



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS



DANIEL MALTA CONCEIÇÃO

**TECNOLOGIAS DE DESMONTE DE ROCHAS COM EXPLOSIVOS:
CONTRIBUIÇÕES PARA A EFICIÊNCIA OPERACIONAL,
SUSTENTABILIDADE E AGREGAÇÃO DE VALOR NA MINERAÇÃO**

Ouro Preto
2026

DANIEL MALTA CONCEIÇÃO

**TECNOLOGIAS DE DESMONTE DE ROCHAS COM EXPLOSIVOS:
CONTRIBUIÇÕES PARA A EFICIÊNCIA OPERACIONAL,
SUSTENTABILIDADE E AGREGAÇÃO DE VALOR NA MINERAÇÃO**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Engenheiro de Minas.

Orientador: Prof. José Margarida da Silva, Ph.D.

**Ouro Preto
2026**



FOLHA DE APROVAÇÃO

Daniel Malta Conceição

Tecnologias de desmonte de rochas com explosivos: contribuições para a eficiência operacional, sustentabilidade e agregação de valor na mineração

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Minas da Universidade Federal

de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Minas

Aprovada em 27 de julho de 2026

Membros da banca

Doutor - José Margarida da Silva - Orientador- Universidade Federal de Ouro Preto

Doutor - Carlos Enrique Arroyo Ortiz - Universidade Federal de Ouro Preto

Mestre - Itamar Luiz de Oliveira Junior

José Margarida da Silva, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 12/08/2026



Documento assinado eletronicamente por **Jose Margarida da Silva, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 12/08/2026, às 15:40, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1160646** e o código CRC **9001924E**.

Este trabalho é dedicado à minha amada Madrinha
Maria José Alves Conceição (in memoriam).

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente a Deus, por não me deixar desistir e me permitir chegar até aqui.

Agradeço a meus pais José Alves Conceição Filho, Cristina de Oliveira Malta e minha madrinha Maria José Alves Conceição (in memorian), por todo o amor, apoio, ajuda e suporte durante toda esta jornada.

Gostaria de agradecer a meus irmãos de sangue Tomás, Arthur, Matheus e Gabriel por todas as palavras, crença e inspiração. Agradeço imensamente aos irmãos que Ouro Preto me deu Mauro Roza Machado Filho e principalmente a André Fonseca Amâncio que por inúmeras vezes me guiou e me iluminou no caminho até aqui.

Gostaria de agradecer as amigas que fiz neste período Nathália, Letícia, Clara e Jéssica por todo carinho, apoio e suporte, sem as quais esta jornada não teria sido a mesma.

Por fim, mas não menos importante gostaria de agradecer a todos os professores pelos quais me encontrei pela Universidade, principalmente aos professores do DEMIN e DEGEO; Especialmente aos Professores José Margarida da Silva e Carlos Alberto Pereira pela lembrança, por me ajudarem e acreditarem na conclusão deste trabalho.

*Out of the night that covers me,
Black as the pit from pole to pole,
I thank whatever gods may be
For my unconquerable soul.*

*In the fell clutch of circumstance
I have not winced nor cried aloud.
Under the bludgeonings of chance
My head is bloody, but unbowed.*

*Beyond this place of wrath and tears
Looms but the Horror of the shade,
And yet the menace of the years
Finds and shall find me unafraid.*

*It matters not how strait the gate,
How charged with punishments the scroll,
I am the master of my fate,
I am the captain of my soul.*

— WILLIAM ERNEST HENLEY
Invictus (1875)

RESUMO

O presente trabalho realiza uma revisão bibliográfica sobre o estado da arte das tecnologias aplicadas ao desmonte de rochas com explosivos na mineração, com o objetivo de analisar como essas tecnologias podem contribuir para a agregação de valor às operações minerárias. A motivação do estudo está relacionada ao aumento das exigências ambientais, à expansão das áreas urbanas próximas às minerações e à necessidade de aprimorar os processos de fragmentação de rochas, reduzindo impactos ambientais e aumentando a eficiência operacional. A pesquisa caracteriza-se como exploratória e de natureza bibliográfica, sendo desenvolvida por meio da análise de artigos científicos, livros, guia técnico, dissertações e teses, nacionais e internacionais, relacionados ao desmonte de rochas, impactos ambientais e tecnologias de detonação. Foram abordados temas relacionados à caracterização tecnológica das rochas, perfuração, explosivos industriais, monitoramento de vibrações e tecnologias emergentes aplicadas às operações de desmonte em minas a céu aberto e subterrâneas. Os resultados evidenciam que a adoção de tecnologias modernas contribui para a melhoria da fragmentação das rochas, redução da diluição do minério, aumento da produtividade das operações de perfuração e lavra, maior controle das detonações e mitigação dos impactos ambientais associados aos desmontes. Verificou-se também que ferramentas de monitoramento, modelagem computacional e métodos preditivos auxiliam no controle de vibrações do solo, sobrepressão atmosférica, projeção de rochas e demais impactos capazes de afetar estruturas, trabalhadores e comunidades do entorno. Conclui-se que a utilização adequada dessas tecnologias promove ganhos em produtividade, segurança operacional, sustentabilidade ambiental e conformidade regulatória, além de contribuir para a redução de custos, melhoria do relacionamento com a sociedade e aumento da agregação de valor nas operações de mineração.

Palavras-chaves: Desmonte de rochas, detonação, mineração, tecnologias de detonação, vibração do solo, sustentabilidade, agregação de valor.

ABSTRACT

This study presents a literature review on the state of the art of technologies applied to rock blasting with explosives in mining, aiming to analyze how these technologies can contribute to value creation in mining operations. The motivation for the study is related to increasing environmental requirements, the expansion of urban areas near mining sites, and the need to improve rock fragmentation processes while reducing environmental impacts and increasing operational efficiency. The research is characterized as exploratory and bibliographic, based on the analysis of scientific papers, books, technical guide, dissertations, and theses addressing rock blasting, environmental impacts, and blasting technologies. Topics such as rock characterization, drilling, industrial explosives, vibration monitoring, and emerging blasting technologies in open-pit and underground mines were investigated. The results indicate that the adoption of modern technologies contributes to improved rock fragmentation, reduced ore dilution, increased drilling and mining productivity, better blasting control, and mitigation of environmental impacts associated with blasting operations. Monitoring tools, computational modeling, and predictive methods were also found to support the control of ground vibrations, air overpressure, flyrock, and other impacts that may affect structures, workers, and nearby communities. It is concluded that the proper use of these technologies promotes gains in productivity, operational safety, environmental sustainability, and regulatory compliance, while contributing to cost reduction, improved community relations, and increased value generation in mining operations.

Key-words: Rock blasting, blasting technology, mining, ground vibration, environmental impacts, sustainability, value creation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Princípio de funcionamento de uma perfuratriz percussiva. Fonte: Adaptado de Zhang (2016), reproduzido por Oliveira Júnior (2022).	7
Figura 2 – Alguns tipos de malhas: (A) quadradas (B) retangulares (C) estagiadas (pé de galinha). Fonte: Adaptado de (SILVA, 2019)	8
Figura 3 – Efeito das colunas de ar para melhorar distribuição de energia. Fonte: Adaptado de (KABWE, 2019)	13
Figura 4 – Imagens da bolsa de gás e do bujão VARISTEM para colunas de ar. Fonte: Adaptado de (ROY, 2021)	13
Figura 5 – Exemplo de detonador eletrônico. Fonte: (JUNIOR, 2022).	15

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Caracterização quantitativa das referências utilizadas no trabalho.	37
Tabela 2 – Distribuição temporal das referências utilizadas no trabalho.	37
Tabela 3 – Quadro de vantagens e agregação de valor para operação.	38
Tabela 4 – Quadro de desvantagens e agregação de valor para operação.	40

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANFIS	<i>Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System</i> (Sistema Neuro-Fuzzy Adaptativo)
ANFO	<i>Ammonium Nitrate Fuel Oil</i> (Nitrato de Amônio e Óleo Combustível)
ANN	<i>Artificial Neural Networks</i> (Redes Neurais Artificiais)
BCA	<i>Bee Colony Algorithm</i> (Algoritmo de Colônia de Abelhas)
BEV	<i>Battery Electric Vehicle</i> (Veículo Elétrico a Bateria)
DTH	<i>Down The Hole</i> (Martelo de Fundo de Furo)
ECR	<i>Effective Casting Ratio</i> (Razão Efetiva de Lançamento)
FMS	<i>Fleet Management Systems</i> (Sistemas de Gestão de Frotas)
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i> (Sistema Global de Navegação por Satélite)
IA	Inteligência Artificial
NBR	Norma Brasileira
PPV	<i>Peak Particle Velocity</i> (Velocidade de Pico de Partícula)
PSO	<i>Particle Swarm Optimization</i> (Otimização por Enxame de Partículas)
SLAM	<i>Simultaneous Localization and Mapping</i> (Localização e Mapeamento Simultâneos)
UCS	<i>Uniaxial Compressive Strength</i> (Resistência à Compressão Uniaxial)
XRF	<i>X-Ray Fluorescence</i> (Fluorescência de Raios-X)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Justificativa do trabalho	2
1.2	Estrutura do trabalho	3
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1	Caracterização do maciço rochoso	4
2.1.1	<i>Classificação</i>	4
2.1.2	<i>Caracterização Tecnológica</i>	5
2.2	Perfuração de Rochas	6
2.3	Malhas para Pedreiras	8
2.4	Explosivos Industriais	8
2.5	Sismografia	9
2.6	Desmonte de rochas com o uso de explosivos	10
2.6.1	<i>Desmonte de rocha a frio</i>	10
2.6.2	<i>Desmonte de rocha a fogo</i>	11
2.7	Tecnologias aplicadas ao desmonte de rochas	12
2.7.1	<i>Detonação com colunas de ar</i>	12
2.7.2	<i>Sistemas Não Elétricos de Iniciação</i>	14
2.7.3	<i>Detonadores Eletrônicos</i>	15
2.7.4	<i>Softwares para Planejamento e Simulação de Desmontes</i>	16
2.7.5	<i>Detonação para Lançamento de Estéril</i>	17
2.7.6	<i>Detonação em galerias ou túneis</i>	18
2.7.7	<i>Detonação por Plasma</i>	19
2.7.8	<i>Detonação para Separação de Materiais</i>	20
2.7.9	<i>Abatimento Induzido por Detonação</i>	22
2.7.10	<i>Drones Aplicados ao Desmonte de Rochas</i>	23
2.7.11	<i>Separação de Minérios</i>	25
2.8	Mineração Subterrânea e Aplicação de Tecnologias	27
2.9	Desvantagens	28
2.9.1	<i>Impactos ambientais das detonações</i>	28
2.9.2	<i>Vibração do solo</i>	29
2.9.3	<i>Sobrepresão atmosférica</i>	30
2.9.4	<i>Projeção de Rocha</i>	31
2.9.5	<i>Impactos na qualidade do ar, fauna e flora</i>	31
2.9.6	<i>Relacionamento com a comunidade e segurança operacional</i>	32
2.10	Estudos em desmonte de rochas	32

3	OBJETIVO	35
3.1	Objetivo geral	35
3.2	Objetivos específicos	35
4	METODOLOGIA	36
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	38
5.1	Resultados	38
5.2	Quadro de vantagens e agregação de valor para operação	38
5.3	Quadro de desvantagens e agregação de valor para operação	40
5.4	Discussão	41
5.5	Lacunas e Tendências	42
6	CONCLUSÕES	45
	REFERÊNCIAS	47

1 INTRODUÇÃO

Com o aumento das exigências ambientais, a expansão das áreas urbanas próximas às minerações, a necessidade de aprimorar os processos de fragmentação de rochas, reduzindo impactos ambientais e aumentando a eficiência operacional; a correta e adequada utilização de tecnologias promove ganhos em produtividade, segurança operacional, sustentabilidade ambiental, conformidade regulatória, além de contribuir para a redução de custos, melhoria do relacionamento com a sociedade e aumento da agregação de valor nas operações de mineração. A técnica de desmonte de rochas com o uso de explosivos ([FERREIRA, 2015](#)) é amplamente utilizada em diferentes atividades que envolvem a escavação ou fragmentação de maciços rochosos. Na mineração, é empregada tanto em minas a céu aberto quanto em minas subterrâneas para a extração de minérios metálicos, não metálicos e energéticos. Nas pedreiras, destinadas principalmente à produção de agregados para a construção civil e rochas ornamentais, o desmonte constitui uma das principais etapas do processo produtivo. Já na engenharia civil, essa técnica é aplicada em obras como túneis, rodovias, ferrovias, barragens e fundações, devido à sua elevada eficiência na fragmentação de maciços rochosos. Dentre as formas clássicas de desmonte de rochas, destacam-se os métodos a frio (mecânicos) e a fogo (por explosivos). Nas operações de pedreira, por exemplo, o desmonte consiste na perfuração de várias fileiras de furos de detonação quase paralelas à face livre da bancada ([ARMAGHANI et al., 2015](#)). O desmonte com explosivos tem se destacado principalmente em situações em que outros métodos não apresentam energia suficiente para a desagregação da rocha ou não oferecem níveis adequados de produtividade e eficiência operacional ([SANTOS, 2023](#)).

Entretanto, em determinadas condições geológicas e operacionais, especialmente na mineração subterrânea, existem métodos que dispensam o uso de explosivos. Destacam-se a lavra por *longwall*, amplamente empregada na extração mecanizada de carvão, e a utilização de mineradores contínuos (*continuous miners*), capazes de realizar simultaneamente o corte, o carregamento e o transporte inicial do material escavado. Embora essas tecnologias proporcionem elevada produtividade e reduzam a necessidade de detonações, sua aplicação é restrita a condições geológicas específicas, não sendo adequada para todos os tipos de maciços rochosos. Dessa forma, o desmonte com explosivos permanece como a principal técnica empregada na maior parte das operações de mineração devido à sua versatilidade e ampla aplicabilidade ([National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2018](#); [PENG et al., 2019](#)).

Com o surgimento de novos modelos computacionais, tecnologias de monitoramento e produtos aplicados às operações de detonação, é comum encontrar autores como ([IRAMINA et al., 2018](#)) afirmando que o desmonte com explosivos continuará sendo a técnica preferida nas próximas décadas, devido ao constante desenvolvimento da área por meio de novos estudos de projeto e aprimoramento dos explosivos industriais. Além disso, essa técnica é considerada

de baixo custo relativo quando comparada a outros métodos de desmonte. Entre os principais benefícios obtidos com a adoção dessas tecnologias destacam-se a redução da contaminação média, a melhoria da fragmentação da rocha, a diminuição da propagação de material indesejado e o aumento da produtividade das operações de perfuração. Esses benefícios podem gerar impactos positivos em diferentes etapas da cadeia produtiva da mineração, contribuindo para a agregação de valor por meio da redução de custos operacionais, aumento da produtividade, melhoria da segurança e diminuição dos impactos ambientais.

No entanto, apesar de serem considerados métodos confiáveis e economicamente viáveis, os desmontes com explosivos precisam lidar com importantes impactos ambientais e operacionais (IRAMINA et al., 2018). Entre os principais impactos destacam-se a sobrepressão atmosférica, a vibração do solo, a projeção de rochas (*flyrock*) e a retroquebra (*back-break*) ao redor da zona de detonação, os quais podem causar danos a estruturas, comprometer a segurança operacional e gerar conflitos com as comunidades localizadas no entorno das minerações (MONJEZI; DEHGHANI, 2008; FISNE et al., 2011; ARMAGHANI et al., 2014a; HAJIHASSANI et al., 2014; EBRAHIMI et al., 2015; ARMAGHANI et al., 2015). Diversos estudos têm demonstrado que as abordagens empíricas tradicionalmente utilizadas para prever esses impactos apresentam limitações de precisão, principalmente em cenários geológicos complexos, motivando o desenvolvimento de métodos baseados em inteligência artificial, redes neurais artificiais, sistemas neuro-fuzzy e técnicas híbridas de otimização para previsão de vibrações, *flyrock*, sobrepressão atmosférica e fragmentação de rochas (ARMAGHANI et al., 2014a; HAJIHASSANI et al., 2014; EBRAHIMI et al., 2015; ARMAGHANI et al., 2015). Nesse contexto, a adoção de tecnologias voltadas ao monitoramento e à modelagem preditiva dos desmontes pode ser considerada uma importante estratégia para agregar valor às operações de mineração, uma vez que contribui para o aumento da produtividade, melhoria da fragmentação, redução dos impactos ambientais, maior segurança operacional e diminuição dos conflitos com as populações do entorno.

1.1 Justificativa do trabalho

Com o crescimento da ocupação urbana, muitas áreas de mineração passaram a estar cada vez mais próximas de comunidades e centros urbanos, tornando as operações de desmonte de rochas com explosivos um importante desafio técnico, ambiental e social. Esse cenário fez com que as regulamentações relacionadas aos impactos ambientais provocados pelas detonações se tornassem mais rigorosas, especialmente no que se refere às vibrações do solo, sobrepressão atmosférica, ruídos e lançamento de fragmentos rochosos. Dessa forma, o controle e o monitoramento desses impactos tornaram-se fundamentais para garantir a sustentabilidade das operações minerárias e minimizar conflitos entre as empresas de mineração e as comunidades localizadas no entorno das áreas de detonação.

Nesse contexto, aprimoramentos nos projetos de detonação e a utilização de novas tecnologias somente podem ser considerados sustentáveis quando associados a métodos precisos

e confiáveis de monitoramento e previsão dos impactos gerados pelas detonações (IRAMINA et al., 2018). Nas últimas décadas, a adoção de novas tecnologias aplicadas ao desmonte de rochas possibilitou a realização de detonações mais eficientes, seguras e consistentes, além do desenvolvimento de modelos preditivos capazes de simular os impactos das vibrações e otimizar os parâmetros operacionais. Assim, o estudo dessas tecnologias torna-se relevante por permitir compreender como a maximização dos benefícios e a mitigação dos impactos das detonações podem contribuir para a agregação de valor às operações de mineração, promovendo ganhos em produtividade, segurança operacional, sustentabilidade ambiental e relacionamento com as comunidades do entorno.

1.2 Estrutura do trabalho

O presente trabalho está estruturado em seis capítulos.

O Capítulo 1 apresenta a introdução, na qual são abordados a contextualização do tema, a justificativa da pesquisa e sua relevância para a mineração.

O Capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica, contemplando os principais conceitos relacionados ao desmonte de rochas com explosivos, às tecnologias aplicadas às operações de perfuração e detonação, aos impactos ambientais associados às detonações e ao estado da arte das tecnologias discutidas na literatura.

O Capítulo 3 apresenta os objetivos do trabalho, descrevendo o objetivo geral e os objetivos específicos que orientaram o desenvolvimento da pesquisa.

O Capítulo 4 é apresenta a metodologia utilizada para o desenvolvimento da pesquisa

O Capítulo 5 apresenta a discussão dos resultados obtidos a partir da revisão bibliográfica, relacionando as vantagens e desvantagens das tecnologias de desmonte com a agregação de valor às operações de mineração por meio de quadros comparativos e análise crítica da literatura.

Por fim, o Capítulo 6 apresenta as conclusões do trabalho, destacando os principais resultados obtidos, o atendimento aos objetivos propostos, as contribuições da pesquisa e sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A mineração envolve uma série de processos técnicos e operacionais que demandam conhecimento detalhado das características do maciço rochoso, dos métodos de perfuração e desmonte e dos impactos ambientais associados às atividades de lavra. Nesse contexto, a caracterização tecnológica das rochas é fundamental para avaliar propriedades físicas, mecânicas e mineralógicas que influenciam diretamente no desempenho operacional e na estabilidade das estruturas geotécnicas. Além disso, a seleção adequada dos equipamentos de perfuração, das malhas de desmonte e dos explosivos industriais contribui para a eficiência das operações, segurança dos trabalhadores e otimização da fragmentação do material rochoso (GERALDI, 2011; BARBOSA, 2023). A utilização de explosivos representa uma das principais técnicas empregadas no desmonte de rochas devido ao baixo custo operacional e à elevada eficiência na fragmentação de diferentes tipos de minérios, tornando-se indispensável nas operações modernas de mineração (PONTES, 2013; FERREIRA, 2015).

Entretanto, quando executado sem planejamento adequado, o desmonte com explosivos pode gerar diversos impactos ambientais e sociais, como vibrações do solo, emissão de ruídos, ultralancamento de fragmentos e geração de poeira, afetando tanto os trabalhadores quanto as populações situadas no entorno das áreas mineradas (PONTES, 2013; FERREIRA, 2015). Dessa forma, torna-se necessário o monitoramento contínuo das vibrações por meio de sismógrafos e técnicas de controle do plano de desmonte por explosivo, visando reduzir danos estruturais e minimizar desconfortos à comunidade (PEREIRA, 2018; BARBOSA, 2023). Paralelamente, a gestão das barragens de rejeitos também se destaca como um importante desafio da mineração contemporânea, devido aos riscos ambientais associados ao armazenamento de resíduos minerais e à necessidade de monitoramento constante para garantir estabilidade e segurança operacional (DUARTE, 2008; BARBOSA, 2023). Assim, a integração entre eficiência operacional, segurança e controle ambiental é essencial para a sustentabilidade das atividades minerárias.

2.1 Caracterização do maciço rochoso

A caracterização do maciço rochoso é fundamental para a compreensão das propriedades físicas, mecânicas e estruturais das rochas, especialmente em aplicações ligadas à mineração, geotecnia e engenharia civil. As rochas podem ser classificadas em grandes grupos: sedimentares, ígneas e metamórficas (BARBOSA, 2023).

2.1.1 Classificação

As rochas sedimentares são formadas pela deposição e compactação de sedimentos em condições relativamente baixas de temperatura e pressão, apresentando geralmente maior

porosidade, permeabilidade e menor resistência mecânica. As rochas ígneas originam-se do resfriamento e solidificação do magma, podendo cristalizar tanto no interior da crosta terrestre quanto na superfície, dependendo das condições de formação. Já as rochas metamórficas resultam da transformação mineralógica e estrutural de rochas preexistentes submetidas a elevadas temperaturas e pressões, sem que ocorra fusão completa do material, promovendo alterações em sua textura, composição e estrutura (PRESS et al., 2006; BARBOSA, 2023).

Santos et al. (2026) propõem novo modelo para a classificação de maciços rochosos utilizando técnicas de aprendizado de máquina. O modelo apresentado constitui uma nova abordagem para lidar com problemas de classificação de maciços rochosos, reduzindo a subjetividade, aumentando a seletividade de parâmetros, diminuindo a dimensionalidade de bancos de dados geotécnicos e otimizando a aplicação de sistemas de classificação.

2.1.2 Caracterização Tecnológica

A caracterização tecnológica das rochas consiste em um conjunto de ensaios e análises destinados à obtenção de parâmetros petrográficos, químicos, físicos e mecânicos, permitindo avaliar a qualidade, o comportamento e a durabilidade dos materiais rochosos em diferentes aplicações. Entre os principais métodos utilizados destaca-se a análise petrográfica, responsável por identificar a mineralogia, textura e classificação da rocha, além de verificar características que possam comprometer sua resistência mecânica, durabilidade e estabilidade química. Também são importantes os ensaios de índices físicos, que avaliam propriedades como massa específica, porosidade e absorção d'água, possibilitando analisar indiretamente o grau de alteração, a coesão mineralógica e a suscetibilidade da rocha aos processos de degradação. Esses parâmetros são fundamentais para determinar a aptidão das rochas para utilização em obras de engenharia, mineração e revestimentos ornamentais (FRASCA, 2003; BARBOSA, 2023).

Os ensaios mecânicos também desempenham papel essencial na caracterização tecnológica das rochas, especialmente os testes de compressão uniaxial, tração na flexão e resistência ao impacto, que permitem avaliar o comportamento do material frente a esforços compressivos, flexores e dinâmicos. Além disso, ensaios específicos, como congelamento e degelo, desgaste abrasivo Amsler e dilatação térmica linear, possibilitam analisar a durabilidade das rochas quando submetidas a diferentes condições ambientais e operacionais, simulando processos de alteração que podem ocorrer durante sua vida útil. Outro método amplamente empregado é a determinação da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas longitudinais, utilizada para avaliar indiretamente o grau de alteração e a integridade estrutural do maciço rochoso. Dessa forma, a caracterização tecnológica fornece informações indispensáveis para a seleção adequada das rochas, para a previsão de seu desempenho em aplicações estruturais, geotécnicas e industriais e para a estimativa de sua durabilidade em longo prazo (FRASCA, 2003; BARBOSA, 2023).

Lemy e Hadjigeorgiou (2003) apresentam uma metodologia de mapeamento digital de frentes de lavra, utilizada para elaborar mapas de traços de descontinuidades a partir de

fotografias de faces rochosas. O método é aplicável a diversas condições do maciço rochoso, buscando, ao mesmo tempo, minimizar a intervenção do usuário. Elabora-se um mapa de traços de descontinuidades e caracteriza-se a rede de descontinuidades com base em critérios geomecânicos. A metodologia é aplicada em dois estudos de caso em minas subterrâneas e um em uma pedreira, abrangendo diferentes condições geológicas e de iluminação. Essas informações são então utilizadas para caracterizar com sucesso os maciços rochosos analisados.

2.2 Perfuração de Rochas

A perfuração constitui uma das etapas mais importantes do ciclo operacional do desmonte de rochas, pois é responsável pela criação dos furos que receberão as cargas explosivas. A qualidade da perfuração influencia diretamente a distribuição da energia da detonação, a fragmentação obtida, os níveis de vibração, a projeção de fragmentos e os custos operacionais da mineração. Desvios de alinhamento, profundidade inadequada e erros de posicionamento podem comprometer significativamente o desempenho do plano de fogo (JUNIOR, 2022; ZHANG, 2016).

Segundo Zhang (2016), o processo de perfuração ocorre pela concentração de tensões na interface entre a ferramenta de corte e a rocha, promovendo a nucleação e propagação de microfraturas que culminam na remoção do material. A Figura 1 ilustra o princípio de funcionamento de uma perfuratriz percussiva, evidenciando a interação entre a ferramenta de perfuração e o maciço rochoso. A eficiência desse processo depende das propriedades geomecânicas do maciço, da energia aplicada, da geometria da ferramenta de perfuração e dos parâmetros operacionais adotados. Essas variáveis influenciam diretamente a taxa de penetração, o desgaste das ferramentas e a qualidade final dos furos de detonação (ZHANG, 2016).

Os equipamentos de perfuração de rochas são empregados de acordo com as características do maciço rochoso e as necessidades operacionais de cada atividade de mineração. As perfuratrizes podem ser classificadas conforme o princípio mecânico utilizado no processo de perfuração, sendo divididas em três grupos principais: percussivas, roto-percussivas e rotativas. As perfuratrizes percussivas atuam por meio do impacto repetitivo de uma ferramenta metálica contra a rocha, enquanto os equipamentos roto-percussivos associam a percussão ao movimento contínuo de rotação, aumentando a eficiência da perfuração em diferentes tipos de maciços. Já os equipamentos rotativos utilizam apenas a rotação da ferramenta sob pressão constante sobre a rocha, sem a aplicação de impactos. A seleção do equipamento adequado depende das propriedades geológicas da rocha, da profundidade dos furos e do volume de material a ser desmontado (GERALDI, 2011; BARBOSA, 2023).

Além das características dos equipamentos, a seleção do método de perfuração deve considerar as condições geomecânicas e operacionais do maciço rochoso. Entre os principais parâmetros utilizados destacam-se a resistência à compressão uniaxial (UCS), a abrasividade, o grau de fraturamento e o comportamento da rocha durante a ruptura. De modo geral, rochas

de menor resistência podem ser escavadas por métodos mecânicos, enquanto maciços mais resistentes normalmente requerem a associação entre perfuração e desmonte com explosivos para proporcionar uma fragmentação eficiente. Dessa forma, a definição do método de perfuração e do diâmetro dos furos deve ser compatível com as características geomecânicas do maciço e com os objetivos operacionais da lavra, como avanço, produção e controle de contorno (DARLING, 2023; CURI, 2017; ROCHA, 2026).



Figura 1 – Princípio de funcionamento de uma perfuratriz percussiva. Fonte: Adaptado de Zhang (2016), reproduzido por Oliveira Júnior (2022).

Entre os equipamentos roto-percussivos, destacam-se os sistemas *Top-Hammer* (Martelo de Superfície) e *Down-the-Hole* (DTH) (Martelo de Fundo de Furo), cuja principal diferença está na posição do mecanismo de percussão. Nos sistemas *Top-Hammer*, o martelo permanece na superfície e transmite a energia de impacto ao longo das hastes de perfuração. Em furos mais profundos, parte dessa energia é dissipada durante a transmissão, reduzindo a eficiência do processo. Nos equipamentos DTH, por outro lado, o martelo é instalado no fundo do furo, próximo à broca, minimizando as perdas de energia e proporcionando maior eficiência em perfurações de maior profundidade e diâmetro. Por sua vez, as perfuratrizes rotativas são empregadas principalmente na execução de furos de grande diâmetro em pedreiras, minas a céu aberto e na indústria de petróleo, utilizando brocas tricônicas (*tricone bits*) ou ferramentas de corte por arraste (*drag bits*), conforme as características da aplicação (ZHANG, 2016).

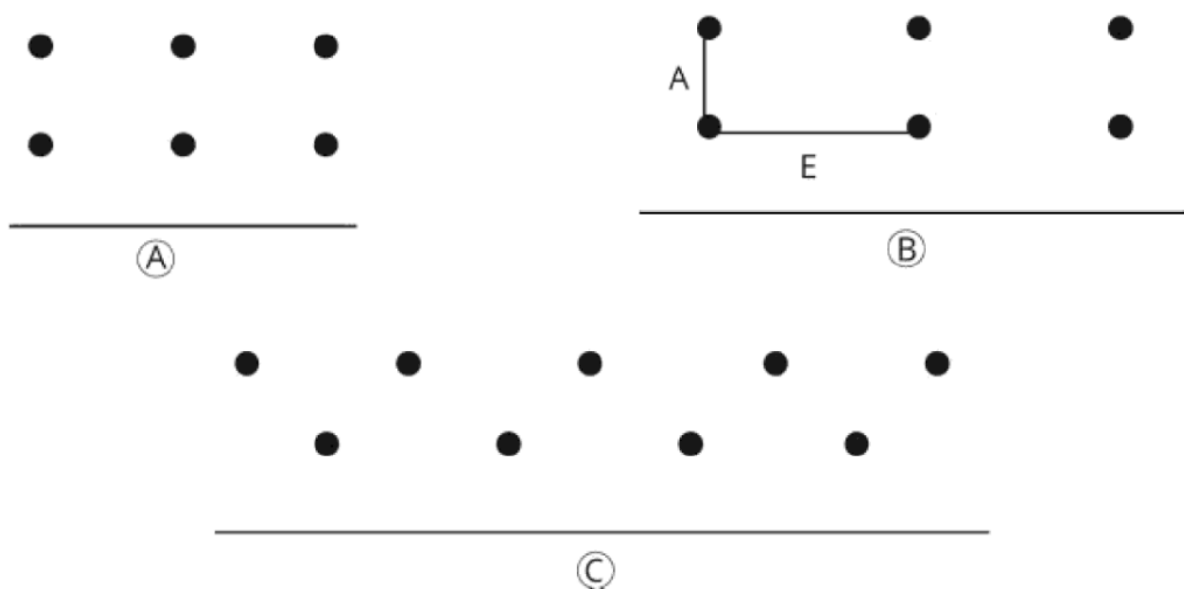
O funcionamento das perfuratrizes depende diretamente do fornecimento de ar comprimido por compressores elétricos ou movidos a diesel, podendo ser estacionários ou portáteis, conforme as necessidades operacionais da mina. Além disso, ferramentas como brocas integrais, hastes, luvas de acoplamento e coroas de perfuração compõem a chamada coluna de perfuração,

conjunto essencial para a execução progressiva dos furos em operações de desmonte de rochas. Esses componentes são fabricados com materiais de elevada resistência mecânica para suportar as condições severas de trabalho encontradas na mineração (GERALDI, 2011; BARBOSA, 2023).

2.3 Malhas para Pedreiras

As malhas de perfuração utilizadas em pedreiras correspondem à disposição geométrica e ao esquema de ligação entre os furos de desmonte, podendo utilizar retardos para controlar a sequência de detonação e o direcionamento do material fragmentado. Diferentes configurações de malhas influenciam diretamente a fragmentação da rocha, o lançamento da pilha e a distribuição da energia dos explosivos no maciço rochoso (GERALDI, 2011; BARBOSA, 2023). Entre os principais tipos destacam-se as malhas quadradas ou retangulares, de execução mais simples, as malhas estagiadas, que apresentam melhor distribuição da energia explosiva, e as malhas em triângulo equilátero, indicadas para rochas compactas devido à maior eficiência na fragmentação (Figura 2). Além disso, as malhas alongadas são recomendadas para rochas friáveis ou macias, favorecendo maior lançamento do material desmontado em função do maior espaçamento entre os furos (BARBOSA, 2023).

Figura 2 – Alguns tipos de malhas: (A) quadradas (B) retangulares (C) estagiadas (pé de galinha).
Fonte: Adaptado de (SILVA, 2019)



2.4 Explosivos Industriais

Os explosivos industriais utilizados na mineração podem ser classificados conforme sua velocidade de reação e forma de liberação de energia. Segundo (GERALDI, 2011; BARBOSA, 2023), os explosivos dividem-se em deflagrantes, detonantes e explosivos de segurança. Os

deflagrantes, como a pólvora, apresentam baixa velocidade de reação, inferior a 500 m/s, enquanto os detonantes liberam energia em velocidades elevadas, variando entre 1200 e 7000 m/s, sendo os mais utilizados nas operações de desmonte de rochas. Já os explosivos de segurança possuem uso restrito às Forças Armadas, incluindo explosivos plásticos e munições especiais. Na mineração, os explosivos detonantes se destacam pela elevada capacidade de fragmentação e eficiência operacional, sendo amplamente empregados em atividades de lavra e desmonte de maciços rochosos (BARBOSA, 2023).

Entre os explosivos detonantes mais utilizados destacam-se as dinamites, o ANFO e as emulsões explosivas, que apresentam características específicas de desempenho e aplicação. O ANFO (Nitrato de Amônio e Óleo Combustível) possui vantagens como menor produção de gases tóxicos, facilidade de carregamento, boa fragmentação da rocha e baixa sensibilidade a impactos, tornando-se amplamente empregado em operações de mineração, principalmente em furos secos, uma vez que sua eficiência é reduzida na presença de água devido à elevada higroscopicidade do nitrato de amônio (JIMENO et al., 1995). Em situações em que há presença de água nos furos de perfuração, são preferencialmente utilizadas emulsões explosivas, que apresentam elevada resistência à água, alta potência e parâmetros ajustáveis, como densidade e viscosidade, proporcionando maior eficiência e segurança durante o carregamento. Além disso, essas emulsões eliminam a necessidade de embalagens e permitem melhor preenchimento das perfurações, aumentando o aproveitamento energético durante o desmonte (JIMENO et al., 1995; BARBOSA, 2023).

Os explosivos também podem ser classificados em primários, secundários e terciários conforme sua sensibilidade e facilidade de detonação. Os explosivos primários apresentam elevada sensibilidade e são utilizados em pequenas quantidades como iniciadores, incluindo compostos como fulminato de mercúrio e azida de chumbo. Os explosivos secundários possuem maior dificuldade de detonação e são os mais utilizados em operações de mineração, abrangendo materiais como TNT, nitroglicerina, dinamites, ANFO e emulsões. Já os explosivos terciários apresentam baixa sensibilidade e elevada estabilidade, necessitando de sistemas de iniciação para detonação, como ocorre com o nitrato de amônio e o perclorato de amônio. Dessa forma, a escolha do explosivo adequado depende das características geológicas do maciço rochoso, das condições operacionais e dos requisitos de segurança envolvidos no processo de desmonte (BARBOSA, 2023).

2.5 Sismografia

O controle das vibrações do solo é uma etapa fundamental nas operações de desmonte de rochas, visando minimizar impactos ambientais, garantir a segurança operacional e reduzir danos em estruturas próximas às áreas de detonação. As atividades de mineração, especialmente o uso de explosivos, geram ondas sísmicas artificiais que se propagam pelo maciço rochoso e podem ser monitoradas por meio de sismógrafos (PEREIRA, 2018; BARBOSA, 2023). Esses

equipamentos registram continuamente os movimentos do solo, permitindo analisar a magnitude e a intensidade das vibrações geradas durante as detonações. Segundo (BARBOSA, 2023), o funcionamento do sismógrafo baseia-se na utilização de uma massa praticamente inerte em relação ao movimento do terreno, possibilitando o registro amplificado das oscilações do solo em um sismograma. Dessa forma, o monitoramento sísmico fornece informações importantes para ajustes no plano de desmonte por explosivo e para a execução de desmontes mais controlados e seguros.

2.6 Desmonte de rochas com o uso de explosivos

A técnica de desmonte de rochas com o uso de explosivos é amplamente utilizada em operações de mineração, pedreiras e obras de engenharia civil devido à sua elevada eficiência na fragmentação de maciços rochosos (FERREIRA, 2015; KINYUA et al., 2022). Esse método tornou-se essencial principalmente em situações envolvendo rochas muito rígidas ou pouco fraturadas, nas quais outros processos de desmonte não apresentam energia suficiente ou viabilidade econômica adequada (SANTOS, 2023). Em operações de pedreira, o desmonte geralmente consiste na perfuração de fileiras de furos de detonação paralelos à face livre da bancada, permitindo o carregamento e detonação controlada dos explosivos (ARMAGHANI et al., 2015). O avanço dessa técnica foi impulsionado historicamente pela invenção da dinamite por Alfred Nobel em 1867, representando um marco importante para o desenvolvimento das tecnologias de detonação (The Nobel Prize, 2026).

Nas últimas décadas, o desmonte com explosivos passou por importantes avanços tecnológicos relacionados ao desenvolvimento de explosivos industriais, sistemas de iniciação, monitoramento e modelagem computacional (IRAMINA et al., 2018). Esses avanços contribuíram para melhorias na fragmentação da rocha, aumento da produtividade das operações de perfuração e redução da diluição do minério, entendida como a incorporação indesejada de material estéril ao minério durante o desmonte, além da diminuição da propagação de material indesejado. A obtenção de uma fragmentação mais adequada também favorece o desempenho das etapas subsequentes de britagem, moagem e beneficiamento, reduzindo o consumo energético e aumentando a eficiência global das operações de mineração (KINYUA et al., 2022). Além disso, o desmonte com explosivos continua sendo considerado uma técnica de baixo custo relativo quando comparado a outros métodos de fragmentação de rochas, consolidando-se como uma das principais técnicas utilizadas nas operações minerárias modernas.

2.6.1 Desmonte de rocha a frio

O desmonte de rochas a frio consiste na escavação e fragmentação do maciço rochoso sem a utilização de explosivos, sendo realizado por meio de diferentes tecnologias e equipamentos. Entre os métodos empregados destacam-se a utilização de argamassa expansiva, rompedores hidráulicos, fresadoras de rocha e mineradores contínuos, utilizados principalmente em operações

subterrâneas e, em determinadas aplicações, na mineração de superfície. A argamassa expansiva consiste na realização de perfurações na rocha seguidas do preenchimento dos furos com um material expansivo, que gera tensões internas progressivas até provocar a desagregação da rocha (FERREIRA, 2015). Esse processo possui tempo médio de atuação de aproximadamente 24 horas e é amplamente empregado em locais onde o uso de explosivos não é permitido, especialmente em áreas urbanas, devido à redução de ruídos, poeira, vibrações e riscos associados às detonações convencionais (SANTOS, 2023). Já os mineradores contínuos realizam o corte mecânico da rocha sem a necessidade de perfuração e detonação, proporcionando elevada continuidade operacional em condições geológicas favoráveis (National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2018).

2.6.2 Desmonte de rocha a fogo

O desmonte de rochas a fogo consiste na fragmentação do maciço rochoso por meio da utilização de explosivos, recebendo essa denominação devido ao processo de detonação empregado na desagregação das rochas (FERREIRA, 2015). Esse método é amplamente utilizado em operações de mineração e obras de engenharia devido à sua elevada eficiência e produtividade. Entretanto, trata-se de uma atividade que exige rigoroso controle operacional e elevados padrões de segurança em razão do alto grau de periculosidade envolvido, além dos impactos ambientais associados à geração de gases, ruídos, vibrações e poeira durante as detonações. (SANTOS, 2023)

O desempenho do desmonte de rochas está diretamente relacionado ao aproveitamento da energia liberada durante a detonação. Quando essa energia não é eficientemente convertida em fragmentação, parte significativa é dissipada na forma de vibrações do solo, sobrepressão atmosférica, projeção de fragmentos e ruídos, reduzindo a eficiência do processo e aumentando os impactos ambientais. Esses efeitos podem estar associados a projetos inadequados de perfuração e desmonte, bem como à interação entre a propagação das ondas de detonação e as descontinuidades do maciço rochoso, comprometendo o aproveitamento da energia dos explosivos (ROCHA, 2026).

Nesse contexto, estudos recentes têm demonstrado que a definição adequada do diâmetro dos furos, associada aos índices de blastabilidade do maciço e à granulometria desejada da fragmentação, exerce influência direta sobre o consumo específico de explosivos, os custos de perfuração e desmonte e a eficiência global das operações de mineração. Dessa forma, o projeto de desmonte deve ser concebido de maneira integrada, considerando simultaneamente aspectos técnicos, econômicos e ambientais, em consonância com os princípios do ciclo *Mine-to-Mill*. Essa abordagem considera que o desempenho global da mineração depende da integração entre as etapas de lavra e beneficiamento, tendo a fragmentação da rocha como elemento de ligação entre esses processos. Uma distribuição granulométrica adequada contribui para reduzir o consumo de energia nas etapas de britagem e moagem, aumentar a taxa de alimentação das usinas de

beneficiamento, minimizar interrupções operacionais e reduzir custos, tornando a fragmentação uma variável estratégica para a otimização do desempenho do empreendimento mineral como um todo (KINYUA et al., 2022; MOOMIVAND et al., 2025; ROCHA, 2026).

2.7 Tecnologias aplicadas ao desmonte de rochas

O desenvolvimento de novas tecnologias aplicadas ao desmonte de rochas tem sido impulsionado pela necessidade de aumentar a produtividade, reduzir custos operacionais e minimizar os impactos ambientais associados às detonações. Em um cenário de crescente competitividade e maiores exigências ambientais, a indústria mineral tem investido em métodos e equipamentos capazes de tornar as operações mais eficientes, seguras e sustentáveis (ROY, 2021).

Esta seção apresenta algumas das tecnologias e métodos modernos empregados em operações de desmonte de rochas. Para cada tecnologia são discutidos seus princípios de funcionamento, principais vantagens, limitações e potenciais contribuições para a agregação de valor nas operações de mineração.

2.7.1 Detonação com colunas de ar

Detonação com colunas de ar, do inglês *Air-deck blasting*, é um método de detonação em que uma coluna explosiva é combinada com uma câmara de ar (Figura 3). Utiliza de espaçadores de madeira e sacos de gás para a construção das colunas de ar. O princípio da detonação baseia-se na sobreposição de frentes de detonação direcionais opostas na coluna de ar, seguidas pela quebra dos produtos da explosão, que forma novas ondas de ar de choque compressivas. A direção da compressão máxima depende do tipo de carregamento, acessórios de detonação e sequência de iniciação (ROY, 2021).

Algumas tecnologias podem melhorar o desempenho do desmonte e diminuir os custos. Como exemplo o VARISTEM (Figura 4), que permite cobrir uma maior área de escavação e reduzir significativamente a quantidade de material de detonação necessária para cada desmonte. Além de poder aumentar a fragmentação, o que permite operações pós-explosão mais eficientes (ROY, 2021).

Dessa forma, a utilização de colunas de ar pode contribuir para a redução do consumo de explosivos, melhoria da fragmentação e diminuição dos custos operacionais, agregando valor às operações de mineração (ROY, 2021).

Figura 3 – Efeito das colunas de ar para melhorar distribuição de energia. Fonte: Adaptado de (KABWE, 2019)

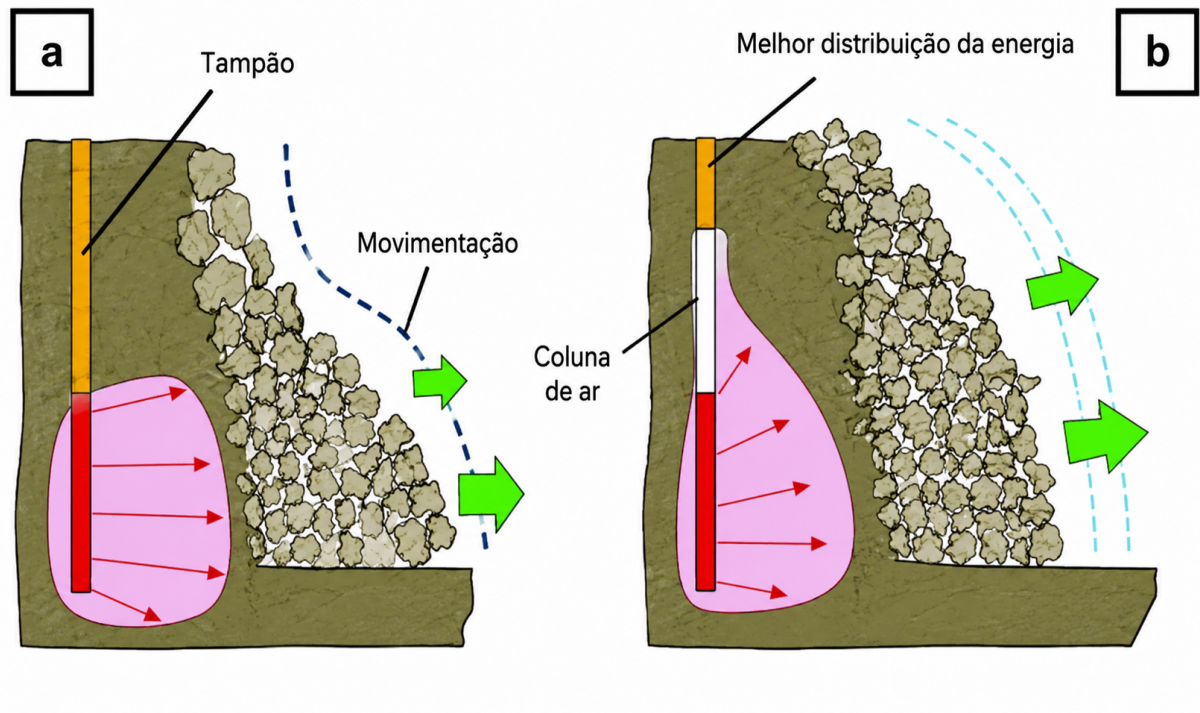


Figura 4 – Imagens da bolsa de gás e do bujão VARISTEM para colunas de ar. Fonte: Adaptado de (ROY, 2021)



Vantagens

- Reduz o consumo específico de explosivos;
- Melhora a distribuição da energia da detonação no maciço rochoso;
- Pode proporcionar melhor fragmentação da rocha;
- Contribui para a redução dos custos operacionais do desmonte;

- Pode reduzir a ocorrência de retroquebra (*back-break*) e danos ao maciço remanescente;
- Favorece maior eficiência das operações subsequentes de carregamento, transporte e britagem.

Desvantagens

- Requer projeto de carregamento e dimensionamento mais criteriosos;
- A eficiência depende da correta posição e dimensão da coluna de ar;
- Exige acessórios específicos, como espaçadores e bolsas de ar (ex.: VARISTEM), aumentando a complexidade operacional;
- Pode apresentar desempenho inferior quando aplicado em condições geológicas inadequadas;
- Necessita de maior controle durante o carregamento dos furos para garantir a estabilidade da coluna de ar.

2.7.2 Sistemas Não Elétricos de Iniciação

Os sistemas não elétricos de iniciação utilizam tubos de choque (*shock tubes*) para transmitir o sinal de detonação, eliminando a necessidade de circuitos elétricos convencionais. Essa tecnologia reduz a suscetibilidade a interferências eletromagnéticas, descargas atmosféricas e correntes parasitas, aumentando a segurança das operações de desmonte (ROY, 2021).

Vantagens

- Maior segurança operacional;
- Menor suscetibilidade a interferências elétricas;
- Maior confiabilidade da sequência de detonação;
- Facilidade de utilização em campo.

Desvantagens

- Menor precisão quando comparada aos detonadores eletrônicos;
- Dificuldade de reprogramação após instalação;
- Possibilidade de danos físicos aos tubos de choque.

2.7.3 Detonadores Eletrônicos

Os sistemas de iniciação empregados nas operações de desmonte podem ser classificados em elétricos, não elétricos e eletrônicos. Os sistemas elétricos utilizam uma corrente elétrica para iniciar a detonação, enquanto os sistemas não elétricos empregam dispositivos como cordéis detonantes, estopins e tubos de choque (*shock tubes*) para transmitir o sinal de iniciação. Os detonadores eletrônicos diferenciam-se por utilizar microprocessadores capazes de controlar com elevada precisão os tempos de retardo, permitindo maior flexibilidade no planejamento e na execução das detonações (LUSK; WORSEY, 2011; JUNIOR, 2022).

Em comparação aos sistemas convencionais, os detonadores eletrônicos apresentam tempos de disparo programáveis, normalmente entre 0 e 20.000 ms, com dispersões da ordem de ± 1 ms ou $\pm 0,1\%$, proporcionando elevada precisão na sequência de detonação. A Figura 5 apresenta um exemplo desse tipo de dispositivo, evidenciando seus principais componentes. Essa característica permite otimizar a fragmentação, reduzir vibrações, sobrepressão atmosférica e projeção de rochas, além de melhorar o controle dos resultados do desmonte. Entretanto, esses sistemas apresentam custo mais elevado, maior complexidade operacional e necessidade de treinamento específico para sua programação. Por esse motivo, sua aplicação pode ser economicamente mais vantajosa em desmontes de grande porte, nos quais o custo adicional pode ser compensado pelos ganhos de produtividade e de controle da fragmentação (LUSK; WORSEY, 2011; JUNIOR, 2022).



Figura 5 – Exemplo de detonador eletrônico. Fonte: (JUNIOR, 2022).

Vantagens

- Elevada precisão dos tempos de retardo;
- Possibilidade de programação individual dos detonadores;

- Maior flexibilidade na definição da sequência de detonação;
- Melhor controle da fragmentação da rocha;
- Possibilidade de redução das vibrações, da sobrepressão atmosférica e da projeção de fragmentos;
- Maior confiabilidade da sequência de detonação.

Desvantagens

- Maior custo em relação aos sistemas convencionais;
- Maior complexidade de programação e operação;
- Necessidade de equipamentos específicos para programação e disparo;
- Necessidade de treinamento da equipe responsável;
- Maior viabilidade econômica em desmontes de grande porte.

2.7.4 Softwares para Planejamento e Simulação de Desmontes

O avanço das tecnologias digitais permitiu o desenvolvimento de softwares específicos para o planejamento, gerenciamento e avaliação de desmontes por explosivos. Essas ferramentas possibilitam integrar informações relacionadas ao plano de fogo, características geológicas do maciço, explosivos utilizados, acessórios de iniciação, parâmetros de perfuração, produtividade dos equipamentos e resultados obtidos em campo. Além disso, permitem armazenar dados históricos, registros fotográficos, monitoramentos e filmagens das detonações, constituindo importantes bases de dados para a otimização contínua das operações. Entre os *softwares* utilizados na mineração destacam-se: *Fragment*, *O-Pit-Blast Design*, *I-Blast*, *DNAFRAG* e *Soft Blast* (JUNIOR, 2022).

Além do gerenciamento das informações, alguns sistemas incorporam modelos computacionais capazes de simular o comportamento das detonações. Esses modelos permitem estimar a propagação das ondas de tensão, o processo de fragmentação da rocha, a movimentação dos fragmentos e a dissipação da energia não convertida em fragmentação, fornecendo subsídios para o aprimoramento do plano de desmonte e para a redução de impactos ambientais, como vibração do solo e projeção de rochas. Dessa forma, os softwares de simulação constituem importantes ferramentas de apoio à tomada de decisão, contribuindo para aumentar a eficiência, a segurança e a previsibilidade das operações de desmonte (BERNARD, 2008; JUNIOR, 2022).

Vantagens

- Integração das informações do plano de fogo;

- Armazenamento do histórico dos desmontes;
- Simulação dos resultados antes da detonação;
- Apoio à tomada de decisão;
- Redução de custos operacionais;
- Maior previsibilidade dos resultados;
- Redução dos impactos ambientais.

Desvantagens

- Elevado custo de aquisição e licenciamento;
- Necessidade de dados confiáveis para calibração dos modelos;
- Dependência de treinamento especializado;
- Resultados dependentes da qualidade das informações de entrada.

2.7.5 Detonação para Lançamento de Estéril

A detonação para lançamento de estéril (*blast casting*) é uma técnica de desmonte utilizada principalmente em minas de carvão a céu aberto, cujo objetivo é maximizar o deslocamento do material de cobertura (estéril) por meio da própria energia da detonação. Nesse método, o excedente de energia dos explosivos é empregado para projetar o material desmontado diretamente para áreas previamente lavradas, reduzindo a necessidade de carregamento e transporte por equipamentos mecânicos. Dessa forma, o método contribui para a exposição mais rápida do minério e para a redução dos custos operacionais associados à remoção de estéril (ROY, 2021).

A eficiência da técnica é geralmente avaliada pela razão efetiva de lançamento (*Effective Casting Ratio – ECR*), que representa a porcentagem do material desmontado que é efetivamente deslocada para a área desejada. Esse índice depende de fatores como as características geológicas do maciço rochoso, os parâmetros de perfuração e detonação e o tipo de explosivo empregado. Estudos mostram que projetos adequadamente dimensionados podem atingir valores de ECR superiores a 30%.

Vantagens

- Redução dos custos de carregamento e transporte de estéril;
- Aumento da produtividade das operações de lavra;
- Melhor aproveitamento da energia dos explosivos;

- Menor necessidade de equipamentos de movimentação de material;
- Possibilidade de redução do custo global de mineração;
- Exposição mais rápida da camada mineralizada.

Desvantagens

- Aplicável apenas em determinadas condições geomórficas e geológicas. Aplicável principalmente em minas a céu aberto com geometrias de bancada e condições geológicas favoráveis ao lançamento controlado do estéril;
- Requer elevado grau de planejamento e controle do plano de desmonte por explosivo;
- Os resultados são altamente dependentes das características do maciço rochoso;
- Pode aumentar a ocorrência de vibrações, projeção de rochas e outros impactos associados às detonações quando mal dimensionado;
- Necessita de parâmetros de perfuração e carregamento cuidadosamente otimizados;
- Nem todas as operações minerárias conseguem atingir razões efetivas de lançamento economicamente atrativas.

2.7.6 Detonação em galerias ou túneis

A detonação em túneis (*coyote blasting* ou *coyote shooting*) é uma técnica utilizada em situações nas quais a perfuração convencional de furos verticais é impraticável ou economicamente inviável. Nesse método, pequenas galerias ou túneis são escavados na base do maciço rochoso e posteriormente preenchidos com explosivos. A detonação ocorre a partir dessas cavidades, promovendo a fragmentação e o deslocamento de grandes volumes de rocha em uma única operação (ROY, 2021).

Essa técnica tem sido empregada principalmente em projetos de grande porte, como construção de barragens, escavações em encostas e movimentação de grandes massas de rocha. Sua aplicação requer um conhecimento detalhado das características geológicas do maciço, uma vez que fatores como fraturamento, orientação das descontinuidades e resistência da rocha influenciam diretamente os resultados da detonação. Estudos de campo demonstram que, quando adequadamente planejada, a técnica pode proporcionar elevados volumes de material fragmentado com controle satisfatório das vibrações e da projeção de fragmentos (ROY, 2021).

Vantagens

- Possibilita o desmonte de grandes volumes de rocha em uma única operação;
- Aplicável em locais onde a perfuração convencional apresenta limitações técnicas;

- Pode reduzir o tempo total necessário para escavação e movimentação do material;
- Permite o aproveitamento da geometria natural do terreno em determinadas aplicações;
- Pode apresentar boa relação custo-benefício em projetos de grande escala.

Desvantagens

- Exige escavação prévia de túneis ou galerias para acomodação dos explosivos;
- Requer elevado conhecimento geológico e geotécnico do maciço rochoso;
- Os resultados são fortemente influenciados pelas características estruturais da rocha;
- Possui maior complexidade de planejamento quando comparada às detonações convencionais;
- Pode gerar elevados volumes de energia e exigir medidas rigorosas de controle de vibrações e segurança.

2.7.7 Detonação por Plasma

A detonação por plasma (*plasma blasting*) é uma tecnologia de fragmentação de rochas que dispensa o uso de explosivos químicos convencionais. O método utiliza uma sonda elétrica posicionada no interior de um furo preenchido com uma solução eletrolítica condutiva. A descarga de energia elétrica gera plasma de alta intensidade, produzindo ondas de choque capazes de fraturar a rocha. Essa tecnologia foi desenvolvida com o objetivo de reduzir os impactos ambientais normalmente associados às detonações convencionais, como poeira, vibrações excessivas e projeção de fragmentos rochosos (ROY, 2021). Estudos analíticos recentes demonstram que a descarga elétrica produz pressões transitórias elevadas e ondas de choque capazes de iniciar e propagar fraturas no maciço rochoso, fornecendo uma base física para o desenvolvimento dessa tecnologia como alternativa aos explosivos convencionais (KUZNETSOVA et al., 2022).

Estudos demonstraram que a técnica é capaz de promover a fragmentação de blocos rochosos e bancadas, apresentando potencial para aplicações em áreas urbanas e locais onde o uso de explosivos convencionais é restrito. Além disso, a intensidade do plasma pode ser ajustada por meio de parâmetros elétricos e das características do meio condutor, ampliando a flexibilidade do processo. Ensaios em escala de campo também evidenciaram que a tecnologia pode ser integrada a sistemas de fraturamento pneumático e extração a vácuo, aumentando a permeabilidade do meio e melhorando a eficiência de processos de remediação, o que demonstra seu potencial para aplicações em engenharia e mineração (JANG et al., 2024). Entretanto, apesar dos resultados promissores obtidos em pesquisas experimentais, a tecnologia ainda enfrenta desafios relacionados à complexidade operacional, custos de implantação e confiabilidade em

aplicações de larga escala, permanecendo em estágio de desenvolvimento e aperfeiçoamento (ROY, 2021; KUZNETSOVA et al., 2022).

Vantagens

- Não utiliza explosivos químicos convencionais;
- Redução da projeção de fragmentos rochosos;
- Menor geração de poeira durante a fragmentação;
- Potencial redução dos impactos ambientais associados às detonações;
- Possibilidade de aplicação em áreas urbanas ou sensíveis;
- Controle mais preciso da energia aplicada ao maciço rochoso.

Desvantagens

- Tecnologia ainda pouco difundida comercialmente;
- Elevada complexidade operacional e de instalação;
- Necessidade de sistemas elétricos de alta potência;
- Custos de implantação superiores aos métodos convencionais;
- Poucas aplicações em larga escala comprovadas na indústria mineral;
- Necessidade de mais pesquisas para validação técnica e econômica.

2.7.8 Detonação para Separação de Materiais

A detonação para separação de materiais (*segregation blasting*) é uma técnica especializada utilizada principalmente na mineração de carvão para separar materiais com diferentes propriedades físicas durante o processo de desmonte. O método explora diferenças de densidade e comportamento à fragmentação entre o minério e o material estéril, permitindo que, após a detonação, os materiais sejam projetados a diferentes distâncias e apresentem menor grau de mistura. Essa técnica é particularmente útil na recuperação de finas camadas de carvão ou minério que normalmente seriam perdidas durante o desmonte convencional (ROY, 2021).

A aplicação da técnica possibilita o aproveitamento de camadas minerais delgadas localizadas entre materiais estéreis, cuja extração por métodos convencionais pode ser economicamente inviável devido à baixa espessura e à dificuldade operacional. Além de aumentar a recuperação do recurso mineral, a segregação dos materiais reduz perdas e contribui para a melhoria da qualidade do material lavrado. Entretanto, seu sucesso depende do conhecimento detalhado

das características geológicas e das propriedades físicas dos materiais envolvidos, exigindo um planejamento cuidadoso das operações de detonação (ROY, 2021).

O mecanismo de funcionamento da detonação para separação de materiais baseia-se nas diferenças de densidade, tamanho dos fragmentos e comportamento dinâmico dos materiais após a explosão. Estudos indicam que materiais menos densos, como o carvão, tendem a ser projetados a distâncias maiores do que materiais mais densos, como as rochas estéréis, quando submetidos às mesmas condições de detonação. Isso ocorre porque a trajetória dos fragmentos é influenciada por fatores como massa, velocidade inicial e resistência do ar. Dessa forma, por meio da distribuição adequada das cargas explosivas ao longo dos furos, é possível controlar o deslocamento relativo dos materiais, promovendo a separação parcial entre minério e estéril durante o próprio processo de desmonte. Esse mecanismo permite reduzir a mistura entre os materiais e aumentar a eficiência da lavra seletiva (ROY, 2021).

Estudos recentes demonstram que a detonação para separação de materiais também pode ser aplicada para reduzir perdas de minério e a diluição em operações de mineração a céu aberto. Nessa abordagem, a distribuição das cargas explosivas, a sequência de iniciação e o controle do movimento dos fragmentos são projetados para favorecer a separação entre minério e estéril durante o próprio desmonte, aumentando a seletividade da lavra. Em um estudo de caso realizado em uma mina de urânio, Yu et al. (2023) verificaram que a utilização de um método de detonação com separação controlada reduziu significativamente a mistura entre minério e estéril, melhorando a recuperação mineral e a qualidade do material destinado ao beneficiamento. Esses resultados reforçam o potencial da técnica como alternativa para minimizar perdas, reduzir a diluição e aumentar a eficiência operacional das atividades de mineração, complementando os conceitos de segregação de materiais apresentados por (ROY, 2021; YU et al., 2023).

Vantagens

- Aumento da recuperação do minério;
- Redução das perdas de camadas minerais delgadas;
- Menor diluição do minério com material estéril;
- Melhoria da qualidade do material produzido;
- Possibilidade de aproveitamento econômico de depósitos anteriormente considerados inviáveis;
- Redução de desperdícios durante a lavra.

Desvantagens

- Requer conhecimento detalhado das características geológicas do depósito;

- Necessita de planejamento e controle rigorosos da detonação;
- Aplicação limitada a determinadas condições geológicas e tipos de depósito;
- Resultados dependem das diferenças físicas entre minério e estéril;
- Pode aumentar a complexidade operacional da lavra;
- Exige monitoramento constante para garantir a eficiência da segregação.

2.7.9 Abatimento Induzido por Detonação

O abatimento induzido por detonação (*induced caving by blasting*) é uma técnica utilizada principalmente em minas subterrâneas para promover a queda controlada do teto rochoso em áreas onde o abatimento natural não ocorre de forma adequada. O método consiste na execução de furos de grande profundidade, tipicamente entre 15 e 22 m, carregados com explosivos, com o objetivo de induzir a ruptura das camadas superiores e controlar o comportamento geomecânico do maciço durante a lavra. Esses furos são normalmente perfurados com inclinação em relação à horizontal, sendo suas dimensões e disposição definidas em função de fatores como espessura da camada mineral, geometria das galerias e características geomecânicas do maciço rochoso.

Essa técnica é amplamente empregada em operações de recuperação de pilares (*depilaring*), etapa da lavra subterrânea em que os pilares de minério deixados temporariamente para sustentar o teto são posteriormente extraídos, exigindo o abatimento controlado das rochas encaixantes para garantir a estabilidade da mina e a segurança das operações. Também é utilizada em métodos de lavra subterrânea que dependem do colapso controlado do maciço rochoso para viabilizar o avanço da extração mineral (ROY, 2021).

A aplicação do abatimento induzido requer estudos prévios das condições geológicas, geotécnicas e estruturais do maciço rochoso, além do monitoramento contínuo das condições de estabilidade. Aspectos como convergência do teto, carregamento dos pilares, vibrações induzidas pela detonação e presença de gases devem ser cuidadosamente avaliados para garantir a segurança da operação. Quando adequadamente projetada, a técnica permite controlar o comportamento das camadas rochosas, reduzindo riscos associados a colapsos inesperados e melhorando a eficiência da extração mineral (ROY, 2021).

O mecanismo de funcionamento baseia-se na indução de fraturas e na redução da resistência das camadas rochosas que compõem o teto da mina. A energia liberada pelos explosivos promove a ruptura controlada dessas estruturas, favorecendo o abatimento das rochas para áreas previamente planejadas. Dessa forma, o método contribui para o controle das tensões no maciço, reduzindo a ocorrência de eventos geomecânicos indesejados e proporcionando condições mais seguras para a continuidade da lavra subterrânea (ROY, 2021).

Vantagens

- Permite controlar o abatimento do teto em áreas onde o colapso natural não ocorre;
- Aumenta a segurança durante a recuperação de pilares e operações subterrâneas;
- Reduz o risco de colapsos inesperados do maciço rochoso;
- Auxilia no controle das tensões geomecânicas da mina;
- Possibilita maior recuperação do minério em determinados métodos de lavra;
- Pode aumentar a produtividade das operações subterrâneas.

Desvantagens

- Requer estudos geológicos e geotécnicos detalhados;
- Necessita de monitoramento constante das condições do maciço rochoso;
- Pode gerar vibrações significativas durante as detonações;
- Exige controle rigoroso de gases e condições de ventilação;
- Possui elevada complexidade operacional quando comparado a métodos convencionais de abatimento sem a indução por explosivos;
- A aplicação inadequada pode comprometer a estabilidade das escavações subterrâneas.

Como estudo de caso, [Roy \(2021\)](#) descrevem a aplicação do abatimento induzido por detonação em uma mina subterrânea de carvão na Índia durante operações de recuperação de pilares. No caso analisado, foi desenvolvido um padrão de perfuração composto por sete furos com profundidades entre 20 e 22 m, distribuídos em duas fileiras e carregados com aproximadamente 68 kg de explosivos, promovendo o abatimento controlado de cerca de 4.320 m³ de rocha sobre uma área aproximada de 216 m². Os resultados demonstraram que a técnica possibilitou o colapso seguro do teto em painéis onde o abatimento natural não ocorria, reduzindo o risco de explosões de ar (*air blast*) e aumentando a segurança das operações. Entretanto, o estudo também evidenciou que o sucesso da técnica depende de estudos geomecânicos detalhados, monitoramento contínuo da convergência do teto, controle das vibrações e adequado dimensionamento do plano de desmonte, não sendo uma solução aplicável indiscriminadamente a qualquer condição geológica ([ROY, 2021](#)).

2.7.10 Drones Aplicados ao Desmonte de Rochas

Os Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs), popularmente conhecidos como drones, vêm sendo incorporados às operações de mineração como ferramentas de apoio ao planejamento, monitoramento e avaliação dos desmontes de rochas. Essas aeronaves podem ser controladas

remotamente ou operar de forma autônoma por meio de rotas previamente programadas, sendo equipadas com câmeras e diferentes tipos de sensores para aquisição de imagens e dados geoespaciais (KARDASZ et al., 2016; REN et al., 2019). Equipados com câmeras de alta resolução e diferentes sensores, esses equipamentos permitem a obtenção rápida de imagens e modelos fotogramétricos, fornecendo informações para cálculos topográficos, inspeções e tomada de decisão. Além disso, os drones podem ser empregados no levantamento da geometria das bancadas, posicionamento dos furos carregados com explosivos, avaliação das condições das vias de acesso, faces livres e leiras, bem como na aquisição de imagens para análises granulométricas, medição dos deslocamentos da pilha de material desmontado e registro das detonações em alta resolução (SILVA, 2019; JUNIOR, 2022; SILVA et al., 2022; REN et al., 2019).

A foto análise é uma técnica digital que usa fotografias da pilha de blocos de rocha, após uma detonação, em pilhas de minério, na caçamba de caminhões, em correias para determinar faixa granulométrica de fragmentos, ajudando a ajustar o plano para melhorar a britagem e a reduzir custos. Grandes mineradoras no Brasil e no mundo utilizam sistemas em cenários específicos. Na lavra a céu aberto, no minério de ferro, câmeras fixas instaladas nas estruturas dos britadores analisam a rocha caindo dos caminhões basculantes. Em minas de cobre e ouro, imagens aéreas obtidas por drones, logo após a detonação, mapeiam toda a extensão da pilha de material. Em mineração de fosfato e calcário, a determinação da curva granulométrica na própria correia transportadora permite calibrar os modelos matemáticos de detonação, buscando o equilíbrio entre quebra excessivamente a rocha e gerar blocos de tamanho exagerado.

Na mineração subterrânea, a utilização de drones tem apresentado avanços significativos, principalmente em atividades de inspeção e monitoramento de cavidades de difícil acesso ou que oferecem riscos à segurança dos trabalhadores. Nessas aplicações, os drones podem operar embarcando sensores de imageamento e sistemas de mapeamento, permitindo a geração de modelos tridimensionais e a inspeção remota de escavações. Entretanto, o ambiente subterrâneo impõe desafios relacionados à ausência de sinal de navegação por satélite (GNSS), baixa luminosidade, poeira, umidade e presença de obstáculos, exigindo tecnologias específicas de navegação, como algoritmos de Localização e Mapeamento Simultâneo (*Simultaneous Localization and Mapping* – SLAM). Dessa forma, o emprego de drones contribui para aumentar a segurança operacional, reduzir a exposição dos trabalhadores a áreas instáveis e ampliar a qualidade das informações utilizadas no planejamento e controle das operações minerárias (KARDASZ et al., 2016; SILVA et al., 2022; AZHARI et al., 2017; REN et al., 2019).

Vantagens

- Aquisição rápida de imagens e modelos fotogramétricos;
- Levantamento topográfico das bancadas e frentes de lavra;
- Verificação do posicionamento dos furos de perfuração;

- Registro das detonações em alta resolução;
- Análise granulométrica por imagens;
- Medição do deslocamento das pilhas de material desmontado;
- Inspeção remota de áreas de difícil acesso;
- Redução da exposição dos trabalhadores a áreas de risco;
- Apoio ao monitoramento geotécnico e à tomada de decisão.

Desvantagens

- Dependência das condições ambientais para operação;
- Limitações de autonomia de voo e capacidade de carga;
- Necessidade de operadores treinados;
- Maior dificuldade de navegação em ambientes subterrâneos;
- Ausência de sinal GNSS em minas subterrâneas, exigindo tecnologias como SLAM;
- Investimento em equipamentos e sensores especializados.

2.7.11 Separação de Minérios

A Separação de Minérios (*Ore Sorting*) é uma tecnologia de pré-beneficiamento que permite identificar e separar seletivamente o minério do material estéril ainda nas etapas iniciais do processo produtivo. A técnica emprega sensores capazes de analisar propriedades físicas e químicas dos materiais, utilizando tecnologias como raios X, fluorescência de raios X e condutividade, possibilitando a classificação do material antes de seu encaminhamento às etapas subsequentes de beneficiamento. [Melo e Silva \(2025\)](#) apresentam a aplicação desses sensores na pré-classificação mineral, enquanto [Li et al. \(2020\)](#) destacam que sistemas de sensoriamento podem ser integrados a equipamentos já utilizados nas operações de lavra, como pás, carregadeiras frontais, escavadeiras e transportadores de correia. Dessa forma, a separação antecipada do estéril reduz o volume de material encaminhado para processos como cominuição e flotação, contribuindo para a redução do consumo energético, dos custos de processamento e da geração de rejeitos.

A integração dessa tecnologia aos equipamentos de lavra também possibilita que a caracterização do minério seja incorporada ao próprio ciclo operacional. Um exemplo é o sistema *ShovelSense*, que utiliza sensores robustos de fluorescência de raios X (*X-Ray Fluorescence – XRF*), de alta velocidade, instalados em equipamentos móveis de lavra para analisar o conteúdo mineral presente na caçamba e estimar o teor do material durante o ciclo de escavação. As

informações obtidas podem ser associadas à localização do material e transmitidas digitalmente ao *software* do Sistema de Gestão de Frotas (*Fleet Management System – FMS*), permitindo direcionar o caminhão de transporte de acordo com a classificação realizada, sem necessidade de intervenção direta do operador (LANG, 2023). Nesse contexto, o sensoriamento associado à separação seletiva pode melhorar o aproveitamento da jazida e a tomada de decisão operacional, além de contribuir para uma mineração mais eficiente e sustentável ao reduzir o processamento desnecessário de estéril e, consequentemente, os impactos relacionados ao consumo de energia e à disposição de rejeitos.

Vantagens

- Redução do volume de estéril processado: a identificação antecipada permite retirar material sem interesse econômico antes das etapas de cominuição e flotação;
- Redução do consumo energético: a diminuição da massa encaminhada ao beneficiamento reduz a energia necessária para o processamento;
- Redução da geração de rejeitos: a separação antecipada diminui o volume de material encaminhado às etapas posteriores e, consequentemente, a quantidade de rejeitos gerados;
- Melhor aproveitamento da jazida: a caracterização do material durante a lavra permite uma separação mais seletiva entre minério e estéril;
- Integração com equipamentos existentes: os sensores podem ser incorporados a escavadeiras, pás, carregadeiras e transportadores de correia (LI et al., 2020);
- Automação da tomada de decisão: sistemas como o *ShovelSense* podem fornecer informações ao Sistema de Gestão de Frotas para auxiliar no direcionamento dos caminhões de acordo com a classificação do material (LANG, 2023);
- Maior sustentabilidade operacional: a redução do material processado contribui para diminuir o consumo de energia, os custos de processamento e os impactos associados à disposição de rejeitos.

Desvantagens

- Necessidade de investimento em sensores e sistemas de automação: a implantação da tecnologia exige equipamentos específicos e integração com a infraestrutura operacional da mina;
- Dependência das características do minério: a eficiência da separação depende da existência de propriedades físicas ou químicas que possam ser adequadamente identificadas pelos sensores empregados;

- Necessidade de integração tecnológica: os dados obtidos pelos sensores precisam ser integrados aos equipamentos de lavra e, em aplicações automatizadas, aos sistemas de gestão de frotas;
- Maior complexidade operacional e tecnológica: a incorporação de sensores, processamento de dados e sistemas automatizados adiciona novos componentes que precisam ser operados e mantidos.

2.8 Mineração Subterrânea e Aplicação de Tecnologias

A aplicação de tecnologias na mineração subterrânea tem contribuído para ampliar a viabilidade técnica, econômica, ambiental e operacional das atividades minerárias. Ferramentas de monitoramento geotécnico, modelagem numérica, automação, eletrificação de equipamentos e sistemas inteligentes de suporte à decisão permitem aumentar a segurança operacional, melhorar o aproveitamento do recurso mineral e reduzir impactos ambientais. Nesse contexto, a mineração subterrânea tem se consolidado como uma alternativa estratégica em situações nas quais a mineração a céu aberto apresenta limitações técnicas, econômicas ou ambientais (OGGERI; ORESTE, 2015; HOOLI; HALIM, 2025; ROVITHIS, 2023).

A mineração subterrânea de rochas ornamentais tem se consolidado como uma alternativa às tradicionais operações a céu aberto, não apenas em situações nas quais as características geológicas do maciço impõem limitações à lavra superficial, mas também devido às crescentes exigências ambientais relacionadas às atividades minerárias (OGGERI; ORESTE, 2015). Em muitos casos, a mineração subterrânea pode apresentar vantagens econômicas e operacionais, especialmente em regiões montanhosas, áreas com elevado volume de estéril, altos custos de desapropriação ou locais onde as condições de estabilidade tornam a mineração a céu aberto inviável. Além disso, a exploração subterrânea pode reduzir significativamente os impactos visuais, a movimentação de material estéril e os custos relacionados à recuperação ambiental das áreas mineradas. Tendências recentes também incluem a substituição gradual de equipamentos movidos a diesel por veículos elétricos a bateria (*Battery Electric Vehicles – BEVs*), contribuindo para a redução das emissões de gases, da ventilação necessária nas minas e dos custos operacionais associados ao consumo de energia e à climatização das galerias (HOOLI; HALIM, 2025).

Outro aspecto relevante refere-se às condições geoestruturais do maciço rochoso e às tecnologias empregadas no processo de escavação. Segundo Oggeri e Oreste (2015), a viabilidade da mineração subterrânea depende de fatores como boas condições estruturais do maciço, estabilidade das escavações, características comerciais da rocha e eficiência econômica da operação. Nesse contexto, métodos mecânicos de corte e separação dos blocos apresentam vantagens relacionadas à preservação da integridade da rocha e ao melhor aproveitamento do material extraído. Além disso, o emprego de equipamentos autônomos, sistemas de navegação e monitoramento em tempo real tem ampliado a eficiência operacional, reduzido a exposição dos

trabalhadores a ambientes de risco e possibilitado maior controle das operações subterrâneas (ROVITHIS, 2023).

A estabilidade das escavações subterrâneas representa outro fator importante para o sucesso da exploração. Dessa forma, projetos de mineração subterrânea devem considerar análises geoestruturais detalhadas, modelagem numérica das fases de lavra e sistemas de monitoramento contínuo do maciço rochoso (OGGERI; ORESTE, 2015). O uso de pilares, sistemas de suporte e monitoramento geotécnico permite avaliar deslocamentos, controlar movimentações de blocos e garantir a estabilidade das escavações ao longo do tempo. Paralelamente, observa-se uma tendência crescente de integração entre sensores, redes de comunicação, equipamentos autônomos e plataformas digitais de gerenciamento das operações, aproximando o setor dos conceitos de Mineração 4.0 e possibilitando ganhos em produtividade, segurança e sustentabilidade (HOOLI; HALIM, 2025; ROVITHIS, 2023). Essas tecnologias têm sido amplamente discutidas pela indústria mineral e por eventos técnicos, como edições mais recentes do CBMINA, evidenciando sua crescente adoção nas operações subterrâneas.

2.9 Desvantagens

2.9.1 Impactos ambientais das detonações

Os desmontes de rochas com explosivos geram diversos impactos ambientais, físicos, sociais e econômicos decorrentes da propagação da energia liberada durante a detonação (SANTOS, 2023). Segundo o autor, a energia produzida pelos explosivos divide-se em três partes principais: uma responsável pela fragmentação e lançamento da rocha, outra propagada em forma de ondas sísmicas pelo maciço rochoso e uma terceira convertida em ruído e sobrepressão atmosférica. Em áreas urbanas ou próximas a comunidades, esses impactos tornam-se ainda mais críticos, ocasionando conflitos entre mineradoras e população devido aos danos estruturais, desconforto sonoro, emissão de poeira e riscos associados às operações de desmonte.

Os impactos ambientais decorrentes das detonações também estão diretamente relacionados à eficiência do aproveitamento da energia liberada pelos explosivos. Quando essa energia não é adequadamente convertida em fragmentação da rocha, parte dela é dissipada na forma de vibrações do solo, sobrepressão atmosférica, ruídos e projeção de fragmentos, reduzindo a eficiência do desmonte e ampliando seus impactos ambientais. Além disso, projetos inadequados de perfuração e desmonte ou a presença de descontinuidades geológicas não identificadas podem favorecer a dissipação da energia para regiões não produtivas do maciço ou para a atmosfera, comprometendo o desempenho operacional. Sob uma perspectiva Mine-to-Mill, essa perda de eficiência também reduz o potencial de otimização das operações subsequentes de britagem e moagem, afetando o desempenho global e a sustentabilidade da atividade minerária (ROCHA, 2026; KINYUA et al., 2022).

Apesar dos impactos ambientais e sociais associados às detonações, o desmonte com

explosivos continua sendo um método indispensável para a fragmentação de grandes volumes de rocha, especialmente em maciços de elevada resistência. Ruídos, emissão de poeira e vibrações frequentemente motivam questionamentos por parte da sociedade, exigindo das empresas mineradoras a adoção de medidas de controle e monitoramento ambiental. A relevância dessa técnica pode ser observada pelo elevado consumo anual de explosivos em países com forte atividade minerária, como Austrália e Estados Unidos, evidenciando sua ampla aplicação nas operações de mineração em escala industrial (LUSK; WORSEY, 2011; JUNIOR, 2022).

No Brasil, os limites aceitáveis para vibrações e sobrepressão atmosférica são regulamentados pela ABNT por meio da NBR 9653 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2018), estabelecendo parâmetros relacionados à velocidade de vibração de partículas, níveis de pressão acústica e controle do ultralancamento (SANTOS, 2023). Entretanto, mesmo quando os parâmetros normativos são respeitados, as detonações podem provocar impactos significativos em residências vizinhas, estruturas urbanas, recursos hídricos, fauna e flora. Além disso, a expansão das áreas mineradas e o armazenamento de estéril frequentemente geram impactos socioambientais relacionados à ocupação territorial e ao relacionamento com as comunidades do entorno.

2.9.2 Vibração do solo

A vibração do solo corresponde à propagação de ondas sísmicas geradas pelas detonações em direção às áreas próximas ao desmonte (ARMAGHANI et al., 2015). Essas vibrações são normalmente avaliadas por meio da velocidade de pico de partícula (*Peak Particle Velocity* – PPV) e da frequência das ondas sísmicas, sendo consideradas importantes indicadores para avaliação de possíveis danos estruturais. Vibrações excessivas podem causar fissuras em edificações, alterações no lençol freático e impactos ambientais nas áreas próximas às operações de mineração.

Segundo (SANTOS, 2023), as vibrações do terreno podem ser classificadas como ondas internas e superficiais, sendo frequentemente percebidas pela população localizada além dos limites da mina. A intensidade dessas vibrações é influenciada por fatores como distância da detonação, propriedades geomecânicas do maciço rochoso, carga de explosivos por retardo e geometria do plano de desmonte por explosivo (ARMAGHANI et al., 2015). Dessa forma, o monitoramento contínuo das vibrações e o adequado planejamento das detonações são fundamentais para minimizar impactos ambientais e garantir maior segurança operacional.

Nesse contexto, tecnologias de monitoramento sísmico, *softwares* de modelagem computacional e métodos baseados em inteligência artificial têm sido amplamente empregados para prever e otimizar os resultados das detonações. Entre estas técnicas destacam-se:

- Redes Neurais Artificiais (*Artificial Neural Networks* - ANNs): modelos computacionais inspirados no funcionamento do cérebro humano, capazes de aprender padrões a partir de dados históricos. No desmonte de rochas, são utilizadas para prever vibração do

solo, fragmentação, retroquebra (*back-break*) e projeção de rochas (*flyrock*) (MONJEZI; DEGHANI, 2008; EBRAHIMI et al., 2015).

- Lógica Fuzzy (*Fuzzy Logic*): método baseado em graus de pertinência que permite representar incertezas inerentes aos processos de desmonte. É utilizada para prever impactos ambientais das detonações e auxiliar na definição dos parâmetros do plano de fogo (FISNE et al., 2011).
- Sistema Neuro-Fuzzy Adaptativo (*Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System - ANFIS*): combina Redes Neurais Artificiais com Lógica Fuzzy, permitindo aprender com dados experimentais e tratar informações imprecisas. Essa técnica tem sido aplicada na estimativa de propriedades geomecânicas, como a resistência à compressão simples e o módulo de Young, contribuindo para o planejamento das operações de desmonte (ARMAGHANI et al., 2014c).
- Otimização por Enxame de Partículas (*Particle Swarm Optimization - PSO*): algoritmo de otimização inspirado no comportamento coletivo de bandos de aves e cardumes de peixes, empregado para otimizar parâmetros das detonações e reduzir vibrações do solo e projeção de rochas (ARMAGHANI et al., 2014a).
- Algoritmo de Colônia de Abelhas (*Bee Colony Algorithm - BCA*): algoritmo bioinspirado baseado no comportamento das colônias de abelhas, utilizado para otimizar os parâmetros do plano de fogo, melhorando a fragmentação das rochas e reduzindo a retroquebra (EBRAHIMI et al., 2015).

Essas técnicas complementam os métodos empíricos tradicionalmente empregados na mineração, proporcionando maior precisão na previsão de vibração do solo, sobrepressão atmosférica, projeção de rochas (*flyrock*), retroquebra (*back-break*) e fragmentação, além de apoiar a tomada de decisão durante o planejamento do plano de fogo, reduzindo impactos ambientais e aumentando a confiabilidade das operações de desmonte (IRAMINA et al., 2018; ARMAGHANI et al., 2015).

2.9.3 Sobrepressão atmosférica

A sobrepressão atmosférica é produzida pela propagação das ondas de choque geradas pela detonação até a superfície livre do terreno (ARMAGHANI et al., 2015). Essas ondas apresentam componentes audíveis e subaudíveis que podem provocar desconforto à população, vibração de portas e janelas, além de possíveis danos estruturais nas áreas próximas às minerações. Entre as principais fontes de geração da sobrepressão destacam-se o deslocamento da rocha na face da bancada, a liberação de gases através de fraturas e a expulsão do tampão dos furos de detonação.

De acordo com (SANTOS, 2023), a sobrepressão atmosférica representa um dos principais fatores de reclamação das comunidades localizadas no entorno das operações minerárias, principalmente em áreas urbanas. Sua intensidade é influenciada por fatores como geometria da detonação, carga de explosivos por retardo, comprimento do tampão e direção de propagação das ondas (ARMAGHANI et al., 2015). Assim, o controle adequado do plano de desmonte por explosivo e o monitoramento contínuo tornam-se essenciais para reduzir os impactos acústicos e minimizar danos às estruturas vizinhas.

O avanço dos sistemas eletrônicos de detonação e das técnicas de modelagem permite otimizar a sequência de disparo e a distribuição da energia dos explosivos, contribuindo para a redução da sobrepressão atmosférica e do desconforto causado às comunidades vizinhas.

2.9.4 Projeção de Rocha

A projeção de rocha, conhecida internacionalmente como *flyrock*, consiste no lançamento descontrolado de fragmentos rochosos para além da área de segurança da detonação (ARMAGHANI et al., 2015). Esse fenômeno ocorre quando existe desequilíbrio entre a resistência do maciço rochoso, o confinamento da carga explosiva e a distribuição da energia da detonação, fazendo com que parte significativa da energia seja direcionada ao arremesso de fragmentos em vez da fragmentação adequada da rocha.

Segundo (SANTOS, 2023), o ultralancamento de fragmentos representa um dos impactos mais perigosos associados às operações de desmonte, podendo provocar acidentes graves, danos estruturais e riscos à população vizinha. Entre os fatores que favorecem a ocorrência da projeção de rochas destacam-se afastamento inadequado entre furos, tampão insuficiente, excesso de explosivos, perfuração imprecisa e condições geológicas desfavoráveis (ARMAGHANI et al., 2015). Nesse contexto, técnicas modernas de monitoramento e métodos computacionais, como redes neurais artificiais e sistemas fuzzy, têm sido utilizados para prever impactos ambientais e auxiliar no controle das operações de detonação.

2.9.5 Impactos na qualidade do ar, fauna e flora

As operações de desmonte de rochas também provocam alterações significativas na qualidade do ar, principalmente devido à emissão de poeira e material particulado gerados pelas detonações, tráfego de veículos e operação de equipamentos movidos à combustão (SANTOS, 2023). Além disso, os ruídos e vibrações associados às explosões afetam diretamente a fauna local, promovendo o afastamento de animais silvestres e alterações no equilíbrio ecológico das áreas mineradas. A supressão vegetal, o acúmulo de estéril e as alterações no sistema de drenagem também contribuem para impactos ambientais sobre a flora, os recursos hídricos e o solo.

Para minimizar esses impactos, diversas ações mitigadoras podem ser adotadas, como implantação de cortinas vegetais, controle de poeira por aspersão de água, monitoramento

de ruídos e vibrações, programas de recuperação ambiental e educação ambiental (SANTOS, 2023). Além disso, o autor destaca a importância da capacitação técnica dos trabalhadores, do cumprimento das normas de segurança e do uso de tecnologias modernas de monitoramento e controle ambiental para garantir maior sustentabilidade às operações de mineração.

Tecnologias emergentes, como a detonação por plasma, além de melhorias nos sistemas de carregamento e iniciação, têm sido estudadas como alternativas para reduzir a emissão de poeira, ruído e projeção de fragmentos, contribuindo para a diminuição dos impactos sobre a fauna e a flora (ROY, 2021).

2.9.6 Relacionamento com a comunidade e segurança operacional

O relacionamento entre mineração e comunidade representa um dos principais desafios associados às operações de desmonte com explosivos, especialmente em áreas urbanas ou próximas a centros populacionais (SANTOS, 2023). Vibrações, ruídos, emissão de poeira e aumento do tráfego de veículos pesados frequentemente geram tensões sociais e reclamações da população do entorno. Nesse contexto, programas de comunicação social, reuniões periódicas com a comunidade e divulgação das atividades operacionais são importantes ferramentas para reduzir conflitos e aumentar a transparência das operações minerárias.

Além disso, a segurança operacional deve ser observada em todas as etapas do processo de desmonte, desde o transporte e armazenamento dos explosivos até a execução das detonações (SANTOS, 2023). O uso adequado de equipamentos de proteção individual, sinalização de segurança, capacitação contínua dos trabalhadores e atualização das técnicas de detonação são medidas fundamentais para reduzir riscos ocupacionais e prevenir acidentes. Dessa forma, o cumprimento das normas regulamentadoras e o uso de tecnologias modernas tornam-se essenciais para garantir segurança, produtividade e sustentabilidade nas operações de mineração.

Além das ações de comunicação e gestão social, a adoção de sistemas de monitoramento em tempo real, sismógrafos, modelagem preditiva e tecnologias avançadas de detonação contribui para aumentar a transparência das operações e reduzir os impactos percebidos pela população. Dessa forma, a tecnologia torna-se uma importante ferramenta para fortalecer o relacionamento com as comunidades e promover maior sustentabilidade às atividades minerárias.

2.10 Estudos em desmonte de rochas

Os estudos mais recentes relacionados ao desmonte de rochas demonstram que os avanços tecnológicos têm ocorrido não apenas na área de perfuração e detonação, mas também em aspectos relacionados à segurança operacional, sustentabilidade ambiental, monitoramento geotécnico e modelagem computacional. Nesse contexto, diferentes pesquisas têm buscado reduzir os impactos ambientais das detonações, aumentar a produtividade das operações e melhorar as condições de trabalho dos profissionais envolvidos na atividade minerária.

No contexto da segurança e das condições de trabalho, [Triginelli e Cunha \(2011\)](#) realizaram um estudo histórico sobre as relações de trabalho no setor de extração de granito no município de Vila Pavão (ES). Os autores observaram que, apesar dos avanços ocorridos ao longo das últimas décadas, ainda persistem condições de trabalho precárias, caracterizadas pela exposição dos trabalhadores às intempéries, ruídos excessivos, vibrações, riscos de acidentes com equipamentos pesados, trabalhos em altura e movimentação de blocos rochosos. Os resultados evidenciam a importância da adoção de tecnologias e boas práticas operacionais para aumentar a segurança e melhorar as condições de trabalho na mineração.

Diversos trabalhos têm concentrado esforços no desenvolvimento de tecnologias de monitoramento e modelagem para reduzir os impactos ambientais decorrentes das detonações. Nesse sentido, [Ferreira \(2015\)](#) monitoraram os níveis de vibração e ruído gerados por desmontes de rocha em duas mineradoras de calcário no município de Caçapava do Sul (RS). Os resultados demonstraram que os níveis de vibração e pressão acústica permaneceram dentro dos limites estabelecidos pela NBR 9653, evidenciando que um adequado planejamento e execução do plano de desmonte por explosivo podem minimizar impactos às estruturas vizinhas e melhorar as etapas subsequentes de carregamento, transporte e beneficiamento.

Complementando essa linha de pesquisa, [Iramina et al. \(2018\)](#) aplicaram Redes Neurais Artificiais (RNA) associadas a parâmetros geomecânicos para modelar a propagação de vibrações induzidas por detonações em uma operação de mineração brasileira. Os autores verificaram que a incorporação de características geomecânicas do maciço rochoso aos modelos preditivos permitiu obter estimativas satisfatórias dos níveis de vibração, contribuindo para tornar a mineração em áreas urbanas uma atividade mais segura e sustentável.

O emprego de técnicas de inteligência artificial para previsão dos impactos ambientais das detonações também foi investigado por [Armaghani et al. \(2015\)](#). Os autores utilizaram sistemas inteligentes para prever sobrepressão atmosférica, vibração do solo, projeção de rochas e retroquebra (*back-break*) em pedreiras de granito na Malásia. Os resultados demonstraram o potencial dessas ferramentas para auxiliar no planejamento das detonações e na mitigação dos impactos ambientais associados ao uso de explosivos.

Outra vertente importante do estado da arte refere-se à aplicação de tecnologias em operações subterrâneas. [Oggeri e Oreste \(2015\)](#) apresentaram um estudo sobre a exploração subterrânea da Caverna de Candoglia, utilizando modelagem numérica e sistemas de monitoramento para avaliar tensões, deformações e estabilidade do maciço rochoso. Os resultados permitiram analisar diferentes cenários de exploração, apoiar o dimensionamento dos sistemas de suporte e contribuir para o desenvolvimento de um plano de lavra mais seguro e eficiente.

Por fim, [Roy \(2021\)](#) realizaram uma ampla revisão das tecnologias emergentes aplicadas ao desmonte de rochas, incluindo sistemas de iniciação não elétricos, *air-deck blasting*, *blast casting*, *plasma blasting*, *segregation blasting* e *induced caving by blasting*. Segundo os autores, essas tecnologias apresentam potencial para aumentar a eficiência operacional, reduzir custos,

melhorar a fragmentação das rochas e minimizar impactos ambientais, reforçando a tendência de utilização crescente de soluções tecnológicas para tornar a mineração mais produtiva, segura e sustentável.

De forma geral, os estudos analisados demonstram que a evolução tecnológica aplicada às operações de desmonte de rochas tem contribuído significativamente para o aumento da produtividade, melhoria da fragmentação, redução dos impactos ambientais e aumento da segurança operacional. Observa-se também uma crescente utilização de ferramentas de monitoramento, modelagem numérica e inteligência artificial para prever e controlar efeitos indesejados das detonações, como vibrações do solo, sobrepressão atmosférica, projeção de rochas e danos ao maciço rochoso.

Entretanto, os trabalhos consultados abordam esses benefícios de forma isolada, concentrando-se em aspectos específicos da operação, como segurança, monitoramento ambiental ou desempenho geotécnico. Nesse contexto, o presente trabalho busca contribuir por meio de uma análise integrada das principais tecnologias aplicadas ao desmonte de rochas, relacionando suas vantagens e desvantagens à agregação de valor para as operações de mineração. Dessa forma, procura-se demonstrar como a adoção de tecnologias pode contribuir simultaneamente para a eficiência operacional, sustentabilidade ambiental, segurança dos trabalhadores e melhoria do relacionamento com as comunidades do entorno.

3 OBJETIVO

3.1 Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo realizar uma revisão bibliográfica sobre o estado da arte das tecnologias aplicadas ao desmonte de rochas com explosivos na mineração, buscando analisar de que forma a utilização dessas tecnologias pode agregar valor às diferentes áreas operacionais da atividade minerária. Além disso, pretende-se compreender como os avanços tecnológicos relacionados aos processos de perfuração, detonação e monitoramento contribuem para o aumento da eficiência operacional, segurança e sustentabilidade das operações de mineração.

3.2 Objetivos específicos

- Analisar as principais tecnologias aplicadas ao desmonte de rochas com explosivos;
- Identificar vantagens, desvantagens e impactos operacionais, ambientais e produtivos das tecnologias de detonação;
- Avaliar a influência da melhoria da fragmentação, redução da contaminação média, diminuição da propagação de material indesejado e aumento da produtividade na agregação de valor das operações mineiras;
- Investigar os principais impactos negativos das detonações, como vibração do solo, sobrepressão atmosférica, *flyrock* e *back-break*;
- Verificar como as tecnologias modernas de desmonte contribuem para a mitigação dos impactos ambientais e operacionais;
- Desenvolver um quadro comparativo relacionando benefícios e limitações das tecnologias de detonação.

4 METODOLOGIA

Este capítulo apresenta a metodologia utilizada no desenvolvimento deste trabalho, caracterizado como uma pesquisa de natureza bibliográfica e exploratória. O estudo foi conduzido por meio de um levantamento e análise da literatura técnica e científica relacionada às tecnologias aplicadas ao desmonte de rochas com explosivos, com foco nas principais tecnologias empregadas nas operações de mineração.

O levantamento bibliográfico contemplou a consulta a artigos científicos, nacionais e internacionais, livros especializados, normas técnicas, dissertações, teses e documentos técnicos do setor mineral. As consultas bibliográficas foram realizadas em bases de dados científicas amplamente utilizadas, como Google Scholar, Scopus, Web of Science e SciELO, complementadas por livros de referência na área de desmonte de rochas e mineração. Foram empregados descritores relacionados ao tema, em português e inglês, entre eles: *desmonte de rochas*, *detonação*, *rock blasting*, *blasting*, *air deck blasting*, *blast casting*, *ground vibration*, *flyrock*, *back-break* e *mineração subterrânea*.

Como critérios metodológicos, foram priorizadas publicações disponibilizadas nos idiomas português e inglês, por concentrarem parte significativa da produção científica relacionada ao desmonte de rochas e às tecnologias aplicadas à mineração. A busca bibliográfica contemplou, preferencialmente, trabalhos publicados entre os anos de 2005 e 2026, de forma a privilegiar estudos recentes sobre tecnologias emergentes, sem excluir obras clássicas consideradas fundamentais para a compreensão dos conceitos de perfuração, explosivos, fragmentação e mecânica das rochas. Foram incluídos artigos científicos revisados por pares, livros técnicos, capítulos de livros, dissertações, teses, trabalhos de conclusão de curso, normas e guias técnicos, trabalhos publicados em anais de eventos científicos, documentos institucionais e materiais didáticos de reconhecida relevância acadêmica. Foram excluídas publicações sem respaldo técnico-científico, documentos sem identificação de autoria, materiais publicitários e fontes que não apresentassem relação direta com o tema da pesquisa. Após a identificação das publicações, realizou-se uma análise de aderência aos objetivos do trabalho, sendo selecionadas as referências que abordavam tecnologias aplicadas ao desmonte de rochas com explosivos, seus impactos operacionais, ambientais e econômicos, bem como métodos de monitoramento, planejamento e otimização das operações minerárias.

Após a seleção e análise das publicações, foram utilizadas 52 referências distintas no desenvolvimento do trabalho. O conjunto bibliográfico foi composto por artigos publicados em periódicos científicos e revistas técnicas, livros, capítulos de livros, normas e guias técnicos, dissertações, teses, trabalhos de conclusão de curso, material didático, trabalhos publicados em anais de eventos e páginas institucionais. Predominaram os artigos publicados em periódicos científicos, que representaram 26 das referências utilizadas, seguidos pelos livros técnicos

e científicos, com oito obras. A distribuição quantitativa das fontes consultadas por tipo de publicação é apresentada na Tabela 1 e a distribuição temporal é apresentada na Tabela 2.

Tabela 1 – Caracterização quantitativa das referências utilizadas no trabalho.

Tipo de publicação	Nacionais	Internacionais	Total
Artigos em periódicos científicos	4	22	26
Artigos em revistas técnicas	1	0	1
Trabalhos em anais de congressos	1	2	3
Livros técnicos e científicos	4	4	8
Capítulos de livro	0	1	1
Dissertações de mestrado	6	0	6
Teses de doutorado	2	0	2
Trabalhos de conclusão de curso	1	0	1
Norma/Guia técnico	1	1	2
Material didático	1	0	1
Página institucional	0	1	1
Total de referências	21	31	52

Tabela 2 – Distribuição temporal das referências utilizadas no trabalho.

Período de publicação	Quantidade
Até 2009	7
2010–2019	25
2020–2026	20
Total	52

O levantamento bibliográfico buscou identificar as principais tecnologias empregadas nas operações de perfuração, detonação, monitoramento e controle dos impactos gerados pelos desmontes de rochas, analisando suas características, vantagens, limitações, aplicações e contribuições para a agregação de valor nas operações minerárias.

As informações obtidas foram submetidas a uma análise qualitativa. As tecnologias identificadas foram agrupadas de acordo com suas principais contribuições para as operações de mineração, permitindo identificar suas vantagens, desvantagens e potenciais aplicações. Com base nessa análise, foram elaborados dois quadros comparativos relacionando os benefícios e limitações das tecnologias à agregação de valor nas operações minerárias, considerando aspectos como produtividade, qualidade da fragmentação, redução da diluição do minério, segurança operacional, controle ambiental e sustentabilidade.

Por fim, os resultados obtidos foram discutidos à luz da literatura consultada, buscando analisar de que forma a adoção de tecnologias aplicadas ao desmonte de rochas pode contribuir para aumentar a eficiência operacional, reduzir os impactos ambientais e promover maior sustentabilidade nas atividades de mineração.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta os resultados obtidos a partir da revisão bibliográfica realizada sobre as tecnologias aplicadas ao desmonte de rochas na mineração e a discussão desses resultados. A análise buscou compreender de que forma os avanços tecnológicos identificados na literatura contribuem para a agregação de valor às operações minerárias, considerando aspectos relacionados à produtividade, qualidade da fragmentação, segurança operacional, sustentabilidade ambiental e relacionamento com as comunidades do entorno.

5.1 Resultados

Com base nas informações levantadas, foi realizada uma análise qualitativa das principais tecnologias, métodos e ferramentas discutidos pelos autores consultados. Como resultado dessa análise, foram elaborados dois quadros síntese: o Quadro 3, que relaciona as principais vantagens observadas na literatura com seus potenciais impactos na agregação de valor das operações minerárias, e o Quadro 4, que apresenta as principais desvantagens e impactos associados às detonações, juntamente com estratégias capazes de mitigar seus efeitos e gerar valor para a operação.

Os resultados evidenciam benefícios relacionados à adoção de tecnologias modernas de desmonte, destacando-se a redução da diluição do minério, a melhoria da fragmentação das rochas, a diminuição da necessidade de desmonte secundário, a redução da propagação de material indesejado e o aumento da produtividade das operações de perfuração, lavra e beneficiamento. Por outro lado, também foram identificados desafios e impactos associados às detonações, incluindo vibração do solo, sobrepressão atmosférica, projeção de rochas, retroquebra e impactos sobre a qualidade do ar, os recursos hídricos, a fauna, a flora e as comunidades do entorno.

5.2 Quadro de vantagens e agregação de valor para operação

Tabela 3 – Quadro de vantagens e agregação de valor para operação.

Vantagem	Agregação de valor	Referências
(1) Redução da diluição do minério	– Maior qualidade do material produzido	(SANTOS, 2023);
	– Menor mistura com material estéril	(ROY, 2021);
	– Melhor aproveitamento da jazida	(SILVA, 2025)
	– Redução de perdas no beneficiamento	
	– Aumento do retorno econômico da operação	
	– Diminuição de custos de transporte	

Continua na próxima página

Tabela 3 – continuação

Vantagem	Agregação de valor	Referências
(2) Melhoria da fragmentação	– Maior eficiência no carregamento e transporte – Redução da necessidade de britagem secundária – Redução da necessidade de desmonte secundário (fogacho) – Menor consumo energético no beneficiamento – Redução de custos operacionais – Aumento da produtividade da lavra	(FERREIRA, 2015); (SANTOS, 2023); (ROY, 2021)
(3) Redução da propagação de material indesejado	– Maior seletividade da lavra – Melhor controle da zona de detonação – Menor retrabalho operacional – Redução de perdas de minério – Melhor controle da diluição do minério	(ARMAGHANI et al., 2015); (SANTOS, 2023)
(4) Aumento da produtividade de perfuração	– Redução do tempo de ciclo operacional – Maior avanço da lavra – Melhor utilização dos equipamentos – Redução de custos operacionais – Maior previsibilidade das operações	(BARBOSA, 2023); (SANTOS, 2023)
(5) Maior controle das detonações	– Melhor distribuição da energia dos explosivos – Redução de vibrações, sobrepressão e projeção de rochas – Menor ocorrência de falhas de detonação – Maior segurança operacional – Otimização do plano de desmonte por explosivo – Programação precisa dos tempos de retardo – Maior controle da sequência de detonação	(ARMAGHANI et al., 2015); (IRAMINA et al., 2018); (ROY, 2021); (LUSK; WORSEY, 2011)
(6) Uso de monitoramento, simulação e modelos preditivos	– Previsão mais precisa dos impactos ambientais – Apoio à tomada de decisão técnica – Maior confiabilidade operacional – Redução de riscos geotécnicos – Redução de conflitos com comunidades – Simulação prévia dos resultados do desmonte – Armazenamento e análise histórica dos desmontes – Levantamentos topográficos rápidos com drones – Monitoramento remoto das frentes de lavra – Análise granulométrica por imagens aéreas	(IRAMINA et al., 2018); (ARMAGHANI et al., 2015); (OGGERI; ORESTE, 2015); (JUNIOR, 2022); (SILVA et al., 2022)
(7) Redução dos impactos ambientais	– Menor emissão de poeira e ruído – Redução de vibrações – Redução de sobrepressão atmosférica e projeção de rochas – Maior conformidade com normas ambientais – Melhor relacionamento com comunidades – Maior sustentabilidade da operação	(SANTOS, 2023); (ROY, 2021); (FERREIRA, 2015); (IRAMINA et al., 2018); (LUSK; WORSEY, 2011)

Continua na próxima página

Tabela 3 – continuação

Vantagem	Agregação de valor	Referências
(8) Aumento da segurança operacional	– Redução da exposição dos trabalhadores aos riscos – Menor probabilidade de acidentes – Maior controle das operações de desmonte – Maior confiabilidade da sequência de iniciação – Melhor gestão dos riscos ocupacionais – Maior confiabilidade das operações – Inspeção remota de áreas de difícil acesso utilizando drones – Redução da exposição dos trabalhadores a áreas instáveis	(TRIGINELLI; CUNHA, 2011); (SANTOS, 2023); (ROY, 2021); (FERREIRA, 2015); (LUSK; WORSEY, 2011); (SILVA et al., 2022)

5.3 Quadro de desvantagens e agregação de valor para operação

Tabela 4 – Quadro de desvantagens e agregação de valor para operação.

Desvantagens	Estratégia para agregação de valor	Referências
(1) Sobrepressão do ar	– Redução do desconforto sonoro à população – Redução de vibrações em portas e janelas – Redução de reclamações da comunidade – Maior aceitação social da atividade minerária – Melhor controle do plano de desmonte por explosivo	(SANTOS, 2023); (ARMAGHANI et al., 2015)
(2) Vibração do solo	– Redução de fissuras em estruturas – Maior segurança operacional – Redução de conflitos comunitários – Otimização do plano de desmonte por explosivo – Conformidade com a NBR 9653 – Detonadores eletrônicos para maior precisão dos retardos – Emprego de softwares de simulação para otimização do plano de fogo	(IRAMINA et al., 2018); (FERREIRA, 2015); (SANTOS, 2023); (LUSK; WORSEY, 2011); (JUNIOR, 2022)
(3) Projeção de rocha e retroquebra	– Redução de acidentes – Menor perda de minério – Melhor estabilidade geotécnica – Redução de retrabalho – Melhor preservação dos limites de escavação – Simulação computacional da distribuição de energia – Avaliação do alcance dos fragmentos por levantamento aéreo com drones	(ARMAGHANI et al., 2015); (ROY, 2021); (SANTOS, 2023); (JUNIOR, 2022)
(4) Impactos na qualidade do ar	– Redução da emissão de poeira e material particulado – Redução da emissão de gases provenientes das operações – Melhoria das condições ambientais – Redução de impactos à saúde ocupacional e pública – Atendimento às normas ambientais	(SANTOS, 2023); (ROY, 2021); (SILVA et al., 2022)
(5) Impactos na fauna e flora	– Preservação da biodiversidade – Redução do afugentamento da fauna – Redução da interferência nos ecossistemas locais – Menor degradação ambiental – Maior sustentabilidade operacional	(SANTOS, 2023); (ROY, 2021)

Continua na próxima página

Tabela 4 – continuação

Desvantagens	Estratégia para agregação de valor	Referências
(6) Alteração da superfície do solo	– Redução de erosões – Melhor conservação do solo – Redução da degradação das áreas mineradas – Redução de assoreamentos – Melhor recuperação ambiental	(SANTOS, 2023)
(7) Alteração do sistema de água	– Preservação de aquíferos – Redução de impactos hídricos – Preservação dos recursos hídricos – Redução da contaminação hídrica – Maior sustentabilidade ambiental	(SANTOS, 2023)
(8) Risco de acidentes de trânsito	– Redução de acidentes viários – Maior segurança da população do entorno – Melhor planejamento logístico – Redução de impactos no tráfego local – Menor desgaste da infraestrutura viária	(SANTOS, 2023)
(9) Acidentes ocupacionais	– Redução de acidentes de trabalho – Maior segurança dos trabalhadores – Redução de afastamentos – Maior produtividade operacional – Melhor capacitação técnica – Utilização de sistemas eletrônicos que aumentam a confiabilidade da iniciação	(TRIGINELLI; CUNHA, 2011); (SANTOS, 2023); (LUSK; WORSEY, 2011)
(10) Conflitos com a comunidade	– Maior aceitação social – Redução de reclamações – Melhor relacionamento institucional – Redução de paralisações – Fortalecimento da imagem da empresa – Registro visual e monitoramento das detonações por drones – Planejamento baseado em modelos computacionais para redução dos impactos	(FERREIRA, 2015); (IRAMINA et al., 2018); (SANTOS, 2023); (JUNIOR, 2022); (SILVA et al., 2022)

5.4 Discussão

A análise dos resultados demonstra que a agregação de valor proporcionada pelas tecnologias aplicadas ao desmonte de rochas não está restrita ao aumento da produtividade da etapa de detonação. A melhoria da fragmentação pode produzir efeitos nas etapas subsequentes da cadeia produtiva, favorecendo as operações de carregamento, transporte, britagem e moagem. Nesse contexto, tecnologias relacionadas ao planejamento do plano de fogo, sistemas de iniciação, monitoramento, modelagem computacional e controle da fragmentação contribuem para uma abordagem integrada das operações minerárias.

Ao mesmo tempo, os resultados demonstram que os ganhos proporcionados pelas tecnologias devem ser avaliados em conjunto com suas limitações e com os impactos decorrentes das detonações. Vibrações, sobrepressão atmosférica, projeção de fragmentos, geração de poeira e

demais efeitos ambientais podem comprometer a segurança operacional, elevar custos e afetar o relacionamento com as comunidades do entorno. Dessa forma, a adoção de tecnologias deve estar associada ao adequado planejamento das operações, ao conhecimento das características do maciço rochoso e ao monitoramento contínuo dos resultados obtidos.

A comparação entre as vantagens e desvantagens identificadas na literatura evidencia, portanto, que a aplicação adequada das tecnologias de desmonte pode contribuir simultaneamente para o aumento da eficiência operacional, redução de riscos, melhor aproveitamento dos recursos minerais e redução dos impactos ambientais. A escolha dessas tecnologias deve considerar as características específicas de cada operação, uma vez que seus benefícios dependem das condições geológicas, geotécnicas, econômicas e operacionais da mina.

5.5 Lacunas e Tendências

A revisão bibliográfica evidenciou que, embora tenham ocorrido avanços significativos nas tecnologias aplicadas ao desmonte de rochas, ainda existem importantes lacunas relacionadas à integração entre planejamento, monitoramento e controle das operações. Grande parte dos estudos concentra-se na avaliação isolada de parâmetros como vibração do solo, fragmentação, retroquebra (*back-break*) ou projeção de rochas (*flyrock*), enquanto abordagens integradas que considerem simultaneamente aspectos operacionais, econômicos e ambientais ainda são relativamente pouco exploradas (IRAMINA et al., 2018; MOOMIVAND et al., 2025).

Outra lacuna identificada refere-se à calibração e validação dos modelos computacionais empregados na previsão dos resultados dos desmontes. Embora técnicas de inteligência artificial, como Redes Neurais Artificiais, ANFIS, Lógica Fuzzy e algoritmos bioinspirados tenham apresentado resultados promissores, seu desempenho depende fortemente da disponibilidade de bases de dados representativas e da calibração para as condições geológicas específicas de cada mina. Dessa forma, a transferência direta desses modelos entre diferentes operações ainda constitui um desafio para sua aplicação em larga escala (ARMAGHANI et al., 2014b; EBRAHIMI et al., 2015; FISNE et al., 2011).

Observou-se também uma tendência crescente de digitalização das operações minerárias por meio da integração entre softwares especializados, detonadores eletrônicos, drones, sensores geotécnicos e sistemas de monitoramento em tempo real. Essas tecnologias permitem ampliar a automação do planejamento e do controle das detonações, fornecendo maior quantidade de informações para apoio à tomada de decisão e contribuindo para aumentar a segurança operacional e reduzir impactos ambientais (JUNIOR, 2022; SILVA et al., 2022; ROY, 2021).

Além disso, a literatura recente indica uma crescente adoção da abordagem *Mine-to-Mill*, na qual o desmonte deixa de ser tratado como uma operação isolada e passa a integrar um sistema contínuo envolvendo perfuração, carregamento, transporte, britagem e moagem. Nesse contexto, a fragmentação obtida no desmonte assume papel estratégico na otimização

do desempenho global da mina, influenciando diretamente o consumo energético, os custos operacionais e a produtividade das etapas subsequentes do processo mineral (KINYUA et al., 2022; MOOMIVAND et al., 2025; ROCHA, 2026).

Os resultados analisados indicam ainda uma tendência de integração entre tecnologias de sensoriamento, classificação de minérios e sistemas de gestão operacional diretamente na frente de lavra. A identificação em tempo real das características do material e o monitoramento de teor permitem aprimorar a separação entre minério e estéril, aumentando a seletividade da operação, reduzindo a diluição e evitando o transporte e o processamento desnecessário de material sem interesse econômico. Tecnologias de *Ore Sorting* baseadas em sensores podem ser integradas a equipamentos de lavra, como pás, carregadeiras frontais, escavadeiras e transportadores de correia, permitindo que informações sobre as características do material sejam obtidas ainda durante as etapas iniciais da operação (MELO; SILVA, 2025; LI et al., 2020).

Essa integração amplia o conceito de *Mine-to-Mill*, uma vez que as informações obtidas na frente de lavra podem auxiliar não apenas na separação entre minério e estéril, mas também no direcionamento do material e no controle da alimentação das etapas subsequentes de beneficiamento. Sistemas como o *ShovelSense*, associados aos Sistemas de Gestão de Frotas (*Fleet Management Systems – FMS*), demonstram o potencial de utilização dessas informações para automatizar decisões relacionadas ao destino do material durante a operação (LANG, 2023). Entretanto, a integração entre sensoriamento, classificação, sistemas de gestão de frotas e processos de beneficiamento ainda representa um campo relevante para desenvolvimento, especialmente quanto à capacidade de transformar dados obtidos em tempo real em decisões operacionais integradas. O avanço dessas tecnologias apresenta potencial para reduzir o consumo energético nas etapas de cominuição, melhorar o aproveitamento dos recursos minerais e diminuir a geração de rejeitos, contribuindo para os princípios da Mineração 4.0 e da mineração sustentável.

Por fim, observa-se que a incorporação de veículos autônomos, equipamentos eletrificados, monitoramento remoto e ferramentas baseadas em inteligência artificial representam algumas das principais tendências para a mineração nas próximas décadas. Essas tecnologias estão alinhadas aos princípios da Mineração 4.0 e têm potencial para aumentar a eficiência operacional, reduzir riscos ocupacionais e contribuir para operações minerárias mais sustentáveis. Entretanto, sua consolidação dependerá da redução dos custos de implantação, da capacitação das equipes e do desenvolvimento de soluções adaptadas às diferentes condições geológicas e operacionais encontradas na mineração (HOOLI; HALIM, 2025; ROVITHIS, 2023; ROY, 2021).

De forma geral, os resultados apresentados e discutidos neste capítulo demonstram que as tecnologias aplicadas ao desmonte de rochas exercem influência direta sobre o desempenho operacional, econômico, ambiental e social das atividades minerárias. A análise qualitativa realizada a partir da revisão bibliográfica permitiu identificar que os avanços tecnológicos não apenas contribuem para melhorias na fragmentação da rocha, produtividade e aproveitamento do minério, mas também auxiliam na mitigação dos impactos ambientais tradicionalmente

associados às detonações.

Observou-se que a agregação de valor proporcionada por essas tecnologias vai além dos ganhos produtivos, abrangendo aspectos relacionados à segurança operacional, sustentabilidade ambiental, conformidade com a legislação, preservação dos recursos naturais e relacionamento com as comunidades do entorno. Da mesma forma, verificou-se que a adequada gestão das desvantagens e dos impactos decorrentes das detonações constitui fator fundamental para garantir a viabilidade técnica, econômica e social das operações minerárias.

Além dos benefícios diretos sobre a fragmentação da rocha, observou-se que o adequado planejamento do plano de desmonte influencia positivamente as etapas subsequentes de carregamento, transporte e beneficiamento mineral. Uma fragmentação compatível com a capacidade dos equipamentos reduz a necessidade de operações secundárias, melhora o desempenho dos processos de britagem e moagem e contribui para o aumento da produtividade global da mina. Dessa forma, a eficiência do desmonte repercute em toda a cadeia produtiva, refletindo na redução dos custos operacionais e na agregação de valor às operações minerárias (FERREIRA, 2015; KINYUA et al., 2022).

A análise das vantagens e limitações das diferentes tecnologias evidencia a importância do planejamento, monitoramento e controle das operações de desmonte, reforçando o papel da inovação tecnológica como elemento estratégico para o aumento da competitividade e da sustentabilidade da mineração. Assim, os resultados discutidos indicam que a maximização dos benefícios e a mitigação dos impactos associados às detonações representam importantes oportunidades de agregação de valor para as operações. As considerações finais e as principais conclusões obtidas a partir deste estudo são apresentadas no capítulo seguinte.

6 CONCLUSÕES

O desmonte de rochas com explosivos constitui uma etapa essencial das operações de mineração, desempenhando papel determinante na eficiência das atividades de lavra e influenciando diretamente as etapas subsequentes de carregamento, transporte e beneficiamento do minério. Embora essa técnica apresente elevada eficiência operacional e ampla aplicação na indústria mineral, sua utilização também está associada a impactos ambientais e riscos operacionais que exigem planejamento, monitoramento e controle adequados. Entre os principais desafios destacam-se a vibração do solo, a sobrepressão atmosférica, a projeção de rochas, a emissão de poeira e os efeitos sobre a fauna, a flora, os recursos hídricos e as comunidades do entorno, reforçando a necessidade de adoção de tecnologias e práticas que promovam operações mais seguras e sustentáveis.

A revisão bibliográfica realizada permitiu identificar que o avanço das tecnologias aplicadas ao desmonte de rochas tem contribuído significativamente para a melhoria do desempenho operacional das minerações. Tecnologias relacionadas ao controle das detonações, monitoramento ambiental, modelagem computacional e métodos preditivos possibilitam melhor fragmentação das rochas, redução da diluição do minério, aumento da produtividade das operações de perfuração e lavra, maior aproveitamento dos recursos minerais e redução dos impactos ambientais associados às detonações.

A análise qualitativa desenvolvida neste trabalho evidenciou que a agregação de valor proporcionada pelas tecnologias de desmonte vai além dos ganhos produtivos. Os resultados demonstram que a maximização das vantagens e a mitigação das desvantagens contribuem para a melhoria da segurança operacional, redução dos riscos geotécnicos, conformidade com a legislação ambiental, preservação dos recursos naturais e fortalecimento do relacionamento entre mineração e sociedade. Dessa forma, a adoção de tecnologias modernas associada ao monitoramento contínuo representa um importante instrumento para aumentar a competitividade e a sustentabilidade das operações minerárias.

Os objetivos propostos para este trabalho foram alcançados. A revisão bibliográfica permitiu analisar as principais tecnologias aplicadas ao desmonte de rochas com explosivos, identificar suas vantagens, limitações e impactos operacionais e ambientais, bem como compreender sua contribuição para a agregação de valor nas operações de mineração. Além disso, foram elaborados quadros comparativos que sintetizam os principais benefícios e desafios associados às tecnologias estudadas, permitindo relacionar os avanços tecnológicos aos ganhos em eficiência operacional, segurança e sustentabilidade.

Por fim, conclui-se que o uso adequado das tecnologias aplicadas ao desmonte de rochas constitui um fator estratégico para a agregação de valor em toda a cadeia produtiva da mineração.

Embora esta pesquisa tenha permitido reunir e analisar as principais tecnologias aplicadas ao desmonte de rochas com explosivos, o estudo apresenta limitações inerentes ao seu caráter bibliográfico. As análises foram fundamentadas em resultados reportados na literatura, não contemplando validações experimentais. Além disso, as diferenças entre condições geológicas, métodos de lavra e práticas operacionais podem influenciar o desempenho das tecnologias analisadas, indicando a necessidade de avaliações específicas para cada contexto minerário.

Como trabalhos futuros, recomenda-se aprofundar estudos relacionados ao emprego de inteligência artificial, redes neurais artificiais e modelos computacionais avançados para previsão de vibrações, sobrepressão atmosférica, projeção de rochas e fragmentação, bem como avaliar a aplicação prática das tecnologias emergentes discutidas neste trabalho em diferentes contextos geológicos. Também se recomenda o desenvolvimento de metodologias integradas baseadas no conceito *Mine-to-Mill*, capazes de relacionar o desempenho do desmonte às etapas subsequentes de carregamento, transporte, britagem e moagem, além da integração de softwares especializados, drones e sistemas de monitoramento em tempo real para apoio à tomada de decisão em operações minerárias.

REFERÊNCIAS

- ARMAGHANI, D. J.; HAJIHASSANI, M.; MOHAMAD, E. T.; MARTO, A.; NOORANI, S. A. Blasting-induced flyrock and ground vibration prediction through an expert artificial neural network based on particle swarm optimization. *Arabian Journal of Geosciences*, 2014a. v. 7, n. 12, p. 5383–5396, 2014a. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s12517-013-1174-0>>.
- ARMAGHANI, D. J.; HAJIHASSANI, M.; MONJEZI, M.; MOHAMAD, E. T. Prediction of flyrock and backbreak induced by blasting operation through a neuro-fuzzy technique. *Engineering with Computers*, 2014b. Springer, v. 30, n. 3, p. 441–451, 2014b.
- ARMAGHANI, D. J.; HAJIHASSANI, M.; MONJEZI, M.; MOHAMAD, E. T.; MARTO, A.; MOGHADDAM, M. R. Application of two intelligent systems in predicting environmental impacts of quarry blasting. *Arabian Journal of Geosciences*, 2015. Springer, v. 8, n. 11, p. 9647–9665, 2015.
- ARMAGHANI, D. J.; TONNIZAM, E.; MOMENI, E.; NARAYANASAMY, M.; AMIN, M. M. An adaptive neuro-fuzzy inference system for predicting unconfined compressive strength and young's modulus: a study on main range granite. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2014c. v. 74, 2014c.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *ABNT NBR 9653: Guia para avaliação dos efeitos provocados pelo uso de explosivos nas minerações em áreas urbanas*. Rio de Janeiro, 2018. Disponível em: <<https://www.abntcatalogo.com.br/>>.
- AZHARI, F.; KIELY, S.; SENNERSTEN, C.; LINDLEY, C.; MATUSZAK, M.; HOGWOOD, S. A comparison of sensors for underground void mapping by unmanned aerial vehicles. In: *Proceedings of the First International Conference on Underground Mining Technology*. Perth: Australian Centre for Geomechanics, 2017. p. 419–430.
- BARBOSA, G. A. P. Trabalho de Conclusão de Curso, *Estudo da perfuração e desmonte de rochas: desafios e medidas de segurança*. Ouro Preto: [s.n.], 2023.
- BERNARD, T. *A Unique Web Based Blasting Simulator that Allows the Selection of Best Initiation Sequence Based on Production Objectives*. [S.l.], 2008. 26 p. Disponível em: <<http://www.dna-blast.com>>.
- CURI, A. *Lavra de Minas*. São Paulo: Oficina de Textos, 2017. ISBN 9788579752445.
- DARLING, P. (Ed.). *SME Underground Mining Handbook*. 2. ed. Englewood, CO: Society for Mining, Metallurgy & Exploration, 2023. ISBN 9780873354844.
- DUARTE, A. P. *Classificação das barragens de contenção de rejeitos de mineração e de resíduos industriais no estado de Minas Gerais em relação ao potencial de risco*. Dissertação (Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos)) — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008. Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Disponível em: <<https://repositorio.ufmg.br>>.
- EBRAHIMI, E.; MONJEZI, M.; KHALES, M. R.; ARMAGHANI, D. J. Prediction and optimization of back-break and rock fragmentation using an artificial neural network and a bee colony algorithm. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2015. v. 75, 2015.

FERREIRA, A. L. C. Análise dos impactos de vibrações e ruídos em estruturas próximas de áreas de lavra com desmonte de rocha com explosivo. 2015. Universidade Federal do Pampa, 2015.

FISNE, A.; KUZU, C.; HÜDAVERDI, T. Prediction of environmental impacts of quarry blasting operation using fuzzy logic. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2011. v. 174, n. 1–4, p. 461–470, 2011.

FRASCA, M. H. B. d. O. *Estudos experimentais de alteração acelerada em rochas graníticas para revestimento*. Tese (Tese (Doutorado em Recursos Minerais e Hidrogeologia)) — Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses-disponiveis/44/44133/tde-03052013-150852/>>.

GERALDI, J. L. P. *O ABC das Escavações de Rocha*. 1. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2011.

HAJIHASSANI, M.; ARMAGHANI, D. J.; KALATEHJARI, R.; MONJEZI, M. Prediction of air-overpressure induced by blasting using a hybrid artificial neural network and particle swarm optimization. *Environmental Earth Sciences*, 2014. Springer, v. 72, n. 9, p. 3369–3376, 2014.

HOOLI, J.; HALIM, A. Battery electric vehicles in underground mines: Insights from industry. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2025. v. 208, p. 115024, 2025. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.115024>>.

IRAMINA, W. S.; SANSONE, E. C.; WICHES, M.; WAHYUDI, S.; ESTON, S. M. d.; SHIMADA, H.; SASAOKA, T. Comparing blast-induced ground vibration models using ann and empirical geomechanical relationships. *REM-International Engineering Journal*, 2018. SciELO Brasil, v. 71, p. 89–95, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/0370-44672017710097>>.

JANG, S. B.; WONG, K. T.; CHOONG, C. E.; HYUN, S.; YOON, Y.; CHOI, E. H.; PARK, N.; JANG, M. Enhancing in situ remediation of clayey soils contaminated with total petroleum hydrocarbons by combining pneumatic fracturing, plasma blasting, and vacuum extraction: A comprehensive field investigation. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2024. Elsevier, v. 12, p. 113064, 2024. ISSN 2213-3437. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.113064>>.

JIMENO, C. L.; JIMENO, E. L.; CARCEDO, F. J. A. *Drilling and Blasting of Rocks*. Rotterdam: A. A. Balkema, 1995. ISBN 9789054101994.

JUNIOR, I. L. d. O. *Controle de Vibrações Geradas pelo Desmonte de Rochas em Estruturas Geotécnicas*. Dissertação (Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral)) — Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, 2022. Área de Concentração: Lavra de Minas.

KABWE, E. Influence of air gap volume on achieving steady-state velocity of detonation. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 2019. Springer, v. 36, n. 6, p. 1179–1189, 2019.

KARDASZ, P.; DOSKOCZ, J.; HEJDUK, M.; WIEJKUT, P.; ZARZYCKI, H. Drones and possibilities of their using. *Journal of Civil & Environmental Engineering*, 2016. v. 6, n. 3, p. 1–7, 2016.

KINYUA, E. M.; ZHANG, J.; KASOMO, R. M.; MAUTI, D.; MWANGANGI, J. A review of the influence of blast fragmentation on downstream processing of metal ores. *Minerals Engineering*, 2022. Elsevier, v. 186, p. 107743, 2022. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0892687522003533>>.

- KUZNETSOVA, N.; ZHGUN, D.; GOLOVANEVSKIY, V. Plasma blasting of rocks and rocks-like materials: An analytical model. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2022. Elsevier, v. 150, p. 104986, 2022. ISSN 1365-1609. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2021.104986>>.
- LANG, H. Data driven mine-to-mill optimization with mine sense solutions. In: *PDAC*. [S.l.: s.n.], 2023.
- LEMY, F.; HADJIGEORGIOU, J. Discontinuity trace map construction using photographs of rock exposures. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2003. v. 40, n. 6, p. 903–917, 2003. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/S1365-1609\(03\)00069-8](https://doi.org/10.1016/S1365-1609(03)00069-8)>.
- LI, G.; KLEIN, B.; SUN, C.; KOU, J. Applying receiver-operating-characteristic (roc) to bulk ore sorting using xrf. *Minerals Engineering*, 2020. v. 146, p. 106117, 2020.
- LUSK, B.; WORSEY, T. M. Blasting. In: DARLING, P. (Ed.). *SME Mining Engineering Handbook*. 3. ed. Englewood, CO: Society for Mining, Metallurgy & Exploration, 2011. v. 2, p. 1049–1083.
- MELO, J. A. G. F.; SILVA, J. M. Tecnologia ore sorting para minério de ferro. *The Mine*, 2025. Facto Editorial, v. 114, p. 22–24, 2025.
- MONJEZI, M.; DEHGHANI, H. Evaluation of effect of blasting pattern parameters on back break using neural networks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2008. v. 45, p. 1446–1453, 2008.
- MOOMIVAND, H.; NAYEBI, S.; MOOMIVAND, H.; MASOUMZAD, H. An innovative method to assess specific charge, drilling and blasting costs considering critical factors of rock mass properties, fragment size and blasthole parameters. *Results in Engineering*, 2025. Elsevier, v. 27, p. 106333, 2025.
- National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. *Monitoring and Sampling Approaches to Assess Underground Coal Mine Dust Exposures*. Washington, DC: The National Academies Press, 2018. Apêndice F: Underground Coal Mining Methods and Engineering Dust Controls. Acesso em: 2 jul. 2026. ISBN 9780309476461. Disponível em: <<https://doi.org/10.17226/25111>>.
- OGGERI, C.; ORESTE, P. Underground quarrying for marble: Stability assessment through modelling and monitoring. *International Journal of Mining Science (IJMS)*, 2015. v. 1, n. 1, p. 35–42, 2015.
- PENG, S. S.; DU, F.; CHENG, J.; LI, Y. Automation in u.s. longwall coal mining: A state-of-the-art review. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2019. v. 29, n. 2, p. 151–159, 2019. ISSN 2095-2686. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2019.01.005>>.
- PEREIRA, G. M. *Análise do posicionamento de equipamentos de sismografia em cavidades naturais subterrâneas*. 89 p. Dissertação (Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral)) — Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2018. Disponível em: <<https://www.repositorio.ufop.br/items/3dc4d757-3dc6-4ff7-8723-2de51e973523>>.
- PONTES, J. C. d. *Impactos de vizinhança proporcionados pelo desmonte de rocha com uso de explosivos: estudo de caso na “Mineração Dantas Gurgel & Cia Ltda”, Caicó-RN*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2013. Disponível em: <<https://dspace.sti.ufcg.edu.br/handle/riufcg/16813>>.

- PRESS, F.; GROTZINGER, J.; JORDAN, T. H.; SIEVER, R. *Para Entender a Terra*. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.
- REN, H.; ZHAO, Y.; XIAO, W.; HU, Z. A review of uav monitoring in mining areas: Current status and future perspectives. *International Journal of Coal Science & Technology*, 2019. v. 6, n. 3, p. 320–333, 2019.
- ROCHA, A. C. S. *Análise da Influência do Diâmetro do Furo na Eficiência da Perfuração e da Fragmentação da Rocha*. Dissertação (Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral)) — Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, 2026. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral. Área de concentração: Lavra de Minas. Orientador: José Margarida da Silva.
- ROVITHIS, D. *Design Criteria for an Autonomous, Electric Mine*. Dissertação (Master's Thesis) — Aalto University, 2023. Disponível em: <<https://aaltodoc.aalto.fi/>>.
- ROY, P. P. Emerging trends in drilling and blasting technology: concerns and commitments. *Arabian Journal of Geosciences*, 2021. Springer, v. 14, n. 7, p. 1–10, 2021.
- SANTOS, A. E. M.; LANA, M. S.; PEREIRA, T. M.; SILVA, D. F. S. A new approach to rock mass classification using machine learning algorithms. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 2026. v. 98, n. 2, 2026.
- SANTOS, L. F. C. d. *Desmonte controlado em pedreiras*. Dissertação (Mestrado) — Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2023. 50 f. Monografia (Graduação em Engenharia de Minas).
- SILVA, C. E. da; SILVA, J. M. da; DUQUE, T. R. F. Panorama sobre o uso de drone na mineração subterrânea. In: CONFEA, CREA-GO E MÚTUA. *Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia (CONTECC)*. Goiânia, GO, 2022. p. 1–5.
- SILVA, J. M. *Lavra Subterrânea*. 2025. Material didático da disciplina MIN114 – Lavra de Mina Subterrânea. Departamento de Engenharia de Minas, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG.
- SILVA, V. C. e. *Desmonte de Rochas*. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2019. 334 p. ISBN 9788579753367.
- The Nobel Prize. *The Man Behind the Prize – Alfred Nobel*. 2026. Nobel Prize Outreach AB. Disponível em: <<https://www.nobelprize.org/alfred-nobel/>>.
- TRIGINELLI, D. H.; CUNHA, D. M. O processo de trabalho em uma pedreira de vila pavão – es: riscos e organização do trabalho. *Anais do XXVI Simpósio Nacional de História – ANPUH*, 2011. v. 1, n. 1, p. 35–42, 2011.
- YU, Z.; SHI, X.-Z.; ZHANG, Z.-X.; GOU, Y.-G.; MIAO, X.-H.; TANG, J.-Z. Using a dividing open-pit blast (dopb) method to reduce ore loss and dilution caused by blast-induced rock movement. *Acta Geotechnica*, 2023. v. 18, p. 4311–4327, 2023. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s11440-023-01826-3>>.
- ZHANG, Z.-X. *Rock Fracture and Blasting: Theory and Applications*. Cambridge, MA: Butterworth-Heinemann, 2016. 505 p. ISBN 9780128026885.