



Universidade Agostinho Neto
Faculdade de Engenharia
Departamento de Engenharia de Minas

Proposta de redução das vibrações resultantes da fragmentação da rocha em uma mina a céu aberto

Caso de Estudo: Sociedade mineira de Catoca

Autor: Bruno Manuel Gaspar da Silva

Estudante Nº: 107967

Trabalho de fim de Curso apresentado como requisito complementar para obtenção do grau Licenciatura em Engenharia de Minas pela Faculdade de engenharia da Universidade Agostinho Neto.

LUANDA,2024

Universidade Agostinho Neto
Faculdade de Engenharia
Departamento de Engenharia de Minas

Proposta de redução das vibrações resultantes da fragmentação da rocha em uma mina a céu aberto

Caso de Estudo: Sociedade mineira de Catoca

Autor: Bruno Manuel Gaspar da Silva

Estudante Nº: 107967

Orientador: Prof. Msc. João Cláudio Cabeia

C0-Orientador: Prof. Msc. Francisco Chicangala

Trabalho de fim de Curso apresentado como requisito complementar para obtenção do grau Licenciatura em Engenharia de Minas pela Faculdade de engenharia da Universidade Agostinho Neto.

LUANDA, 2024

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho especialmente aos meus pais, pelo apoio constante ao longo da minha formação, por acreditarem na realização deste sonho, por me ajudarem a reduzir cada vez mais a distância que me separa das coisas que almejei.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por nunca me deixar sozinho.

Aos meus pais e aos meus irmãos, por todo suporte durante a vida acadêmica.

A sociedade mineira do Catoca , por me ceder o Estágio e os dados para que se concretizasse o trabalho.

Ao meu orientador Msc. João Cláudio Cabeia, por sua total disponibilidade, paciência e atenção na elaboração deste trabalho, foi de extrema ajuda.

A todo corpo docente do curso de Engenharia de Minas da UAN, que sempre me ofertou o melhor nas matérias oferecidas.

Aos meus colegas do curso, os amigos que me acompanharam nesta longa caminhada e, certamente, continuaremos juntos, aqui vai o meu muito obrigado!

EPÍGRAFE

*“Mais vale acender uma vela do que
amaldiçoar a escuridão”*

-Provérbio chinês

RESUMO

A fragmentação de rocha em minas a céu aberto é uma prática essencial na indústria de mineração, mas traz consigo efeitos significativos de vibração que podem impactar diversos aspectos. Primeiramente, a vibração resultante pode ter um impacto ambiental negativo, afetando a fauna, flora e ecossistemas locais, levando à perda de habitat e perturbação de ecossistemas sensíveis. Além disso, a segurança dos trabalhadores da mina é uma preocupação, pois a vibração pode comprometer a estabilidade de estruturas e equipamentos, aumentando o risco de acidentes. As comunidades locais também são afetadas pela vibração, principalmente devido ao ruído gerado e possíveis danos às estruturas residenciais próximas. Isso pode causar desconforto e preocupações com a saúde e segurança dos residentes. Para mitigar esses efeitos, é crucial que as operações de mineração estejam em conformidade com regulamentações ambientais e de segurança rigorosas. Medidas de mitigação, como o uso de explosivos controlados e técnicas de isolamento de vibração, podem ajudar a reduzir o impacto negativo. O monitoramento contínuo da vibração é essencial para avaliar e minimizar os efeitos adversos, permitindo ajustes nas práticas de mineração conforme necessário. Em resumo, a fragmentação de rocha em minas a céu aberto é uma atividade que requer uma abordagem cuidadosa para minimizar os efeitos prejudiciais da vibração no meio ambiente, na segurança dos trabalhadores e nas comunidades locais.

Palavras-chaves: Vibração, Desmonte, Explosivos & Fragmentação.

ABSTRACT

Rock fragmentation in open-pit mines is an essential practice in the mining industry, but it brings with it significant vibration effects that can impact a variety of aspects. Primarily, the resulting vibration can have a negative environmental impact, affecting local fauna, flora, and ecosystems, leading to habitat loss and disruption of sensitive ecosystems. Additionally, the safety of mine workers is a concern, as vibration can compromise the stability of structures and equipment, increasing the risk of accidents. Local communities are also affected by vibration, mainly due to the noise generated and possible damage to nearby residential structures. This can cause discomfort and concerns for the health and safety of residents. To mitigate these effects, it is crucial for mining operations to comply with stringent environmental and safety regulations. Mitigation measures, such as the use of controlled explosives and vibration isolation techniques, can help reduce the negative impact. Continuous vibration monitoring is essential for assessing and minimizing adverse effects, allowing for adjustments to mining practices as needed. In summary, rock fragmentation in open-pit mines is an activity that requires a careful approach to minimize the detrimental effects of vibration on the environment, worker safety, and local communities.

Keywords: Vibration, Dismantling, Explosives & Fragmentation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1:Processo de fragmentação representando a energia de detonação em função da distribuição de tamanho dos blocos “in situ” e da fragmentação requerida.....	5
Figura 1. 2:Fluxograma da execução da operação de desmonte com explosivos, sua natureza complexa e seus requerimentos.....	7
Figura 1. 3:Desmonte de rochas por explosivo	18
Figura 1. 4:Zonas associadas a um furo de um desmonte.....	20
Figura 1. 5:Movimento da Onda P no terreno	26
Figura 1. 6:Movimento da Ondas S no terreno.....	26
Figura 1. 7:Movimento da Onda R no terreno	27
Figura 1. 8:Orientação do transdutor em relação ao desmonte	28
Figura 1. 9:Equipamentos de monitoração e medição de vibrações	32
Figura 3. 1:Localização Geográfica	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1:Velocidades de propagação das Ondas P e S em diferentes meios.....	25
Tabela 1. 2:Fatores que influenciam a magnitude das Vibrações.....	29
Tabela 1. 3:Valores admitidos pela Norma Alemã DIN-4150 para danos em edifícios.	34
Tabela 1. 4:Níveis seguros de velocidade de vibração de partícula para estruturas civis	35
Tabela 1. 5:Limites de velocidades de vibração de partícula de pico por faixas de frequência.....	36
Tabela 3. 1:Parâmetros da pega de fogo.....	41
Tabela 3. 2:Cálculo da velocidade de propagação das ondas em dois pontos distintos da SMC em função do dimensionamento da pega de fogo.....	44
Tabela 3. 3:Cálculo da velocidade de propagação das ondas em dois pontos distintos da SMC em função do redimensionamento da pega de fogo	45

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1:Análise da malha de perfuração em função do espaçamento I	42
Gráfico 2:Análise da malha de perfuração em função do espaçamento II	42
Gráfico 3:Análise da malha de perfuração em função do volume total II	43
Gráfico 4:Relação de impedância.....	47
Gráfico 5:Velocidade de propagação.....	48
Gráfico 6:Velocidade de propagação.....	48

LISTAS DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABS– *Absolute Bulk Strength* ABS– *Absolute Bulk Strength*

AWS – *Absolute Weight Strength*

BBSD – *blasted block size distribution* – “distribuição de tamanho dos blocos detonados”

IBSD – *in-situ block size distribution* – “distribuição de tamanho dos blocos *in situ*”

RWS – *RelativeWeight Strength*;

RBS – *Relative Bulk Strength*;

;

VOD –Velocidade de detonação;

INDÍCE

DEDICATÓRIA.....	I
AGRADECIMENTOS	II
EPÍGRAFE	III
RESUMO.....	IV
ABSTRACT	V
LISTA DE FIGURAS	VI
LISTA DE TABELAS	VII
LISTA DE GRÁFICOS.....	VIII
LISTAS DE SIGLAS E ABREVIATURAS	IX
INTRODUÇÃO	1
Problemática	1
Hipóteses	2
Objetivo Geral	2
Objetivos Específicos	2
Justificativa.....	2
Delimitação do tema.....	3
Estrutura do Trabalho.....	3
CAPÍTULO I: FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	4
1.1 Definições de termos e conceitos chaves	4
1.2. Desmonte com explosivos.....	4
1.2.1. Classificação dos Explosivos	7
1.2.2 Propriedades dos explosivos.....	10
1.2.3 Iniciação de explosivos.....	12
1.2.4 Pega de fogo em uma mina a céu aberto.....	16
1.2.5 Relação de impedância	17

1.2.6 Funções dos explosivos	18
1.3. Vibrações pelo terreno	19
1.4. Caracterização de uma Onda.....	23
1.4.1. Tipos de Ondas	24
1.4.2 Ondas Internas.....	26
1.4.3. Ondas Superficiais	27
1.5. Previsão das Vibrações no Terreno	28
1.6. Fatores que Influenciam a Propagação de Vibrações.....	29
1.6.1 Parâmetros Controláveis	30
1.6.2 Parâmetros não Controláveis	30
1.7 Equipamento para monitorar e medir vibrações.....	31
1.8. Principais normas aplicadas aos desmontes de rochas com explosivos	33
CAPÍTULO II: METODOLOGIA DE ESTUDO	37
2.1. Métodos de investigação.....	37
2.2. Técnicas de pesquisas	37
2.3. Procedimentos e dificuldades encontradas	38
2.3.1. Procedimentos	38
2.3.2. Dificuldades encontradas	38
2.3.3. Tratamentos dos dados.....	38
CAPÍTULO III: ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS.....	39
3.1. Localização Geográfica.....	39
3.2. Vias de acessos	39
3.3. Historial da Mina de Catoca	39
3.4 Análise das vibrações em dois pontos distintos da SMC	40
3.4.1 Redimensionamento da pega de fogo na SMC.....	41
3.4.2 Cálculo da velocidade de propagação da onda longitudinal em dois pontos distintos da mina	43

3.5. Interpretação dos resultados obtidos	45
CONCLUSÃO.....	49
RECOMENDAÇÕES.....	50
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	51
ANEXOS	54
APÊNDICE	58

INTRODUÇÃO

A indústria mineira disponibiliza recursos minerais essenciais para o crescimento económico de um país e o desenvolvimento da sociedade de maneira geral. Ela vai da extração mineral até a fabricação dos produtos industriais. Apesar de sua importância, gera alguns impactos ambientais que são alvos constantes da fiscalização de órgãos públicos, visando estabelecer condições de conforto e segurança para habitantes e edificações existentes em seu próprio núcleo mineiro e suas vizinhanças.

A utilização de explosivos é uma das operações mais comuns na etapa do desmonte de rochas, possui um custo baixo em relação ao desmonte mecânico e garante eficiência na fragmentação. Deste modo, quando executa-se a fragmentação com recurso a explosivos sem a condução de um planejamento adequado a atividade, causar-se-á desconforto humano, colocando em risco a saúde da população do entorno, dos trabalhadores expostos a esta atividade, danificar-se-á o meio ambiente e suas estruturas. Dentre os principais impactos relacionados com o desmonte de rochas realizado com explosivos temos, o ruído e a vibração, sendo este último impacto, motivo da presente investigação, tendo em conta que estão mais sujeitos há reclamações da vizinhança no entorno das áreas de mineração.

Tais impactos podem ser reduzidos a um nível aceitável, desde que a lavra seja executada com a utilização de técnicas modernas tanto na extração como no beneficiamento.

Problemática

O desmonte de rocha com recurso a substâncias explosivas provoca impactos ambientais e desconforto para as populações envolvidas, as quais estão expostas aos seus efeitos. Os danos maléficos ao meio ambiente se fazem sentir através do lançamento de rochas, vibrações, emissão de poeira, aumento dos ruídos, assoreamento de áreas e/ou de drenagens adjacentes à pedreira, além da alteração visual e paisagística. Esses danos podem ser minimizados, com aplicação de técnicas estratégicas e participativas no gerenciamento ambiental sem prejudicar o desenvolvimento sustentável da região.

Tendo em conta as considerações acima expostas, temos a seguinte pergunta de partida:

Quais são os mecanismos a serem utilizados para a redução das vibrações do maciço rochoso resultante do desmonte de rochas com explosivos em dois pontos distintos na sociedade mineira do Catoca?

Hipóteses

H₁: Se se redimensionar a pega de fogo e se ter em conta a relação de impedância do explosivo e da rocha levando em consideração as propriedades físico-mecânicas do maciço rochoso será possível obter uma redução no excesso de vibrações durante o desmonte de rochas.

H₂: Se se determinar a velocidade de propagação das ondas de detonação é possível implementar medidas de controle ou amortecimento para a reduzir a amplitude e impacto.

Objetivo Geral

Propor a redução das vibrações resultantes da fragmentação da rocha na Sociedade mineira de Catoca.

Objetivos Específicos

- ✓ Caraterizar de forma geral a Sociedade Mineira de Catoca;
- ✓ Listar os fatores que influenciam na velocidade de propagação das ondas de detonação;
- ✓ Determinar os parâmetros da pega de fogo e a relação de impedância tendo em conta as caraterísticas da rocha e explosivo;
- ✓ Identificar a repercussão das vibrações resultantes do desmonte do maciço rochoso em dois pontos distintos da sociedade mineira de Catoca.

Justificativa

A mineração a céu aberto é uma atividade complexa que envolve a fragmentação da rocha para a extração de minérios. No entanto, essas atividades de fragmentação com recurso a atividades de desmonte mecânico e com explosivos geram vibrações que podem afetar negativamente a estrutura das edificações próximas, a segurança dos trabalhadores e o meio ambiente.

Portanto, é fundamental realizar uma análise aprofundada sobre os efeitos dessas vibrações, a fim de entender a magnitude do problema e desenvolver soluções eficientes para minimizar os impactos. Além disso, essa pesquisa contribuirá para a melhoria das práticas de mineração a céu aberto, promovendo a segurança dos trabalhadores, a preservação do meio ambiente e o desenvolvimento sustentável da indústria mineradora.

Delimitação do tema

Neste trabalho faremos a análise dos efeitos gerados pelas vibrações, resultantes da fragmentação da rocha apenas para mina a céu aberto tendo como estudo de caso a **Sociedade Mineira de Catoca**.

Estrutura do Trabalho

O nosso trabalho está dividido em três capítulos:

Capítulo I: Fundamentação Teórica ou Científica – neste capítulo definir-se-á os conceitos chaves relacionados ao trabalho.

Capítulo II: Metodologia de Estudo – neste capítulo abordaremos os métodos para a realização do trabalho.

Capítulo III: Análise e Discussão dos Resultados – neste capítulo demonstraremos e interpretaremos os resultados obtidos ao longo da pesquisa.

CAPÍTULO I: FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

1.1 Definições de termos e conceitos chaves

Rocha: são agregados de minerais sólidos interligados, embora algumas acompanham-se de um único mineral e ainda, são constituídas por descontinuidades ou vazios existentes entre os grãos (Menezes, 2013).

Mineral: é um composto químico, via de regra, resultante de processos inorgânicos, de composição química geralmente definida e encontrado naturalmente na crosta terrestre (Leonardos & Leinz, 1971).

Desmorte: é a operação que consiste em separar blocos e fragmentos do maciço a que pertence através de abertura de cavidades (Sambuquilha, 2018).

Explosivos: são substâncias químicas ou misturas que sofrem uma decomposição muito violenta produzindo grande quantidade de calor e gases (Mors, 2009).

Vibração: ou oscilação, é qualquer movimento que se repete de forma regular ou irregular dado um intervalo de tempo (Bertelli, 2023).

Fragmentação: é o processo no qual as rochas são quebradas, fragmentadas ou desintegradas em pedaços menores (Armasa, 2023).

1.2. Desmorte com explosivos

A reação de decomposição pode ser iniciadas por diversos agentes como:

1. Ações mecânicas: Impacto, pressão, vibração, etc.
2. Ações de calor: Chama, aquecimento, faísca
3. Ação de outro explosivo: Espoletas, cordeis detonantes, etc.

A reação de decomposição pode dar-se sob a forma de combustão, deflagração e detonação, em função das características químicas do explosivo e das condições de iniciação e confinamento da mesma.

A forma mais simples e usual de efetuar o desmorte de rochas a céu aberto é através de um sistema de bancadas (degraus direitos). Para a aplicação dos explosivos no interior do maciço rochoso, inicialmente executa-se uma malha de perfuração, com alocação de furos em geral paralelos à face livre (frente livre).

De acordo com (Morais, 2004) o que caracteriza um explosivo como uma ferramenta para desmonte de rochas é sua capacidade de fornecer uma energia concentrada em uma zona limitada. Essa energia criará novas fraturas e extensão das preexistentes na massa rochosa, seguida pelo deslocamento dos fragmentos resultantes.

O arranque de rochas com explosivo por sua vez, transformará uma massa rochosa com um certo IBSD – *in-situ block size distribution* – “distribuição de tamanho dos blocos *in situ*” numa pilha com BBSD – *blasted block size distribution* – “distribuição de tamanho dos blocos detonados”. O estado de distribuição natural certamente terá profundo efeito na fragmentação e na quantidade de energia explosiva requerida para a redução dos blocos à faixa granulométrica desejada figura 1.1 (Morais, 2004)).

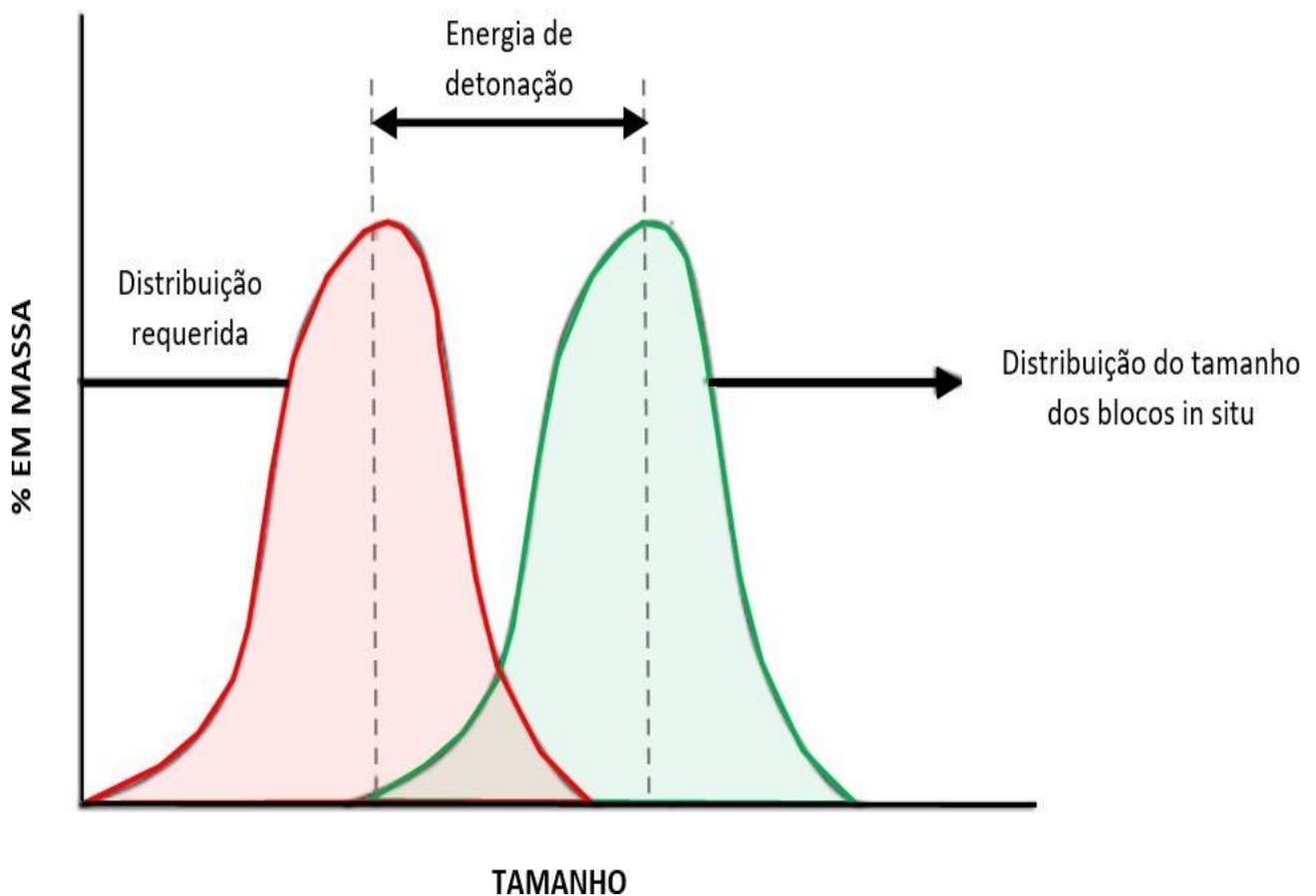


Figura 1.1: Processo de fragmentação representando a energia de detonação em função da distribuição de tamanho dos blocos “in situ” e da fragmentação requerida.

Fonte: Adaptado de (Morais, 2004)

No geral, o desmonte de rochas é uma operação complexa que envolve vários fatores que influenciam e condicionam o seu desempenho. A partida, a fragmentação estará relacionada aos parâmetros geológicos e geotécnicos do maciço, quantidade de explosivos, tipo e distribuição de energia. É importante que, em qualquer operação mineira, nas etapas antecedentes ao desmonte, seja feita uma análise detalhada sobre as condições naturais da massa rochosa como ato de colocar em transparência os aspectos inalterados do conjunto do maciço rochoso que, isolados ou agregados, terão efeitos consideráveis durante a detonação e influenciarão nos mecanismos de sua rotura.

Uma caracterização do maciço numa fase preliminar permitirá compreender de que modo ocorre a interação explosivo-rocha e como é a distribuição espacial da resistência do corpo rochoso ao desmonte. Isso conduzirá a um melhor controle e dimensionamento da operação, numa tentativa de se obter uma correta distribuição de carga e aproveitamento das forças geradas pela libertação de energia, ao redor da massa rochosa circundante.

A eficiência do desmonte, então, dar-se-á em função do posicionamento espacial das frentes livres, ajustamento dos parâmetros geométricos da pega de fogo, propriedades dos explosivos, confinamento, modo de iniciação, temporização dos furos, mas sobretudo do grau de conhecimento do material rochoso (Santana, 2018). Claramente a partir do controle da transmissão de energia haverá garantia do êxito da detonação e redução dos danos indesejáveis que afetam as condicionantes ambientais e sociais . Isto também fará com que as saídas sejam condizentes com o esperado em termos de parâmetros técnicos – grau de fragmentação, redução de blocos, performance do equipamento, dispersão da pilha de material e eficiência nas operações subsequentes (carga e transporte, moagem, beneficiamento etc).

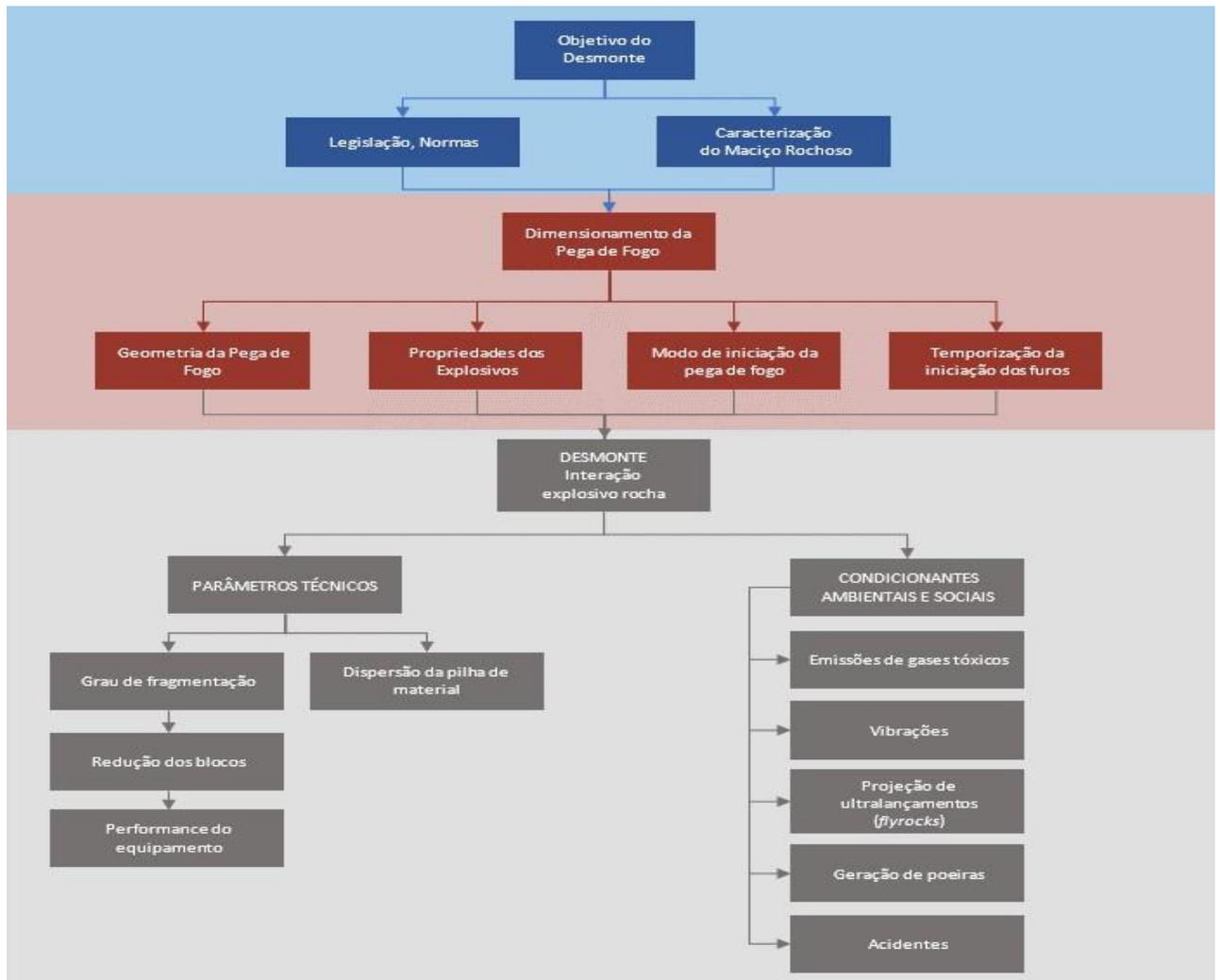


Figura 1. 1: Fluxograma da execução da operação de desmonte com explosivos, sua natureza complexa e seus requerimentos.

Fonte: Adaptado de Gomes.

1.2.1. Classificação dos Explosivos

Segundo (Jimeno & Jimeno, 2017), os explosivos são classificados basicamente em três categorias, que são: explosivos primários ou iniciadores, explosivos secundários ou altos explosivos e alguns materiais podem atuar tanto como primários como secundários em um processo de detonação. Explosivos Primários ou Iniciadores São materiais utilizados nos processos de iniciação dos explosivos propriamente ditos: Espoletas, Cordéis Detonantes. Os mais usados industrialmente são: Azida de Chumbo, Estifinato de Chumbo, Fulminato de Mercúrio, Nitropenta etc. Não têm força para detonar a rocha, apenas para iniciar a explosão. Muito sensíveis. Explosivos secundários ou Altos explosivos: São os explosivos propriamente ditos ou explosivos de ruptura. São mais estáveis que os explosivos comuns necessitam de uma maior

quantidade de energia para iniciar o processo de detonação, energia está geralmente fornecida pela ação direta da detonação de um explosivo primário. É o caso das Dinamites, Gelatinas, Anfos (mistura de Nitrato de Amônio e Óleo Diesel), Lamas, etc. Alguns materiais podem atuar tanto como primários como secundários em um processo de detonação. É o caso da Nitropenta que no Cordel Detonante atua como explosivo primário ou iniciador e em cargas especiais (cargas de demolição) atua como secundário. Detonam com velocidades de 2500 a 7500 m/s, com pressões de até 100 000 atmosferas.

1.2.1.1 Classificação dos explosivos quanto a sua composição

- Explosivos simples: são explosivos formados por um único componente simples químico. Entre eles se destacam o nitroglicol, nitroglicerina, nitrocelulose, trotil e ciclonil.
- Explosivos mistos: são formados por substâncias que consomem e produzem oxigênio, mas que não são explosivos quando isolados. Como por exemplo os nitratos inorgânicos, cloratos e percloratos.
- Explosivos compostos: é uma mistura dos explosivos simples e mistos.

1.2.1.2 Classificação dos explosivos quanto a consistência

De acordo com a consistência os explosivos podem ser: plásticos e semi-plásticos: sólidos e líquidos.

- Explosivos plásticos e semi-plásticos: são aqueles que se adaptam a forma do furo, podendo preencher maior volume.
- Explosivos sólidos: são utilizados sob a forma de cartuchos contendo o explosivo em pó.
- Explosivos líquidos: apresentam grande facilidade de carregamento.

1.2.1.3 Classificação dos explosivos quanto a velocidade de combustão

- Lentos ou propulsores: quando a sua velocidade é inferior a 1000m/s.
- Rápidos: quando a sua velocidade de combustão é superior a 1000m/s mas inferior a 500m/s.

1.2.1.4 Classificação dos explosivos quanto aos efeitos

- Fraturante: quando a velocidade de reacção do seu efeito é de destruição do meio que envolve, fraturando-o em pequenos blocos.
- Deflagrante: quando devido a lentidão da reacção o seu efeito é de ruptura pelas fraturas existentes.

1.2.1.5 Classificação dos explosivos quanto a sensibilidade

- Sensíveis: quando o explosivo é ativado pelo efeito de choque ou calor moderado.
- Pouco sensíveis: quando a iniciação só é possível com a utilização de um detonador

Destacamos alguns tipos de explosivos:

- ✓ Anfo;
- ✓ Emulsões e aquagel;
- ✓ Blendes e dinamites.

No geral, há muitas maneiras de se classificar os explosivos, quer em função de suas propriedades, composição química, presença de grupos estruturais (grupos explosóforos), aplicação e outros. A mais comum e que é tomada como referência, consiste em agrupá-los em: explosivos deflagrantes (baixos explosivos) e explosivos detonantes (altos explosivos), cuja diferença se baseia na sua velocidade de detonação, sendo os deflagrantes com velocidade inferior a 2000 m/s e detonantes com velocidades entre 2000 e 7000 m/s (Jimeno & Jimeno, 2017).

1.2.2 Propriedades dos explosivos

1.2.2.1. Força

Traduz a quantidade de energia liberada pela comparação com a energia liberada por uma gelatina composta de 92% de nitroglicerina com 8% de nitrocelulose, e expressa como percentagem em relação a este padrão. Outro padrão utilizado é o nitrato de amônio. 3.3.4.2. Velocidade de detonação (VOD) A velocidade de detonação (VOD) de um explosivo é a velocidade na qual a reação se propaga através do explosivo, e em desmorte, isto significa ao longo da coluna de explosivo no furo. Cada tipo de explosivo tem sua própria velocidade de detonação, que depende dos seus componentes químicos, densidade, confinamento e diâmetro da carga. Em velocidade de detonação é habitualmente expressa em metro por segundo (m/s) e varia normalmente entre 2000 (m/s) e 8000 (m/s). Manual da Atlas Powder (1987) sugere que explosivos de alta velocidade são ideais para rochas duras e os de baixa velocidade oferecem melhores resultados em formações mais macias.

1.2.2.2. Pressão de detonação (PD)

A pressão de detonação é a pressão dentro da frente de detonação, ou seja, é a pressão da onda de detonação durante a viagem ao longo da carga explosiva (ver figura 3). Esta pressão é a principal responsável pela geração de uma onda de choque na rocha que circunda a carga explosiva. A magnitude desta onda reflete a energia de choque do explosivo e é o seu efeito que causa a fratura da rocha (Cameron & Hagan, 1996).

$$PD = \frac{\rho_e \times VD^2}{4}$$

Onde: PD - pressão de detonação (kPa). ρ_e - massa volúmica da substância explosiva (kg/m³). VD - velocidade de detonação (m/s).

1.2.2.3. Densidade (d)

Quanto maior a densidade maior a concentração em um furo maior a fragmentação da rocha. A densidade é um dos parâmetros a ter em conta no momento do carregamento de um furo que possua água no seu interior, pois explosivos com boa resistência a água e de densidade inferior a 1 (um) flutuam, o que não acontece para explosivos com densidade superior a 1 (um). A densidade dos explosivos comerciais varia de 0,60 a 1,45 g/cm³ e é determinada por sua composição, tamanho de grão e

a densidade dos componentes (Clark, 1980).

1.2.2.4. Segurança no Manuseio

Capacidade de resistir à explosão ou projétil (tiro), onda de choque, descarga elétrica, etc. Define forma e tipo de transporte, armazenagem, etc.

1.2.2.5. Resistência à água

Alguns explosivos, como os de nitrato de amônio, não detonam quando molhados. Por isso é necessário saber se há água nos furos, para a escolha do explosivo. De um modo geral, as dinamites têm grande resistência à água, ao passo que os explosivos à base de nitrato de amônio não a têm, ou tem pouca resistência à água. A resistência à água é medida pelo número de horas que o explosivo pode ficar submerso e ainda assim iniciar com eficiência e detonar completamente com a espoleta. Quanto à resistência à água, os explosivos industriais podem ser classificados como tendo: – Nenhuma resistência à água. – Boa resistência à água - não perde sua sensibilidade mesmo quando submersos por um período de até 24 horas em condições de pressão hidrostática de até 3 atmosferas. – Ótima resistência à água- Desenvolvem seu trabalho normal dentro de um intervalo de 72 horas de submersão em condições de pressão hidrostática de até 3 atmosferas.

1.2.2.6. Sensibilidade

Segundo a SPEL, sensibilidade explosiva é entendida como a maior ou menor quantidade de energia que necessita para iniciar a sua explosão. Podemos considerar vários tipos de sensibilidade, umas que podem ser “favoráveis” e outras “desfavoráveis”. Sensibilidade “favoráveis” – Sensibilidade ao detonador – Sensibilidade a ondas de choque Sensibilidade “desfavoráveis” – Sensibilidade ao choque – Sensibilidade a fricção Sensibilidade “favoráveis” Sensibilidade ao detonador Regra geral todos os explosivos indústrias necessitam, para a sua iniciação, da detonação de um explosivo de potência superior. Este explosivo, primário ou iniciador, está colocado num detentor, ou no cordão detonante, consoante o tipo de iniciação que se pretende. Sensibilidade a ondas de choque Este tipo de sensibilidade tem a ver com a distância máxima a que um cartucho com detonador consegue transmitir as ondas de choque provocada pela sua detonação a outro cartucho receptor, colocado em linha com o primeiro. Sensibilidade ao choque depende de explosivo para explosivo, sendo uns mais sensíveis do que os outros.

Sensibilidade a fricção como no caso de sensibilidade ao choque, também as sensibilidades à fricção existem alguns explosivos que são mais sensíveis à fricção que outros.

1.2.2.7 Volume de Gases (na temperatura e pressão da explosão)

De baixa expansão gasosa (até 800 l/kg) e – De alta expansão gasosa (acima de 800 l/kg)

1.2.3 Iniciação de explosivos

Segundo a Spel, podemos dizer que a iniciar um explosivo estamos a provocar a sua detonação. Esta iniciação pode ser feita através da introdução de um detonador num cartucho de explosivo, que entrará em contacto com o resto da carga, ou atrás da ligação de um detonador ao cordão detonante, que se encontra em contacto, ao longo de toda carga, transmitindo-lhe a detonação. Estes são os dois procedimentos geralmente usados para iniciar a explosão. Dentre destes procedimentos há depois variações como quanto ao tipo de detonador que são: detonador ordinário, detonador eléctrico, detonador não eléctrico, quanto ao tipo de cordão detonante (existência de diversas gramagens de cordão detonante).

1.2.3.1. Detonadores eléctricos

Os detonadores eléctricos são activados por intermedio da energia eléctrica. É composto por uma cobertura metálica, geralmente de alumínio. As partes que constituem os detonadores eléctricos são: a eléctrica, a explosiva e no caso dos detonadores de retardo, a substancia retardadora. Parte eléctrica A parte eléctrica que se encontra na zona superior do casquilho é constituída pelo inflamador, pelos fios de ligação que possuem tonalidades de cores consoante as suas características, por outros elementos de protecção. Parte retardadora Após a combustão da carga retardadora é iniciada a combustão da carga primária. Uma vez que esta se encontra imediatamente abaixo da carga retardadora, para os detonadores que retardo; no caso de detonador instantâneos ou de tempo zero, apos a incandescência do inflamador e a combustão da pasta que o envolve, inicia-se a combustão da carga primária. Por fim e após a combustão da carga primária, tanto para detonadores instantâneos como para os retardos, verifica-se a combustão da carga base ou secundaria. Parte explosiva Encontra-se na zona inferior da cápsula e que é composta por uma carga primária, constituída por um explosivo muito sensível, que ao receber

a combustão vinda da parte retardadora detona e por uma carga secundária composta por um explosivo menos potente, em maior quantidade, é esta a última parte do detonador a reagir e a provocar a iniciação do explosivo em que está inserido (escorvado). Nos detonadores eléctricos instantâneos não existe parte retardadora, logo a inflamação do filamento provoca, instantaneamente, a detonação do dispositivo de iniciação.

1.2.3.2. Riodet (Detonador Eléctrico de Alumínio)

Os detonadores eléctricos Riode para uso em minas, pedreiras, construção civil e operações subterrâneas. Estão disponíveis em três serieis: Instantâneo (Z), microretardos (M) e retardos (D)

Os detonadores Riodet de Microretardos são fabricados com 25 tempos e os de Retardos com 16 tempos, proporcionando grande flexibilidade nos planos de fogo com intervalos de tempos curtos e longos respectivamente. Os Riodet se apresentam em dois tipos de sensibilidade eléctrica. Insensíveis (I): sensibilidade standard para aplicações normais; Altamente Insensíveis (AI): para aplicações que envolvam risco de iniciação accidental por correntes externas.

1.2.3.3 Detonador não eléctrico

Os sistemas de iniciações não eléctricos são usados principalmente locais onde exista a possibilidade de haver iniciação indesejáveis, locais próximos a linhas eléctricas, vias ferias eletrificadas, etc. Para estes casos existem acessórios que substituem os detonadores eléctricos e permitem sequenciar correctamente as pegas de fogo. Os detonadores não eléctricos são constituídos por um tubo de plástico que contem no seu interior uma substância reativa, não explosiva, que mantem a propagação da onda de propagação de aproximadamente 2000m/s. Esta reacção do tubo actua uniformemente como um sinal e tem energia suficiente, para iniciar um detonador.

1.2.3.3 Classificação dos detonadores em função do uso

- Cápsula de alumínio - usados nos casos gerais.
- Cápsula de cobre - usados em ambientes inflamáveis.
- Sísmicos - com tempo de reacção inferior a um milissegundo.
- Para trabalhos a grandes pressões de água – até 100 kg/cm²

1.2.3.4 Classificação dos detonadores conforme a intensidade de corrente necessária para iniciar um detonador

- Sensíveis - intensidade de corrente de segurança 0,18 Amp.
- Insensíveis - intensidade de corrente de segurança 0,45 Amp.
- Muito insensíveis – intensidade de corrente de segurança 3 Amp.
- Altamente insensíveis – intensidade de corrente de segurança 4 Amp

1.2.3.5 Métodos de explosão

Dependendo do modo de provocar a explosão do detonador se diferenciam os métodos de explosão.

Os métodos de explosão podem ser:

- De fogo
- Elétrico
- Não elétrico
- Com mecha detonante

a) Métodos de explosão de fogo e meio de ligação

Quando a explosão do detonador realiza-se com um raio de fogo ou faísca de uma mecha.

Os meios de ligação são:

- Cápsula detonadora
- Mecha
- Meios para acender a mecha

b) Métodos de explosão eléctrica e meios de ligação

- Quando a explosão do detonador realiza-se com um inflamador eléctrico
- Fontes de corrente
- Aparelhos de medição e controle

c) Métodos de explosão de fogo

Quando a explosão do detonador realiza-se com a mecha acendida a um inflamador eléctrico.

Métodos de ligação:

- Detonador
- Acessórios
- Máquina explosora

d) Método de explosão com mecha detonante

Quando a explosão da carga da substância industrial é provocada pela explosão de uma mecha detonante que por sua vez inicia-se com uma cápsula detonadora ou detonador eléctrico e não eléctrico.

Meios de ligação:

- Mecha detonante
- Meios correspondentes aos de fogo, eléctrico e não eléctrico.

1.2.4 Pega de fogo em uma mina a céu aberto

O desmonte a céu aberto tem características próprias que o individualiza dos outros tipos de explorações, nomeadamente de interior. Uma das principais características assente no facto do desmonte se efectuar por bancadas. Estas bancadas possuem características que variam consoante o tipo de rocha, o tipo de local de trabalho, o produto que se pretende obter, etc.

A conveniência de se ter uma bancada bem dimensionada apresenta as seguintes vantagens:

- Maior rapidez nos serviços
- Maior produção diária
- Melhor plano de ataque
- Melhor plano de pago
- Maior economia.

Em termos de desvantagens, não existe nenhuma de grande relevo. Para este tipo de desmonte pode dizer-te que não existe limite quanto ao número de furos a executar, nem quanto a altura da bancada, mas sabe-se que quanto mais altas, estas foram, mais perigosas se tornam, tornando também mais difícil nas perfurações.

1.2.4.1 Factores importantes numa pega de fogo

Os factores mais importantes para a realização de uma pega de fogo são: —

- Diâmetro do furo
- Comprimento de furo
- Subfuração
- Afastamento
- Espaçamento
- Inclinação do furo
- Carga de um furo
- Atacamento ou tampão
- Consumo específico

1.2.5 Relação de impedância

A escolha do explosivo a desmontar uma rocha deve ser feita, sempre, em função das características mecânicas dessa rocha. Os explosivos diferem em densidade, velocidade de detonação, energia, etc. E cada um se adapta melhor a cada característica de determinado tipo de rocha. Essa adaptabilidade explosivo-rocha foi classificada pelo U.S. Bureau of Mines através da grandeza denominada “Impedância característica” do explosivo ou da rocha, definidas pelas relações:

$$I_e = \rho_e * v_D$$

$$I_r = \rho_r * v_S$$

Onde: ρ_e - densidade do explosivo (g/m^3) v_D - velocidade de detonação do explosivo (m/s) ρ_r - densidade da rocha (g/m^3) v_S - velocidade da onda longitudinal na rocha da em (km/s)

A partir dessa grandeza, e com base em serie de investigações o U.S. Bureau of Mines enunciou o seguinte princípio: “quanto maior for a impedancia do explosivo ou quanto mais proxima esta estiver da impedancia caracteristica da rocha maiores quantidade de energia do explosivo serão absorvidas pela rocha” . Se uma deformação crítica é tomada como um critério de ruptura, as rochas com maiores valores de módulo de Young requerem uma maior energia dos explosivos para a sua fragmentação. É habitual aquando da escolha do explosivo para o desmonte de um maciço rochoso, utilizar o seguinte critério, a impedância do explosivo a utilizar deverá ser mais próxima da impedância acústica do maciço rochoso (produto da velocidade de propagação sísmica no maciço pela densidade da rocha que o constitui (Gomes et al., 2008).Dividindo as duas equações acima teremos a relação de impedância.

$$N_z = \frac{\rho_e * v_D}{\rho_r * v_S}$$

Ao analisar da expressão acima, podemos verificar que existem duas situações diferente: A relação de impedâncias (N_z) é igual a um (1).

A relação de impedâncias (N_z) é maior que um (1).

1.2.6 Funções dos explosivos

1- Quebrar a rocha/ minério: escavação, carregamento e transporte.

2- Mover à rocha: pilha adequada, empurrar o material.

Fragmentação: é a quebra de blocos que compõem a massa rochosa. Parâmetros principais da fragmentação Explosivo - velocidade de detonação e expansão de gás Material (factores geológicos) - planos de fraqueza, descontinuidades (fracturas, juntas, planos de estratificação, falhas), densidade, porosidade, água. Fragmentação da rocha.

A fragmentação da rocha pode acontecer por dois motivos:

- Ondas de choque - quebram ao redor do furo, levam a reflexão e ao deslocamento da face livre.
- Pressão dos gases- ampliam as fracturas ao redor do furo até a face livre



Figura 1. 2:Desmonte de rochas por explosivo

Fonte: (LEITE, 2013) citado por (GOMES, 2016).

1.3. Vibrações pelo terreno

As vibrações, no seio dos impactos ambientais associados ao desmonte de rocha, estão frequentemente na génese de conflitos entre as comunidades circundantes e as autoridades competentes. Assim sendo, a mitigação destes efeitos é tida como um objetivo fundamental aquando do planeamento e execução de pegadas de fogo, (GOMES, 2016).

Assim sendo, devido à impossibilidade de eliminação da propagação de vibrações, é necessário o controlo e monitorização destas, com o intuito de garantir os limites impostos. É prática comum por parte dos responsáveis pelos desmontes, a execução da estimativa das vibrações, com o objetivo de garantir previamente com uma maior confiança que a magnitude das vibrações não ultrapassa os limites legais.

Do ponto de vista mecânico, uma vibração é o movimento oscilatório de uma partícula em torno da sua posição de equilíbrio, provocado por um impulso. Este impulso é gerado, por forças exteriores, que são transmitidas pelas partículas envolventes. A vibração pode ser decomposta num somatório de ondas periódicas elementares, cuja natureza depende do meio físico em que se propagam, (GOMES, 2016).

As vibrações são respostas elásticas do terreno, quando este é sujeito à passagem de uma onda de tensão, com origem direta ou indireta numa solicitação dinâmica de origem artificial ou natural, (BERNARDO, 2004).

Para (Gomes, 2016), quando uma carga de explosivo é detonada, liberta-se uma certa quantidade de energia, sob a forma de energia elástica contida nos gases, bem como calor e onda aérea. Quando os gases gerados estão confinados, exercem uma pressão elevada na parede do furo, fomentando a fragmentação da rocha envolvente. A execução de um desmonte mal dimensionado incorre num desperdício de energia proveniente da detonação do explosivo, e pode conduzir à produção de vibrações excessivas.

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

Zona hidrodinâmica: é a zona onde a pressão dos gases é superior à resistência à compressão do maciço, provocando a pulverização da rocha;

Zona plástica: é a zona onde a pressão dos gases excede o limite elástico do maciço, provocando deformações plásticas. Geram-se também fendas radiais muito intensas promovidas pelas tensões de tração tangenciais;

Zona elástica: é a zona onde as tensões provocadas pela detonação não ultrapassam o limite elástico da rocha. A dissipação de energia é baixa, desencadeando a propagação de vibrações no maciço a grandes distâncias.

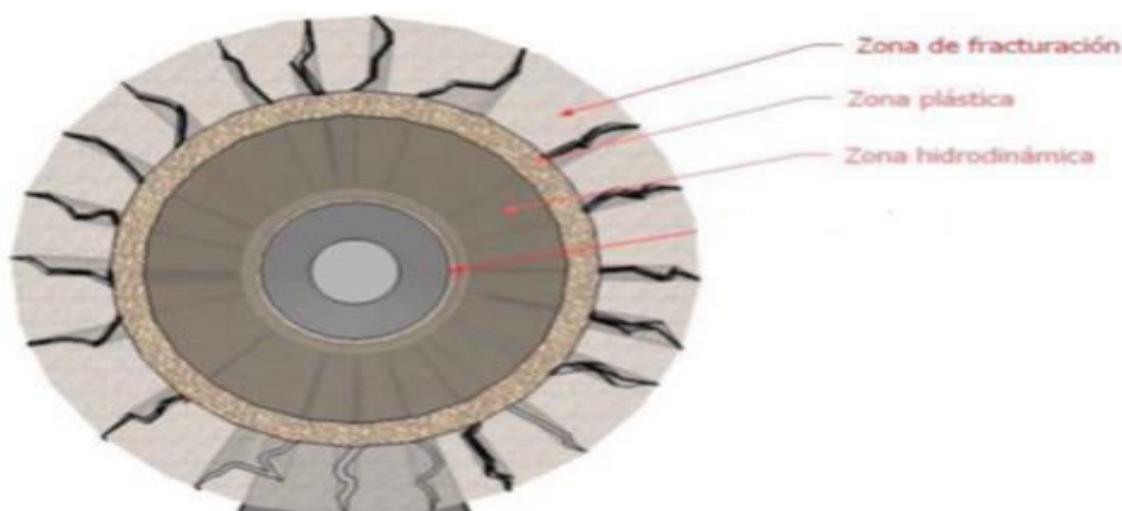


Figura 1. 3: Zonas associadas a um furo de um desmonte

Fonte: (LEITE, 2013) citado por (GOMES, 2016).

Para (Azevedo & Patrício, 2001), as vibrações de maneira geral, são atenuadas através dos mecanismos geométricos e também pela dissipação existente durante o seu percurso.

(França, 2001) afirma que, em termos práticos, as vibrações nem sempre diminuem com a distância, já que segundo o autor, em meios estratificados, dependendo da geometria, as ondas podem concentrar-se ou sobrepor-se a outras ondas refletidas, podendo ocorrer altos valores de vibração em locais mais afastados.

Uma análise factível sobre frequência de vibração de edificações foi apresentada por (França, 2001). Segundo o autor, toda estrutura possui um intervalo de frequência de vibração natural e todo corpo em virtude de sua inércia reage a uma vibração. Assim ao existir uma fonte externa vibrando com frequência similar à frequência natural de um sistema, o mesmo passa a vibrar em grande intensidade, colocando-se em ressonância com a fonte. Portanto, a instabilidade de estruturas perante a propagação

das ondas sísmicas, sejam elas naturais ou artificiais, possui pequena relação com a frequência de ressonância.

É possível prever com um bom grau de confiabilidade e precisão os níveis de pico de vibração de detonações futuras em determinado local, levando em consideração os fatores locais de atenuação de vibrações, que estão estritamente relacionadas com as propriedades geológicas, geotécnicas e físicas de um maciço rochoso, (Ferreira & Dallora, 2006).

(REIL, 1998) menciona que os três principais fatores relacionados à vibração no solo determinantes para as estruturas construídas vibrarem, são:

- Velocidade de vibração máxima de partícula e vibração resultante (VR);
- Duração da vibração;
- Frequência de vibração.

Existe a possibilidade da propagação de vibrações no terreno provocar trincas em construções, porém seu desconforto ambiental à população, geralmente, se reduz ao incômodo causado pela sensação de vibração ou tremor das edificações, provenientes da oscilação ou queda de objetos, (Dallora Neto, 2004).

Segundo (Geraldi J. , 2011), o parâmetro mais adequado para mensurar a magnitude das vibrações produzidas pelas detonações e a probabilidade de danos é a velocidade de partícula. Foi determinado, a partir de uma série de experimentos, um nível máximo para a velocidade da partícula (V_p), de modo a prevenir danos em edificações, principalmente nas localizadas a um raio inferior a 50 m da área das detonações. O valor máximo adoptado internacionalmente para V_p é de 50,00 mm/s, considerado como o limite seguro para vibrações pelo terreno (Langefors e USBM – United States Bureau of Mines). Este valor deve ser considerado técnico, pois em locais devido ao tipo de edificações próximas e às condições locais do maciço a ser desmontado, a V_p deve ser reduzida, na faixa de 20-30 mm/s, (Geraldi J. , 2011).

Para que se evitem danos ao maciço, o limite adoptado internacionalmente da V_p é de 100 mm/s, e caso estes danos ocorram, serão superficiais e se limitarão a uma faixa de 0 a 3 m no interior da massa rochosa. Porém, o simples facto de se respeitar este valor não elimina a necessidade de um reconhecimento geológico preliminar, para detectar irregularidades preexistentes, que podem interferir nas instrumentações sísmicas, induzindo a erros de avaliação. A equação de Langefors pode ser também

adoptada para se determinar a velocidade de partícula que poderá ser atingida em um determinado tipo de rocha, para uma primeira projeção quanto a vibrações pelo terreno ou pela massa de rocha, (Geraldi J. , 2011)

$$V_p = k \cdot Q/R^{3/2}$$

Onde:

Q = quantidade de explosivo expressa em Kg, carregados num furo ou em furos interligados e detonados no mesmo instante;

R = distância em metros entre a frente de escavação e um determinado ponto localizado no mesmo maciço;

K = coeficiente a ser aplicado para um determinado tipo de rocha, sendo usual:

- ✓ Granitos, Gnaisses e Basaltos densos: de 500 a 700;
- ✓ Xistos e rochas metamórficas duras: de 300 a 500;
- ✓ Rochas sedimentares, rochas brandas e maciços alterados: de 100 a 300.

O mesmo autor apresenta ainda outra equação que permiti prevenir danos que poderiam ser causados pelas vibrações:

$$K = Q/R^{3/2}$$

Onde:

Q = quantidade de explosivos expressos em quilos, carregados em um furo ou em furos interligados e detonados no mesmo instante;

R = distância em metros entre a frente de escavação e a edificação mais próxima (alvo principal);

K = variável que representa um coeficiente de segurança determinado em função do tipo de edificação e/ou estrutura-alvo e de sua maior ou menor distância da frente de escavação (baricentro das detonações).

Com a utilização correta desta equação, aplicada na fase inicial das detonações de campo, permite ao técnico projetar e utilizar quantidades corretas de carregamento, sem o risco de causar danos às edificações vizinhas logo nas primeiras detonações. Primeiramente o autor fixou experimentalmente vários níveis para K, partindo de um valor mínimo equivalente a 0,008 até o máximo de 1,0. Estes níveis estão relacionados

e são aplicados para determinar as cargas instantâneas máximas a utilizar, de acordo com a distância mínima e dos diversos tipos de construções, de sua estrutura, dos telhados de construção, idade, importância do imóvel, dentre outros. Com os valores de K e R determinados, será então possível determinar um valor seguro de Q, (Geraldini J. , 2011).

1.4. Caracterização de uma Onda

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

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

Características da partícula: Deslocamento; Velocidade; Aceleração; Duração da vibração da partícula.

Características da onda: Velocidade de Propagação; Comprimento de onda da vibração; Frequência de Propagação; Atenuação da Onda em função do meio de propagação.

1.4.1. Tipos de Ondas

Segundo (Gomes, 2016), as vibrações elásticas que se propagam no terreno são compostas por ondas com diferentes características, as quais aliadas à heterogeneidade dos meios de propagação, conferem à vibração um padrão pseudo-aleatório. Estas podem ser divididas em dois grupos, a saber:

- **Ondas Internas:** Ondas Compressivas (Ondas P) e Ondas Distorcionais (Ondas S);
- **Ondas Superficiais:** Ondas Rayleigh (Ondas R) e Ondas Love (Ondas Q).

Esta divisão é realizada com base no tipo de propagação. As características da propagação das ondas sísmicas no terreno dependem das particularidades do meio onde se propagam. O tipo de material, bem como a existência de heterogeneidades no terreno são os fatores que representam maior importância na alteração do modo de propagação à medida que as ondas progredem no meio.

As velocidades de propagação das ondas são variáveis, assumindo valores consoante o tipo de onda bem como o tipo de meio onde se propagam.

Tabela 1.1: Velocidades de propagação das Ondas P e S em diferentes meios

Fonte: adaptado de (Stanford Rock Physics Laboratory)

Meios de Propagação	Ondas P (m/s)	Ondas S (m/s)
Calcário	3500 – 6000	2000 – 3300
Granito	4500 – 6000	2500 – 3300
Basalto	5000 – 6000	2800 – 3400
Gneisse	4400 – 5200	2700 – 3200
Carvão	2200 – 2700	1000 – 1400

1.4.2 Ondas Internas

As ondas internas são caracterizadas por se propagarem esfericamente no interior da massa rochosa e induzirem nas partículas do solo movimentos unidireccionais. Estas assumem uma maior importância, ao nível da energia libertada, na proximidade da fonte que as gera. As ondas internas são compostas por ondas compressivas denominadas doravante por ondas P, e por ondas transversais ou ondas S, (GOMES, 2016).

Ondas P: as ondas P propagam-se induzindo no terreno uma deformação longitudinal na direção da sua propagação, até intersectarem outro meio onde vão ocorrer alterações, nomeadamente, no surgimento de ondas de corte e de superfície.

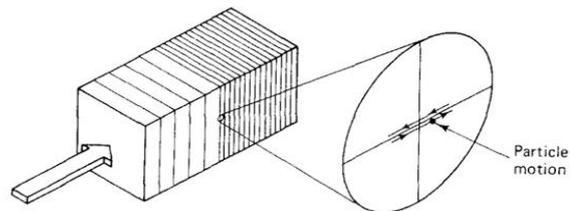


Figura 1. 4: Movimento da Onda P no terreno

Fonte: Dowding [1985]

Ondas S: as ondas S geram no terreno uma deformação transversal à direção da sua propagação. A sua velocidade de difusão situa-se entre 60-70% da velocidade das ondas P.

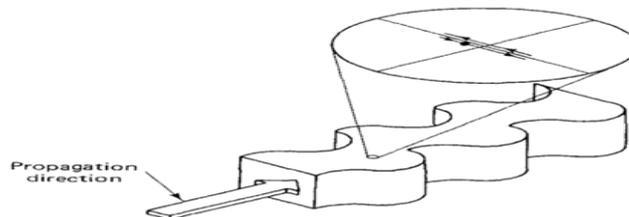


Figura 1. 5: Movimento da Ondas S no terreno

Fonte: Dowding [1985]

1.4.3. Ondas Superficiais

Segundo (Gomes, 2016), as ondas superficiais são caracterizadas por se propagarem nas interfaces do terreno, como por exemplo nas falhas, contatos geológicos e na superfície do terreno, induzindo vibrações bidimensionais.

1.4.3.1 Ondas R

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

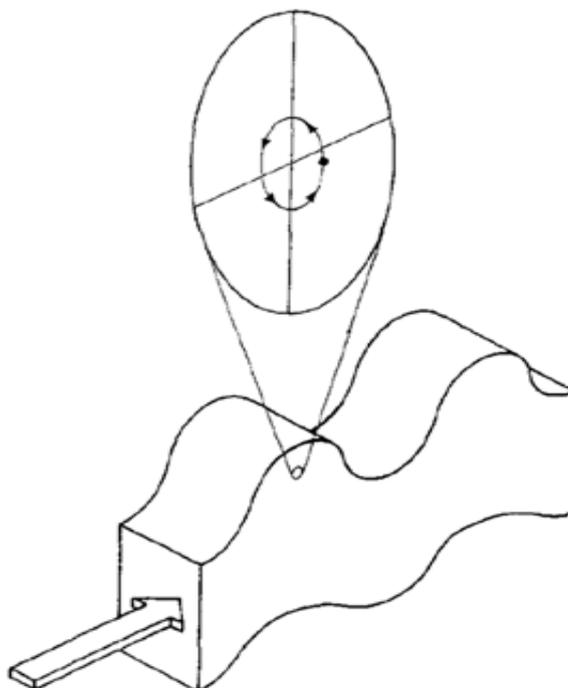


Figura 1. 6:Movimento da Onda R no terreno

Fonte: Dowding [1985]

1.4.3.2 Ondas Q

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

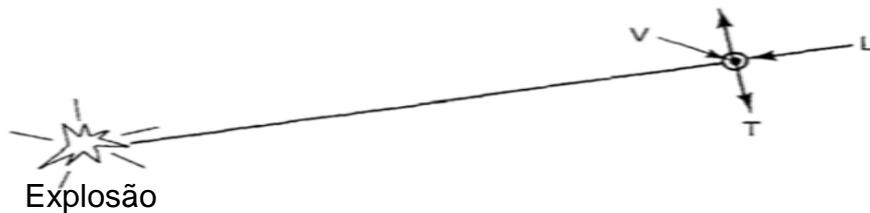


Figura 1. 7: Orientação do transdutor em relação ao desmonte

Fonte: Dowding [1985]

1.5. Previsão das Vibrações no Terreno

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

A intensidade das vibrações, tende a diminuir exponencialmente com o aumento da distância. Para (Sarsby, 2000), os fatores determinantes na redução das vibrações com a distância são: Expansão geométrica das ondas;

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

Por este facto, desenvolveram-se leis para estimação das vibrações, com objetivo de obter uma previsão do movimento do terreno na área envolvente. Estas foram desenvolvidas correlacionando as variáveis que afetam a propagação. Admite-se que os danos em estruturas estão correlacionados com a amplitude das ondas sísmicas,

sendo que, das grandezas físicas que as caracterizam, a velocidade vibratória das partículas é a que melhor se ajusta à referida correlação.

1.6. Fatores que Influenciam a Propagação de Vibrações

A propagação de vibrações no terreno é função de diversas variáveis que influenciam as características das mesmas. Estas variáveis podem ser distinguidas como controláveis ou não controláveis, consoante a capacidade de adaptação aquando do dimensionamento da corta e do diagrama de fogo, (GOMES, 2016).

Tabela 1. 2:Fatores que influenciam a magnitude das Vibrações.

Fonte: (ROSENTHAL, 1987).

		Influência nas Vibrações		
		Importante	Moderamente Importante	Insignificante
Variáveis Controláveis	Peso da carga explosiva por retardo	X		
	Intervalo dos retardos	X		
	Parâmetros geométricos do desmonte	X		
	Peso da carga por detonação	X		
	Direção da Iniciação	X		
	Cordão detonante descoberto ou não			X
Variáveis não Controláveis	Geologia local	X		
	Tipo de material de cobertura	X		
	Espessura do material de cobertura	X		
	Distância entre desmonte e ponto de interesse	X		
	Propriedades do maciço rochoso	X		
	Erro no tempo de iniciação		X	
	Superfície do terreno			X

1.6.1 Parâmetros Controláveis

(Gomes, 2016), afirma que os parâmetros controláveis associados a desmontes com recurso a explosivos podem ser estipulados de antemão, aquando do dimensionamento das pegas de fogo, bem como no carregamento e execução destas. A variação e adaptabilidade destes pode permitir uma melhoria na qualidade do desmonte, bem como na mitigação das perturbações ambientais e sociais.

1.6.2 Parâmetros não Controláveis

(Gomes, 2016), afirma que os parâmetros não controláveis são normalmente dependentes das características geológicas e geotécnicas presentes no local envolvente do desmonte, bem como de erros não controláveis associados aos equipamentos utilizados no desmonte. Assim sendo, dada a imprevisibilidade destes, o seu controlo é inviabilizado. No entanto, as variações que estes produzem necessitam de ser contabilizadas e incorporadas nas análises executadas.

➤ **Geologia**

A geologia local e a geomecânica das rochas têm uma grande influência na propagação das vibrações e a sua importância aumenta em pontos mais distantes do desmonte. A heterogeneidade das propriedades geomecânicas, bem como a existência de diferentes litologias, leva à diversificação das propriedades de propagação.

Uma vez que a maior parte dos maciços são heterogéneos, observa-se uma propagação diferencial das ondas, consoante a direção que se analisa, indicando a existência de diferentes índices de atenuação das ondas. A presença de um solo por cima da camada rochosa pode afetar a intensidade e a frequência das vibrações, em virtude do módulo de elasticidade destes ser inferior ao das rochas, provocando o aumento da velocidade de propagação das ondas nos solos. A frequência de vibração das ondas diminui, mas o deslocamento das partículas aumenta significativamente com o aumento da espessura do recobrimento, (JIMENO, 2003).

A existência de diferentes litologias e heterogeneidades no terreno têm, em grande parte dos casos, um efeito atenuador na propagação das vibrações no terreno. Contudo, em condições específicas, podem ocorrer fenómenos de amplificação, desencadeando assim um aumento do risco de acidentes. Um dos exemplos mais

claros é, no caso de solos estratificados, a ocorrência de amplificação das vibrações quando ocorre uma diminuição da espessura dos estratos.

➤ **Distância**

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

Os cálculos de vibração ajudam a definir um melhor desenho de detonação e produzem os seguintes benefícios, (Maxam, 2016).

- ✓ Melhor relação com a comunidade;
- ✓ Redução do risco de danos por vibração nas estruturas e vibração dos edifícios;
- ✓ Redução do risco de poluição sonora e danos causados por onda aérea;
- ✓ Redução da diluição da rocha;
- ✓ Optimização na perfuração e detonação;
- ✓ Melhoria dos métodos de extração da rocha;
- ✓ Aumento da vida útil da Mina em áreas ambientalmente sensíveis;
- ✓ Redução da frequência de detonação.

1.7 Equipamento para monitorar e medir vibrações

Sismógrafos e acessórios adicionais (geofones e microfones), acelerómetros, hidrofones e receptores de canais múltiplos são usados na análise de vibrações. O software de análise de ondas específicas também é necessário; **Rioblast** é o software especial da Maxam para esse fim.

Esses equipamentos são adequados para monitorar e medir vibrações do solo e sobre pressão de ar. Algumas características relevantes do equipamento são:

- ✓ Ergonómico e força em condições ásperas;
- ✓ Auto-suficiente e pequeno;

- ✓ Velocidade de Partícula de Pico (PPV) e Faixas de Frequência em níveis de detonação;
- ✓ Comunicação e análise de ondas usando software no computador.



Figura 1. 8:Equipamentos de monitoração e medição de vibrações

Fonte: (Maxam, 2016)

Esses equipamentos são utilizados para registrar os dados experimentais, que têm como objetivo receber os impulsos sísmicos e registá-los. Os sismogramas permitem obter informações relativas aos valores da velocidade vibratória de pico (PPV – peak particle velocity) segundo três componentes ortogonais: L (longitudinal), T (transversal) e V (vertical), assim como da sua resultante vectorial (PVS – peak velocity sum), utilizada como o valor máximo da velocidade vibratória que atinge o local de monitorização. O sismograma inclui também as frequências, medidas nos instantes de tempo em que se verificam as amplitudes máximas, (BERNARDO, 2004).

Particularmente para as escavações situadas nas proximidades de estruturas, pode recorrer – se à monitorização das vibrações, não só com o objetivo do aperfeiçoamento do diagrama de fogo empregue, mas também, como mecanismo de defesa da empresa que leva a cabo as ações de escavação, em situações de conflito com as populações. Quando se lida com maciços fraturados e saturados de água subterrânea, ocorrem alterações sensíveis na frequência do meio, provocadas pelo lençol freático e suas variações (como os terrenos com influência de marés). A água do lençol freático, de lagoas, mares e reservatórios é também um excelente meio transmissor de vibrações oriundas das detonações, (Geraldi J. , 2011). Um desmorte de rocha com utilização de explosivos, deve passar por três fases basicamente, sequenciais, tendo em vista o controlo das vibrações induzidas na massa rochosa:

1. Reconhecimento geológico-geotécnico da área do desmonte;
2. Estabelecimento de cargas iniciais (equação de Langefors);
3. Instrumentação sísmica – ajuste nos planos de detonação.

As medições de vibração e de sobre pressão consistem na medição dos níveis de vibração e pressão gerados por uma explosão e sua comparação com os limites padrão. Um passo além da análise de vibração de monitoramento, consistindo no cálculo da fórmula de atenuação para um projeto de detonação específica e para cada massa de rocha.

1.8. Principais normas aplicadas aos desmontes de rochas com explosivos

As normas técnicas regidas pelos órgãos públicos fiscalizadores são de extrema importância para a realização dos monitoramentos dos níveis de vibrações e ruídos. Através dessas normas são definidos cada um desses impactos, estipulando seus respectivos limites máximos, além de determinar os parâmetros necessários para analisar os danos às estruturas e edificações próximas aos locais do desmonte de rocha com o uso dos explosivos, (SANTOS, 2009). A diferença entre as normas técnicas de alguns países, no que diz respeito às ações causadas pelos impactos ambientais e/ou danos em estruturas, está no facto de que algumas se basearam em valores empíricos e outras em parâmetros como o tipo de construção e o material utilizado, (BACCI, 2003). Talvez essa seja a grande diferença da norma brasileira para as normas de grande referência mundial, como a DIN-4150 da Alemanha e a USBM-8507 dos Estados Unidos. Na Norma DIN são fornecidos os limites de velocidade de vibração de partícula em mm/s, considerando o tipo de estrutura civil e o intervalo de frequência em Hz, como podemos verificar na Tabela abaixo:

Tabela 1. 3:Valores admitidos pela Norma Alemã DIN-4150 para danos em edifícios.

Fonte: (BACCI, 2003).

Tipos de Estrutura	Fundação	Andar mais alto dos edifícios
	Frequência (Hz) <10 10-50 50-100	Qualquer frequência
Industrial	20 mm/s 20-40 mm/s 40-50 mm/s	40 mm/s
Habitações	5 mm/s 5-15 mm/s 15- 20 mm/s	15 mm/s
Edifícios particularmente delicados	3 mm/s 3-8 mm/s 8-10mm/s	8 mm/s

Atualmente a USBM baseia seu critério para avaliar os danos em estruturas, através de pesquisas que foram realizadas em minerações a céu aberto e publicadas em 1980 no *Report of Investigation* (RI 8507). Durante estes estudos verificou-se que existe um grave problema em relação à ressonância estrutural, sendo esta originada em resposta à vibração de baixa frequência, resultando em aumentos dos deslocamentos e deformações nas estruturas, reforçando a ideia que esses danos podem ser causados pela frequência.

Tabela 1. 4: Níveis seguros de velocidade de vibração de partícula para estruturas civis

Fonte: USBM (RI8507), (BACCI, 2003)

Tipo de estruturas	Baixas frequências: f40 <Hz PPV (mm/s)	Altas frequências: f40 >Hz PPV (mm/s)
Casas modernas, paredes interiores pré-moldadas	19	50
Casas velhas, paredes interiores com gesso ou revestimento de madeira	12,7	50

A norma brasileira NBR-9653 foi concebida pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) a partir de monitoramentos de vibrações produzidas pelo desmonte de rocha com uso de explosivo em pedreiras localizadas próximas a áreas periféricas das grandes concentrações urbanas. Esses dados foram coletados desde a década de 70 e a norma brasileira publicada em 1986.

De maneira geral, os estudos mostraram que para todos os tipos de rochas onde ocorreram os desmontes de rochas (Gnaiss, Granito, Calcário e Basalto), não foram observados valores de vibração de partícula acima de 15 mm/s a partir de 200 m do local onde ocorreram as detonações. Assim foram sugeridos valores máximos de carga máxima por espera (Q), para que os valores de vibração de partícula não excedessem os 15 mm/s, para faixas de valores de distância (D) inferiores a 200 m, ficando estipulado da seguinte maneira:

Para $140 < D < 200$, (Q) < 100 kg/espera e para $40 < D < 140$, (Q) < 30 kg/espera.

A partir de então a NBR-9653 definiu como 15 mm/s o limite máximo de vibração permissível nos arredores das áreas onde ocorriam as detonações em pedreiras. A velocidade resultante de partícula deve ser calculada de acordo com a equação:

$$VR = [(VL^2) + (VT^2) + (VV^2)].0,5$$

Onde: VR = Velocidade resultante de vibração de partícula (mm/s), VL = Velocidade de vibração na direção longitudinal, em mm/s, VT = Velocidade de vibração na direção transversal (mm/s) e VV = Velocidade de vibração na direção vertical, em mm/s.

A NBR-9653 foi publicada em 1986 e não fazia referência a frequência dos fenômenos vibratórios, além de não mencionar em sua análise os tipos de edificações afetadas pelas vibrações. A norma foi revisada e atualizada em 2005 passando a avaliar os riscos de danos induzidos por vibrações do terreno, considerando a magnitude e a frequência de vibração da partícula, estabelecendo limites para esses parâmetros.

Tabela 1. 5: Limites de velocidades de vibração de partícula de pico por faixas de frequência

Fonte: NBR-9653

Faixa de Frequência	Limite de PPV (mm/s)
4 Hz a 15 Hz	Inicia em 15 mm/s e aumenta linearmente até 20 mm/s
15 Hz a 40 Hz	Acima de 20 mm/s e aumenta linearmente até 50 mm/s
Acima de 40 Hz	50 mm/s

CAPÍTULO II: METODOLOGIA DE ESTUDO

2.1. Métodos de investigação

Após introdução teórica sobre a análise dos efeitos gerados pelas vibrações resultantes da fragmentação da rocha em uma mina a céu aberto, seus diversos parâmetros relativos, e análise bibliográfica surgiu a necessidade de concretizar um estudo prático. Neste sentido a pesquisa se concentrou em estudar diferentes efeitos das vibrações resultantes da fragmentação na Sociedade mineira de Catoca.

Foi utilizada como forma de estudo nos primeiros capítulos a pesquisa documental e bibliográfica: foi recolhido, analisado e interpretado as contribuições teóricas já existentes relacionadas ao tema em estudo. E no terceiro capítulo foi realizado um estudo de caso. Teve como fins a pesquisa pura, com posterior aplicação da teoria para ilustrar seu uso prático.

A sequência metodológica do trabalho será a seguinte:

- ❖ Identificação e caracterização do problema estudado. O problema diz respeito a análise dos efeitos gerados pelas vibrações resultantes da fragmentação com um estudo de caso da sociedade mineira de Catoca.
- ❖ Pesquisa exploratória, envolvendo levantamento bibliográfico e análise de exemplos de vibrações dos maciços rochosos na indústria mineira.
- ❖ Estudo de caso na sociedade mineira de Catoca, entrevista ao pessoal envolvido nas operações e análise de Relatórios da pega de fogo e histórico das vibrações elaborados anteriormente.

2.2. Técnicas de pesquisas

Com a finalidade de descrever o tipo de pesquisa a ser adoptado, recorrem-se ao critério de classificação de pesquisa proposto por (Vergara, 2004) em relação aos dois aspectos: quanto aos fins e quanto aos meios.

Quanto aos fins: é uma **pesquisa descritiva e explicativa**.

Descritiva por apresentar os principais métodos e sistemas de análise de vibrações do maciço rochoso resultantes do desmonte de rochas com explosivo. Explicativa, por detalhar as principais vantagens e limitações por detalhar os principais métodos de otimização de exploração, bem como suas interações.

Quanto aos meios: é uma **pesquisa bibliográfica e estudo de caso**.

Bibliográfica, pois foi elaborada uma revisão de literatura relacionada ao tema da pesquisa por consulta a materiais como livros, artigos, dissertações, material de treinamento e também, na internet.

Estudo de caso, pois foi realizada uma determinação dos parâmetros da pega de fogo e cálculo da velocidade de propagação das ondas de detonação, bem como a análise dessas vibrações em dois pontos distintos da mina.

Quanto a natureza: **pura e aplicada**

2.3. Procedimentos e dificuldades encontradas

2.3.1. Procedimentos

- ✓ Observação direta dos documentos fornecidos pela empresa;
- ✓ Análise, interpretação e avaliação dos dados;

2.3.2. Dificuldades encontradas

No percurso da elaboração do trabalho, tivemos problemas para a obtenção, análise e tratamento dos dados.

2.3.3. Tratamentos dos dados

Para o tratamento de dados utilizamos alguns softwares como Microsoft Word, Excel que possibilitou na elaboração de Gráficos e tabelas.

CAPÍTULO III: ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

3.1. Localização Geográfica

Geograficamente, a SMC situa-se a nordeste da República de Angola, na parte noroeste da província da Lunda Sul e esta por sua vez faz fronteira a norte da Província da Lunda Norte, a sul da Província do Moxico e a oeste de Malanje, a Leste da República Democrática do Congo. A SMC situa-se a 35km de Saurimo (capital da Lunda Sul) e a cerca de 949 km de Luanda.



Figura 3. 1:Localização Geográfica

Fonte: (Relatório catoca, 2024)

3.2. Vias de acessos

A mina de catoca é acessível por estrada asfaltada ou por via aérea, quer via Saurimo, quer via Lucapa. Por via aérea, utilizam-se aviões de grande ou pequeno porte que aterram respetivamente no aeroporto de Saurimo e aeroporto da mina de Catoca, e por via aérea através das estradas nacionais nº 180 que liga as cidades de Saurimo e Dundo, e estrada nacional 230 entre as cidades de Malanje e Suarimo.

3.3. Historial da Mina de Catoca

A chaminé de Catoca foi descoberta pelos garimpeiros em 1968, por uma “Pluma” de diamantes encontrados nos sedimentos ribeirinhos do riacho da Catoca e rio Iova. Segundo história “crença popular” Catoca significa “perdido, aquele que foi e não voltou”. Porque muitos garimpeiros em condições de segurança acabavam

escorregando ou morrendo nas escavações ou buracos feitos por eles com objetivo de encontrarem diamantes.

Em 1995, os primeiros pesquisadores cegaram ao kimberlito de Catoca para melhor entenderem as riquezas que ali estavam guardadas. A exploração do kimberlito da mina de Catoca teve o seu início aos 11 de Fevereiro de 1997, isto é, considera-se esta data como o diada Mina de Catoca, com um tempo de vida inicialmente previsto para 40 anos até a profundidade (990mx915m) devendo a Mina atingir o seu limite final de diâmetro aproximado de 1650mx1650m.

3.4 Análise das vibrações em dois pontos distintos da SMC

Para se proceder a análise das vibrações em dois pontos distintos da mina fez-se primeiramente o dimensionamento da pega de fogo onde seguimos os seguintes passos:

- ❖ Levantamento e análise dos dados iniciais para o redimensionamento da pega de fogo da SMC
- ❖ Determinação dos demais parâmetros da pega de fogo mediante as fórmulas convencionais e uso da ferramenta excel;
- ❖ Determinação das velocidades de propagação das ondas em dois pontos distintos da SMC nomeadamente da frente de trabalho até a portaria da mina e frente até ao alojamento mais próximo.

3.4.1 Redimensionamento da pega de fogo na SMC

Tabela 3. 1:Parâmetros da pega de fogo

Fonte: (O autor, 2024)

PARAMETROS	VALORES	Fórmulas
Diâmetro do furo(mm)	203,00	
Inclinação do furo(°)	75,00	
Números de furos	376,00	
Altura da bancada(m)	15,00	
Densidade do explosivo (g/cm ³)	1,20	
Densidade da rocha(g/cm ³)	3,5	
Afastamento(m)	5,46	$A = 0,0123 \times DE \left(\frac{2 \times Pe}{Pr} + 1.5 \right)$
Espaçamento 1(m)	6	$E1 = 0,23 \times (Hb + 2 \times A)$
Espaçamento 2(m)	6,65	$E2 = \frac{Hb + 7A}{8}$
Razão de inflexibilidade	2,75	$Ri = \frac{Hb}{A}$
Área da malha de perfuração 1	32,76	$M1 = A \times E1$
Área da malha de perfuração 2	36,31	$M2 = A \times E2$
Subfuração(m)	1,64	$SF = 0,3 \times A$
Profundidade de perfuração(m)	59,60	$PF = \frac{Hb}{\cos(\alpha)} + SF$
Tampão(m)	3,82	$T = 0,7 \times A$
Carga de fundo	16,73	$CF = 0,3 \times (PF - T)$
Carga de coluna	39,05	$Cc = PF - CF - T$
Volume total de escavação 1	184766,4	$VT1 = M1 \times Hb \times n$
Perfuração específica 1	0,000323	$PE = \frac{PF}{VT}$
Perfuração específica 2	0,000291	
Volume total de escavação 2	204788,4	$VT2 = M2 \times Hb \times n$

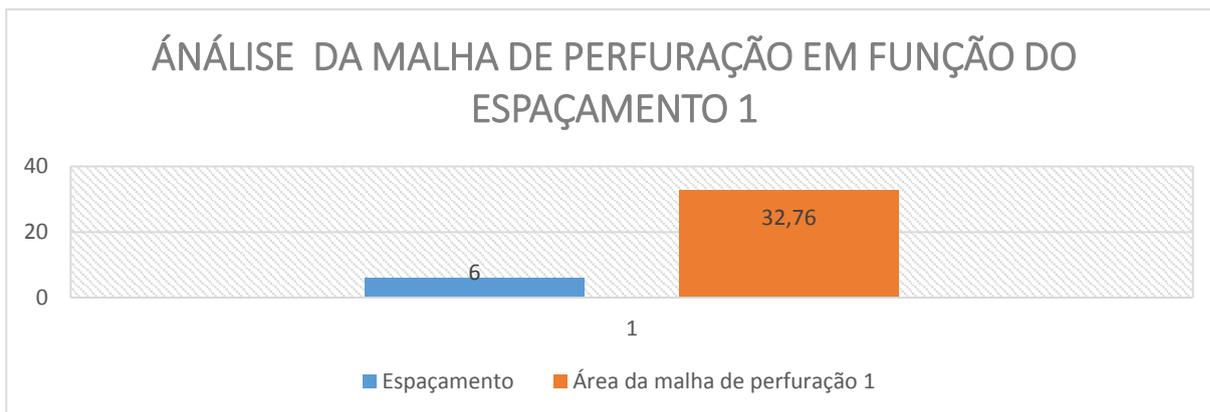


Gráfico 1:Análise da malha de perfuração em função do espaçamento I

Fonte:(O autor, 2024)

Este gráfico ilustra a distância dos furos em função da malha, sendo esta malha densa; Onde a distância entre os furos foi de 6m. “Quanto maior for a malha, maior será os espaçamento”



Gráfico 2:Análise da malha de perfuração em função do espaçamento II

Fonte:(O autor, 2024)



Gráfico 3:Análise da malha de perfuração em função do volume total II

Fonte:(O autor, 2024)

3.4.2 Cálculo da velocidade de propagação da onda longitudinal em dois pontos distintos da mina

Para calcular a velocidade das ondas usaremos a fórmula proposta por (Gerald J. , 2011), em dois pontos nomeadamente da mina até ao alojamento e da mina até a portaria:

$$V_p = k \cdot Q / R^{3/2}$$

Q = quantidade de explosivo expressa em Kg, carregados num furo ou em furos interligados e detonados no mesmo instante;

R = distância em metros entre a frente de escavação e um determinado ponto localizado no mesmo maciço;

K = coeficiente a ser aplicado para um determinado tipo de rocha, sendo usual.

Tabela 3. 2:Cálculo da velocidade de propagação das ondas em dois pontos distintos da SMC em função do dimensionamento da pega de fogo

Fonte: (O autor, 2024)

Mina-Alojamento	Mina-Portaria
K= 650 R=3.8Km =3800m Q=65 VT=MxHbxn VT=184766,4 m ³ QxVT=65x184766,4 = 12009816kg Logo: $V_P=k \cdot Q/R^{3/2}$ VP= 650x 12009816 / (3800) ^{3/2} VP= 33325,32 m/s	K= 650 R=9.8Km= 9800m Q=65 VT=MxHbxn VT= 184766,4 m ³ QxVT=65x184766,4= 12009816kg Logo: $V_P=k \cdot Q/R^{3/2}$ VP= 650x 12009816/ (9800) ^{3/2} VP= 8046,57m/s

A seleção desses dois pontos distintos da sociedade mineira de Catoca foi em função do fluxo de pessoas existentes nesses mesmos locais. O mau dimensionamento compromete na eficiência de trabalho, podendo provocar problemas relacionados com o cálculo errado dos parâmetros da pega de fogo consequentemente provocar vibrações que são resultantes da fragmentação de rocha. Logo, para se minimizar é necessário que este plano seja rígido levando em consideração as propriedades físico-mecânicas do maciço e a relação de impedância.

Outro assim, foi reajustada a pega de fogo de forma eficiente tendo como Base o estudo aprofundado da geologia local, mecânica dos solos/ características do maciço podendo assim obter uma redução no excesso de vibrações

Tabela 3. 3: Cálculo da velocidade de propagação das ondas em dois pontos distintos da SMC em função do redimensionamento da pega de fogo

Fonte: (O autor, 2024)

Mina-Alojamento	Mina-Portaria
K= 650 R=3.8Km =3800m $V_t = M_2 \times H_b \times n$ $V_t = 204788,4 \text{ m}^3$ $Q = Pr \times V_t$ $Q = 3,5 \times 204788,4$ $Q = 716759,4 \text{ Kg}$ Logo: $V_p = k \cdot QIR^{3/2}$ $VP = 650 \times 716759,4 / (3800)^{3/2}$ $VP = 1988,89 \text{ m/s}$	K= 650 R=9.8Km =9800m $V_t = M_2 \times H_b \times n$ $V_t = 204788,4 \text{ m}^3$ $Q = Pr \times V_t$ $Q = 3,5 \times 204788,4$ $Q = 716759,4 \text{ Kg}$ Logo: $V_p = k \cdot QIR^{3/2}$ $VP = 650 \times 716759,4 / (9800)^{3/2}$ $VP = 480,228 \text{ m/s}$

3.5. Interpretação dos resultados obtidos

Foi possível reajustar e redimensionar a pega de fogo de forma diferente, uma vez que no primeiro caso foi possível observar que tanto da mina ao alojamento e da mina até a portaria a velocidade de propagação das ondas foi muito alta. Esse valor foi dado não só em função da distância mas como também foi dado em função da malha, espaçamento e razão de inflexibilidade que é a relação entre o altura da bancada e o afastamento, onde serviu de indicador de bancadas altas e baixas; *“quanto mais densa for a malha, maior informação do maciço teremos”*.

Com a utilização correta da equação proposta por Langefors, aplicada na fase inicial das detonações de campo, permite ao técnico projetar e utilizar quantidades corretas de carregamento, sem o risco de causar danos às edificações vizinhas logo nas primeiras detonações. Com base ao autor Geraldi, Para que se evitem danos ao maciço, o limite adoptado internacionalmente da V_p é de 100 mm/s, e caso estes danos ocorram, serão superficiais e se limitarão a uma faixa de 0 a 3 m no interior da massa rochosa. Porém, o simples facto de se respeitar este valor não elimina a necessidade de um reconhecimento geológico preliminar, para detectar irregularidades preexistentes, que podem interferir nas instrumentações sísmicas, induzindo a erros de avaliação. A equação de Langefors pode ser também adoptada

para se determinar a velocidade de partícula que poderá ser atingida em um determinado tipo de rocha, para uma primeira projeção quanto a vibrações pelo terreno ou pela massa de rocha.

A intensidade das vibrações, tende a diminuir exponencialmente com o aumento da distância. Para (Sarsby, 2000), os fatores determinantes na redução das vibrações com a distância são: Expansão geométrica das ondas; Progressiva separação dos diferentes tipos de onda; Presença de descontinuidades nos maciços, provocando a reflexão, refração, difração e dispersão das ondas;

Com o reajuste da pega de fogo levando em consideração as propriedades físico-mecânicas do maciço e relação de impedância foi possível obter uma redução no excesso de vibrações. A determinação das velocidades das ondas podem ajudar a minimizar o efeito das vibrações geradas através do ajuste adequado dos parâmetros do sistema. Por exemplo, ao entender a velocidade com que as vibrações se propagam, é possível implementar medidas de controle ou amortecimento para se reduzir sua amplitude e impacto, isso pode incluir o uso de matérias específicos, geometria estrutural otimizada ou sistema de absorção de energia.

Cálculo da relação de impedância

Substância explosiva	Pe	VD	NZ
ANFO	1,20g/cm ³	3100m/s	0.28
Emulsão		5000m/s	0.45

ANFO	Emulsão
$Pr=3,5 \text{ g/cm}^3$ $Pe=1,20\text{g/cm}^3$ $VS=3821\text{m/s}$ $VD=3100\text{m/s}$ $NZ = \frac{Pe*VD}{Pr*VS} = 0,28$	$Pr=3,5 \text{ g/cm}^3$ $Pe=1,20\text{g/cm}^3$ $VS=3821\text{m/s}$ $VD=5000\text{m/s}$ $NZ = \frac{Pe * VD}{Pr * VS}$ $= 0,45$

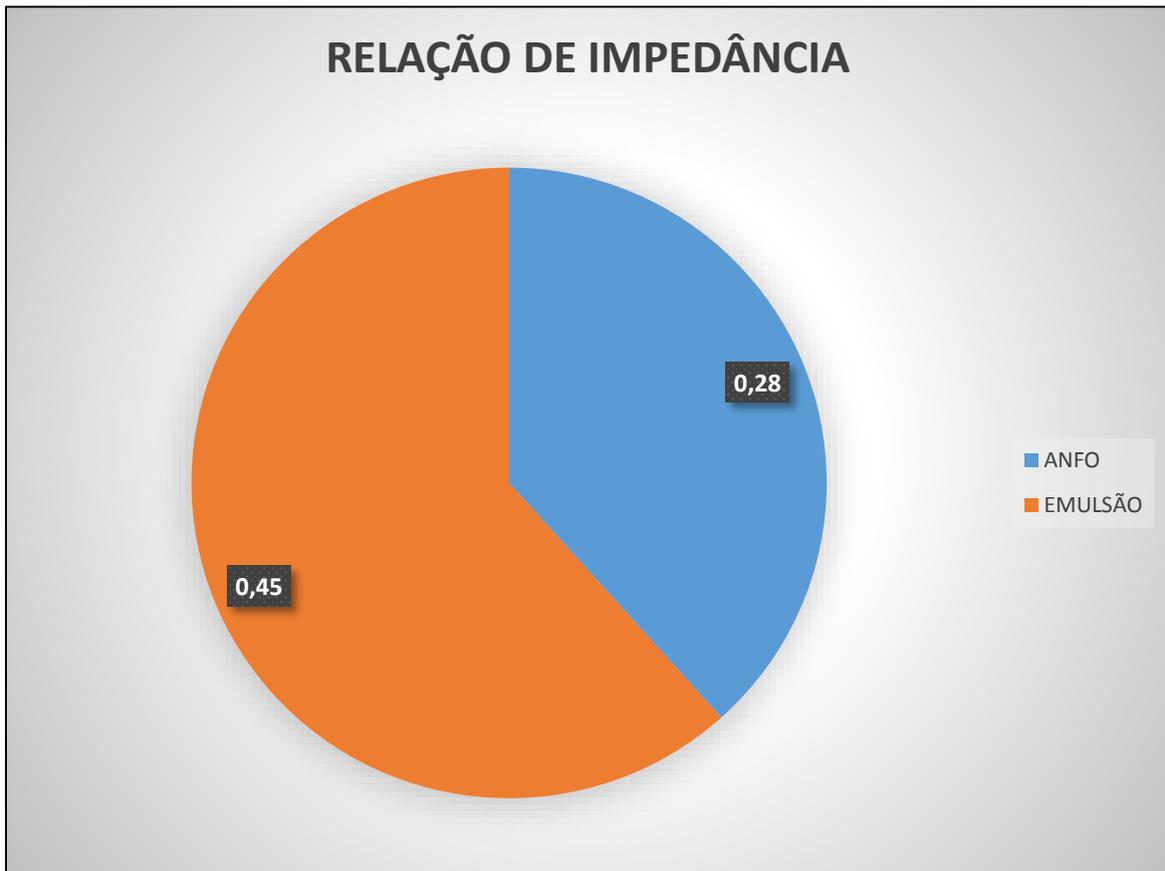


Gráfico 4:Relação de impedância

Fonte: (O autor, 2024)

Problema:

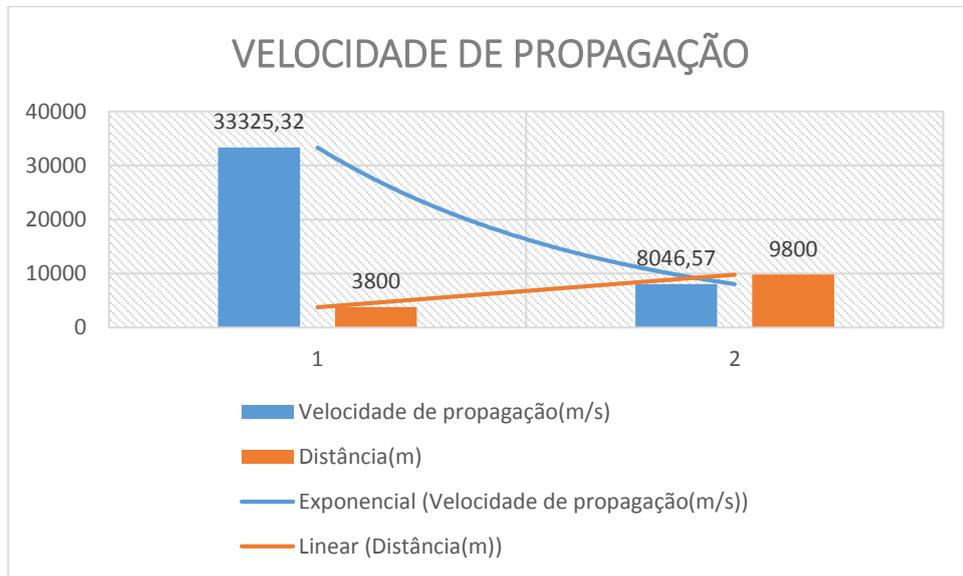


Gráfico 5: Velocidade de propagação

Fonte: (O autor, 2024)

Solução:

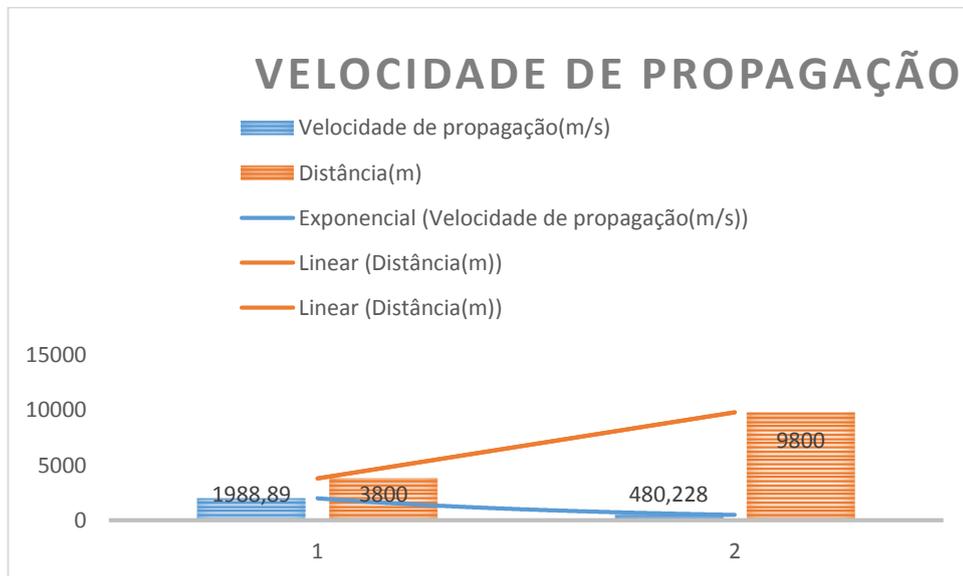


Gráfico 6: Velocidade de propagação

Fonte: (O autor, 2024)

CONCLUSÃO

Em virtude das análises feitas ao longo da nossa pesquisa, chegamos as seguintes conclusões:

- ❖ Após a aquisição de dados e relatórios da pega de fogo foi possível obter uma redução no excesso de vibrações, saindo de 33325,32 m/s da mina até o alojamento para 1988,89 m/s, e de 8046,57 m/s da mina até a portaria para 480,228 m/s
- ❖ Os fatores que influenciam na velocidade de propagação das ondas estão relacionados com as propriedades dos explosivos bem como as variáveis controláveis e não controláveis;
- ❖ A determinação e o redimensionamento da pega de fogo e cálculo da relação de impedância possibilitou obter uma redução no excesso das vibrações durante o desmonte porque conhecendo esses parâmetros bem como as propriedades do maciço se selecionou a emulsão como sendo o explosivo mais eficiente e eficaz, isso por conta da semelhança com a rocha.

RECOMENDAÇÕES

Para diminuir o excesso dos efeitos gerados pelas vibrações resultantes da fragmentação de uma rocha, sugerimos que:

- ❖ Para a SMC: que se faça um estudo aprofundado das propriedades físico-mecânicas do maciço rochoso e um Dimensionamento da pega de fogo de forma otimizada;
- ❖ Fazer o monitoramento de vibrações de modo a implementar medidas confiáveis para mitigar as mesmas;
- ❖ Utilização de perfuratrizes DI650i: Por meio da sua tecnologia de ponta ela visa oferecer alta **produtividade**, precisão confiabilidade e **monitoramento dos parâmetros da pega de fogo**;
- ❖ Para a geração futura: que se faça um estudo mais aprofundado, tendo como componente científica e temática: ***Implementação de um sistema artificial de monitoramento e prevenção de Vibrações resultantes da fragmentação da rocha em uma mina a céu aberto.***

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Armasa. (2023). Fragmentação. São Paulo: Armasa.

Azevedo, & Patrício. (2001). Análise dos Impactos de vibrações e ruídos em análise dos impactos de vibrações e ruídos em desmonte de rocha com explosivo.

BACCI, D. (2003). Vibrações Geradas Pelo Uso de Explosivos no Desmonte de Rochas: Avaliação dos Parâmetros Físicos do Terreno e dos Efeitos Ambientais. Tese de Doutorado. Universidade Estadual Paulista.

BERNARDO, P. (2004). Impactes Ambientais do Uso de Explosivos na Escavação de Rochas, com Ênfase as vibrações. Lisboa: Instituto Superior Técnico.

Bertelli, M. (2023). Vibração. Física - Manual do Enem.

D. d. (1998). Ruídos e Vibrações Ligados à Utilização dos Explosivos e Equipamentos”. Comunicações do 1º Seminário de Auditorias Ambientais Internas. Divisão de Minas e Pedreiras do Instituto Geológico e Mineiro. . Portugal.

Dallora Neto, C. (2004). Em Análise das vibrações resultantes do desmonte de rocha em mineração de calcário e argilito posicionada junto à área urbana de Limeira (SP) e sua aplicação para a minimização de impactos ambientais. Rio Claro: Dissertação (Mestrado em Geociências) - Programa de Pós-Graduação em Geociências – Área de Concentração em Geociências e Meio Ambiente. Universidade Estadual Paulista.

Ferreira, & D. N. (2006). Controle de Vibrações Geradas por Desmonte de Rocha com Explosivos, Estudo de Caso: Calcário Cruzeiro Limeira (SP). São Paulo: Departamento de geologia Aplicada, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Campus do Rio Claro.

França, G. (2001). Estudo das Vibrações Geradas por Detonações na Obra Civil da Eclusa 2 de Tucuruí. PA RBGF: Revista Brasileira de Geofísica. Vol. 29 (1).

Geraldi, J. (2011). Apostila de introdução a mecânica dos solos.

Geraldi, J. (2011). O ABC das Escavações de Rocha. Rio de Janeiro. Ed. Interciência. Em Apostila de introdução a mecânica dos solos.

GOMES, J. P. (2016). Metodologia para Análise de Vibrações provocadas por Desmontes com Recurso a explosivos. PORTO: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

Gomes, J. P. (2021). Perícia Técnica para a verificação da influência DE Vibrações provenientes de Desmontes com explosivos em manifestações patológicas em edificações. Goiania.

Heramann. (1972). Manual de perfuração de rocha. SãoPaulo.

J. E. (2017). Manual del perforacion, explosivos y voladuras Minería y obras públicas. Espanha, Madrid.

Jimeno , C. L., & Jimeno, E. L. (2017). Manual de Perforación, Explosivos y Voladuras en Minería y Obras Públicas. López Jimeno, Carlos; 1ª edição.

JIMENO, E. J. (2003). Manual de Perforación y Voladura de Rocas”. ITGE. 2ª Edição. Espanha.

LEITE, A. D. (2013). DESMONTE DE ROCHA COM O USO DE EXPLOSIVOS: ESTUDO DE CASO EM TRECHO DA FERROVIA NOVA TRANSNORDESTINA.

Leonardos, O. H., & Leinz, V. (1971). Glossário Geológico. Em O. H. Viktor Leinz, Glossário Geológico (p. 128). Companhia Editora Nacional.

Maxam. (2016). Catálogo de Serviços Técnicos. Versão 1.0 Edição.

Menezes, S. d. (2013). Rochas: manual fácil de estudo e classificação. Em S. d. Menezes, Rochas: manual fácil de estudo e classificação (p. 112). Oficina de Textos, 2013.

Morais, J. L. (2004). SIMULAÇÃO DA FRAGMENTAÇÃO DOS DESMONTES DE ROCHAS POR EXPLOSIVOS. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG.

Mors, S. (2009). O escialista. Clube de autores.

Nieble, C. M. (2017). Desmontes cuidadosos com explosivos. São Paulo: oficina de Texto.

REIL, J. (1998). Why people complain about blasting. Rock Products.

ROSENTHAL, M. A. (1987). Blasting Guidance Manual. s.l. : U. S. Department of the Interior.

Sambuquila, J. (2018). Dimensionamento dos equipamentos de carregamento e transporte na pedreira GEOMINERAL Angola 2018.

Santana, M. d. (2018). Aplicação do modelo de Kuz-Ram e fotoanálise na avaliação da eficiência do desmonte em mineração de gipsita na região do Araripe. Universidade Federal de Pernambuco. Fonte: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/32073>

SANTOS, D. (2009). Estudo das Vibrações Geradas pelo Desmonte de Rochas com Uso de Explosivos e a Sua Relação Com as Fraturas da Pedreira Bangu-RJ. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Trabalho de Conclusão de Curso. Rio de Janeiro.

Saraiva, B. (2021). Análise ao índice de susceptibilidade ao desmonte com explosivos para a melhoria o plano de fogo. Porto.

Sarsby, R. (2000). Environmental Geotechnics. London : ICE Publishing. London.

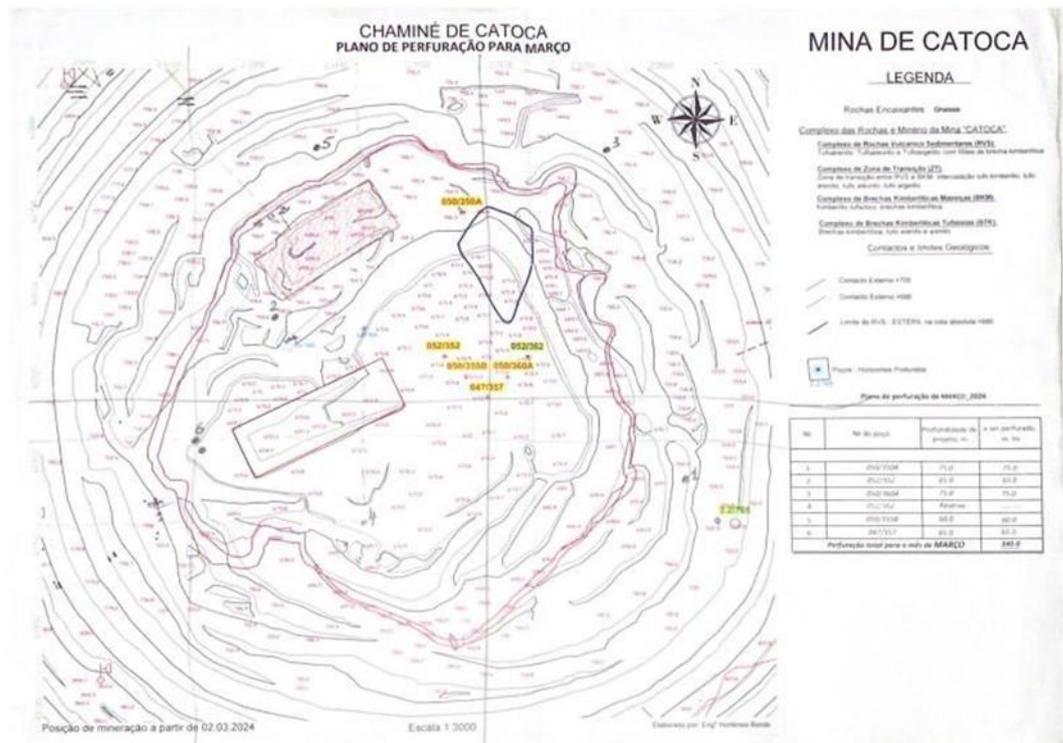
Silva, E. A. (2016). Geografia em rede. São Pulo.

Smith, A. C. (s.d.). Open Pit Mine Planning and Design.

Vergara, S. C. (2004). Projetos e relatórios de pesquisa em administração. 5 ed. São Paulo: Atlas.

ANEXOS

PARAMETROS	VALORES	Fórmulas
Diâmetro do furo(mm)	203,00	
Inclinação do furo(°)	75,00	
Números de furos	376,00	
Altura da bancada(m)	15,00	
Densidade do explosivo (g/cm ³)	1,20	
Densidade da rocha(g/cm ³)	3,5	
Afastamento(m)	5,46	$A = 0,0123 \times DE \left(\frac{2 \times Pe}{Pr} + 1.5 \right)$
Espaçamento 1(m)	6	$E1 = 0,23 \times (Hb + 2 \times A)$
Espaçamento 2(m)	6,65	$E2 = \frac{Hb + 7A}{8}$
Razão de inflexibilidade	2,75	$Ri = \frac{Hb}{A}$
Área da malha de perfuração 1	32,76	$M1 = A \times E1$
Área da malha de perfuração 2	36,31	$M2 = A \times E2$
Subfuração(m)	1,64	$SF = 0,3 \times A$
Profundidade de perfuração(m)	59,60	$PF = \frac{Hb}{\cos(\alpha)} + SF$
Tampão(m)	3,82	$T = 0,7 \times A$
Carga de fundo	16,73	$CF = 0,3 \times (PF - T)$
Carga de coluna	39,05	$Cc = PF - CF - T$
Volume total de escavação 1	184766,4	$VT1 = M1 \times Hb \times n$
Perfuração específica 1	0,000323	$PE = \frac{PF}{VT}$
Perfuração específica 2	0,000291	
Volume total de escavação 2	204788,4	$VT2 = M2 \times Hb \times n$



Sobre a realização de Detonação de Explosivos na chaminé Kimberlítica de Catoca.
Bloco Nº13 Min 2-24 Hz + 675m, (ESTE); Bloco Nº22 GN-24 Hz + 675m (SUDESTE)

1. Ao Chefe do DMIN Eng.º Eusebio Cuscela incumbir

a) Ao Chefe de Sector de Trabalhos de Detonação **Andrey Soloviov**, assegurar a preparação e término do carregamento dos furos em conformidade com o projecto de detonação massiva e, realizar a detonação em massa de explosivos no horário compreendido entre **14h45min e 15h00** do dia 10 de Abril de 2024.

O controlo pela carga dos furos é incumbido ao Engenheiro Mineiro de trabalhos de detonação **Olivaldo Veigas**
b) Ao Mestre Mineiro de Trabalhos Explosivos **Andrey Soloviov** até as 12h00 proceder instrução (DDS) com sinalizadores e colocar os postes de protecção na fronteira da zona de perigo

c) Ao Mestre Mineiro de Trabalhos Explosivos **Andrey Soloviov** até as 13h00 dar o sinal de aviso e as 13h30min efectuar a montagem da rede explosiva

d) Ao Chefe do Turno tecnológico da Mina Eng.º Gilberto Muleleno

- Até as 14h00 proceder ao desligamento das instalações de bombeamento no interior da mina
- Até as **14h00** acordar com o electricista da linha de transmissão de energia e subestação em serviço, ceder a quantidade necessária de buldozer para remover o equipamento eléctrico da zona de perigo e, as **14h00** desligar e retirar todo o equipamento eléctrico na zona de perigo
- Até as **14h30** fechar o acesso à mina do equipamento de transporte aos horizontes de preparação das detonações em massa
- Até as **14h30** afastar da mina o autotransporte não ligado com a execução dos trabalhos de detonação
- Até as **14h30** afastar as escavadoras, sondas de furação e outros equipamentos para fora dos limites da zona de perigo e, evacuar todo o pessoal fora da mina
- Acordar com o Mestre Mineiro de Trabalhos Explosivos **Andrey Soloviov** o raio da zona de perigo

e) Ao chefe de Sector de Trabalhos de Perfuração e Detonação **Andrey Soloviov**, 24 horas antes dar a conhecer ao responsável de **Segurança de Trabalho** sobre locais e horário de execução das explosões em massa.

f) Ao Chefe Adjunto de Departamento de Mineração para Operações Mineiras **José Pinheiro**, no período dos trabalhos explosivos assegurar o trabalho do stock de minério.

Director de Produção da SMC, Lda. Eng.º Mateus Teixeira de Carvalho _____

Tomaram conhecimento da ordem:

- 1 Departamento de Segurança Pública e Operações do CPPLS _____
- 2 Chefe de Departamento de Segurança de Trabalho e Ambiente _____
- 3 Chefe do Departamento de Segurança e Gestão de Riscos _____
- 4 Chefe do Departamento de Equipamentos _____
- 5 Chefe do Departamento de Energia _____
- 6 Chefe do Departamento de Administração e Serviços Gerais _____
- 7 Chefe do Departamento de Mineração _____
- 8 Chefe Adjunto do Departamento de Mineração para Operações Mineiras _____
- 9 Chefe de Departamento de Metalurgia _____
- 10 Chefe de Sector de Trabalhos de Detonação _____
- 11 Chefe Adjunto do Departamento Trabalhos Preparatório _____
- 12 Chefe de Turno Tecnológico da Mina _____
- 13 Chefe do Departamento de Transportação, Estradas e Escombreciras _____
- 14 Chefe do Departamento de Topografia e Geodésia _____
- 15 Director de Produção da Geosondas, SA _____
- 16 Responsável Técnico da Hipermaquinas _____
- 17 Chefe de Departamento de Geologia _____
- 18 Chefe de Departamento de Programação de Produção e Controlo Técnico _____
- 19 Chefe do Sector de Comunicação e Imagem _____
- 20 Responsável da Alva Ventures _____

MOD.DMIN. STD.003.00

DADOS DE DETONAÇÃO DOS BLOCOS 13 MIN-1-24 E 14 MIN-1-24

INFORMAÇÕES GERAIS DO BLOCO DETONADO EM ANÁLISE

LOCALIZAÇÃO		CLIENTE	
Município	Saurimo	Cliente	Sociedade Mineira de Catoca, SA
Província	Lunda-Sul	Projecto	Mina de Catoca
Tipo de Material		Tempo de Execução do Fogo	
Densidade do Material (t/m^3)	Gnaise	Data do Fogo	03 – Abril - 2024
Tipo de Fogo	Céu Aberto	Hora do Fogo	15h:18 min

DESENHO DA MALHA E DADOS DA APLICAÇÃO

GEOMETRIA DO BLOCO		DADOS DA SUBSTÂNCIA EXPLOSIVA			
Diâmetro do furo (m)	0,203	Nome do produto	Tipo	Densid. (g/cm^3)	Total (Kg)
Afastamento (m)	5,5	Emulsão	Russa	1,15	74.300
Espaçamento (m)	5,5		Sul Africana	1,08	22.100
Atacamento (m)	5-4		Total		96.400
Material do atacamento	Ar				
Altura da Bancada (m)	12,5				
Inclinação do furo (°C)	---				
PARÂMETROS DA PROGRAMAÇÃO DA DETONAÇÃO		ACESSÓRIOS DE DETONAÇÃO			
Número de furos	Planificado	443*		TIPO DE ACESSÓRIO	
	Real	271*		QUANTIDADE	
Profundidade Max. (m)	17	Booster de 400	256		
Profundidade Min (m)	1	Booster de 800	256		
Profundidade Méd. (m)	13	Detonador de 15/500ms	256		
Volume (m^3)	Planificado	Detonador de 20.4/500ms	256		
	Real	Detonador de 10.2/500ms	-----		
Emulsão (Kg)	Planificado	Retardo 15/9ms	-----		
	Real	Retardo 8.4/25ms	140		
Cons. Específico (Kg/m^3)	Planificado	Retardo 8.4/42ms	240		
	Real	Retardo 10.2/67ms	-----		
OBJECTIVO DA DETONAÇÃO		Lead Line (m)	500		
Extração do Minério		Cordel Detonante (m)	-----		
		Rastilho (m)	-----		
		Cápsula Detonante	-----		
		Mangas 220	100		
EXECUÇÃO DA TAREFA					
Tempo de carregamento do bloco				1,5 dia	
Tempo de instalação				01h:47 min	

Essa diferença notável dos dados marcados (entre o real e o planificado) deve-se ao facto de que não detonaram os blocos completos tal como no projecto. Cortou-se o bloco 13 Min-1-24 e não se terminou de perfurar o bloco 14-Min-1-24.

APÊNDICE

-Cálculo da relação de impedância

Substância explosiva	Pe	VD	NZ
ANFO	1,20g/cm ³	3100m/s	0,28
Emulsão		5000m/s	0,45

ANFO	Emulsão
<p>Pr=3,5 g/cm³ Pe=1,20g/cm³ VS=3821m/s VD=3100m/s</p> $NZ = \frac{Pe * VD}{Pr * VS} = 0,28$	<p>Pr=3,5 g/cm³ Pe=1,20g/cm³ VS=3821m/s VD=5000m/s</p> $NZ = \frac{Pe * VD}{Pr * VS} = 0,45$