



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
UNIDADE ACADÊMICA DE MINERAÇÃO E GEOLOGIA

AIRTON NASCIMENTO LEONEL

**IMPACTOS DAS VIBRAÇÕES GERADAS PELA DETONAÇÃO DE ROCHAS COM
USO DE EXPLOSIVOS: UMA ANÁLISE NA LITERATURA DE APLICAÇÕES DE
TÉCNICAS MITIGADORAS EM CASOS REAIS**

CAMPINA GRANDE

2024

AIRTON NASCIMENTO LEONEL

IMPACTOS DAS VIBRAÇÕES GERADAS PELA DETONAÇÃO DE ROCHAS COM
USO DE EXPLOSIVOS: UMA ANÁLISE NA LITERATURA DE APLICAÇÕES DE
TÉCNICAS MITIGADORAS EM CASOS REAIS

Trabalho Final de Curso apresentado ao
Curso de Engenharia de Minas da
Universidade Federal de Campina Grande,
como requisito parcial à obtenção do título
de bacharel em Engenharia de Minas.

Orientador: Prof. Me. Rafael Chagas Silva.

CAMPINA GRANDE

2024

AIRTON NASCIMENTO LEONEL

IMPACTOS DAS VIBRAÇÕES GERADAS PELA DETONAÇÃO DE ROCHAS COM
USO DE EXPLOSIVOS: UMA ANÁLISE NA LITERATURA DE APLICAÇÕES DE
TÉCNICAS MITIGADORAS EM CASOS REAIS

Trabalho Final de Curso apresentado ao
Curso de Engenharia de Minas da
Universidade Federal de Campina Grande,
como requisito parcial à obtenção do título
de bacharel em Engenharia de Minas.

Aprovado em: ___/___/_____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Me. Rafael Chagas Silva (Orientador)
Universidade Federal de Campina Grande (UFCG)

Prof. Dr. Iure Borges Moura de Aquino
Universidade Federal de Campina Grande (UFCG)

Me. Josenildo Isidro dos Santos Filho
Universidade Federal de Campina Grande (UFCG)

A Deus.
A minha família.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por te me iluminado e protegido durante toda a caminhada.

A toda a minha família, principalmente os meus pais, pela paciência e por todas as ajudas que me deram ao longo de todo esse período, sem vocês eu não teria alcançado meu objetivo.

Ao Prof. Me. Rafael Chagas Silva, pela excelente orientação e por todos os conhecimentos transmitidos.

Aos meus colegas de curso, pelos bons momentos vividos e pela troca de experiências durante nossa jornada.

Aos participantes da banca examinadora, Prof. Dr. Iure Borges Moura de Aquino e Josenildo Isidro dos Santos Filho, pelo tempo e por todas as sugestões.

RESUMO

O desmonte de rochas com uso de explosivos é uma técnica amplamente utilizada na mineração para fragmentar grandes volumes de rochas de forma eficiente. Esse processo envolve a perfuração de furos nas rochas, onde são inseridos explosivos que, ao serem detonados, geram uma rápida liberação de energia, fragmentando o material rochoso. Embora seja altamente eficaz, o desmonte com explosivos gera vibrações sísmicas que podem ter consequências significativas. Essa vibração gerada pode se propagar por longas distâncias, resultando em possíveis danos tanto ao próprio maciço remanescente quanto a estruturas próximas. Também pode causar certo desconforto aos moradores que vivem nas proximidades das operações de mineração, sendo uma das principais fontes de queixas da população local. Diante disso, o trabalho teve como objetivo realizar um estudo na literatura sobre a aplicação de técnicas mitigadoras de vibrações causadas pelo desmonte de rochas com uso de explosivos. Para tanto, a metodologia envolveu a revisão de técnicas de controle de vibração, como a limitação da carga máxima por espera, uma vez que permite o controle dos níveis de vibração apenas por modificar alguns parâmetros do plano de fogo. Isso acontece por meio da lei de atenuação que descreve o comportamento das ondas na área do desmonte para adequá-las as normas reguladoras NBR 9653, NP 2074 e o padrão *Transport Noise Management*; o uso de espoletas eletrônicas, que contribuem para melhorar a eficiência, a segurança e o controle nas operações de detonação, e as barreiras de amortecimento, que consistem na criação de barreiras artificiais, que por contraste de impedância, retêm as ondas de baixa frequência, causadoras dos maiores danos às estruturas. Foram apresentados casos práticos que demonstraram a aplicação dessas técnicas e seus resultados. Os resultados apresentados foram satisfatórios, demonstrando que é possível alcançar um equilíbrio entre a eficiência operacional e mitigação de impactos ambientais e estruturais.

Palavras-chave: Desmonte de rochas. Explosivo. Vibração. Técnicas de mitigação.

ABSTRACT

Rock blasting with explosives is a widely used technique in mining to fragment large volumes of rock efficiently. This process involves drilling holes into the rocks, where explosives are placed. When detonated, they release energy rapidly, fragmenting the rock material. Although highly effective, blasting with explosives generates seismic vibrations that can have significant consequences. These vibrations can propagate over long distances, potentially causing damage to both the remaining rock mass and nearby structures. They may also cause some discomfort to residents living near mining operations, making this one of the primary sources of complaints from the local population. Given these impacts, the study aimed to conduct a literature review on the application of techniques to mitigate vibrations caused by rock blasting with explosives. The methodology involved reviewing vibration control techniques, such as limiting the maximum charge per delay, which allows control of vibration levels by merely adjusting certain parameters of the blast plan. This is achieved through an attenuation law that describes wave behavior in the blasting area to comply with regulatory standards NBR 9653, NP 2074, and the Transport Noise Management standard. The use of electronic detonators, which contribute to improved efficiency, safety, and control in blasting operations, was also reviewed, as well as damping barriers, which create artificial barriers that, through impedance contrast, retain low-frequency waves responsible for the most damage to structures. Practical cases demonstrating the application of these techniques and their results were presented. The results were satisfactory, showing that it is possible to achieve a balance between operational efficiency and the mitigation of environmental and structural impacts.

Keywords: Rock blasting. Explosives. Vibration. Mitigation techniques.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Parâmetros de um plano de fogo.....	16
Figura 2 - Componentes básicos do martelo de superfície.....	21
Figura 3 - Perfuratriz Rotopercussiva.....	23
Figura 4 - Malha quadrada.....	27
Figura 5 - Malha retangular.....	27
Figura 6 - Malha estagiada (pé de galinha).....	28
Figura 7 - Raio de ação dos explosivos nas malhas triângulo equilátero.....	29
Figura 8 - Anfomax produzido pela Enaex.....	31
Figura 9 - Unidade Móvel de Bombeamento (UMB).....	33
Figura 10 - Emulsão encartuchada.....	33
Figura 11 - Reforçador (Booster).....	35
Figura 12 - Cordel detonante.....	35
Figura 13 - Layout de um detonador eletrônico.....	37
Figura 14 - Espoleta eletrônica.....	38
Figura 15 - Limites de velocidade de partícula de pico em função da frequência.....	46
Figura 16 - Fluxograma da metodologia desenvolvida na realização do trabalho.....	48
Figura 17 - Gráfico DS vs. V e as relações utilizadas para ajuste dos fatores do terreno.....	50
Figura 18 - Efeito exagerado da barreira de amortecimento em ondas de baixa frequência.....	53
Figura 19 - Fator de amortecimento em função da distância, altura da barreira e comprimento de onda.....	54
Figura 20 - Localização da mina em estudo.....	55
Figura 21 e 22 – Alocação dos sismógrafos.....	56

Figura 23 - Dispersão dos valores de PPV em comparação com os limites da NBR 9653	57
Figura 24 - Dispersão dos valores de PPV em comparação com os limites da NP2074	57
Figura 25 - Comparação entre as cargas máximas por espera em kg - vibrações em estruturas segundo as normas NP 2074 e NBR 9635.....	60
Figura 26 - Comparação entre as cargas máximas por espera em kWh – vibrações em estruturas segundo as normas NP 2074 e NBR 9635.....	60
Figura 27 - Carga máxima por espera, em kg, versus distância	61
Figura 28 - Carga máxima por espera, em kWh, versus distância.....	62
Figura 29 - Mapa de localização da Mineração Dantas Gurgel & Cia Ltda	64
Figura 30 - Estrutura típica de air deck	69
Figura 31 - Croqui do segundo desmonte com a localização dos dois sismógrafos ..	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Sistemas de perfuração de rochas.....	19
Tabela 2 – Composição básica da lama (<i>Slurry</i>).....	32
Tabela 3 - Composição típica de um explosivo em emulsão.....	32
Tabela 4 - Comparação da densidade com o nível de vibração.....	43
Tabela 5 - Limite para velocidade de partículas de pico NBR 9653	45
Tabela 6 - Norma portuguesa – NP 2074 (2015)	46
Tabela 7 - Limites máximos de vibração induzidas por detonações para conforto humano	47
Tabela 8 - Limites máximos de pressão acústica induzidas por detonações para conforto humano	47
Tabela 9 - Parâmetros aproximados obtidos pela regressão múltipla para vibrações	58
Tabela 10 - Resumo dos valores de carga máxima por espera	63
Tabela 11 - Limites de intensidade das frequências de ruídos segundo NBR 9653:2005	66
Tabela 12 - Análise de sismografia da espoleta eletrônica x espoleta não elétrica...67	
Tabela 13 - Dados do plano de fogo	68
Tabela 14 - Registro dos sismógrafos.....	71

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANM	Agência Nacional de Mineração
Cal	Calorias
cm	Centímetro
dB	Decibel
DTH	<i>Down The Hole</i>
g	Gramas
Hz	Hertz
Kg	Kilograma
kWh	Kilowatt
m	Metro
mm	Milímetros
MPa	Mega Pascal
NA	Nitrato de amônio
NBR	Norma Brasileira Regulamentar
NC	Nitrato de celulose
NG	Nitroglicerina
NP	Norma Portuguesa
OD	Óleo Diesel
OSMRE	Office of Surface Mining Reclamation and Enforcement
Pa	Pascal
s	Segundos
USMB	United States Bureau of Mines

Sumário

1. INTRODUÇÃO	14
2. OBJETIVO GERAL	15
2.1 Objetivos Específicos	15
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
3.1 Perfuração e desmonte de rochas	15
3.1.1 Perfuração de rochas	19
3.1.2 Equipamentos de perfuração	21
3.1.3 Parâmetros geométricos da perfuração	24
3.1.3.1 Malhas de perfuração	26
3.1.4 Explosivos comerciais utilizados em desmonte de rochas.....	29
3.1.4.1 ANFO e ALANFO.....	30
3.1.4.2 Hidrogéis ou lamas (<i>Slurries</i>).....	31
3.1.4.3 Emulsão	32
3.1.4.4 Gelatinas	34
3.1.5 Acessórios de detonação	34
3.1.5.1 Reforçadores (<i>Booster</i>).....	35
3.1.5.2 Cordel detonante.....	35
3.1.5.3 Espoletas não elétricas	36
3.1.5.4 Espoletas eletrônicas	37
3.2 Fatores que afetam os níveis das vibrações causadas por explosivos	39
3.2.1 Carga máxima por espera e tempo de retardo.....	40
3.2.3 Influência das variáveis geométricas nos níveis de vibração de um plano de fogo	41
3.2.4 Água no furo.....	42
3.2.5 Tipos de explosivos.....	43
3.2.6 Geologia do terreno.....	43

3.3 Normas Regulamentadoras	44
3.3.1 NBR 9653:2005.....	44
3.3.2 Norma NP 2074-2015 – Portugal	46
3.3.3 <i>Transport Noise Management</i> - Código de prática do estado de Queensland - Austrália	47
4. METODOLOGIA	48
4.1 Limitação da carga máxima por espera	49
4.2 Utilização de espoleta eletrônica	51
4.3 Barreiras de amortecimento	52
5. ESTUDOS DE CASO E DISCUSSÕES	55
5.1 CONTROLE DE VIBRAÇÕES E PRESSÃO ACÚSTICA NO DESMONTE DE ROCHAS COM EXPLOSIVOS: ESTUDO DE CASO EM UMA MINA DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO	55
5.1.1 Avaliação dos possíveis danos e incômodo humano com os planos de fogo comumente utilizados na mina.....	56
5.1.2 Lei de propagação de vibrações	58
5.1.3 Dimensionamento da carga máxima admissível por espera e do plano de fogo.....	59
5.1.3.1 Carga máxima admissível por espera segundo avaliação de vibrações em estruturas.....	59
5.1.3.2 Carga máxima admissível por espera segundo avaliação do incômodo humano em relação a vibrações e pressão acústica.....	61
5.1.3.3 Definição da carga máxima por espera.....	62
5.2 USO DE ESPOLETA ELETRÔNICA PARA OTIMIZAR O DESMONTE DE ROCHAS COM EXPLOSIVOS E MITIGAR OS IMPACTOS DE VIZINHANÇA	64
5.3 A APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE <i>SMOOTH</i> PARA O CONTROLE DE VIBRAÇÕES PRÓXIMO A ÁREAS URBANAS	68
6. CONCLUSÃO	72
7. REFERÊNCIAS	74

1. INTRODUÇÃO

A utilização de explosivos no desmonte de rochas é uma prática amplamente difundida na mineração e na construção civil. Apesar de sua eficácia operacional, as vibrações geradas por esse processo podem provocar diversos impactos negativos, tanto ambientais quanto estruturais, além de interferir no bem-estar das comunidades do entorno. Estas vibrações, quando não controladas, podem causar danos a edificações próximas, desencadear processos erosivos, afetar a fauna local e comprometer a segurança de trabalhadores nas áreas de desmonte. Devido a esses riscos, o controle das vibrações tornou-se uma preocupação central em projetos que envolvem detonações, exigindo o desenvolvimento de métodos e normas para evitar ou mitigar seus efeitos (DORNELLES, 2013).

Neste contexto, pesquisas, como as de Silva (2019) e Jimeno *et al.* (1990), têm se concentrado em analisar os parâmetros que influenciam a propagação das vibrações, além de propor estratégias para minimizá-las. Fatores como a carga máxima por espera, o espaçamento entre os furos, o tempo de retardo entre as detonações, e até mesmo as características geológicas do terreno, desempenham um papel determinante na intensidade das vibrações geradas. Normas regulamentadoras, como a NBR 9653 (2005) no Brasil e a NP 2074 (2015) em Portugal, estabelecem critérios específicos para limitar os níveis de vibração permitidos em áreas próximas a edificações e ambientes sensíveis.

Este estudo buscou analisar os impactos das vibrações geradas por explosivos no desmonte de rochas por meio de uma revisão da literatura acadêmica e de uma avaliação de estudos de caso. A pesquisa explorou as principais técnicas de controle das vibrações, incluindo o uso de espoletas eletrônicas, barreiras de amortecimento e a limitação da carga máxima por espera. Além disso, foi discutido a aplicação dessas técnicas em situações reais, destacando as melhores práticas e os desafios encontrados na mitigação dos efeitos das vibrações em operações de desmonte. Com base nos estudos analisados, este trabalho oferece uma visão abrangente sobre as metodologias de controle e os resultados obtidos na prática, contribuindo para o aprimoramento das operações de desmonte com explosivos, visando à segurança, sustentabilidade e eficiência.

2. OBJETIVO GERAL

A pesquisa teve como objetivo analisar os impactos das vibrações geradas por explosivos no desmonte de rochas, por meio de uma revisão da literatura acadêmica e da avaliação de estudos de caso, com o intuito de identificar os principais efeitos, desafios e práticas mitigadoras adotadas no controle de vibrações em operações mineiras.

2.1 Objetivos Específicos

- Revisar os principais conceitos teóricos sobre vibrações causadas por explosivos no desmonte de rochas, com base na literatura acadêmica;
- Selecionar e descrever as técnicas de mitigação de vibrações causadas pelo desmonte de rochas com uso de explosivos;
- Avaliar as metodologias utilizadas para medição e controle das vibrações em trabalhos acadêmicos sobre desmontes com explosivos;
- Sintetizar as melhores práticas e estratégias mitigadoras apresentadas na literatura para reduzir os impactos das vibrações causadas por explosivos.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nessa seção serão abordados alguns aspectos referentes à perfuração e desmonte de rochas, definindo os parâmetros geométricos, os tipos de perfuração, explosivos e acessórios utilizados, além das principais normas que regem o controle de vibração no desmonte. Esses conceitos são fundamentais para o entendimento do efeito da vibração causada por desmonte de rocha com uso de explosivos.

3.1 Perfuração e desmonte de rochas

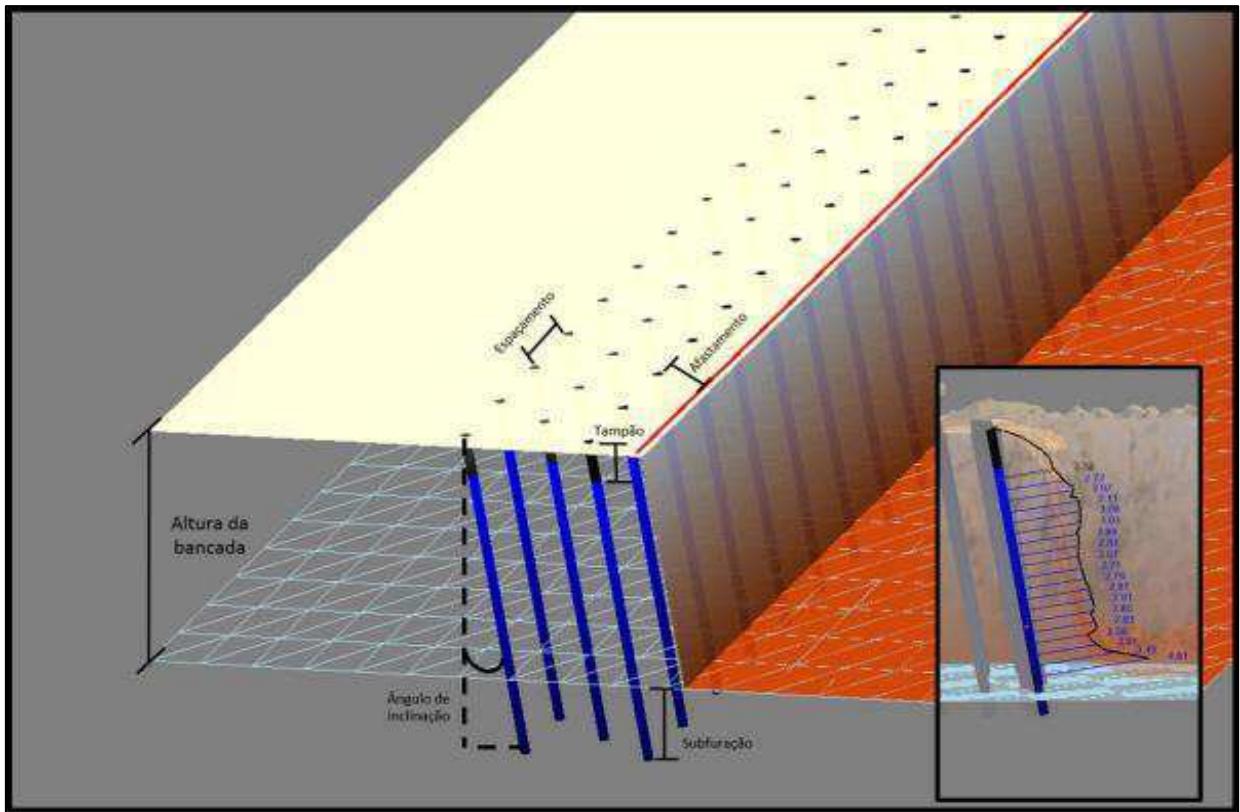
De acordo com Jimeno *et al.* (1990), a fase inicial de um desmonte de rochas é a perfuração, cujo propósito é elaborar uma rede de furos com dimensões específicas. Esses furos são estrategicamente posicionados para receber as cargas explosivas e os dispositivos de iniciação, fundamentais para o sucesso da operação.

O controle e a redução dos efeitos vibratórios durante o desmonte depende da gestão eficaz de algumas variáveis do plano de fogo, como a quantidade máxima de explosivos por furo, a sequência de detonação, os intervalos de tempo entre os detonadores, entre outros aspectos (SILVA, 2019). Esses elementos não apenas influenciam na eficiência operacional, mas também são essenciais para mitigar impactos ambientais e garantir a segurança no local de trabalho. Um planejamento

meticuloso do plano de fogo é, portanto, crucial para alcançar esses objetivos com sucesso (SILVA, 2019).

A Figura 1 mostra alguns parâmetros geométricos essenciais que devem ser levados em consideração no desenvolvimento de um plano de fogo.

Figura 1 - Parâmetros de um plano de fogo.



Fonte: Silva (2022)

Os parâmetros geométricos apresentados na Figura 1, estão descritos a seguir:

- Afastamento

Segundo Bhandari (1997) e Silva (2009), o afastamento refere-se à distância da primeira linha de furos até a frente livre ou a distância entre linhas de furos consecutivas, medida em metros. Este parâmetro é crucial na geometria do desmonte, influenciando diretamente sua eficiência e segurança. Destaca-se assim, a importância não apenas da disposição dos furos individuais, mas também da organização das linhas de furos no planejamento das operações de desmonte.

- Espaçamento

Conforme definido por Reis (2016), o espaçamento refere-se à distância longitudinal entre os furos de uma mesma linha em operações de perfuração. Diversos fatores, como altura da bancada, afastamento entre linhas de furos, uso de retardos, quantidade de carga explosiva e diâmetro de perfuração, são apontados por Silva (2009), Bhandari (1997) e Reis (2016) como determinantes na definição do espaçamento ideal. Cada um desses parâmetros influencia diretamente a eficácia da detonação e a qualidade da fragmentação, sendo essencial considerá-los de forma integrada na elaboração de projetos de perfuração.

- Subperfuração

Silva (2009) define subperfuração como o comprimento perfurado abaixo da cota topográfica almejada da bancada. Este parâmetro tem a função de evitar o aparecimento de repé ou bloco de rocha formado pela detonação insuficiente do pé da bancada, representada por uma superfície irregular que dificulta a realização de trabalhos subsequentes na praça do desmonte. A subperfuração também pode favorecer a formação de uma superfície irregular na cota topográfica da bancada desmontada, em virtude das variações de comprimento dos furos e do espaçamento entre eles.

- Profundidade do furo

O comprimento total de cada furo é considerado sua profundidade real, conforme explicado por Silva (2009). Esta profundidade varia de acordo com a inclinação do furo e a subperfuração. Quando um furo é inclinado em relação à superfície da bancada, seu comprimento total aumenta, enquanto a subperfuração diminui esse comprimento. Assim, a profundidade efetiva do furo pode ser calculada utilizando a Equação 1:

$$Hf = \frac{Hb}{\cos \alpha} + \left(1 - \frac{\alpha}{100}\right) \times S \quad \text{Equação (1)}$$

Onde,

Hf: Profundidade do furo (m)

Hb: Altura da bancada (m)

α : Inclinação do furo

S: Subfuração (m)

Essa abordagem permite determinar com precisão até que ponto cada furo penetra na bancada, levando em conta não apenas a inclinação, mas também a subperfuração, fatores essenciais para o cálculo correto da profundidade real do furo.

- Tampão

O tamponamento refere-se ao preenchimento da parte superior dos furos com um material inerte, selecionado pela sua granulometria adequada, que proporciona fricção suficiente contra as paredes do furo para contrapor a pressão da detonação (SILVA, 2019). Reis (2016) destaca que o tamponamento dos furos de detonação é crucial para reduzir o risco de escape dos gases gerados pelo explosivo para a atmosfera por meio da superfície do furo. Isso é fundamental para otimizar a fragmentação da rocha, pois permite que a carga explosiva se propague de maneira mais eficiente através das fraturas do maciço rochoso. Essa prática não apenas melhora a eficácia da detonação, mas também contribui para garantir que a energia liberada seja utilizada de forma mais eficiente na fragmentação desejada da rocha.

No desmonte de rochas, vários outros parâmetros do plano de fogo estão intimamente ligados ao planejamento eficaz das detonações. A carga total, por exemplo, representa a soma da carga de fundo e da carga de coluna, sendo crucial para determinar a energia explosiva necessária para fragmentar a rocha de forma adequada (REIS, 2016).

A altura da carga de fundo, desempenha um papel crucial como carga de reforço, otimizando a transmissão da energia explosiva. Por sua vez, a altura da carga de coluna é obtida subtraindo-se a carga de fundo da carga total, sendo responsável pela fragmentação primária da rocha (REIS, 2016).

Além desses parâmetros, a razão de carga, definida como a relação entre a carga total de explosivo do furo e o volume de rocha por furo, é essencial

para determinar a eficiência da detonação e a qualidade da fragmentação. Segundo Jimeno *et al.* (1990), a razão de carregamento praticada em minerações a céu aberto, geralmente, varia de 250 a 550 g/m³.

Vários fatores físicos e geológicos também exercem influência significativa na qualidade das detonações, conforme destacado por Bhandari (1997). Entre eles estão a dureza da rocha, suas propriedades elásticas, densidade, porosidade, composição mineral, tamanho dos grãos, descontinuidades estruturais, presença de cavidades e estratigrafia. Esses elementos devem ser cuidadosamente considerados durante o planejamento das operações para garantir detonações seguras e eficazes.

3.1.1 Perfuração de rochas

A perfuração do maciço rochoso representa a primeira etapa para a realização de um desmonte de rochas. A Tabela 1 apresenta os sistemas de perfuração mais usuais, segundo Jimeno *et al.* (1990).

Tabela 1 - Sistemas de perfuração de rochas

MECÂNICOS	TÉRMICOS	HIDRÁULICOS	QUÍMICOS
Percussão Rotação Rotopercussão	Tocha ou lança elétrica Plasma	Jato de água Erosão	Microjateamento Dissolução

Fonte: Adaptado de Jimeno *et al.* (1990)

Apesar da grande variedade de métodos de perfuração disponíveis, na mineração e construção civil, a perfuração é realizada, em sua grande maioria, utilizando energia mecânica. Os principais componentes de um sistema de perfuração desse tipo são: a perfuratriz, que é a fonte de energia mecânica; a transmissão, que é o meio de transferência dessa energia; o equipamento de perfuração, que aplica essa energia à rocha; e o fluido de perfuração, que limpa e lubrifica as partes móveis do sistema de acionamento da perfuratriz e remove os detritos produzidos (JIMENO *et al.*, 1990).

De acordo com Silva (2014), existem três principais métodos de perfuração para o desmonte de rochas com explosivos aplicados à mineração:

- Método rotopercussivo com martelo de superfície (*Top-Hammer*);
- Método rotopercussivo com martelo de fundo de furo (*Down the Hole - DTH*); e
- Perfuração rotativa com brocas tricônicas (*Holler Bit*).

3.1.1.1 Perfuração por rotopercussão

Segundo Silva (2014), nas perfuratrizes rotopercussivas, os martelos são acionados por ar comprimido ou sistemas hidráulicos, e geram o impacto diretamente na broca (DTH) ou no punho de bater que transmite a energia para a coluna de perfuração (*Top-Hammer*). Este sistema é altamente eficaz em muitos tipos de rochas duras e é amplamente utilizado em diversas operações de mineração e construção civil.

Ainda segundo Silva (2014), é importante destacar que, em operações de mineração a céu aberto, as máquinas rotopercussivas, frequentemente, desempenham um papel mais proeminente. O diâmetro do furo produzido por esses equipamentos é um dos fatores que fazem com que tenham uma maior utilização. As perfuratrizes com martelo de superfície (*Top-Hammer*), trabalham com uma faixa de diâmetros que vai de 1" a 3"½ (22 a 89mm); já as de fundo de furo (DTH), trabalham de 3"½ a 15" (89 a 381mm) (JIMENO *et al.*, 1990).

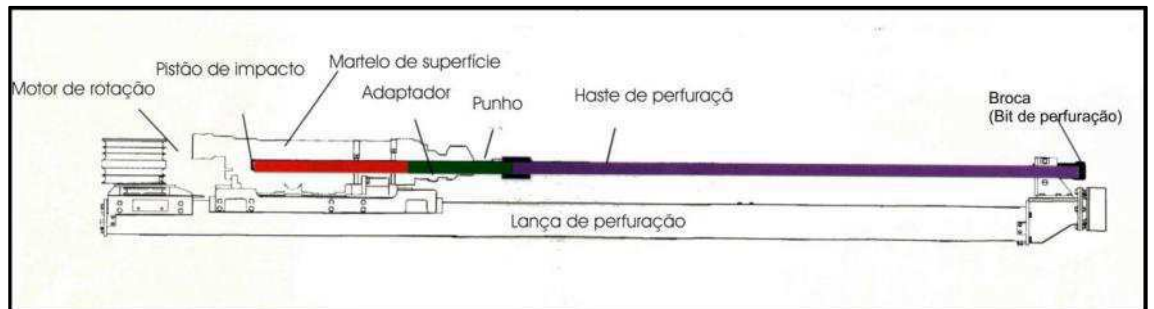
Silva (2014), define que a perfuração rotopercussiva se baseia na combinação das seguintes ações:

- **Percussão:** os impactos produzidos pelas batidas do pistão do martelo originam ondas de choque que se transmitem à rocha;
- **Rotação:** com este movimento se faz girar a broca para que se produzam impactos sobre a rocha em diferentes posições;
- **Pressão de avanço:** para se manter em contato a ferramenta de perfuração e a rocha é exercida uma pressão de avanço sobre a broca de perfuração;
- **Fluido de limpeza:** o fluido de limpeza permite extrair os detritos do fundo do furo.

Todavia, os sistemas principais de acionamento das perfuratrizes rotopercussivas são: rotação e percussão. Enquanto a rotação gira a haste de perfuração, a percussão aplica golpes que ajudam a fragmentar o material.

Essas forças são transmitidas pela haste até a coroa de perfuração que fragmenta a rocha em seção circular (SILVA, 2014). A Figura 2 mostra os componentes básicos do sistema de perfuração rotopercussivo.

Figura 2 - Componentes básicos do martelo de superfície



Fonte: Silva (2014)

3.1.2 Equipamentos de perfuração

Os equipamentos de perfuração podem ser classificados e agrupados de acordo com seu princípio básico de funcionamento, e podem ser divididos em:

- Perfuratrizes Pneumáticas:

De acordo com Silva (2014), o martelo acionado por ar comprimido é composto por um cilindro fechado, cuja tampa dianteira possui uma abertura axial para fixação do punho e das hastes de perfuração. Dentro do cilindro, um pistão realiza movimentos alternativos, gerando impacto no punho de perfuração. Esse impacto é transmitido às hastes de perfuração, que são utilizadas para perfurar a rocha.

Uma válvula controla o fluxo de ar comprimido, direcionando-o alternadamente para a parte anterior e posterior do pistão. Esse ciclo de ar comprimido impulsiona o movimento do pistão, criando os golpes necessários para o funcionamento do martelo (SILVA, 2014).

A profundidade máxima alcançada por este sistema é limitada a aproximadamente 30 metros, devido às perdas de energia na transmissão das ondas de choque do martelo para a coroa de perfuração. Cada haste adicionada na coluna de perfuração aumenta as perdas de energia devido à reflexão da energia nas conexões e luvas de perfuração (SILVA, 2014).

- Perfuratrizes Hidráulicas:

No final da década de 60 e início da década de 70, houve um avanço significativo na tecnologia de perfuração de rochas com o desenvolvimento dos martelos hidráulicos. Silva (2014) define que uma perfuratriz hidráulica possui essencialmente os mesmos componentes de uma perfuratriz pneumática, mas difere crucialmente no método de acionamento.

Enquanto uma perfuratriz pneumática utiliza ar comprimido, gerado por um compressor acionado por um motor diesel ou elétrico, para mover o motor de rotação e produzir o movimento alternativo do pistão do martelo, uma perfuratriz hidráulica utiliza um conjunto de bombas para realizar essas funções. Essas bombas são responsáveis por acionar os componentes da perfuratriz hidráulica, como o motor de rotação e o mecanismo que movimenta o pistão do martelo (SILVA, 2014).

Ainda de acordo com Silva (2014), essa transição para sistemas hidráulicos trouxe diversas vantagens para a perfuração de rochas, como maior eficiência, controle preciso da potência e velocidade, além de redução nos custos operacionais quando comparada às perfuratrizes pneumáticas tradicionais.

Alguns parâmetros certificam que as perfuratrizes com acionamento hidráulico possuam uma melhor tecnologia se comparadas às de acionamento pneumático, como (CROSBY, 1998 *apud* SILVA, 2014):

- Menor consumo de energia;
- Menor desgaste da broca de perfuração;
- Maior velocidade de penetração;
- Melhores condições ambientais de operação;
- Maior flexibilidade na operação;
- Maior facilidade para a automação.

- Perfuratrizes Rotopercussivas:

Segundo Geraldi (2011), realizando uma comparação, nas perfuratrizes percussivas, o deslocamento do pistão propicia rotação parcial nas ferramentas, de aproximadamente 1/8 do diâmetro do furo, a cada impacto sobre a rocha.

Já nas perfuratrizes rotopercussivas, foi introduzida a rotação independente da ferramenta de perfuração. Um conjunto motor auxiliar, acoplado a perfuratriz, confere rotação à ferramenta, independentemente do movimento de “vaivém” do pistão. A velocidade dessa rotação pode variar de 0 a 100 rpm, de acordo com as condições físicas e geológicas da rocha a ser perfurada (GERALDI, 2011).

Esses equipamentos são mais versáteis em relação aos percussivos, principalmente em situações especiais, como, por exemplo:

- Transposição de mantos ou faixas de rochas alteradas;
- Perfuração em maciços mais fraturados;
- Presença de água subterrânea na execução dos furos.

Outro fator que deve ser ressaltado é o maior custo de aquisição desse equipamento, além de o processo de deslocamento dessas máquinas provocar algumas dificuldades devido ao porte e peso das carretas hidráulicas.

A perfuratrizes percussivas e rotopercussivas são indicadas normalmente para execução de furos de até 4” (102mm), verticais ou horizontais (GERALDI, 2011)

Figura 3 - Perfuratriz Rotopercussiva



Fonte: Sandvik (2024)

- Perfuratrizes DTH (*Down The Hole*):

São equipamentos que operam por meio de movimentos totalmente independentes de percussão e rotação, que realizam furos com maiores diâmetros e profundidades. Nesses equipamentos, a percussão é feita

diretamente por meio do acionamento pneumático, atuando com alta pressão sobre a rocha (até 250 MPa) (GERALDI, 2011).

Neste sistema de perfuração, posiciona-se o martelo próximo a broca, fazendo com que a energia do impacto sobre a rocha seja maximizada, evitando perdas ao longo de hastes e luvas. Ainda segundo Geraldi (2011), a pressão de trabalho e a rotação necessárias ao bom desempenho são fornecidas por um sistema hidráulico que permanece em superfície, montado na carreta que sustenta todo o conjunto.

- **Perfuratrizes Rotativas:**

Geraldi (2011) define perfuratrizes rotativas como equipamentos que utilizam toda a energia de acionamento para ativar um sistema de rotação combinado com uma grande pressão da ferramenta sobre a rocha a ser perfurada. Em maciços formados por rochas brandas, normalmente sedimentares, esses equipamentos são amplamente utilizados para a execução de furos com maior diâmetro. No entanto, quanto mais dura e abrasiva for a rocha a ser perfurada, menor será o rendimento dessas máquinas.

3.1.3 Parâmetros geométricos da perfuração

Segundo Geraldi (2011), um projeto de escavação de rocha a céu aberto deve ser baseado em três parâmetros:

- I. É necessário definir os volumes que serão escavados e as metas de produção para o serviço que será executado;
- II. Fazer um estudo com foco na destinação da rocha que será escavada, onde algumas opções devem ser analisadas, como: encaminhar a rocha para o beneficiamento mineral, promover o aproveitamento direto da rocha em obras ou depositar a rocha em um bota-fora pré-determinado (estéril).
- III. Por fim, é necessário definir a fragmentação da rocha (faixa granulométrica) ideal da rocha a ser obtida em função da destinação do material.

No que diz respeito às características dos furos, Silva (2016) define que são caracterizados por quatro parâmetros: diâmetro, profundidade, retilinidade e estabilidade.

- Diâmetro dos furos:

A escolha do diâmetro dos furos depende da sua finalidade. Em furos para detonações, vários fatores influenciam essa escolha, como o tamanho desejado dos fragmentos após a detonação, o tipo de explosivo a ser utilizado e a vibração admissível do terreno durante a detonação. Em grandes pedreiras e outras minerações a céu aberto, furos de grande diâmetro apresentam menores custos de perfuração e detonação por metro cúbico ou tonelada de rocha escavada. Em trabalhos menores, o diâmetro do furo pode ser determinado pelo tamanho do equipamento disponível para perfuração, carregamento e transporte. A escolha do diâmetro dos furos também depende da produção horária, do ritmo da escavação e da resistência da rocha (SILVA, 2016).

- Profundidade dos furos:

A profundidade do furo está intimamente ligada ao corte necessário para que a bancada alcance o nível estabelecido na etapa de planejamento (SILVA, 2019). De acordo com Jimeno *et al.* (1990), esse parâmetro representa a extensão total perfurada pela máquina de perfuração, e normalmente é maior que a altura do banco, considerando a subperfuração.

Segundo Silva (2019), a escolha do equipamento de perfuração é determinada pela profundidade do furo. Em minerações a céu aberto, essas profundidades geralmente estão em uma faixa de 12 a 15 metros, utilizando martelo de superfície (*Top-Hammer*). Para profundidades maiores, entre 50 e 70 metros ou mais, o método de perfuração de fundo de furo (*Down the Hole - DTH*) é preferido. Furos profundos, maiores que 20 metros são, normalmente, empregados em métodos de lavra subterrânea, por exemplo Sublevel Stopping e Vertical Crater Retreat.

- Retilidade dos furos:

A retidão de uma perfuração pode variar conforme o tipo e a natureza da rocha, o diâmetro e a profundidade do furo, o método e as condições do equipamento utilizado, além da experiência do operador. Para perfurações profundas destinadas a detonação, é essencial que o furo seja o mais reto possível, a fim de assegurar a correta distribuição dos explosivos e alcançar os resultados desejados. Caso haja desvios nos furos, muitas vezes é necessário reduzir o espaçamento entre eles, o que acaba gerando um aumento nos custos (SILVA, 2016).

- **Estabilidade dos furos:**

Silva (2016) ainda alerta que durante a perfuração em materiais soltos ou rochas que tendem a desmoronar, é crucial estabilizar o furo para garantir que ele permaneça aberto até que os explosivos sejam carregados. Isso pode ser feito utilizando tubos ou mangueiras de revestimento. Essas medidas preventivas são essenciais para a segurança e eficácia do processo de perfuração e detonação.

3.1.3.1 Malhas de perfuração

Segundo Camargos (2023), as malhas de perfuração geralmente levam seu nome de acordo com a geometria de distribuição dos furos na bancada ou praça de lavra, podendo ser: quadradas, retangulares, estagiadas e triângulo equilátero.

- **Malhas quadradas:**

Nessa configuração, os furos possuem a mesma distância entre o espaçamento e afastamento, logo:

$$E = A$$

Equação (2)

Onde,

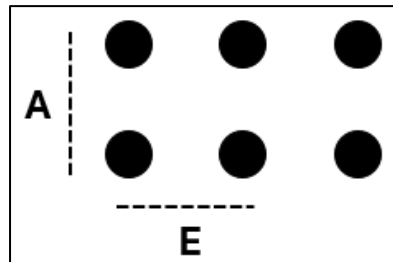
E: espaçamento

A: afastamento

As malhas quadradas tendem a acelerar o processo de perfuração devido ao menor tempo entre a perfuração de um furo e outro. No entanto, elas exigem atenção especial quanto à fragmentação. O centro dos quadrados na malha tende a receber menos influência dos

explosivos, o que pode levar à formação de matações e repés. Esse fenômeno foi observado por Jimeno *et al.* (1990), que destacam a necessidade de considerar a fragmentação ao utilizar esse tipo de malha.

Figura 4 - Malha quadrada



Fonte: Adaptado de Silva (2006)

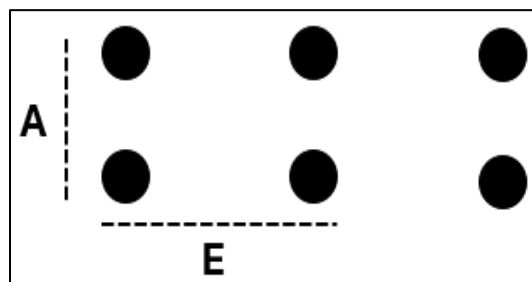
- Malhas retangulares:

Assim como nas malhas quadradas, a malha retangular oferece vantagens em termos de menor tempo de deslocamento entre furos. No entanto, a abrangência do explosivo é menor no centro do retângulo (SILVA, 2019). A principal diferença em relação à malha quadrada é que, na malha retangular, o espaçamento entre os furos é maior do que o afastamento, logo:

$$E > A$$

Equação (3)

Figura 5 - Malha retangular



Fonte: Adaptado de Silva (2006)

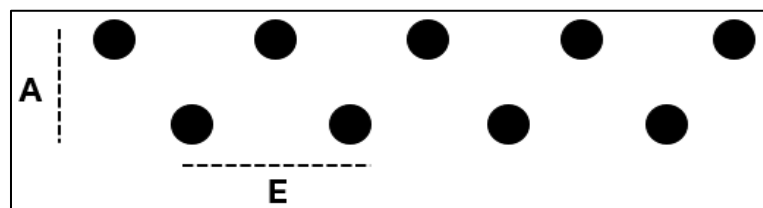
- Malhas estagiadas:

Também conhecida como “pé de galinha”, esse tipo de disposição é usado para maximizar a eficiência da fragmentação do minério, aproveitando a influência dos explosivos de forma estratégica. O centro

da malha recebe a maior concentração de explosivos, o que aumenta a fragmentação na área central e ajuda a otimizar o uso dos explosivos. No entanto, a perfuração pode ser mais demorada devido ao deslocamento maior entre os furos (SILVA, 2019).

Além disso, as malhas podem ser adaptadas para diferentes formas, como triângulos equiláteros, para atender às necessidades específicas de cada operação de mineração.

Figura 6 - Malha estagiada (pé de galinha)



Fonte: Adaptado de Silva (2006)

- Malhas triângulo equilátero

Segundo Silva (2019), esta é uma variação das malhas estagiadas, diferenciando-se por ter um triângulo com todos os lados de igual comprimento. Para alcançar essa configuração, é necessário seguir uma razão específica que define o processo para manter todas as distâncias iguais entre os vértices do triângulo.

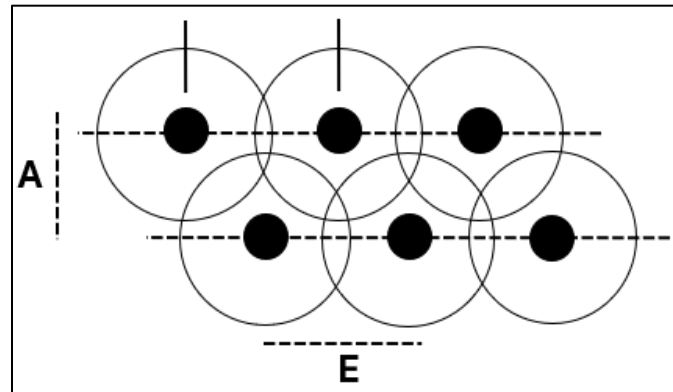
$$\frac{E}{A} = 1,15 \quad \text{Equação (4)}$$

A principal vantagem desse método é a capacidade de ajustar as amarrações e temporizações do desmonte de maneira mais flexível, algo que não é viável com outras malhas. Ele também garante que o centro do triângulo equilátero receba a maior concentração de explosivos, minimizando assim a necessidade de retrabalho. No entanto, assim como nas malhas estagiadas convencionais, essa configuração apresenta uma produtividade reduzida devido ao tempo de deslocamento entre os furos (SILVA, 2019).

Conforme indicado por Jimeno *et al.* (1990), esta malha é especialmente adequada para rochas que possuem alta resistência à

compressão, abrasividade e dureza, pois proporciona um melhor aproveitamento dos gases do explosivo.

Figura 7 - Raio de ação dos explosivos nas malhas triângulo equilátero



Fonte: Adaptado de Silva (2019)

3.1.4 Explosivos comerciais utilizados em desmonte de rochas

“Explosivos são substâncias ou misturas, em qualquer estado físico, que, quando submetidos a uma causa térmica ou mecânica suficientemente energética (calor, atrito, impacto etc.) se transformam, total ou parcialmente, em gases, em um intervalo de tempo muito curto, desprendendo considerável quantidade de calor” (SILVA, 2019).

De acordo com Jimeno *et al.* (1990), os explosivos industriais para uso civil são divididos em dois grupos: agentes explosivos e explosivos convencionais.

- Agentes Explosivos ou Agentes Detonantes:
 - São misturas que não necessariamente contêm ingredientes explosivos em sua composição;
 - Exemplos incluem ANFO (nitrato de amônio e óleo combustível), ALANFO, hidrogéis ou lamas e emulsões explosivas.
- Explosivos Convencionais:
 - Requerem substâncias detonantes em sua fabricação, ou seja, explosivos propriamente ditos;
 - Exemplos incluem explosivos gelatinosos e pulverulentos, que contêm um percentual de nitroglicerina em sua composição.

3.1.4.1 ANFO e ALANFO

O ANFO (Nitrato de Amônio e Óleo Combustível) é amplamente utilizado como agente detonante na fragmentação de rochas, especialmente em empresas de pequeno, médio e grande porte. Sua popularidade se deve ao baixo custo por metro cúbico de rocha desmontada, à facilidade de fabricação e à segurança no manuseio e uso (MENDES, 2015 *apud* SILVA, 2015).

O ANFO (Figura 8) é uma mistura composta por 95,5% de nitrato de amônio, que atua como oxidante na reação explosiva, e 4,5% de óleo combustível, que age como redutor no processo de oxidação (SILVA, 2015; JIMENO, 1990). Segundo Jimeno *et al.* (1990), diversos tipos de combustíveis podem ser utilizados para a formação do ANFO, tanto sólidos (como carvão, serragem e algodão) quanto líquidos (como querosene, gasolina, óleo diesel e óleos vegetais). Contudo, devido à melhor miscibilidade para promover a reação de redução do nitrato de amônio de maneira eficiente, os combustíveis líquidos são mais indicados. Entre eles, o óleo diesel é comumente utilizado por sua baixa volatilidade, o que reduz o risco de formação de vapores explosivos de metano e contribui para a criação de um explosivo mais seguro.

De acordo com Silva (2019), sua principal característica é a baixa densidade em comparação com as emulsões (0,85 g/cm³). Isso proporciona uma menor razão linear de carregamento e, conseqüentemente, um menor consumo de explosivos. Quando utilizados em condições adequadas, esses explosivos produzem bons resultados devido à sua alta liberação de energia na forma de gases e à capacidade de preencher completamente os espaços vazios nos furos. Essa característica garante que não haja perda de energia entre o explosivo e as paredes do furo.

Jimeno *et al.* (1990) recomendam o uso do ANFO em planos de fogo com furos de diâmetro superior a 50 mm. Abaixo desse valor, a velocidade de detonação diminui drasticamente, podendo causar deflagração do explosivo. Contudo, em furos com diâmetros excessivamente grandes, a sensibilidade do ANFO também diminui significativamente, sendo recomendados furos com até 150 mm de diâmetro.

Para desmontar rochas não fraturadas, o ANFO apresenta algumas desvantagens, como a baixa potência liberada na reação de detonação quando

comparado a outros explosivos. Além disso, o ANFO possui baixa densidade e pouca resistência à água (JIMENO *et al.*, 1990).

Para aumentar a energia liberada durante a detonação, foi criado o ALANFO. Esta mistura consiste em nitrato de amônia, óleo combustível e uma pequena quantidade de alumínio, variando entre 13% e 15% da composição total. A energia liberada na reação é de aproximadamente 1650 cal/g, e aumenta com o acréscimo de alumínio, podendo chegar a uma concentração máxima de 25%, com granulometria entre #20 e #150 (JIMENO *et al.*, 1990).

Contudo, a produção do ALANFO é complexa e mais cara, e a presença de alumínio em pequenas quantidades na mistura pode resultar em instabilidade, fatores que dificultam sua ampla utilização (JIMENO *et al.*, 1990).

Figura 8 - Anfomax produzido pela Eneax



Fonte: Eneax (2024)

3.1.4.2 Hidrogéis ou lamas (*Slurries*)

Os hidrogéis são agentes explosivos constituídos por soluções aquosas que contêm nitrato de amônia, nitrato de sódio e/ou nitrato de cálcio como materiais oxidantes. Esses explosivos também incluem nitrato de monometilamina (NMMA) em concentrações de 10 a 15%, disperso em óleos combustíveis a 6%. Para evitar a segregação do material sólido na solução, são adicionados agentes espessantes e gelificantes, que representam 1% da composição total (JIMENO *et al.*, 1990).

Esse explosivo é mais potente que o ANFO, apresentando energia liberada muito semelhante aos explosivos gelatinosos, da ordem de 1500 cal/g.

Os hidrogéis possuem densidade controlável de 0,8 a 1,6 g/cm³ e são resistentes à água. Os gases que são gerados na detonação são, geralmente, menos tóxicos que o do ANFO, tornando esse explosivo mais seguro (MARTINHO, 2012; JIMENO *et al.*, 1990).

Tabela 2 – Composição básica da lama (*Slurry*)

FASE CONTÍNUA	
Água	15 - 20%
Nitrato de Amônio e/ou de Sódio/Cálcio	65 - 80%
Goma + Agentes Cruzadores	1 - 2%
FASE DESCONTÍNUA	
Óleo Diesel	2 - 5%
Alumínio	0 - 10%
Agentes Gaseificação	0,20%

Fonte: Adaptado de Silva (2006)

3.1.4.3 Emulsão

Explosivos em emulsão são classificados como água-em-óleo (*water-in-oil*). Esses explosivos consistem em microgotículas de uma solução oxidante supersaturada dispersas em uma matriz de óleo. Para otimizar o rendimento energético e reduzir os custos de produção e o preço de venda, o oxidante utilizado é predominantemente o nitrato de amônio. Quimicamente, uma emulsão é definida como uma dispersão estável de um líquido imiscível em outro. Esta estabilidade é alcançada através do uso de agentes emulsificantes, que facilitam a formação e manutenção da emulsão, e pela agitação mecânica vigorosa que garante uma dispersão uniforme (SILVA, 2019).

Tabela 3 - Composição típica de um explosivo em emulsão

Ingredientes	Porcentagem em massa
Nitrato de Amônio	77,3
Água	16,7
Óleo Diesel	4,9
Agente Emulsificante: Oleato de sódio ou Monoleato de ezorbitol	1,1
TOTAL	100

Fonte: Adaptado de Silva (1986)

As emulsões podem ser aplicadas de duas formas: utilizando Unidades Móveis de Bombeamento (UMB's) ou na forma encartuchada. A principal vantagem da aplicação por bombeamento, em comparação com a encartuchada, é a capacidade de ajustar as proporções de nitrato de amônio na mistura. Esse ajuste permite alterar a densidade do explosivo de acordo com o tipo de material a ser detonado, proporcionando maior flexibilidade e eficiência na aplicação (SILVA, 2019). Por outro lado, em maciços rochosos muito fraturados, a emulsão bombeada pode preencher os vazios da rocha, favorecendo ao desperdício do explosivo ou promovendo resultados inesperados na detonação.

Figura 9 - Unidade Móvel de Bombeamento (UMB)



Fonte: Enaex (2024)

Figura 10 - Emulsão encartuchada



Fonte: Enaex (2024)

Segundo Martinho (2012), as emulsões têm se destacado cada vez mais devido a uma série de vantagens significativas. Elas são econômicas, oferecem excelente resistência à água e permitem o ajuste preciso da densidade. Além disso, possuem uma vida útil prolongada quando armazenadas, geram gases pouco tóxicos durante o desmonte e são reconhecidas por sua segurança na utilização.

3.1.4.4 Gelatinas

Segundo Silva (2006), a gelatina explosiva foi inventada por Alfred Nobel em 1875. Trata-se de um explosivo altamente denso, com uma textura plástica que lembra a de uma goma de mascar. Jimeno *et al.* (1990) definem que, o percentual de NG-NC das gelatinas de hoje varia de 30-35% + NA + Combustível (OD) + agentes gelatinizantes que reduzem a higroscopicidade do NA, e, mesmo nessa proporção, este composto explosivo atinge 80% da energia liberada pela gelatina pura. Possuem uma alta densidade, que varia entre 1,2 a 1,5 g/cm³ e uma elevada velocidade de detonação (5000 a 6000 m/s).

Esse tipo de explosivo é utilizado apenas em situações especiais devido à sua potência e características específicas. É conhecido por sua capacidade de produzir excelente fragmentação e ótimo adensamento no furo. No entanto, seu uso também gera gases nocivos, o que requer precauções adequadas durante o manuseio e a aplicação (SILVA, 2006).

3.1.5 Acessórios de detonação

Segundo Silva (2006), os explosivos industriais possuem uma estabilidade química que os torna manuseáveis com segurança sob condições normais. Para desencadear uma detonação, é necessário fornecer ao explosivo uma quantidade inicial de energia de ativação, suficiente para promover as reações internas que o transformarão em gases. Uma vez iniciada essa reação, ela se propaga por toda a massa explosiva em forma de onda. Essa energia inicial pode ser fornecida na forma de choques moleculares provenientes de calor, faíscas, atrito, impacto, entre outros.

Os acessórios de detonação são projetados para iniciar esses fenômenos de forma segura. Alguns deles são especificamente desenvolvidos

para retardar a detonação, quando necessário. Assim, podemos afirmar que os acessórios de detonação são dispositivos, aparelhos ou instrumentos utilizados com o objetivo de garantir um desmonte seguro e eficaz (SILVA, 2006).

3.1.5.1 Reforçadores (*Booster*)

Conforme apontado por Silva (2019), os *boosters* são reforçadores de detonação em formato cônico ou cilíndrico, Figura 11, que contêm uma carga pirotécnica de nitropenta, essencial para a iniciação dos explosivos no furo. A função dos *boosters* é assegurar a transmissão de energia ao longo da carga de fundo e/ou coluna, resultando em uma maior velocidade de detonação do explosivo. Vale destacar que o diâmetro dos *boosters* deve ser o mais próximo possível do diâmetro do furo, de modo a maximizar as propriedades energéticas das cargas explosivas (MENDES, 2018).

Figura 11 - Reforçador (Booster)



Fonte: Enaex (2024)

3.1.5.2 Cordel detonante

Segundo Klen (2010), o cordel detonante é um dispositivo composto por um núcleo de nitropenta, envolto em fios de algodão e recoberto por uma camada plástica. Essa estrutura proporciona ao cordel alta flexibilidade, resistência a ações mecânicas e impermeabilidade. Com uma velocidade de detonação de aproximadamente 7000 m/s, o cordel detonante é amplamente utilizado na iniciação de explosivos em operações de desmontes a céu aberto, sendo considerado seguro para manuseio (SILVA, 2015).

Figura 12 - Cordel detonante



Fonte: Enaex (2024)

No entanto, Klen (2010) também destaca algumas desvantagens associadas ao uso do cordel detonante. Entre elas estão o elevado nível de ruído gerado, a possibilidade de rompimento da linha de tronco, o risco de iniciação prematura de explosivos sensíveis durante a propagação da onda de detonação, e a expulsão precoce de parte do material do tampão. Por outro lado, as principais vantagens incluem a alta resistência à água, a capacidade de iniciar vários furos simultaneamente, o custo mais acessível e a possibilidade de armazenamento por longos períodos sem deterioração, desde que armazenado corretamente.

3.1.5.3 Espoletas não elétricas

Com o progresso tecnológico após a invenção do cordel detonante, as espoletas não elétricas emergiram como um novo acessório de iniciação. Segundo Mendes (2018), essas espoletas contêm em seu interior azida de chumbo, nitropenta e um elemento de retardo. Em comparação com o cordel detonante, as espoletas não elétricas oferecem vantagens como maior silêncio, segurança e menor emissão de ondas sísmicas e sonoras.

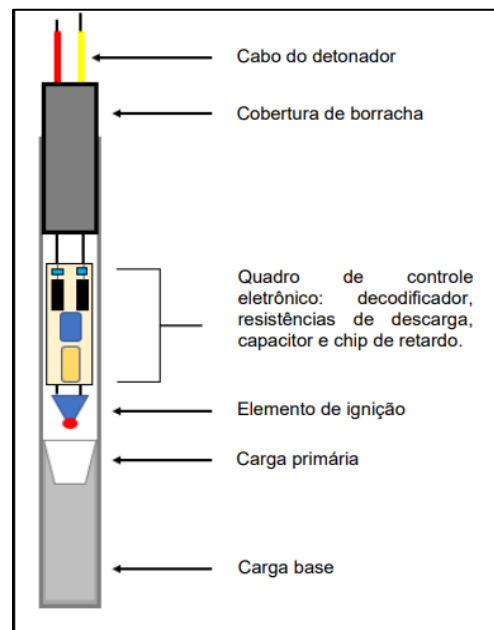
Contudo, ao serem usadas com explosivos encartuchados (escorvados), apresentam uma maior probabilidade de falhas de iniciação. Isso se deve ao fato de que a iniciação é pontual e o cabo transmissor de energia (estopim ou tubo de choque) das espoletas não é explosivo, diferentemente do cordel detonante. Assim, se houver lacunas entre os encartuchados, a chance de não detonar completamente o furo aumenta (SILVA, 2019).

3.1.5.4 Espoletas eletrônicas

Em consonância com a evolução tecnológica, o mercado apresentou o Sistema de Retardo Eletrônico. Este sistema inclui uma espoleta de retardo eletrônico que é fácil de usar e programável, adequado para diversos tipos de desmonte tanto na mineração quanto na construção civil, podendo ser aplicado em obras a céu aberto e subterrâneas (SILVA, 2019).

Ainda de acordo com Silva (2019), a grande diferença do detonador eletrônico é que cada espoleta pode ter seu tempo de retardo programado individualmente. Este dispositivo contém aproximadamente 790 mg de PETN (Tetranitrato de Pentaeritritol) como carga de base e 90 mg de azida de chumbo como carga primária, além de uma ponte de fio de alta resistência (inflamador) e um circuito eletrônico com um microchip inteligente e dois capacitores eletrônicos (um para assegurar a autonomia do detonador e outro para iniciar o inflamador). É ideal para uso com altos explosivos comerciais sensíveis à espoleta e pode ser utilizado para detonar *boosters*. A Figura 13 apresenta um *layout* de um detonador eletrônico.

Figura 13 - Layout de um detonador eletrônico



Fonte: Tavares (2024)

Pontes *et al.* (2016) explica que os iniciadores eletrônicos têm um impacto significativo na eficiência das operações de desmonte de rochas na

mineração. A avaliação da eficiência das espoletas eletrônicas pode ser feita com base nos seguintes parâmetros:

1. **Redução dos impactos ambientais:** as espoletas eletrônicas proporcionam um controle mais exato das detonações, diminuindo a dispersão de partículas e gases poluentes. Isso contribui para a minimização da poluição do ar, além de reduzir a contaminação do solo e da água nas proximidades.
2. **Menores danos ao talude remanescente:** graças à precisão das espoletas eletrônicas, a energia liberada durante a detonação pode ser controlada de forma mais eficaz. Isso resulta em menos fraturas e deslocamentos indesejados no talude remanescente, ajudando a manter a estabilidade das paredes da mina ou pedreira e prevenindo desmoronamentos, o que é crucial para a segurança das operações subsequentes.
3. **Efeitos sobre as operações de carregamento e transporte:** detonações mais controladas produzem fragmentos de rocha de tamanho mais uniforme, facilitando as operações de carregamento e transporte. Isso não só aumenta a eficiência dessas operações, mas também reduz o desgaste dos equipamentos utilizados, contribuindo para a longevidade e a redução de custos de manutenção. A Figura 14 traz a representação de uma espoleta eletrônica.

Figura 14 - Espoleta eletrônica



Fonte: Autor (2023)

Ainda de acordo com Pontes *et al.* (2016), a utilização de espoletas eletrônicas em operações de desmonte não apenas aumenta a precisão e eficiência das detonações, mas também oferece maior flexibilidade e controle. Um aspecto importante desse controle é a possibilidade de interromper a operação mesmo após o início da energização dos detonadores, proporcionando uma camada adicional de segurança e a chance de ajustar a operação conforme necessário.

Programas de simulação de desmonte são fundamentais no planejamento e execução dessas operações. Eles permitem a programação precisa de retardos entre as detonações, que podem ser observados e ajustados em diferentes velocidades, havendo assim a possibilidade de se realizarem ajustes e detecção de possíveis erros (PONTES *et al.*, 2016). Dessa forma, a combinação de espoletas eletrônicas e simulações avançadas melhora significativamente o controle, a segurança e a eficiência das operações de desmonte.

3.2 Fatores que afetam os níveis das vibrações causadas por explosivos

Segundo Klein (2010), as variáveis que influenciam nos níveis de vibração são praticamente as mesmas que interferem na qualidade do desmonte e se classificam em dois grupos: as controláveis e as não controláveis.

➤ Variáveis não controláveis

- Condições climáticas: o vento e o clima são fatores que não podem ser alterados. Embora não seja possível modificá-los durante o planejamento, é possível prever suas condições e ajustar o plano de fogo conforme necessário.
- Características geológicas do terreno: estas incluem as propriedades geomecânicas das rochas e o tipo de solo. Essas características determinam como a energia da explosão se dispersa e são fundamentais para prever os níveis de vibração. Exemplos incluem:
 - Dureza e resistência das rochas;

- Estrutura e fraturas no terreno;
- Tipo de solo.

➤ Variáveis controláveis

Estas são as variáveis que podem ser ajustadas durante o planejamento do plano de fogo. Alguns exemplos incluem:

- Tempo de retardo;
- Carga máxima por espera;
- Direção de iniciação;
- Inclinação dos furos;
- Diâmetro dos furos;
- Espaçamento e afastamento.

3.2.1 Carga máxima por espera e tempo de retardo

Os tempos de retardo e a carga máxima por espera são variáveis interconectadas. De acordo com Jimeno *et al.* (1990), a carga máxima por espera é definida como a maior quantidade de explosivo detonado por unidade de retardo. À vista disso, é o fator de maior influência na geração de vibrações em desmontes que utilizam dispositivos de retardo. Isso significa que a maior carga por retardo é o que determina a intensidade das vibrações, em vez da carga total do desmonte, contanto que os intervalos de tempo sejam superiores a 8 m/s para prevenir interferências entre as ondas geradas.

A escolha correta desses tempos e a análise de suas variações permitem a detonação individual de cada carga. Conforme mencionado anteriormente, isso possibilita o controle dos níveis de vibração ao dividir o desmonte em estágios (KLEIN, 2010).

Porém, Klein (2010) ainda ressalta que uma escolha incorreta dos tempos de retardo e a ausência de uma avaliação da dispersão desses tempos podem ter efeitos negativos, resultando na sobreposição de ondas e promovendo a geração de ondas de baixas e altas frequências, que são responsáveis pelo fenômeno de ressonância nas estruturas. Por

isso, acessórios de iniciação com baixa dispersão nos tempos de retardo tem sido amplamente utilizados como forma de diminuir a geração de superposição de ondas, destacando-se os detonadores eletrônicos (FILHO, 2022).

Segundo Jimeno *et al.* (1990), os primeiros estudos sobre a determinação dos tempos mínimos de retardo propuseram tempos de retardo de 8 ou 9 m/s, baseados em experimentos realizados em pedreiras de calcário. Porém, outros estudos mostraram que, com intervalos de retardo de três vezes o período da onda de vibração, não ocorreria superposição de ondas devido ao amortecimento das ondas sísmicas geradas na detonação. Ainda conforme Jimeno *et al.* (1990), a *Nobel's Explosives Co.* demonstrou que intervalos de tempo menores que 25 m/s resultam em superposição construtiva de ondas, o que aumenta significativamente os níveis de vibração.

3.2.3 Influência das variáveis geométricas nos níveis de vibração de um plano de fogo

- **Afastamento e espaçamento:** segundo Klein (2010), quando o afastamento e o espaçamento são excessivos, os gases resultantes da detonação encontram maior dificuldade para fragmentar e arrancar a rocha. Conseqüentemente, grande parte da energia gerada pelo explosivo é transmitida à rocha, aumentando a intensidade das vibrações.
- **Subperfuração:** quando a subperfuração é excessiva a quantidade de energia utilizada para desmonte de rocha na base é menor, sendo uma porcentagem cada vez maior da energia do explosivo convertida em vibração (KLEIN, 2010).
- **Diâmetro dos furos:** o aumento do diâmetro do furo não ajuda a controlar as vibrações, pois a quantidade de explosivo necessária aumenta proporcionalmente ao quadrado do diâmetro do furo. Assim, um diâmetro maior implica em uma quantidade maior de explosivo, o que resulta em uma carga mais elevada e, conseqüentemente, em maiores vibrações (JIMENO *et al.*, 1990).

- **Tamanho do tampão:** o tampão, quando apresenta um comprimento excessivo, proporciona maior confinamento dos gases podendo influenciar no aumento dos níveis de vibração (KLEIN, 2010).
- **Inclinação dos furos:** de acordo com Klein (2010), a utilização de furos inclinados reduz os níveis de vibração, pois permite um melhor direcionamento da energia em relação ao piso da bancada. Especialmente quando o ângulo é de 45°, há uma otimização na transferência da energia química do explosivo, resultando em um aproveitamento mais eficiente e na diminuição das vibrações.
- **Direção da iniciação:** a sequência de iniciação deve ser planejada para que a detonação dos furos ocorra de forma a afastar o impacto das estruturas a serem protegidas. Isso resulta em níveis reduzidos de vibração nessas estruturas (KLEIN, 2010).
- **Confinamento de carga:** Klein (2010), explica que está relacionado à quantidade de explosivo e ao volume de rocha a ser removida. Quando o intervalo de tempo entre duas linhas de furos é muito curto, não há tempo suficiente para que a rocha removida pela primeira linha se desloque e crie uma nova face livre para a linha seguinte. Isso resulta em um aumento do confinamento das cargas, o que faz com que mais energia seja convertida em energia sísmica, causando problemas de vibração. Konia *et al.* (2006) mencionam que o confinamento das cargas pode aumentar os níveis de vibração em até 500%.

3.2.4 Água no furo

Sendo um fluido incompressível que tende a preencher a maioria dos vazios em solos e rochas, a água facilita a propagação das ondas de tensão geradas durante os desmontes de rocha com explosivos, resultando em níveis de vibração mais elevados (DORNELES, 2013).

3.2.5 Tipos de explosivos

Klen (2010) afirma que, de forma contraintuitiva, o nível de vibração não aumenta com o aumento da densidade do explosivo. Segundo Jimeno *et al.* (1990), esse fenômeno ocorre porque a impedância da rocha é o fator que correlaciona a velocidade das partículas e a tensão induzida na rocha. Em outras palavras, explosivos que geram uma pressão de detonação mais baixa no furo resultam em níveis de vibração inferiores, como observado na Tabela 4.

Tabela 4 - Comparação da densidade com o nível de vibração

Tipos de explosivo	Densidade (g/cm ³)	Nível de vibração
ANFO	0,8	Médio
Emulsão	1,15	Pequeno
Blendado	1,45	Grande

Fonte: Adaptado de Filho (2022) *apud* Klen (2010)

3.2.6 Geologia do terreno

Jimeno *et al.* (1990) define que a propagação das ondas mecânicas depende fortemente das características do meio pelo qual elas se propagam. Em maciços rochosos homogêneos, as vibrações se propagam em todas as direções. No entanto, em estruturas geológicas complexas, a propagação pode variar com a direção e apresentar diferentes leis de atenuação.

Além disso, a propagação das ondas pode ser influenciada pela presença e pelas características do solo na região em torno do desmonte. Grande parte da energia das ondas é dissipada para vencer os espaços vazios entre as camadas do solo, diminuindo a velocidade de propagação das ondas e, conseqüentemente, a frequência de vibração (JIMENO *et al.*, 1990).

Ainda segundo Jimeno *et al.* (1990), de maneira geral, a grandes distâncias do local de desmonte, as variáveis controláveis exercem pouca influência na intensidade das vibrações. Nesses casos, a formação geológica do terreno predomina sobre a intensidade das

vibrações, determinando a forma de propagação das ondas e suas leis de atenuação.

3.3 Normas Regulamentadoras

3.3.1 NBR 9653:2005

O desmonte de rochas com explosivos em operações de lavra a céu aberto precisa ser cuidadosamente controlado. Esse controle não se limita apenas ao volume de rocha produzido, à fragmentação desejada, à prevenção de blocos grandes, à estabilidade das rochas que permanecem na área, ou ao formato e direção do lançamento do material. É igualmente importante considerar os possíveis danos estruturais que podem ser causados a edificações próximas, principalmente devido à propagação das ondas geradas pelas detonações.

A norma NBR 9653 de 2005 estabelece limites para a velocidade máxima de partículas resultantes de detonações de explosivos, com o objetivo de prevenir danos em estruturas civis. Esses limites são determinados com base na frequência das ondas geradas pelas detonações. No entanto, a norma apresenta uma limitação importante em relação a outras normas internacionais, como por exemplo as normas USBM RI 8507 e OSMRE (Estados Unidos) e a NP 2074-2015 (Portugal), pois não leva em consideração o tipo específico de estrutura a ser protegida. Como observado por Silveira (2017), essa abordagem generalizada pode resultar em uma proteção inadequada para determinadas estruturas, que podem ser mais suscetíveis aos efeitos das vibrações.

Alguns conceitos são definidos pela NBR 9653, entre eles está a pressão acústica, referida como ruído, é causada por uma onda de choque no ar, contendo componentes tanto na faixa audível (entre 20 Hz e 20.000 Hz) quanto fora dela, com uma duração inferior a um segundo. A norma determina que, fora da área de operação, a pressão acústica não deve ultrapassar 100 Pa, o que corresponde a um nível de 134 dB.

Ainda segundo a NBR 9653, quantos às vibrações, alguns conceitos e parâmetros são descritos como:

- I. **Velocidade de vibração de partícula de pico:** máximo valor instantâneo da velocidade de uma partícula em um ponto durante um determinado intervalo de tempo, considerado como sendo o maior valor dentre os valores de pico das componentes de velocidade de vibração de partícula para o mesmo intervalo de tempo;
- II. **Velocidade resultante de partícula:** máximo valor obtido pela soma vetorial das três componentes ortogonais simultâneas de velocidade de vibração de partícula, considerado ao longo de um determinado intervalo de tempo;
- III. **Frequência de vibração de partícula:** número de oscilações por segundo em que o terreno vibra conforme energia sísmica criada pela detonação de 38 explosivos que passa por um ponto determinado, obtido a partir da análise do registro de velocidade de vibração de partícula, dada em Hertz (1Hz é igual a uma oscilação por segundo);
- IV. **Distância escalonada:** é a relação entre a distância horizontal do ponto de medição ao local de detonação e a raiz quadrada da carga máxima por espera.

A Tabela 5, apresenta os limites de velocidade de partículas de pico por faixa de frequência:

Tabela 5 - Limite para velocidade de partículas de pico NBR 9653

FAIXA DE FREQUÊNCIA	LIMITE DE VELOCIDADE DE VIBRAÇÃO DE PARTÍCULA DE PICO
4 Hz a 15 Hz	Iniciando em 15 mm/s, aumentando linearmente até a 20 mm/s
15 Hz a 40 Hz	Acima de 20 mm/s, aumenta linearmente até 50 mm/s
Acima de 40 Hz	50 mm/s

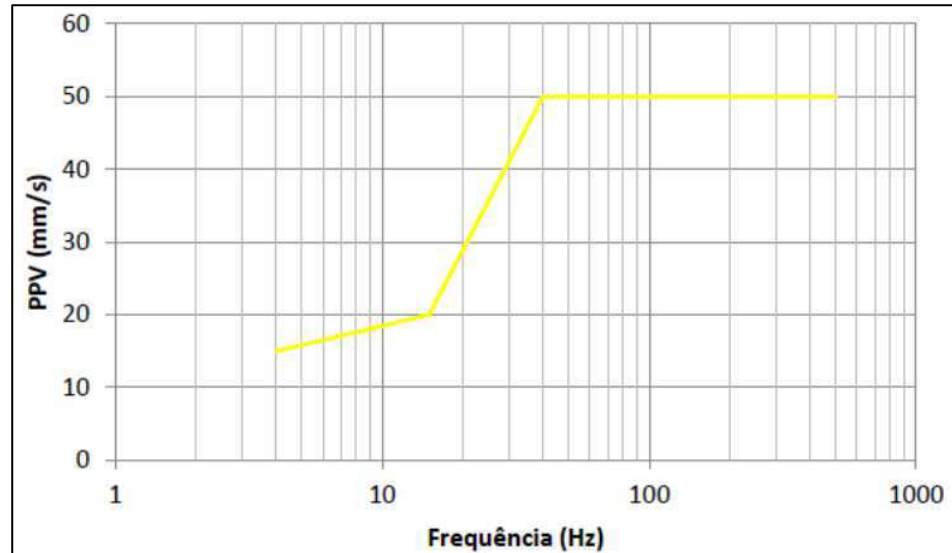
Nota: Para valores abaixo de 4 Hz, deve ser utilizado como limite o critério de deslocamento de partículas de pico de no máximo 0,6 mm (de zero a pico).

Fonte: Adaptado da NBR 9653 (2005)

Já a Figura 15, representa graficamente o limite de velocidades de partículas de pico (PPV) em função da frequência. Verifica-se que a velocidade do PPV atinge valores entre 15 e 20 mm/s para frequências

baixas, que variam de 4 a 15 Hz, respectivamente. Essas frequências mais baixas têm maior propensão a influenciar as fases de vibração das edificações, podendo desencadear um efeito de ressonância.

Figura 15 - Limites de velocidade de partícula de pico em função da frequência



Fonte: Silveira (2017)

3.3.2 Norma NP 2074-2015 – Portugal

De acordo com Silveira (2017), a norma portuguesa atualizada, NP 2074:2015, também leva em conta a frequência e o tipo de estrutura para determinar a velocidade máxima de vibração de partícula de pico, conforme ilustrado na Tabela 6.

Tabela 6 - Norma portuguesa – NP 2074 (2015)

Tipos de estruturas	Velocidade máxima de vibração de partículas (mm/s)		
	Frequência dominante, f		
	f ≤ 10Hz	10Hz < f ≤ 40Hz	f > 40Hz
Sensíveis	1,50	3,00	6,00
Comuns	3,00	6,00	12,00
Reforçadas	6,00	12,00	40,00

Fonte: Silveira (2017)

Observando a Tabela 6, verifica-se que esta norma é bastante rigorosa, especialmente para baixas frequências, abaixo de 10 Hz. Além disso, os diferentes tipos de estruturas são afetados de maneira distinta

pelo fenômeno vibratório, o que torna a norma portuguesa mais precisa e confiável na avaliação dos efeitos deletérios causados pelas vibrações decorrentes do desmonte de rochas com uso de explosivos (SILVEIRA, 2017).

3.3.3 *Transport Noise Management* - Código de prática do estado de Queensland - Austrália

O Código de Prática do Estado de Queensland, na Austrália, define limites máximos para a vibração de partículas com relação ao incômodo humano (conforme apresentado na Tabela 7) em situações de eventos vibratórios impulsivos, como detonações, levando em conta a localização da área afetada. Além disso, o código estabelece que os mesmos limites para a velocidade de vibração de partículas usados para avaliar o incômodo humano, devem ser aplicados também na avaliação de possíveis danos estruturais (SILVEIRA, 2017).

Tabela 7 - Limites máximos de vibração induzidas por detonações para conforto humano

Local	Velocidade de vibração de partículas
Construções históricas, monumentos	2mm/s
Uso de terras sensíveis	Máximo de 5mm/s para 9 a cada 10 detonações consecutivas e 10mm/s para qualquer detonação.

Fonte: Silveira (2017)

Quanto à pressão acústica, o código também fornece limites máximos para avaliação do incômodo humano (Tabela 8), bem como para avaliação do possível dano estrutural.

Tabela 8 - Limites máximos de pressão acústica induzidas por detonações para conforto humano

Local	Velocidade de vibração de partículas
Uso de terras sensíveis	Máximo de 115dB para 9 a cada 10 detonações consecutivas e máximo de 120 dB para qualquer detonação.

Fonte: Silveira (2017)

4. METODOLOGIA

Este trabalho foi realizado por meio de uma revisão na literatura focada nos impactos das vibrações geradas pelo desmonte de rochas com a utilização de explosivos comerciais, baseando-se na busca por determinadas palavras-chave, como: *vibrações causadas por explosivos*, *desmonte de rochas*, *controle de vibrações*, *impactos ambientais*, *mitigação de vibrações*. À vista disso, foram selecionados trabalhos acadêmicos, tipo dissertação e artigos científicos. A partir da análise dos trabalhos selecionados, a pesquisa foi estruturada em duas etapas principais:

1. Identificar métodos para minimizar os efeitos prejudiciais das vibrações provenientes das detonações.
2. Coletar e avaliar estudos de caso que implementaram esses métodos, analisando os resultados obtidos.

Com base na primeira etapa, serão apresentadas três principais técnicas de controle de vibrações: limitação da carga máxima por espera, utilização de espoletas eletrônicas e barreiras de amortecimento. Para cada técnica, serão explicados o fundamento teórico, as especificidades e as formas de aplicação.

Na segunda etapa, serão discutidos estudos de caso relacionados a cada técnica, aplicados em situações reais de detonação com explosivos. A escolha dos estudos de caso priorizou pesquisas a partir do ano de 2017, realizadas no Brasil, e que seguem as normas nacionais de controle de vibrações. Em cada estudo, será analisada a aplicação prática da técnica e seus efeitos no controle da intensidade das vibrações.

O fluxograma apresentado na Figura 16, representa de forma esquemática a metodologia desenvolvida para produção do trabalho, além de listar as técnicas que serão abordadas e os estudos de caso que serão apresentados.

Figura 16 - Fluxograma da metodologia desenvolvida na realização do trabalho



Fonte: Autor (2024)

4.1 Limitação da carga máxima por espera

Essa técnica, fundamenta-se na correlação entre os níveis de vibração e a energia liberada por explosivos em intervalos de tempo específicos. O método prioriza o parâmetro de velocidade de vibração e não leva em conta os efeitos de frequências baixas (SILVA, 2005). Certas normas, incluindo a NBR 9653, não consideram os efeitos da frequência ao definir os limites de vibração, o que viabiliza o uso dessa técnica para minimizar e controlar os níveis de vibração.

De acordo com Silva (2005), a estimativa da velocidade de vibração é obtida por meio de equações empíricas que consideram, como principais parâmetros, a distância da fonte ao ponto de medição, a carga máxima por espera e características da litologia do terreno. Vogt e Singh (1998) analisaram, em seus estudos, oito tipos distintos de equações para estimar os níveis de vibração. Essas equações se diferenciavam pela relação matemática entre os parâmetros mencionados, comparando a quantidade máxima de explosivo estimada para um valor fixo de velocidade de vibração e ajustando os fatores litológicos do terreno. Os autores concluíram que nenhuma das equações

satisfizes em sua totalidade os parâmetros de vibração em diferentes condições geológicas, contudo a Equação 5, proposta pela USBM foi a mais assertiva nas predições, dentre as condições geológicas estudadas.

$$V = k * \left(\frac{D}{\sqrt{Q}}\right)^m = k * (DS)^m \text{ (mm/s)} \quad \text{Equação (5)}$$

Onde,

V – Velocidade de vibração máxima (mm/s);

D – Distância entre a fonte de energia e o ponto de monitoramento (m);

Q – Carga máxima por espera (Kg);

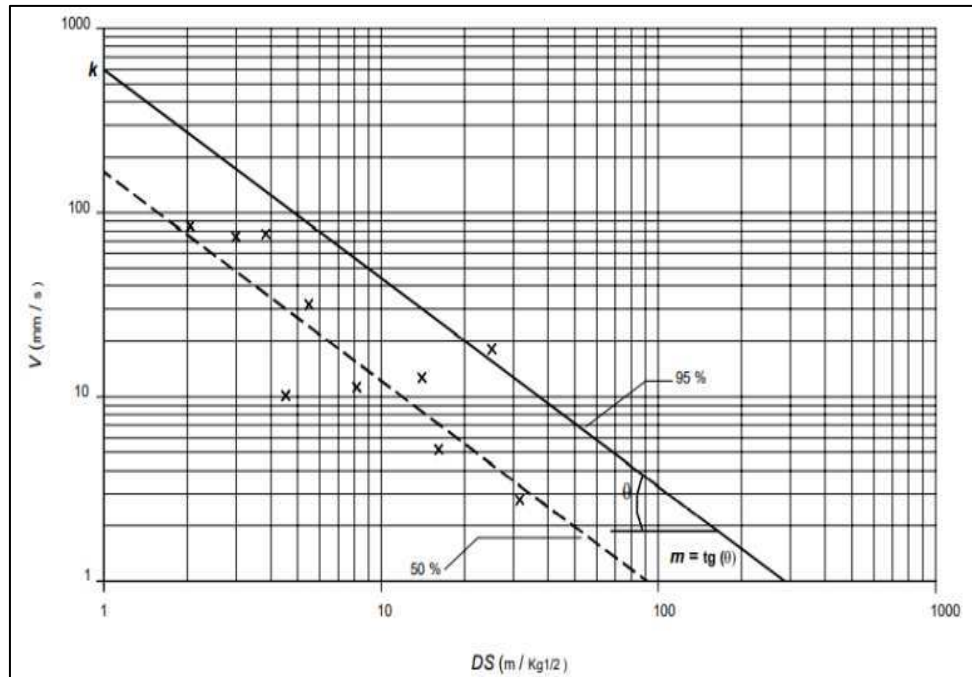
k e m – fatores do terreno;

DS – Distância escalonada (m/kg^{1/2}).

Ainda segundo Silva (2005), os parâmetros *k* e *m* são determinados através da calibração por regressão linear com valores obtidos de testes executados na área onde será realizado os desmontes. O parâmetro *k* representa o coeficiente linear da reta, determinado geometricamente pela interseção do prolongamento da reta com o eixo Y, correspondendo, nesse contexto, à velocidade de vibração máxima. O parâmetro *m*, por sua vez, é o coeficiente angular da reta, obtido através do cálculo da tangente do ângulo formado entre a linha de ajuste e o eixo das abscissas, que, nesse caso, representa a distância escalonada. Como a relação entre os parâmetros DS e V é inversamente proporcional, o coeficiente *m* sempre será negativo

A Figura 17 exemplifica um gráfico de velocidade máxima de partículas por distância escalonada apresentando os aspectos citados anteriormente.

Figura 17 - Gráfico DS vs. V e as relações utilizadas para ajuste dos fatores do terreno



Fonte: Silva (2005)

No entanto, é comum utilizar uma variação da Equação 5 para descrever o comportamento das ondas sísmicas. Essa variação permite determinar a velocidade de partícula de pico através de uma regressão não linear, levando em consideração a carga máxima por espera e a distância até o ponto analisado. Isso facilita a obtenção desses parâmetros separadamente para o redimensionamento do plano de fogo, conforme ilustrado na Equação 6 (DALLORA NETO, 2004).

$$V = a * Q^b * D^c \quad \text{Equação (6)}$$

Onde,

V – Velocidade de vibração máxima (mm/s);

D – Distância entre a fonte de energia e o ponto de monitoramento (m);

Q – Carga máxima por espera (Kg);

a, b e c – fatores litológicos.

4.2 Utilização de espoleta eletrônica

A espoleta eletrônica tem se destacado como uma das tecnologias mais promissoras para o desmonte de rochas com uso de explosivos, devido à sua eficiência, segurança e controle abrangente sobre o processo de detonação. Comparada com outras tecnologias, como a espoleta não elétrica, a espoleta

eletrônica oferece diversos benefícios, incluindo melhor operacionalização, otimização dos resultados do desmonte de rochas e menor frequência gerada pelo limite de velocidade de pico da partícula (VPP), conforme especificado pela ABNT 9653:2005 (PONTES *et al.*, 2016).

Segundo Pontes *et al.* (2016), além de promover uma fragmentação mais eficiente da rocha, graças ao controle preciso do tempo das detonações e da liberação gradual de energia, a espoleta eletrônica também minimiza os impactos nas áreas vizinhas. Entre esses impactos estão a mitigação de abalos sísmicos de alta intensidade (vibrações) e a redução da poluição sonora (ruídos).

O uso de espoletas eletrônicas também proporciona maior flexibilidade na definição dos tempos de detonação, além de oferecer uma segurança maior ao sistema pirotécnico, graças à sua precisão e à ampla gama de tempos programáveis (0 a 8.000 m/s), logo, essas características permitem ajustar o plano de fogo para diferentes cenários. Programas de simulação de desmonte possibilitam a programação dos retardos adequados, permitindo visualizá-los em diversas velocidades. Isso facilita a antecipação de possíveis correções ou modificações na sequência de detonação previamente estabelecida, além de identificar erros de projeto. Dessa forma, os riscos no manuseio de explosivos são reduzidos, garantindo a segurança dos envolvidos, já que o sistema de detonação é controlado eletronicamente, tanto no tempo quanto na minimização de possíveis falhas operacionais (PONTES *et al.*, 2016).

4.3 Barreiras de amortecimento

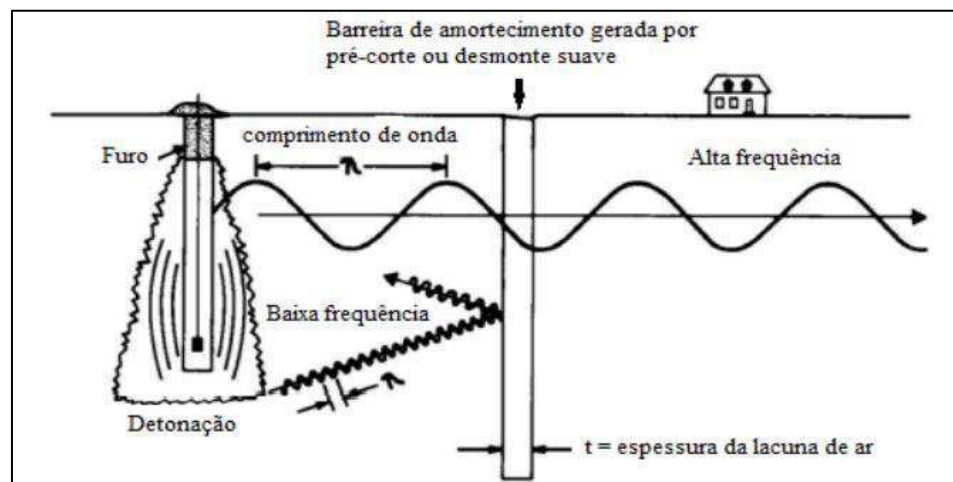
De acordo com Silva (2005), a técnica das barreiras de amortecimento envolve a criação de barreiras artificiais em uma área específica do terreno, com o objetivo de reduzir a intensidade das vibrações geradas pelo desmonte de rochas. Como essa técnica atua no meio de propagação das ondas sísmicas, ela é classificada como um método de controle indireto.

Quando as vibrações atingem as barreiras, parte da energia é dissipada e refletida no maciço, devido ao contraste de impedância acústica entre a zona fragmentada e o maciço rochoso. Segundo Silva (2005), a quantidade de energia dissipada depende diretamente da relação entre a rigidez acústica do maciço rochoso e a do ar ou água.

A redução da intensidade das ondas geradas durante o desmonte depende, entre outros fatores, do diâmetro dos furos, da distância entre as linhas e da localização da barreira em relação à fonte ou à estrutura a ser protegida. Essas barreiras podem ser formadas por furos vazios, preenchidos com água ou por linhas de pré-corte, que atuam diretamente na interface entre a rocha e o material de preenchimento, diminuindo a intensidade das ondas devido ao contraste de impedância acústica entre os meios de propagação (SILVA, 2005).

As técnicas de pré-corte e de desmonte suave (*Smooth blasting*), comumente usadas como método de desmonte de contorno, também podem ser classificadas como barreiras de amortecimento, pois permitem criar uma fratura vertical plana que separa o bloco detonado do restante do maciço rochoso. Mesmo que essa fratura tenha uma espessura mínima, na ordem de milímetros, ela forma uma barreira de ar que reflete a maior parte das ondas de baixa frequência, em função do contraste de impedância acústica entre os meios, conforme mostrado na Figura 18 (SILVA, 2005).

Figura 18 - Efeito exagerado da barreira de amortecimento em ondas de baixa frequência

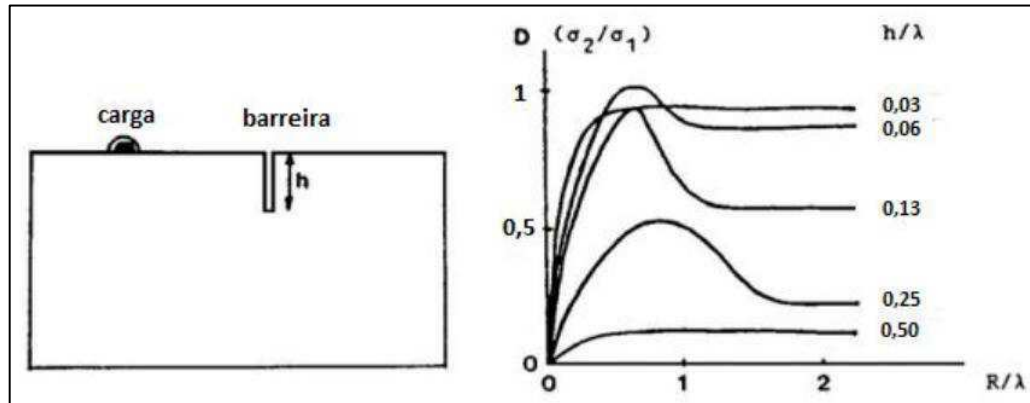


Fonte: Adaptado de Silva (2005).

Persson *et al.* (1993) analisou os fatores de redução da intensidade das ondas por meio de barreiras de amortecimento (D), considerando diferentes distâncias (R), profundidades de cavidade (h) e comprimentos de onda (λ). Os resultados dessa pesquisa estão ilustrados na Figura 19. Os dados indicam que o maior nível de amortecimento foi obtido quando as barreiras foram construídas a distâncias iguais ou menores que o comprimento de onda. Além

disso, o autor ressalta que o amortecimento é mais eficaz quando a profundidade da barreira é significativamente menor do que o comprimento de onda.

Figura 19 - Fator de amortecimento em função da distância, altura da barreira e comprimento de onda.



Fonte: Persson *et al.* (1993)

Para maximizar o nível de amortecimento, a barreira deve ser posicionada dentro da zona de deformação residual gerada pela detonação da carga. Essa zona corresponde à área do terreno que se encontra no limite de atuação do explosivo, além da qual o meio permanece inalterado. As características do maciço, o tipo de explosivo e a razão de carga são fatores determinantes para definir essa área de deformação residual (SILVA, 2005).

5. ESTUDOS DE CASO E DISCUSSÕES

Neste tópico serão apresentados os resultados dos estudos de caso selecionados e as discussões acerca da sua eficiência e aplicabilidade nas áreas de estudo como forma de mitigar os efeitos causados pela vibração gerada a partir do desmonte de rochas com uso de explosivos.

5.1 CONTROLE DE VIBRAÇÕES E PRESSÃO ACÚSTICA NO DESMONTE DE ROCHAS COM EXPLOSIVOS: ESTUDO DE CASO EM UMA MINA DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO

A mina em estudo está situada a sudeste de Belo Horizonte, próxima da zona urbana e encaixada na porção leste do Quadrilátero Ferrífero, Estado de Minas Gerais, Brasil, conforme apresentado no mapa de localização da Figura 20.

Figura 20 - Localização da mina em estudo



Fonte: Silveira (2017)

As campanhas de monitoramento foram realizadas em pontos estratégicos, incluindo parte da área de lavra, a região situada entre a lavra e a comunidade, e dentro da própria comunidade. As fontes de vibração monitoradas foram 10 detonações de teste, utilizando o explosivo tipo emulsão.

O monitoramento foi realizado com o uso de 20 sismógrafos da marca GEOSONICS®, modelo SSU 3000 EZ+. Esses sismógrafos foram configurados com limites de sensibilidade (*trigger*) variando de 0,32 a 1,02

mm/s para vibração e de 112 a 116 dB para pressão acústica, além de janelas temporais de 5 a 8 segundos, ajustadas conforme a localização do equipamento. Isso garantiu que fatores como o trânsito de pedestres, a passagem de veículos ou a distância entre os pontos de monitoramento e as detonações não interferissem nos registros. Os sismógrafos foram equipados com geofones e três transdutores posicionados de forma triortogonal (longitudinal, transversal e vertical) e um microfone, permitindo a captação tanto da velocidade de vibração de partículas quanto da pressão acústica.

Figura 21 e 22 – Alocação dos sismógrafos



Fonte: Silveira (2017)

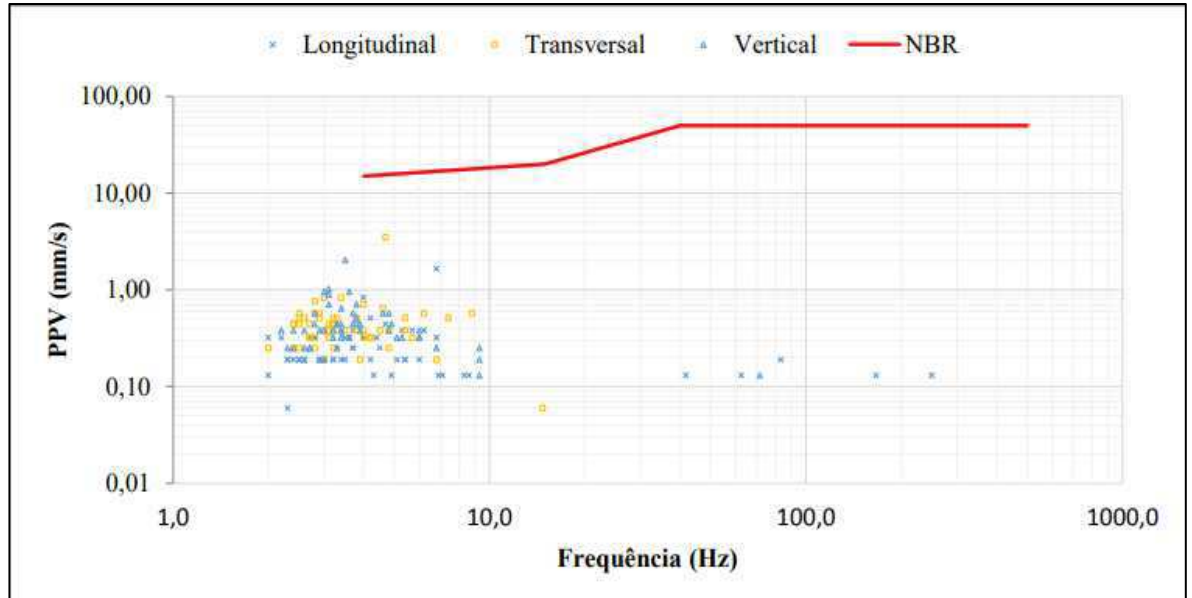
5.1.1 Avaliação dos possíveis danos e incômodo humano com os planos de fogo comumente utilizados na mina

Com base nos registros sismográficos de vibração e pressão acústica coletados durante o monitoramento, Silveira (2017) comparou esses dados com as normas e padrões de admissibilidade apresentados na revisão da literatura. É importante destacar que as cargas explosivas máximas por espera utilizadas nos desmontes do teste mantiveram-se dentro da faixa utilizada nos desmontes de produção de 1.475 kg de explosivo.

Utilizando os valores de velocidade de pico das partículas e suas frequências associadas, Silveira (2017) elaborou gráficos de dispersão que compararam esses dados com os valores de referência das normas NBR 9653 (Figura 23) e NP 2074 (Figura 24). Para a confecção dos gráficos, foram considerados apenas os registros dos pontos de

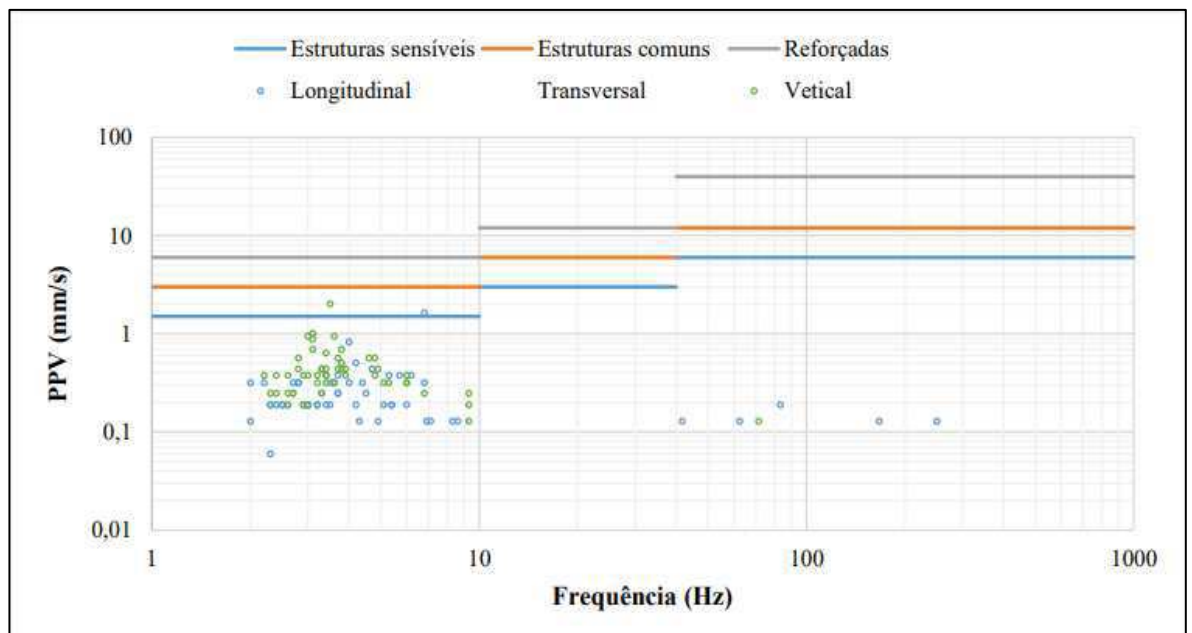
monitoramento localizados na comunidade, ou seja, fora dos limites do empreendimento mineiro, conforme recomendado pelas normas.

Figura 23 - Dispersão dos valores de PPV em comparação com os limites da NBR 9653



Fonte: Silveira (2017)

Figura 24 - Dispersão dos valores de PPV em comparação com os limites da NP2074



Fonte: Silveira (2017)

Segundo os critérios propostos pela NP 2074, estruturas sensíveis como casas antigas poderiam ser afetadas por apenas dois registros de

vibração. O restante dos registros não excedeu os limites admissíveis tanto da NP 2074, como da NBR 9653.

5.1.2 Lei de propagação de vibrações

Com os dados pós-processados do monitoramento realizado neste estudo, utilizou-se o software LABFit® para determinar a lei de propagação das vibrações, considerando a carga máxima por espera Q (kg) e a distância D (m). A aplicação do modelo resultou em um coeficiente de determinação (R^2) de 0,87 (87%), conforme apresentado na equação:

$$v = 900 * Q^{0,27} * D^{-1,29} \quad \text{Equação (7)}$$

A Tabela 9 mostra os parâmetros obtidos pela regressão com seus respectivos desvios padrão.

Tabela 9 - Parâmetros aproximados obtidos pela regressão múltipla para vibrações

Parâmetro	Valor	Desvio Padrão
a	900	$6,40 \times 10^2$
b	0,27	$9,80 \times 10^2$
c	-1,29	$2,80 \times 10^{-2}$

Fonte: Silveira (2017)

O coeficiente de determinação obtido por Silveira (2017) indicou uma boa qualidade da regressão, demonstrando que a variável velocidade de vibração pode ser prevista a partir das variáveis carga máxima por espera e distância. Em litologias intensamente fraturadas, como no caso da área estudada, esse valor é considerado elevado, pois as ondas sísmicas de vibração estão sujeitas a reflexões e sobreposições ao longo do percurso, o que geralmente dificulta a precisão dos modelos de predição.

Conforme previsto pela lei de propagação, observou-se que o aumento da carga máxima por espera resulta em uma vibração maior das partículas do terreno. Em contrapartida, observa-se uma relação inversa para a distância: à medida que a distância aumenta, a vibração das partículas do terreno diminui.

5.1.3 Dimensionamento da carga máxima admissível por espera e do plano de fogo

Com o objetivo de reduzir os possíveis danos causados por detonações nas estruturas da comunidade e minimizar o desconforto gerado à população, foi realizado um estudo para redimensionar a carga máxima por espera a ser utilizada como padrão e definir um plano de fogo base que atenda tanto aos critérios de admissibilidade de vibração e pressão acústica quanto aos de produção. Esse estudo baseou-se em normas que avaliam o dano estrutural e o incômodo humano causado por vibrações e pressão acústica mencionadas anteriormente, nas leis de propagação dessas variáveis e na metodologia descrita, tomando como referência a Equação 6.

É importante destacar que a maioria das normas considera a velocidade máxima de pico de partículas (PPV), em vez das velocidades resultantes de pico da soma vetorial (PVS) das três componentes em um mesmo instante. Contudo, como os tipos de construções variam entre países, foi adotado o PVS, que fornece um valor mais elevado de vibração, de modo a ser mais conservador na análise, o que incorporou ao estudo um fator de segurança adicional no dimensionamento.

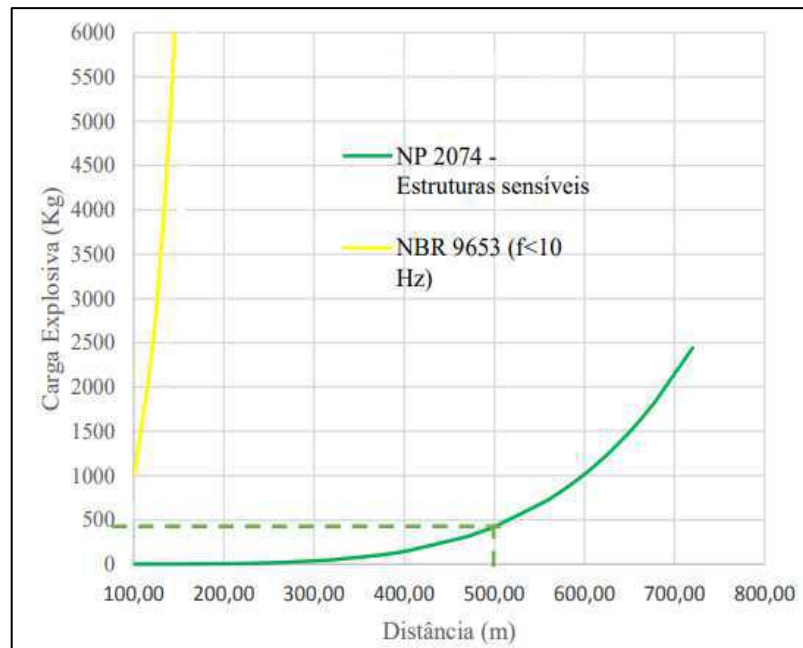
5.1.3.1 Carga máxima admissível por espera segundo avaliação de vibrações em estruturas

Para avaliar a segurança das estruturas da comunidade, SILVEIRA (2017) adotou critérios estabelecidos pela norma Portuguesa NP 2074, aplicáveis a estruturas sensíveis, que são predominantemente encontradas na comunidade. A escolha dessa norma justificou-se por sua atualização recente, em 2015, devido ao rigor técnico e pela consideração das frequências e tipos de estruturas ao definir os limites máximos admissíveis.

Para comparar e avaliar a influência dos valores limites admissíveis de velocidade de vibração no cálculo da carga máxima explosiva por espera, conforme a metodologia adotada neste estudo, as cargas também foram dimensionadas utilizando a norma brasileira (NBR 9653:2005). As Figuras 25 e 26 apresentam uma comparação da carga máxima por espera, expressa em kg e kWh, respectivamente, para as

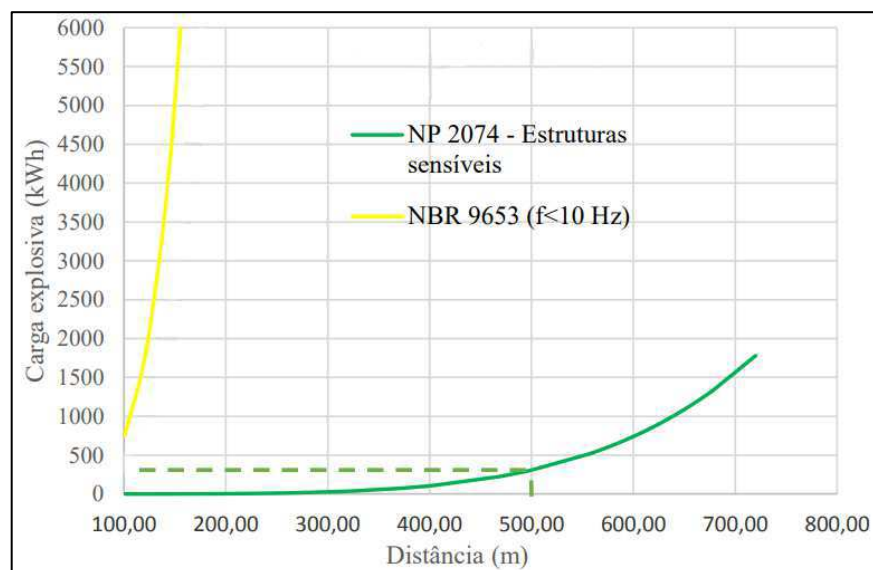
duas normas mencionadas. O uso da unidade da carga máxima por espera em termos de energia (kWh) decorreu da necessidade de torná-la aplicável a qualquer tipo de explosivo, sem restringir ao tipo específico utilizado nas detonações monitoradas.

Figura 25 - Comparação entre as cargas máximas por espera em kg - vibrações em estruturas segundo as normas NP 2074 e NBR 9635



Fonte: Adaptado de Silveira (2017)

Figura 26 - Comparação entre as cargas máximas por espera em kWh – vibrações em estruturas segundo as normas NP 2074 e NBR 9635



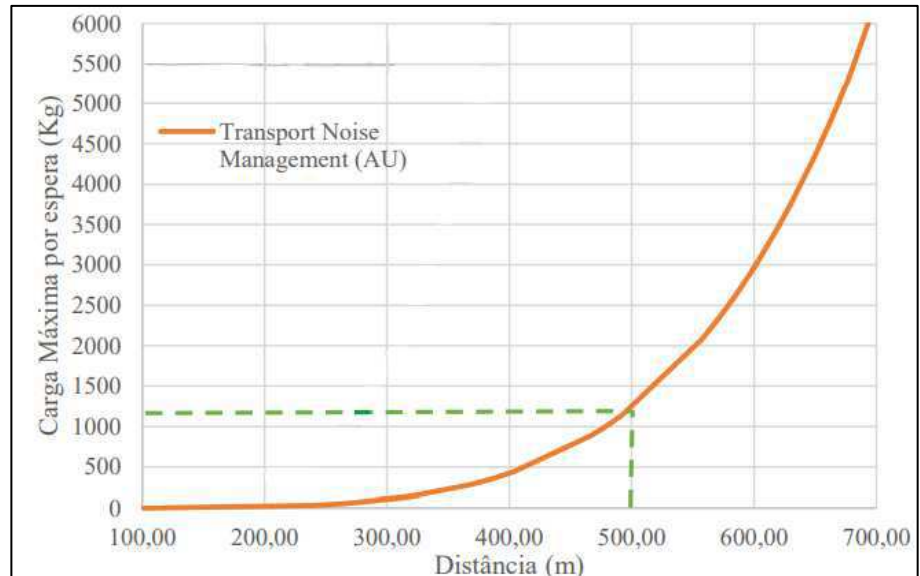
Fonte: Adaptado de Silveira (2017)

Ao analisar os gráficos, Silveira (2017) notou que a carga máxima por espera segundo a NBR 9653 apresentou valores excessivamente elevados para as práticas operacionais de mineração. Em contraste, a norma NP 2074 recomenda uma carga máxima por espera de aproximadamente 307,47 kWh (equivalente a 422 kg de emulsão) para uma distância de 500 metros, que é a distância mínima entre os limites projetados da mina e a comunidade. Assim, para minimizar possíveis danos estruturais causados por vibrações, a carga máxima por espera mais adequada seria aquela calculada com base na NP 2074.

5.1.3.2 Carga máxima admissível por espera segundo avaliação do incômodo humano em relação a vibrações e pressão acústica

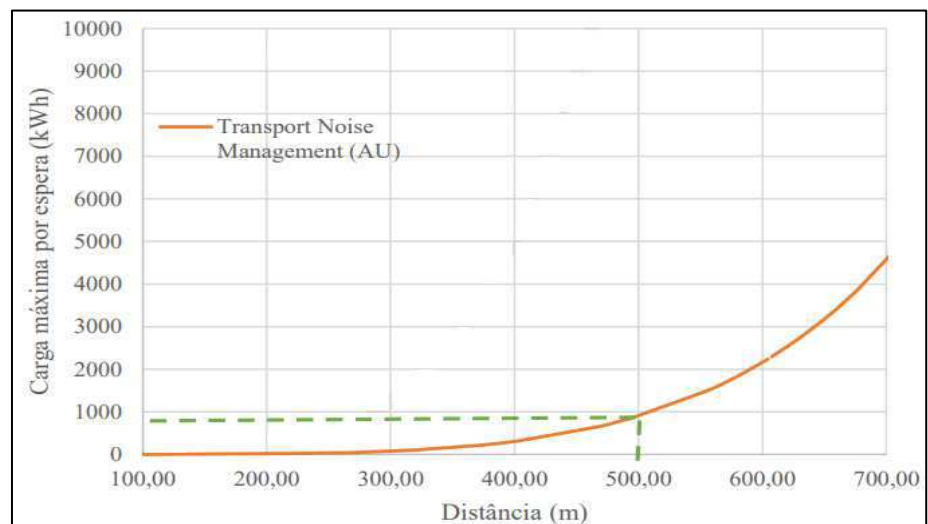
As cargas máximas por espera foram recalculadas com base no *Transport Noise Management Code of Practice*, que é o código de práticas do estado de Queensland, na Austrália, para a avaliação de vibrações e pressão acústica resultantes de detonações. Este código estabelece um limite máximo admissível de 2 mm/s para vibração, devido à presença de construções históricas na comunidade, e de 120 dB para pressão acústica. A escolha desse padrão é justificada pelo fato de que ele é o mais rigoroso em relação ao incômodo humano, considerando tanto o potencial de dano estrutural quanto o desconforto para as pessoas, além de incorporar diretrizes de várias normas internacionais renomadas.

Figura 27 - Carga máxima por espera, em kg, versus distância



Fonte: Adaptado de Silveira (2017)

Figura 28 - Carga máxima por espera, em kWh, versus distância



Fonte: Adaptado de Silveira (2017)

Ao analisar os gráficos das Figuras 27 e 28, SILVEIRA (2017) observou um valor de carga máxima por espera de 899,48 kWh (1.234 kg de emulsão) calculado aplicando o *Transport Noise Management Code of Practice*.

5.1.3.3 Definição da carga máxima por espera

A Tabela 10 apresenta um resumo dos valores de carga máxima por espera sugerido pelo dimensionamento aplicando as distintas normas e padrões de admissibilidade.

Tabela 10 - Resumo dos valores de carga máxima por espera

Norma	Critério	Quantidade de explosivo recomendada	
		Kg	kWh
NP 2074	Vibração de estruturas	422	308
NBR 9653	Vibração de estruturas	2.272.051	1.656.325
Transport Noise Management (AU)	Incômodo humano - estruturas	1.234	899

Fonte: Adaptado de Silveira (2017)

Ao comparar os dimensionamentos de carga máxima por espera com base em diferentes normas e padrões para vibração e pressão acústica, considerando tanto o dano estrutural quanto o incômodo humano, Silveira (2017) verificou que o valor mais adequado a ser adotado é 899,48 kWh, o equivalente a 1.234 kg de emulsão, conforme o padrão *Transport Noise Management Code of Practice*. Este valor correspondeu a aproximadamente cinco furos a serem detonados simultaneamente, dado que a mina geralmente utiliza 250 kg de emulsão por furo. A escolha desse padrão é justificada pelo fato de que ele visa garantir tanto a segurança das estruturas quanto a minimização do incômodo humano em relação às vibrações, além de que esse valor de carga máxima é inferior ao encontrado na avaliação da pressão acústica.

É importante destacar que, de acordo com a norma portuguesa NP 2074 para a avaliação de vibração em estruturas, a carga máxima por espera encontrada foi menor do que a estipulada pelo padrão *Transport Noise Management Code of Practice*. No entanto, a carga de 422 kg de emulsão é mais difícil de ser aplicada nas detonações desta mina, pois geralmente se utiliza 250 kg de explosivo por furo e retardos pirotécnicos convencionais. Devido à imprecisão desses retardos, pode ocorrer o disparo simultâneo de vários furos, ultrapassando assim o valor de carga estabelecido.

Silveira (2017) realizou um estudo que visa minimizar os danos estruturais e o desconforto causados à população por detonações em desmontes de rochas, focando na determinação da carga máxima por espera. Para isso, foram utilizadas normas de diferentes países, como a

NP 2074 e a NBR 9653, além de padrões como o *Transport Noise Management Code of Practice*.

Um dos principais objetivos do estudo foi garantir que as vibrações e a pressão acústica geradas pelas detonações ficassem dentro dos limites aceitáveis, tanto em termos de segurança estrutural quanto de incômodo à população. O estudo destacou a adoção de um critério mais conservador, o PVS, que forneceu valores mais elevados de vibração, aumentando a margem de segurança na análise.

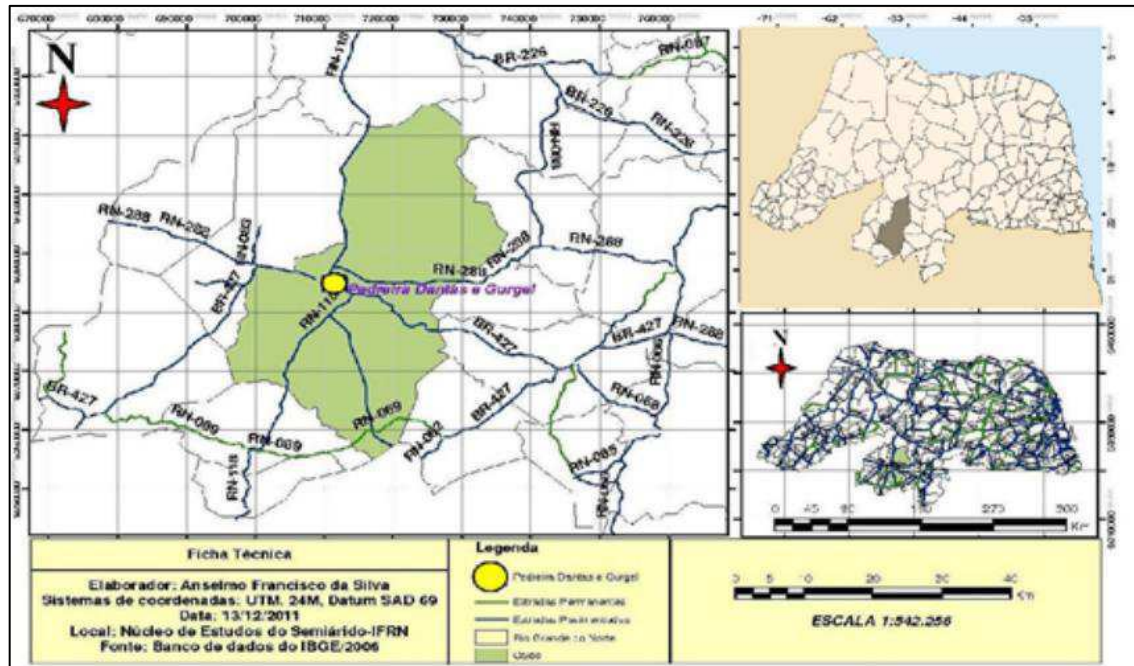
A carga máxima por espera foi comparada entre as normas, também em termos de energia (kWh), com o intuito de tornar possível sua aplicação para qualquer tipo de explosivo, e o valor de 899,48 kWh, o equivalente a 1.234 kg de emulsão, foi o considerado o ideal, conforme o padrão *Transport Noise Management Code of Practice*.

Diante disso, a técnica de controle de vibração por meio da limitação da carga máxima por espera, mostrou-se satisfatória, considerando que os parâmetros prescritos pela NBR 9673 e NP 2074 foram atendidos.

5.2 USO DE ESPOLETA ELETRÔNICA PARA OTIMIZAR O DESMONTE DE ROCHAS COM EXPLOSIVOS E MITIGAR OS IMPACTOS DE VIZINHANÇA

As atividades descritas no trabalho foram realizadas na Mineração Dantas Gurgel & Cia Ltda., uma empresa que utiliza explosivos no processo de desmonte de rochas. A empresa está localizada nas proximidades da zona urbana de Caicó-RN, conforme ilustrado na Figura 29.

Figura 29 - Mapa de localização da Mineração Dantas Gurgel & Cia Ltda



Fonte: Pontes *et al.* (2016)

A empresa Mineração Dantas Gurgel & Cia Ltda., objeto deste estudo, é uma organização privada com uma área de 30 hectares registrada na ANM, dedicada à extração e beneficiamento de rochas graníticas, atuando diretamente no mercado da construção civil. A escolha dessa empresa como foco do estudo se deu em função do uso de explosivos em suas operações de desmonte de maciços rochosos e pela proximidade com a zona urbana, estando situada a menos de 1 km, o que pode gerar impactos na vizinhança.

O planejamento e desmonte da bancada do granito é feito obedecendo a metodologia a seguir:

- Definição da área da bancada a ser desmontada;
- Realização do levantamento topográfico;
- Elaboração da malha de perfuração;
- Perfuração com perfuratriz rotopercussiva pneumática, utilizando furos com diâmetro de 3" e profundidade variando entre 6 e 9 metros, com distâncias de 1,7 de afastamento entre linhas de furos, com espaçamento de 3 metros;
- Avaliação do desvio na malha e perfuração por meio dos softwares Dinacon Soluções em Desmontes e Sistex v.2.0.3;
- O plano de fogo elaborado contempla todos os aspectos essenciais para maximizar o desmonte, incluindo: razão de carga, carga de coluna,

carga de fundo, tampão, tempo de espera, sequência de iniciação e temporização das espoletas eletrônicas, conforme o planejamento do desmonte.

Antes do carregamento dos furos com material explosivo, Pontes *et al.* (2016) realizaram medições de profundidade utilizando uma trena métrica para obter as profundidades reais e verificar possíveis obstruções. Em seguida, a inclinação da bancada foi avaliada com o uso de um inclinômetro, que, por meio de uma sonda (sensor), analisou o desvio da perfuração nos eixos (X, Y, Z) e transferiu as informações para o registrador (SDF). Os dados coletados pelo registrador do inclinômetro foram baixados e analisados no Software SDF.

Os resultados de vibrações evidenciados na Tabela 11 são mensurados pela determinação dos valores máximos para as três componentes da VPP e de frequência de vibração obtidos nos eixos longitudinal (L), vertical (V) e transversal (T) com unidade de medidas determinadas em mm/s, assim como os resultados da sobrepressão acústica, e são os valores considerados permitidos pela norma brasileira, a NBR 9653:2005.

Tabela 11 - Limites de intensidade das frequências de ruídos segundo NBR 9653:2005

Frequência	Limite de VPP	Pressão Acústica
4Hz até 15Hz	Iniciando em 15mm/s até 20mm/s	134dB
15Hz até 40Hz	Iniciando em 20mm/s até 50mm/s	
Acima de 40Hz	50mm/s	

Fonte: Pontes *et al.* (2016)

Os valores de frequência de ruídos analisados por Pontes *et al.* (2016) no Software Sistex v2.03 mostraram que a sobrepressão acústica alcançou 125,67 dB com o uso de linha silenciosa. Com a linha eletrônica, a sobrepressão acústica foi de aproximadamente 121,65 dB. Embora ambos os métodos estejam dentro dos limites de pressão acústica estabelecidos pela ABNT, a linha eletrônica causa menos desconforto acústico.

Na Tabela 12, os valores na coluna referente à linha silenciosa refletem as vibrações decorrentes da detonação com espoleta não elétrica, enquanto a coluna da linha eletrônica apresenta as vibrações geradas pela detonação com espoleta eletrônica.

Tabela 12 - Análise de sismografia da espoleta eletrônica x espoleta não elétrica

Vibração	Linha Silenciosa	Linha Eletrônica
T (mm/s)	1,01	1,05
V (mm/s)	1,19	0,86
L (mm/s)	1,51	0,90
Resultante (mm/s)	1,23	0,93

Fonte: Pontes *et al.* (2016)

Embora os valores de vibração observados durante o desmorte com linha silenciosa estejam dentro dos limites sugeridos pela NBR 9653:2005, Pontes *et al.* (2016) observou que as vibrações resultantes do uso de linha eletrônica são inferiores às geradas pela linha silenciosa. Assim, foi possível concluir que as detonações com linha silenciosa causam mais desconforto à população ao redor em comparação com as realizadas com linha eletrônica.

Com isso, Pontes *et al.* (2016) concluiu que os dados de ruídos sugerem que as detonações realizadas com linha eletrônica possuem características melhores para uso com explosivos, uma vez que os níveis de sobrepressão acústica chegam a ser até 3,2% dB menor, comparados aos níveis de sobrepressão acústica quando utilizada a linha silenciosa.

Em relação aos níveis de vibrações registrados nos eixos transversal, vertical e longitudinal, Pontes *et al.* (2016) notou que a detonação com linha eletrônica mostrou resultados mais satisfatórios quando comparados aos valores de vibrações na detonação realizada com linha silenciosa. A linha eletrônica chegou a gerar aproximadamente 24% menos vibrações que a linha silenciosa durante a detonação. Sobre essa perspectiva, quando as detonações forem realizadas em áreas urbanas, vizinhança ou controlada, Pontes *et al.* (2016) sugerem o uso de linha eletrônica (espoleta eletrônica) como fator mitigador de ruídos e vibrações.

A utilização de espoletas eletrônicas no estudo de Pontes *et al.* (2016) mostrou-se eficaz em relação ao uso da linha silenciosa (não elétrica), porém, os resultados apresentados como diferença entre os dois tipos de acessórios são aproximados, ou seja, não há uma diferença tão relevante que justifique o uso do acessório eletrônico na área de estudo apresentada no texto.

O uso de espoletas eletrônicas no desmonte de rochas apresenta claras vantagens, especialmente em áreas urbanas ou próximas a comunidades, devido à sua capacidade de mitigar vibrações e ruídos, tornando-as uma opção mais segura e menos incômoda. Contudo, essas vantagens devem ser avaliadas considerando o aumento de custos e uma maior complexidade de operação. Em contextos em que a segurança e o bem-estar da população são prioritários, as espoletas eletrônicas mostram-se ideais, enquanto em operações em áreas mais remotas, com menos restrições, os métodos convencionais podem ser mais adequados financeiramente.

5.3 A APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE *SMOOTH* PARA O CONTROLE DE VIBRAÇÕES PRÓXIMO A ÁREAS URBANAS

Costa e Mata (2020) realizaram um estudo em uma mineradora de lavra a céu aberto, localizada em Minas Gerais, cujas instalações e operações encontram-se próximas à área urbana, a aproximadamente 600 metros.

Foi utilizado por Costa e Mata (2020) a técnica de "*smooth blasting*" em conjunto com a coleta de dados sismográficos, com o objetivo de reduzir e monitorar os impactos negativos das ondas geradas pelas detonações nas edificações próximas à mina. Para que o estudo fosse realizado, foi proposto o seguinte projeto: realizar dois desmontes de rochas, utilizando perfurações de $6\frac{3}{4}$ de diâmetro. Na direção voltada para a cidade, foi aplicada a técnica de "*smooth blasting*", com furos em malha mais fechada e metade da carga explosiva. Já na direção oposta, foram usados furos com malha mais aberta e carga de coluna padrão. Conforme indicado na Tabela 13, a seguinte metodologia foi empregada nesses desmontes.

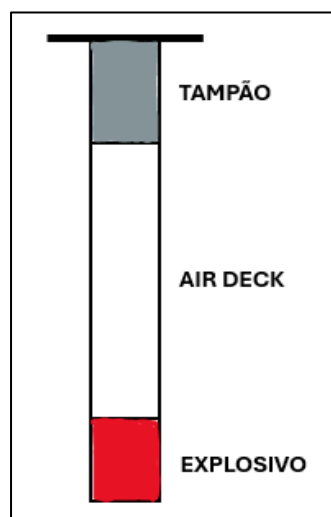
Tabela 13 - Dados do plano de fogo

Parâmetros	Primeiro desmonte	Segundo desmonte
Altura da bancada (m)	12,2	12,3
Malha (m)	4,6 x 5,3	4,6 x 5,3
Smooth (m)	3,2 x 3,7	3,2 x 3,7
Tampão (m)	4,4	4,4
Razão de Carga (kg/t)	275	305
Carga Máxima por Espera (kg)	257	250

Fonte: Costa e Mata (2020)

A técnica de “*smooth blasting*” envolve a criação de duas linhas paralelas de perfuração com malha mais fechada. Os furos são carregados com pequenas quantidades de explosivos, posicionadas nas partes mais profundas. O explosivo é inserido com o auxílio de bolsas de ar (*air deck*), o que gera um plano de fratura vertical na rocha, formando uma barreira adicional que ajuda a amortecer a propagação das ondas sísmicas (COSTA E MATA, 2020). A utilização dos *air decks* aprimora a eficiência dessa técnica, sendo sua disposição no furo ilustrada na Figura 30.

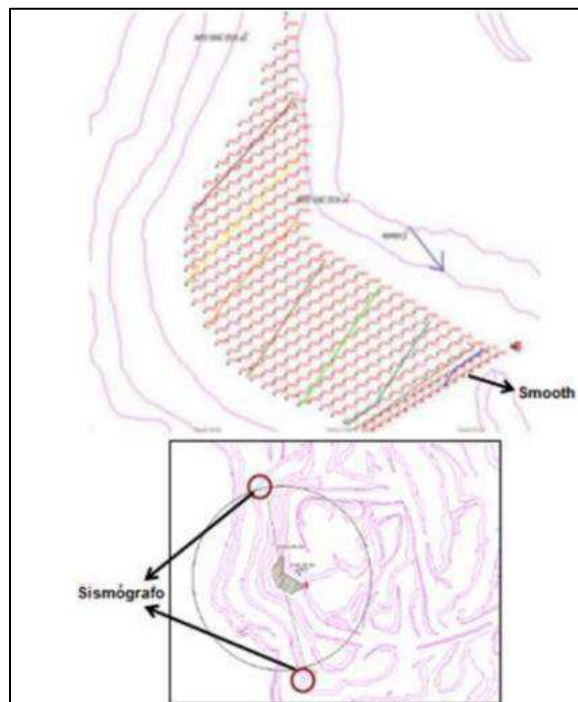
Figura 30 - Estrutura típica de air deck



Fonte: Adaptado de Costa e Mata (2020)

Para monitorar a vibração e a propagação das ondas no local, foi recomendada a instalação de dois sismógrafos da marca Instantel na mina, posicionados a 300 metros do desmorte. Um dos sismógrafos foi instalado na região norte, oposta à cidade, enquanto o outro foi colocado na região sul, voltada para o lado urbano. Durante os dois eventos de desmorte, foram utilizadas espoletas eletrônicas, que permitiram a aplicação de tempos de retardo, liberando um furo de cada vez. Esse procedimento direcionou as ondas geradas pela detonação para a área não urbanizada (Norte), enquanto no lado voltado para a cidade (Sul) foi aplicada a técnica de “*smooth blasting*”. A Figura 31 ilustra o croqui do segundo desmorte com a localização dos sismógrafos.

Figura 31 - Croqui do segundo desmorte com a localização dos dois sismógrafos



Fonte: Adaptado de Costa e Mata (2020)

A disposição dos dois sismógrafos nas posições previamente mencionadas permitiu avaliar a eficácia da técnica ao comparar a redução do PPV registrada pelo sismógrafo posicionado atrás da barreira de amortecimento, ao sul, com os valores obtidos na área ao norte, onde a barreira de amortecimento foi utilizada.

Os resultados do monitoramento das duas detonações realizados por Costa e Mata (2020) estão apresentados na Tabela 14. Os dados indicaram

uma redução significativa nos níveis de vibração, com reduções aproximadas de 72% e 31% nos desmontes 1 e 2, respectivamente, resultando em uma redução média de 51% ao considerar ambos os eventos. Além disso, as vibrações registradas nas edificações próximas foram de aproximadamente 3 mm/s e 2 mm/s para os desmontes 1 e 2, respectivamente. Esses valores ficaram bem abaixo do limite de 15 mm/s estabelecido pela NBR 9653:2005, mesmo nas condições mais desfavoráveis.

O maior valor de PPV foi registrado durante o desmonte 1, na estrutura da primeira casa da cidade, devido à sua maior proximidade com o local da detonação.

Tabela 14 - Registro dos sismógrafos

Desmontes	Região norte (lado oposto da cidade) - 300m	Região sul (lado da cidade) - 300m	Ganho (%)	Primeira casa na cidade
Primeiro desmonte (mm/s)	9,40	5,46	72,16	2,80
Segundo desmonte (mm/s)	14,90	11,40	30,70	2,26

Fonte: Adaptado de Costa e Mata (2020)

O aumento da razão de carga no segundo desmonte gerou um aumento significativo na vibração nos dois lados onde a medição foi realizada, se aproximando do limite permitido estabelecido pela NBR. A utilização da técnica de “*smooth blasting*” por Costa e Mata (2020) mostrou-se eficaz na redução das vibrações sísmicas geradas pelas detonações, especialmente em áreas urbanas (região sul). Apesar da baixa diferença entre os valores de vibração em relação a primeira casa na cidade, a redução média de 51% das vibrações e os baixos níveis registrados confirmaram que a técnica é adequada para desmontes em áreas sensíveis, proporcionando segurança e minimizando os impactos estruturais.

6. CONCLUSÃO

A análise dos estudos evidencia a eficácia das técnicas analisadas para o controle das vibrações e impactos acústicos gerados pelos desmontes de rocha com explosivos.

A técnica de limitação da carga máxima por espera destacou-se como uma das mais eficazes no controle das vibrações, pois permite ajustar a quantidade de explosivo de acordo com as exigências das normas de controle. Além disso, essa técnica pode ser combinada com outros métodos de mitigação, oferecendo maior flexibilidade no controle. Os dados obtidos durante os monitoramentos podem ser integrados ao modelo de lei de atenuação, o que possibilita a otimização do processo de desmonte de rochas, tornando-o mais eficiente e ajustado às condições locais. A técnica foi essencial para manter as vibrações e os níveis de pressão acústica dentro dos parâmetros estabelecidos pelas normas NBR 9356:2005 e NP 2074 na área de estudo, garantindo a segurança estrutural das edificações e o bem-estar da população no entorno do empreendimento mineral.

De maneira análoga, na técnica que utilizou espoletas eletrônicas, observou-se uma diminuição nas vibrações e na pressão acústica, tornando-a uma solução ideal para minimizar os impactos em áreas urbanas. Embora o custo seja mais elevado em comparação com métodos tradicionais, os benefícios em termos de segurança e conforto justificam sua implementação em locais com restrições ambientais e de proximidade com comunidades.

A técnica de barreira de amortecimento também mostrou-se altamente eficaz no controle das vibrações, tornando-se uma boa alternativa na mitigação dos danos provocados pelas vibrações resultantes de detonações com o uso de explosivos, através da técnica de "*smooth blasting*". Entre os principais benefícios dessa abordagem está a atenuação das ondas de baixa frequência e a diminuição da intensidade das vibrações, como demonstrado no estudo de Costa e Mata (2020). Nesse trabalho, a aplicação da técnica mostrou uma redução média de 51% das vibrações, comprovando sua eficiência em áreas sensíveis, como zonas urbanas próximas a mineradoras, apesar da diferença manter-se próxima na área de estudo.

Assim, as diferentes técnicas aplicadas nos estudos demonstraram que é possível alcançar um equilíbrio entre a eficiência operacional e mitigação de

impactos ambientais e estruturais, contribuindo para uma prática de desmonte de rochas mais segura e eficiente.

7. REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS; **Guia para avaliação dos efeitos provocados pelo uso de explosivos nas minerações em áreas urbanas: Procedimento**; NBR 9653. Rio de Janeiro: 12 p., 2005.

BHANDARI, S. **Engineering rock blasting operations**. Department of Mining Engineering, J.N.V. University, Jodhpur; India. A.A. BALKEMA, 1997.

CAMARGOS, Thomás A. **OTIMIZAÇÃO DAS MALHAS DE PERFURAÇÃO POR TIPO DE MATERIAL, EM UMA MINA DE MINÉRIO DE FERRO DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO**. Monografia - Curso de Engenharia de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, p. 55. 2023.

COSTA, Leandro de Vilhena; MATA, Jônatas Franco Campos da. **A aplicação da técnica de *smooth* para o controle de vibrações próximo a áreas urbanas**. Brazilian Journal Of Development. Curitiba, p. 97157-97165. 12 dez. 2020.

DALLORA NETO, Caetano. **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**. 2004. vii, 82 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, 2004.

DORNELES, Felipe T. **Controle e Previsão de Vibrações e Ruídos gerados por Desmonte de Rochas com Explosivos**. Trabalho de conclusão de curso, Universidade Federal do Pampa, Tecnologia em Mineração, v. 96, 2013.

ENAEX. **ANFOMAX. Explosivo granulado**. Disponível em: <<https://www.enaex.com/br/pt/anfomax>. Acesso em: 29/07/2024.

ENAEX. **IBEMUX. Explosivo a granel**. Disponível em: <https://www.enaex.com/br/pt/ibemux-2/>. Acesso em: 07/08/2024.

ENAEX. **IBEGEL. Emulsão encartuchada**. Disponível em: <https://www.enaex.com/br/pt/emulsao-encartuchada/>. Acesso em: 29/07/2024.

ENAEX. **BOOSTER. Reforçador**. Disponível em: <https://www.enaex.com/br/pt/x-booster-3/>. Acesso em: 29/07/2024.

ENAEX. **BRITACORD. Cordel detonante.** Disponível em: <https://www.enaex.com/br/pt/britacord-bg-2/>. Acesso em: 29/07/2024,

FILHO, Alberto J. A. J. **MÉTODOS DE CONTROLE APLICADOS NA MITIGAÇÃO DOS EFEITOS DANOSOS PROVOCADOS PELAS VIBRAÇÕES RESULTANTES DO DESMONTE DE ROCHAS COM USO DE EXPLOSIVOS: UMA REVISÃO.** Trabalho de Conclusão de Curso - Curso de Engenharia de Minas, Universidade Federal do Ceará, p. 73, 2022.

GERALDI, JOSÉ LÚCIO PINHEIRO. **O ABC DAS ESCAVAÇÕES DE ROCHA.** 1ª Edição. Rio de Janeiro: Interciência, 2011.

JIMENO, C. L.; JIMENO, E. L.; GARCÍA, P. **Manual de perforacion y voladura de rocas.** Madrid: Instituto Geologico y Minero de España, 1990. 442 p.

KLEN, André Monteiro. **Aplicação da técnica de simulação para análise da superposição de ondas sísmicas geradas em desmonte de rocha pela dispersão dos tempos de retardo utilizando o método de Monte Carlo.** 2010. 133 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, Departamento de Engenharia de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010.

KONIA, C. J.; Walter, E. J. (2006). **Rock Blasting and Overbreak Control,** U.S. Department of transportation Federal Highway Administration office of implementation. 3a ed. Georgetown Pike, McLean, Virginia.

MARTINHO, José Fernando de Carvalho *et al.* **O uso de explosivos na escavação de túneis: implementação do dimensionamento de diagramas de fogo em folhas de cálculo.** 2012.

MENDES, M. L. **Curso de Desmonte de Rochas por Explosivos – Formação de Blaster,** 2018, Belo Horizonte, 2018.

PERSSON, P. A., HOLMBERG, R. e LEE J. 1994. **Rock blasting and explosives engineering.** CRC Press, Boca Raton, Florida, USA, 540 p.

PONTES, Júlio César de *et al.* **Uso de espoleta eletrônica para otimizar o desmonte de rochas com explosivos e mitigar os impactos de vizinhança.** I Congresso Internacional da diversidade do semiárido. [S.l.], p. 1-11, 2016.

REIS, P. A. dos S. **Otimização de parâmetros geométricos em diagramas de fogo para desmonte a céu aberto.** Dissertação de mestrado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2016.

SANDVIK. Surface top hammer drill rigs; Ranger™ DX800. Disponível em: <https://www.rocktechnology.sandvik/en/products/equipment/surface-drill-rigs/ranger-dx800-surface-top-hammer-drill-rig>. Acesso em 07/08/2024.

SILVA, Luis Antônio Abadi e. **Estudo da efetividade de barreiras de amortecimento no controle de vibrações geradas pelo desmonte com explosivos em mina de carvão a céu aberto.** 2005. 128 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Tecnologia Mineral e Metalurgia Extrativa, Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Engenharia de Minas da UFRGS, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

SILVA, Ranyere Sousa. **Predição da vibração de partículas no desmonte de rochas utilizando aprendizado de máquina.** Monografia (MBA em Data Science e Analytics) - Programa de Educação Continuada em Engenharia da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2022.

SILVA, Valdir Costa e. **Curso de min 112–Operações mineiras.** Ouro Preto: Departamento de Engenharia de Minas - UFOP, 2014.

SILVA, Valdir Costa e. **Curso de min 210–Operações mineiras.** Ouro Preto: Departamento de Engenharia de Minas - UFOP, v. 20, 2009.

SILVA, Valdir Costa e. **Desmonte de rochas.** São Paulo: Oficina de Textos, 2019.

SILVA, Valdir Costa e. **Perfuração de Rochas.** Curso de Especialização em Sistemas Minerometalúrgicos. Ouro Preto, 2006.

SILVEIRA, Leandro Geraldo Canaan. **Controle de vibrações e pressão acústica no desmonte de rochas com explosivos: estudo de caso em uma mina do quadrilátero ferrífero.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto, Escola de Minas. Departamento de Engenharia de Minas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral. Ouro Preto-MG: Engenharia Mineral, 2017. 138p.

VOGT, W e SINGH P. K. 1998. **Ground vibration: prediction for safe and efficient blasting.** ERZMETALL 51, N° 10, p. 677 – 684.