disparo, de seguida apontar para o ponto de referência do fundo da bancada do furo em questão e disparar o segundo disparo do *laser*;
9. Seleccionando no equipamento a opção de *Profile* realizar uma serie de disparos ao longo da vertical entre os dois pontos de referência;
10. Repetir as etapas anteriores em todos os furos do diagrama seleccionados;
11. Aquando do *download* dos dados do equipamento, deverão ser inseridas as medidas da etapa 3 e o ângulo de furação.

## Anexo B – Registo de amplitude de vibração exemplificativo (*Event e FFT Report*)

O registo apresentado corresponde ao desmorte nº 76.21 da pedra do Outão e à monitorização realizada pelo sismógrafo Orica.

*Event Report:*





FFT (Fast Fourier Transform) Report:



Waveform Trigger Source  
 Trigger Level(s)  
 Trigger Level (Mic)  
 Pre-Trigger/Record Time  
 Sample Rate  
 Setup File Name  
 Operator

Vert at April 28, 2021 12:08:39  
 Geo 0.150 mm/s  
 Mic 2.00 pa, 100 dB(L)  
 0.25 sec/4.25 sec (Auto)  
 1024 sps  
 N/A  
 -

Serial Number  
 Model Number  
 Battery Level  
 Unit Calibration  
 Event File Name

BE13685  
 MiniMate Plus/8 10.72.8.17  
 6.3 volts  
 October 8, 2020 by CEME  
 BE13685\_20210428120839.IDFW

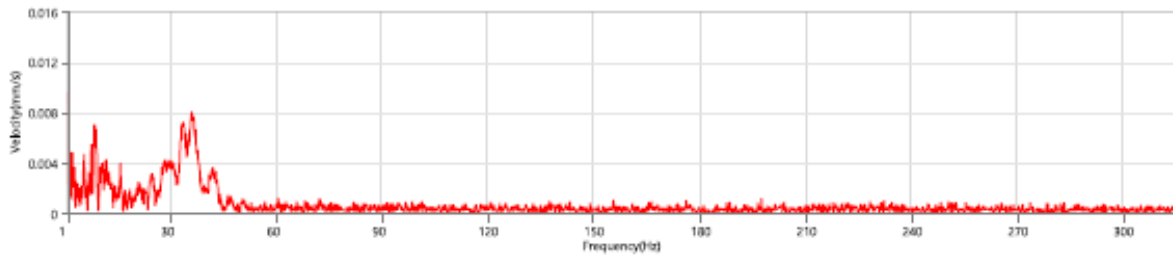
Notes

geophone 1  
 geophone 2

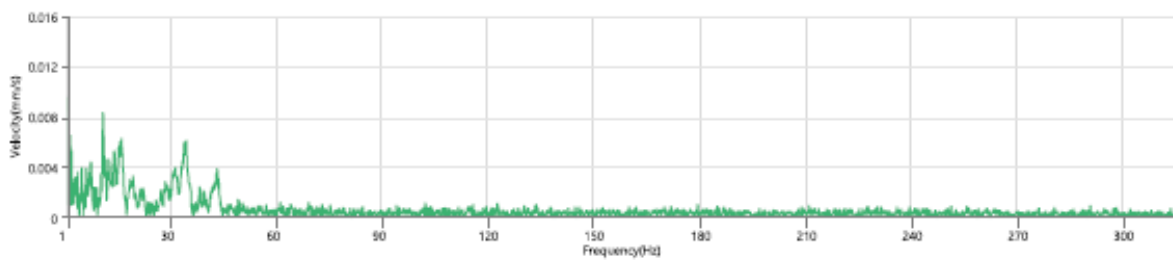
CALIBRATION CEME  
 BG6115  
 BT1958

Post Event Notes No text to be displayed.

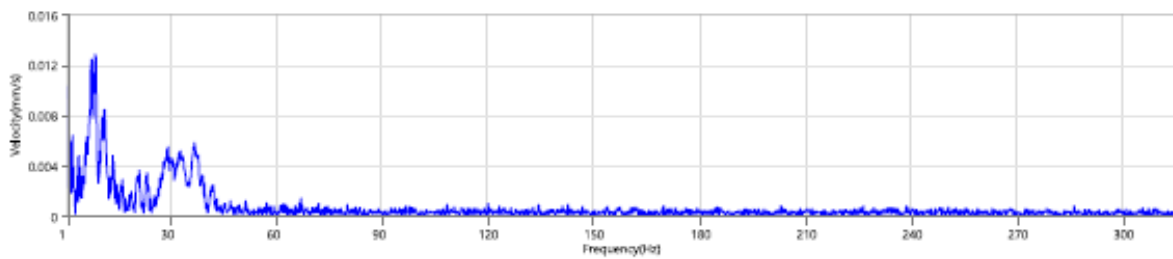
Tran - Dominant Frequency 1.0 Hz, Amplitude 0.010 mm/s (Peak Particle Velocity: 0.365 mm/s)



Vert - Dominant Frequency 1.0 Hz, Amplitude 0.010 mm/s (Peak Particle Velocity: 0.254 mm/s)



Long - Dominant Frequency 8.8 Hz, Amplitude 0.013 mm/s (Peak Particle Velocity: 0.317 mm/s)



## Anexo C – Base de dados da pedra do Outão (4 páginas)

Nº Desmonte	Data	Piso	Tipo de Rocha	Q (kg)	Sismógrafo	PVS (mm/s)	Local Monitorizado	D (m)	Frequencia dominante (Hz)
34.21	03/03/2021	140	CA	91	Secil Outão	0,676	E	1113	7,1
35.21	03/03/2021	150	MA	23	Secil Outão	0,312	E	1090	6,6
38.21	10/03/2021	130	MA	46	Secil Outão	0,734	H	767	19
39.21	10/03/2021	140	MA	47	Secil Outão	0,588	H	755	7,5
40.21	11/03/2021	150	MA	20	Orica	0,366	I	1011	35,8
41.21	12/03/2021	130	CA	42	Secil Outão	0,599	H	808	7,2
42.21	12/03/2021	130	CA	42	Secil Outão	0,572	H	827	18
43.21	15/03/2021	120	CA	61	Secil Outão	1,338	H	985	5,4
44.21	15/03/2021	150	MA	38	Secil Outão	0,815	H	719	8,4
45.21	16/03/2021	140	MA	45	Orica	0,456	I	1044	8,2
47.21	17/03/2021	140	MA	47	Secil Outão	0,563	E	1188	11,2
47.21	17/03/2021	140	MA	47	Orica	0,385	C	1094	10,2
48.21	19/03/2021	140	MA	48	Orica	0,692	H	759	8,1
49.21	23/03/2021	140	MA	35	Secil Outão	0,461	H	704	10,5
49.21	23/03/2021	140	MA	35	Orica	0,430	I	1048	8,2
50.21	24/03/2021	140	CA	45	Orica	0,327	C	1175	7,5
51.21	24/03/2021	140	MA	48	Orica	0,214	C	1201	10,2
52.21	25/03/2021	130	CA	45	Secil Outão	0,467	G	1058	6,2
52.21	25/03/2021	130	CA	45	Orica	0,381	I	1305	13,5
53.21	25/03/2021	140	MA	38	Secil Outão	0,432	G	920	6,5
53.21	25/03/2021	140	MA	38	Orica	0,399	I	1135	4,9
54.21	26/03/2021	130	MA	42	Secil Outão	0,783	H	764	14,5
54.21	26/03/2021	130	MA	42	Orica	0,316	I	1257	11,5
55.21	30/03/2021	130	CA	75	Orica	0,855	H	904	7,2
56.21	30/03/2021	140	CA	54	Orica	0,753	H	916	6,5
57.21	30/03/2021	140	MA	45	Orica	1,386	H	744	11,2
58.21	31/03/2021	140	MA	20	Secil Outão	0,709	H	705	8,1
58.21	31/03/2021	140	MA	20	Orica	0,758	H	705	8,1
59.21	31/03/2021	140	MA	35	Secil Outão	0,375	H	705	9,8
59.21	31/03/2021	140	MA	35	Orica	0,483	H	705	10,5

	Dados considerados outliers
--	-----------------------------

Nº Desmonte	Data	Piso	Tipo de Rocha	Q (kg)	Sismógrafo	PVS (mm/s)	Local Monitorizado	D (m)	Frequencia dominante (Hz)
60.21	01/04/2021	120	CA	61	Secil Outão	0,399	H	971	3,5
61.21	01/04/2021	140	MA	45	Secil Outão	1,348	H	701	10,6
62.21	06/04/2021	140	MA	48	Secil Outão	0,908	H	754	10
62.21	06/04/2021	140	MA	48	Orica	0,385	C	1104	10
63.21	08/04/2021	150	MA	29	Orica	0,582	H	684	19,2
64.21	12/04/2021	130	CA	42	Orica	0,412	C	1013	8,5
65.21	12/04/2021	140	MA	48	Orica	0,321	C	1091	8,5
67.21	14/04/2021	130	MA	48	Orica	0,670	H	765	19,2
69.21	19/04/2021	120	CA	61	Orica	0,482	H	1050	10,2
70.21	21/04/2021	120	MA	69	Orica	0,714	H	883	8,2
71.21	21/04/2021	150	MA	26	Orica	0,387	H	691	7,8
72.21	23/04/2021	130	MA	39	Orica	1,041	B	408	15,9
75.21	28/04/2021	120	CA	64	Secil Outão	0,716	H	968	10
75.21	28/04/2021	120	CA	64	Orica	1,250	B	420	10,5
76.21	28/04/2021	150	MA	38	Secil Outão	0,555	H	691	11,2
76.21	28/04/2021	150	MA	38	Orica	0,480	B	646	8,8
79.21	03/05/2021	130	CA	45	Secil Outão	0,628	A	582	8
79.21	03/05/2021	130	CA	45	Orica	1,128	H	792	19,1
80.21	03/05/2021	140	MA	45	Secil Outão	0,684	A	482	10
80.21	03/05/2021	140	MA	45	Orica	0,835	H	755	9,5
81.21	04/05/2021	130	MA	56	Secil Outão	0,506	H	875	15,2
81.21	04/05/2021	130	MA	56	Orica	0,544	H	875	15,1
82.21	05/05/2021	120	CA	61	Secil Outão	0,595	C	945	10
83.21	06/05/2021	130	CA	45	Secil Outão	0,421	A	570	6,2
83.21	06/05/2021	130	CA	45	Orica	0,372	C	1182	6,8
84.21	06/05/2021	130	CA	48	Secil Outão	0,410	A	577	9,5
84.21	06/05/2021	130	CA	48	Orica	0,320	C	1192	10,2
85.21	10/05/2021	130	MA	39	Secil Outão	1,091	B	408	9,5
85.21	10/05/2021	130	MA	39	Orica	0,853	H	886	9,5
86.21	11/05/2021	130	MA	39	Secil Outão	1,237	B	391	14,2
86.21	11/05/2021	130	MA	39	Orica	0,731	H	902	8
87.21	17/05/2021	120	CA	61	Secil Outão	1,361	B	444	10,8
87.21	17/05/2021	120	CA	61	Orica	0,507	H	951	4
88.21	18/05/2021	140	MA	45	Secil Outão	0,488	B	502	8,5

	Dados considerados outliers
--	-----------------------------

Nº Desmonte	Data	Piso	Tipo de Rocha	Q (kg)	Sismógrafo	PVS (mm/s)	Local Monitorizado	D (m)	Frequencia dominante (Hz)
88.21	18/05/2021	140	MA	45	Orica	0,763	H	806	8,9
89.21	19/05/2021	130	MA	69	Orica	0,324	F	1408	8,1
90.21	19/05/2021	150	MA	26	Secil Outão	0,493	H	696	8
90.21	19/05/2021	150	MA	26	Orica	0,307	F	1271	8,2
91.21	20/05/2021	130	CA	45	Secil Outão	0,424	B	666	12,8
91.21	20/05/2021	130	CA	45	Orica	1,188	H	790	18,1
92.21	21/05/2021	140	MA	42	Orica	0,713	F	1336	11,5
92.21	21/05/2021	140	MA	42	Secil Outão	1,462	H	789	11,4
93.21	24/05/2021	120	CA	64	Secil Outão	0,870	H	799	8,5
93.21	24/05/2021	120	CA	64	Orica	0,463	F	1222	9,5
94.21	25/05/2021	130	MA	69	Orica	0,373	F	1432	8
95.21	26/05/2021	120	CA	42	Secil Outão	0,546	H	818	7,8
95.21	26/05/2021	120	CA	42	Orica	0,243	F	1248	8
96.21	27/05/2021	120	CA	69	Secil Outão	0,518	H	859	8,5
96.21	27/05/2021	120	CA	69	Orica	0,276	F	1366	8
96.21	27/05/2021	120	CA	69	Secil Britas	0,602	B	499	8
97.21	27/05/2021	150	MA	38	Secil Outão	0,572	H	680	20
97.21	27/05/2021	150	MA	38	Orica	0,304	F	1214	6
97.21	27/05/2021	150	MA	38		0,407	B	641	1
98.21	28/05/2021	140	MA	42	Secil Outão	0,563	H	776	7,8
98.21	28/05/2021	140	MA	42	Orica	0,360	F	1327	7
98.21	28/05/2021	140	MA	42		0,665	B	529	14
99.21	31/05/2021	120	CA	58	Secil Outão	0,765	H	943	7
99.21	31/05/2021	120	CA	58	Orica	0,390	F	1434	8
99.21	31/05/2021	120	CA	58	Secil Britas	1,451	B	456	8
100.21	01/06/2021	130	MA	39	Secil Outão	0,422	H	856	9,2
100.21	01/06/2021	130	MA	39	Orica	0,269	F	1408	7
101.21	08/06/2021	150	MA	26	Orica	0,294	H	679	10
101.21	08/06/2021	150	MA	26	Secil Britas	0,511	H	679	11
102.21	09/06/2021	130	MA	39	Orica	0,353	F	1215	8
102.21	09/06/2021	130	MA	39	Secil Britas	0,607	H	670	9
103.21	09/06/2021	130	CA	39	Orica	0,292	F	1222	11
103.21	09/06/2021	130	CA	39	Secil Britas	0,932	H	789	19
105.21	14/06/2021	140	MA	48	Orica	0,865	H	763	10
106.21	15/06/2021	120	CA	58	Orica	0,879	H	855	23
107.21	15/06/2021	130	MA	39	Orica	0,887	H	850	15

Dados considerados outliers

Nº Desmonte	Data	Piso	Tipo de Rocha	Q (kg)	Sismógrafo	PVS (mm/s)	Local Monitorizado	D (m)	Frequencia dominante (Hz)
108.21	18/06/2021	130	MA	39	Orica	0,573	H	863	10
109.21	21/06/2021	130	CA	83	Orica	0,325	F	1414	7
109.21	21/06/2021	130	CA	83	Secil Britas	0,644	H	953	7
110.21	22/06/2021	130	MA	39	Orica	0,389	F	1386	11
110.21	22/06/2021	130	MA	39	Secil Britas	0,681	H	841	11
111.21	22/06/2021	140	MA	48	Orica	0,340	F	1307	10
111.21	22/06/2021	140	MA	48	Secil Britas	0,616	H	752	10
112.21	23/06/2021	140	CA	48	Orica	0,473	H	879	8
113.21	28/06/2021	150	MA	38	Orica	0,504	H	664	10
113.21	28/06/2021	150	MA	38	Secil Britas	0,264	F	1205	7
114.21	28/06/2021	170	MA	69	Orica	0,488	H	1051	9
114.21	28/06/2021	170	MA	69	Secil Britas	0,282	F	1659	8
115.21	29/06/2021	130	MA	39	Orica	0,607	H	860	4
116.21	29/06/2021	140	MA	48	Orica	0,525	H	745	9
116.21	29/06/2021	140	MA	48	Secil Britas	0,369	F	1300	10
117.21	30/06/2021	130	MA	69	Orica	0,321	H	1015	4
119.21	02/07/2021	140	CA	45	Orica	0,350	H	875	7
119.21	02/07/2021	140	CA	45	Secil Britas	0,255	F	1253	12

	Dados considerados outliers
--	-----------------------------

## Anexo D – Base de dados da pedra do Vale do Covão (3 páginas)

Nº Desmonte	Data	Piso	Q (kg)	Sismógrafo	PVS (mm/s)	Local Monitorizado	D (m)	Frequencia dominante (Hz)
15.21	02/03/2021	130	86	Secil Britas	0,406	E	692	13,8
16.21	08/03/2021	160	69	Secil Britas	0,403	D	697	12,2
16.21	08/03/2021	160	69	Orica	1,395	A	265	9
17.21	08/03/2021	85	49	Orica	1,590	A	323	5,8
17.21	08/03/2021	85	49	Secil Britas	0,214	D	539	1,1
18.21	09/03/2021	85	63	Secil Britas	0,455	E	596	12,1
18.21	09/03/2021	85	63	Orica	2,869	A	264	11,2
24.21	18/03/2021	160	81	Secil Britas	0,338	E	755	5
24.21	18/03/2021	160	81	Orica	1,832	A	283	7,2
25.21	18/03/2021	160	28	Orica	0,904	A	315	10,8
28.21	22/03/2021	160	75	Secil Britas	0,288	E	756	5
28.21	22/03/2021	160	75	Orica	1,808	A	301	6,4
32.21	29/03/2021	115	113	Secil Britas	0,333	E	718	20,6
32.21	29/03/2021	115	113	Orica	1,025	A	436	16,2
37.21	09/04/2021	85	72	Orica	0,323	E	583	19,8
39.21	15/04/2021	160	69	Secil Britas	0,365	E	757	7
39.21	15/04/2021	160	69	Orica	1,762	A	324	12,4
40.21	15/04/2021	160	55	Orica	0,750	A	289	10,2
41.21	16/04/2021	85	69	Orica	0,470	E	592	5,8
42.21	16/04/2021	160	43	Orica	0,285	E	729	1
50.21	29/04/2021	160	43	Orica	0,802	F	910	4,5
51.21	30/04/2021	160	43	Orica	0,457	F	922	6,4
51.21	30/04/2021	160	43	Secil Britas	1,192	C	890	9
52.21	30/04/2021	100	107	Orica	0,311	F	959	4
52.21	30/04/2021	100	107	Secil Britas	0,979	C	807	13,1
53.21	30/04/2021	160	41	Orica	0,345	F	862	4,8
53.21	30/04/2021	160	41	Secil Britas	0,463	C	868	1,1
56.21	07/05/2021	160	43	Orica	1,094	B	522	7,9
57.21	10/05/2021	85	72	Orica	0,583	H	1001	7,6
57.21	10/05/2021	85	72	Secil Britas	1,033	B	621	6,6
59.21	12/05/2021	160	43	Orica	0,405	F	894	5
59.21	12/05/2021	160	43	Secil Britas	0,525	C	842	7
60.21	13/05/2021	175	52	Orica	0,514	D	519	4,9
60.21	13/05/2021	175	52	Secil Britas	4,501	B	295	12,2
61.21	13/05/2021	160	52	Secil Britas	1,337	B	436	16,1
62.21	14/05/2021	160	43	Orica	0,350	G	908	11
62.21	14/05/2021	160	43	Secil Britas	0,504	B	547	15,9

	Dados considerados outliers
--	-----------------------------

Nº Desmante	Data	Piso	Q (kg)	Sismógrafo	PVS (mm/s)	Local Monitorizado	D (m)	Frequencia dominante (Hz)
63.21	17/05/2021	160	93	Orica	0,703	G	982	5,5
63.21	17/05/2021	160	93	Secil Britas	0,734	C	815	7,6
64.21	19/05/2021	160	47	Orica	0,306	H	1002	5,5
64.21	19/05/2021	160	47	Secil Britas	1,136	A	277	6,8
65.21	21/05/2021	145	66	Orica	0,471	G	1050	5,2
66.21	24/05/2021	145	66	Orica	0,467	H	1112	5,4
67.21	25/05/2021	160	55	Orica	0,372	G	1009	5,2
67.21	25/05/2021	160	55	Secil Britas	0,457	C	812	6,8
68.21	26/05/2021	160	43	Orica	0,252	F	911	5
68.21	26/05/2021	160	43	Secil Britas	1,211	A	297	15,1
69.21	27/05/2021	160	43	Orica	0,665	F	910	4
70.21	28/05/2021	160	43	Orica	0,384	H	1085	5,2
70.21	28/05/2021	160	43	Secil Britas	1,370	A	350	8
71.21	28/05/2021	145	68	Orica	0,357	H	992	7,8
71.21	28/05/2021	145	68	Secil Britas	1,138	A	262	7,9
72.21	31/05/2021	145	63	Orica	0,442	G	1027	5,5
72.21	31/05/2021	145	63	Secil Britas	1,318	A	359	7,2
73.21	01/06/2021	160	43	Orica	0,283	H	1020	9,2
73.21	01/06/2021	160	43	Secil Britas	1,267	A	294	15,2
74.21	02/06/2021	145	115	Orica	1,737	B	533	17,2
74.21	02/06/2021	145	115	Secil Britas	2,151	A	269	12
75.21	07/06/2021	160	52	Secil Britas	0,988	A	289	15
75.21	07/06/2021	160	52	Orica	1,325	B	505	34,2
76.21	08/06/2021	175	66	Secil Britas	0,375	A	602	48,5
76.21	08/06/2021	175	66	Orica	2,834	B	303	17,8
77.21	09/06/2021	160	43	Orica	1,377	B	524	26,6
77.21	09/06/2021	160	43	Secil Britas	2,396	A	268	11,1
78.21	14/06/2021	145	95	Orica	0,535	G	983	4
79.21	15/06/2021	160	40	Orica	0,317	F	883	4,8
79.21	15/06/2021	160	70	Secil Britas	1,404	A	268	11,6
81.21	18/06/2021	175	58	Orica	0,490	D	507	5
82.21	21/06/2021	145	101	Orica	0,736	G	948	8,4
82.21	21/06/2021	145	101	Secil Britas	2,556	A	278	7,8
83.21	23/06/2021	145	104	Orica	1,165	B	522	16,6
84.21	24/06/2021	145	107	Secil Britas	2,247	A	280	15,8
85.21	24/06/2021	175	55	Secil Britas	0,414	A	588	48,8
85.21	24/06/2021	175	55	Orica	0,490	D	501	5
86.21	25/06/2021	145	101	Orica	0,556	F	879	4
86.21	25/06/2021	145	101	Secil Britas	1,664	A	267	12

	Dados considerados outliers
--	-----------------------------

Nº Desmonte	Data	Piso	Q (kg)	Sismógrafo	PVS (mm/s)	Local Monitorizado	D (m)	Frecuencia dominante (Hz)
87.21	28/06/2021	145	101	Orica	0,605	G	932	7,5
87.21	28/06/2021	145	101	Secil Britas	3,201	A	263	12
88.21	29/06/2021	145	96	Orica	0,254	D	670	4,8
88.21	29/06/2021	145	96	Secil Britas	3,512	A	259	12,4
89.21	29/06/2021	175	58	Secil Britas	0,382	A	615	48,8
89.21	29/06/2021	175	58	Orica	0,385	D	505	5
90.21	30/06/2021	145	83	Orica	1,510	B	511	16,6
91.21	01/07/2021	145	87	Orica	0,519	H	994	6,8
91.21	01/07/2021	145	87	Secil Britas	3,026	A	257	12,4
92.21	02/07/2021	175	44	Orica	0,498	D	491	5
92.21	02/07/2021	175	44	Secil Britas	0,523	C	709	10,4



## Anexo E – Tabela com dados *laser 2D* da pedreira do Outão

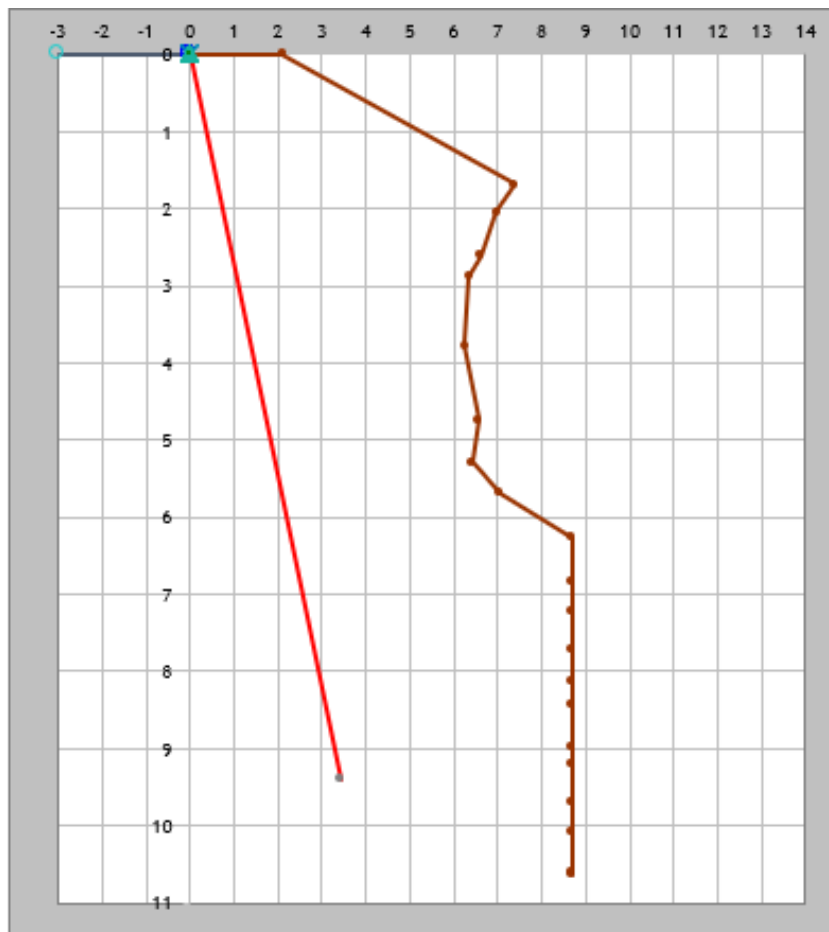
Data	Rocha/Piso	Nº Desmorte	Distância média do afastamento no topo da bancada (m)	Altura média da bancada (m)	Ângulo médio da bancada (°)	Afastamento médio da bancada (m)
06/04/2021	MA140	62.21	4,29	10,02	18,51	4,61
08/04/2021	MA150	63.21	4,00	3,03	-43,58	4,61
12/04/2021	CA130	64.21	3,88	9,08	10,36	4,42
14/04/2021	MA140	68.21	3,68	10,25	41,85	5,31
19/04/2021	CA120	69.21	3,95	6,74	14,70	5,19
21/04/2021	CA120	70.21	4,26	7,13	-3,30	4,34
21/04/2021	MA150	71.21	3,95	3,16	-46,83	4,09
23/04/2021	MA130	72.21	3,66	7,61	10,00	4,43
27/04/2021	CA130	73.21	4,60	9,50	17,95	4,99
27/04/2021	MA140	74.21	4,48	11,06	12,92	4,60
28/04/2021	CA120	75.21	3,99	7,02	6,66	5,11
28/04/2021	MA150	76.21	3,63	3,90	-23,69	4,48
03/05/2021	CA130	79.21	4,28	9,22	16,50	5,28
03/05/2021	MA140	80.21	4,30	10,42	8,83	4,81
04/05/2021	MA130	81.21	3,88	7,82	7,25	5,04
05/05/2021	CA120	82.21	4,04	7,06	1,85	4,11
06/05/2021	CA130	83.21	4,88	9,51	31,68	7,08
06/05/2021	CB130	84.21	4,52	9,69	34,78	6,16
10/05/2021	MA130	85.21	3,77	8,18	7,54	4,65
11/05/2021	MA130	86.21	4,26	8,21	8,62	5,21
19/05/2021	MA130	89.21	4,34	8,02	2,00	4,48
19/05/2021	MA150	90.21	3,41	2,48	-46,26	4,04
20/05/2021	CA130	91.21	4,39	9,28	14,99	4,79
21/05/2021	MA140	92.21	3,98	7,91	3,43	4,97
24/05/2021	CA120	93.21	3,82	7,00	9,47	4,27
26/05/2021	CA130	95.21	4,57	9,90	0,63	4,43
27/05/2021	CA120	96.21	4,20	7,25	11,55	4,62
27/05/2021	MA150	97.21	3,53	3,87	-14,86	4,19
28/05/2021	MA140	98.21	4,30	10,99	19,50	5,42
31/05/2021	CA120	99.21	3,72	7,12	1,38	4,74
01/06/2021	MA130	100.21	4,25	8,67	12,15	4,15
08/06/2021	MA150	101.21	3,47	2,44	-45,60	3,89
09/06/2021	MA130	102.21	4,30	8,52	8,95	4,34
14/06/2021	MA140	105.21	4,20	10,80	18,67	4,63
15/06/2021	MA130	107.21	3,97	8,62	5,58	4,29
21/06/2021	CA130	109.21	3,82	9,15	31,26	5,64
28/06/2021	MA170	114.21	4,50	7,88	23,95	4,63
29/06/2021	MA130	115.21	3,90	9,01	29,50	4,41
29/06/2021	MA140	116.21	4,80	11,77	29,70	4,95

## Anexo F - Tabela com dados *laser* 2D da pedraira do Vale do Covão

Data	Nº Desmonte	Distância média do afastamento no topo da bancada (m)	Altura média da bancada (m)	Ângulo médio da bancada (°)	Afastamento médio (m)
09/04/2021	37.21	4,35	15,38	15,60	5,04
16/04/2021	41.21	3,88	15,79	17,90	4,64
29/04/2021	50.21	4,02	5,03	-40,24	4,02
30/04/2021	51.21	4,26	12,54	0,52	3,91
30/04/2021	53.21	3,70	5,75	-20,18	3,96
07/05/2021	56.21	3,83	5,78	-3,98	4,24
10/05/2021	57.21	5,13	15,57	8,83	5,44
12/05/2021	59.21	4,03	5,47	-24,15	3,96
13/05/2021	60.21	3,44	5,43	1,30	4,35
14/05/2021	62.21	3,50	6,04	-13,44	3,53
17/05/2021	63.21	4,12	5,88	-3,78	4,14
19/05/2021	64.21	3,40	5,50	-0,70	4,85
25/05/2021	67.21	3,57	4,71	-15,50	3,85
26/05/2021	68.21	3,54	5,98	-5,28	4,10
28/05/2021	71.21	3,60	5,23	-23,60	4,21
01/06/2021	73.21	3,55	5,54	-15,90	4,12
07/06/2021	75.21	3,07	4,99	-16,37	3,54
15/06/2021	79.21	3,85	6,08	-5,50	4,10
18/06/2021	81.21	4,38	5,84	10,35	4,90
25/06/2021	86.21	4,13	9,12	8,33	3,68

## Anexo G – Perfil exemplo obtido através dos dados *laser* 2D

Perfil da bancada referente a um dos furos do diagrama de fogo, obtido através dos dados *laser* 2D, referente ao desmonte nº 75.21 da pedreira do Outão.



## Anexo H – Relatório de desmonte exemplificativo preenchido pelo técnico responsável

O relatório de desmonte apresentado corresponde ao desmonte nº 76.21 da pedreira do Outão.



### RELATÓRIO DE DESMONTE

CENTRO DE PRODUÇÃO: **OUTÃO B.**

DADOS GERAIS		DIAGRAMA DE FOGO		EXPLOSIVOS					
N.º DESMONTE	76.21	FURAÇÃO	N.º FUROS	15	CARGA FUNDO	PULSAN	80 mm	225 kg	
IDENTIFICAÇÃO DA BANCADA	150		N.º FIADAS	3			mm	kg	
HORA DISPARO	12 h 40 min		ALTURA BANCADA (m)	4	CARGA COLUNA	PERONAC	80 mm	325 kg	
N.º REQUISIÇÃO EXPLOSIVOS	CAPSA		ALTURA FUROS (m)	4.5			mm	kg	
REGISTO SISMÓGRAFO	0.57 mm/s		DIST. À FRENTE (m)	4				kg	
			ESPAÇAMENTO (m)	5					
PARÂMETROS DE ANÁLISE		TOTAL	DESMONTE (m³)	2400	TOTAL EXPLOSIVO				550 kg
PERFURAÇÃO ESPECÍFICA (ton/m)	46.66		DESMONTE (ton)	5250	ACESSÓRIOS DE TIRO				
CONSUMO ESPECÍFICO (g/ton)	105	OBSERVAÇÕES (Desenho diagrama, local de iniciação, temporização, etc.):		LIGADORES				15 uni. 6 m 25 ms	
SEGURANÇA		P794		DETONADORES NÃO ELÉTRICOS/ELECTRÓNICOS (Riscar o que não interessa)				16 uni. 12 m 175 ms	
- Existência de projecções: Não <input checked="" type="checkbox"/> Sim <input type="checkbox"/>				uni. m ms					
- Tiros Falhados: Não <input checked="" type="checkbox"/> Sim <input type="checkbox"/>				uni. m ms					
QUALIDADE DO DESMONTE				uni. m ms					
- Deslocamento da bancada: Bom <input checked="" type="checkbox"/> Mau <input type="checkbox"/>		DETONADORES ELÉTRICOS				1 uni. 3 m 0 t			
- Fragmentação: Boa <input checked="" type="checkbox"/> Má <input type="checkbox"/>		uni. m t							
- Possível existência de repés: Não <input checked="" type="checkbox"/> Sim <input type="checkbox"/>		CORDÃO DETONANTE				m			
DATA:	O OPERADOR:	DATA:	PEDREIRA:						
16/04/2021	A. CORREIA	16/04/2021	1						

Homologado por: GQAS

01 MN P 11 01/02