

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**  
**Escola de Engenharia**  
**Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas**

Flávio Loyola Tavares

**DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO EMPÍRICO PARA CONTROLE DE  
*BACKBREAK* GERADO POR DESMONTES EM UMA MINA A CÉU ABERTO**

Belo Horizonte

2024

Flávio Loyola Tavares

**DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO EMPÍRICO PARA CONTROLE DE  
*BACKBREAK* GERADO POR DESMONTES EM UMA MINA A CÉU ABERTO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas (Mestrado Profissional) da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do Título de Mestre em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas.

Área de Concentração: Tecnologia Mineral e Meio Ambiente

Orientador: Renan Collantes Candia

Belo Horizonte

2024

T231d Tavares, Flávio Loyola.  
Desenvolvimento de um modelo empírico para controle de *backbreak* gerado por desmontes em uma mina a céu aberto [recurso eletrônico] / Flávio Loyola Tavares . - 2024.  
1 recurso online (92 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: Renan Collantes Candia.

Dissertação (mestrado profissional) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Apêndices: f. 91-92.

Bibliografia: f. 87-90.  
Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Engenharia de minas - Teses. 2. Tecnologia mineral - Teses.  
3. Minas e mineração - Teses. 4. Mina a céu aberto - Teses.  
5. Modelagem matemática - Teses. 6. Detonação - Teses. 7. Rochas - Teses. 8. Otimização - Teses. 9. Explosivos - Teses. 10. Aderência - Teses. I. Candia, Renan Collantes. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 622(043)



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**  
**ESCOLA DE ENGENHARIA**  
Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica,  
Materiais e de Minas da UFMG - Mestrado Profissional

**UFMG**

**DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO EMPÍRICO PARA  
CONTROLE DE BACKBREAK GERADO POR DESMONTES EM  
UMA MINA A CÉU ABERTO**

**FLÁVIO LOYOLA TAVARES**

Dissertação de mestrado submetida à Comissão Examinadora designada pelo Colegiado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas da UFMG – Mestrado Profissional da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas.

Aprovada em 20 de março de 2024.

Por:

Prof. Dr. Renan Collantes Candia (UFMG)  
Orientador

Prof. Dr. Michel Melo Oliveira (UFMG)

Dr. Andre Luiz Alvarenga Santos (UFMG)

A minha esposa Keila, por toda a compreensão e incentivo durante todas etapas deste trabalho. Aos meus pais, pelo exemplo de vida e incentivo no percurso profissional e acadêmico.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus por me dar discernimento nas minhas escolhas e por ter iluminado meus passos para alcançar este objetivo. Gratidão à minha esposa pelo constante incentivo na busca por voos cada vez mais altos e por sempre ser meu alicerce nos momentos necessários, aos meus pais pelo exemplo de luta, mostrando desde o início que não existem atalhos e que o trabalho e a constância são melhores caminhos para alcançar um objetivo. Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Renan Collantes pela sabedoria e por todo suporte necessário para o desenvolvimento desse trabalho. A todos aqueles que de alguma forma incentivaram o desenvolvimento e conclusão do meu mestrado, muito obrigado!

## RESUMO

O desmorte de rochas com uso de explosivos é o método de fragmentar o maciço rochoso empregado em uma quantidade expressiva de mineradoras, porém, associado a este processo, existem efeitos indesejados que podem comprometer os resultados gerais da detonação, como é o caso do *backbreak*. Esse fenômeno tem o potencial de gerar impactos negativos nos processos subsequentes ao desmorte, principalmente no que diz respeito ao âmbito da segurança, qualidade da fragmentação, planejamento de lavra de longo prazo e geotecnia. Entendendo a relevância do tema, esta dissertação trata de: analisar um banco de dados composto por informações de 37 detonações realizadas em uma mina a céu aberto a fim de avaliar a correlação existente entre os diferentes parâmetros controláveis de desmorte e o *backbreak*, desenvolver um modelo preditivo baseado em regressão linear múltipla para estimar o dano médio e analisar a aderência da sua aplicação para a área em estudo. Para isso, o estudo considera como dados de entrada o afastamento médio, espaçamento médio, profundidade média, carga máxima por espera nos furos de produção, carga máxima por espera na última linha de furos, razão de carregamento, quantidade de *decks* nos furos de produção, quantidade de *decks* na última linha de furos, número de linhas, P80 e *Top size*. As regressões lineares simples indicaram que os parâmetros de desmorte que apresentam maior correlação com a *backbreak* para a operação estudada são: a carga máxima por espera nos furos de produção, carga máxima por espera na última linha de furos, razão de carregamento, quantidade de *decks* nos furos de produção e quantidade de *decks* nos furos da última linha. Além disso, a análise de regressão linear múltipla mostra que as variáveis anteriormente citadas apresentam um forte grau de correlação com o *backbreak* médio, quando avaliadas de maneira associada. Por fim, o modelo preditivo desenvolvido demonstrou uma forte correlação entre o dano médio medido e simulado. Além disso, ao avaliar um segundo cenário excluindo desmortes com as maiores cargas máximas por espera, verificou-se que a presença desses dados influencia positivamente na correlação dos parâmetros com o *backbreak*. No entanto, é importante destacar que o estudo não considera características intrínsecas do maciço rochoso, o que pode impactar negativamente a correlação com alguns parâmetros.

**Palavras-chave:** desmorte por explosivos; simulação; modelagem matemática; otimização.

## ABSTRACT

Blasting rocks with explosives is a method widely employed in numerous mining operations to achieve rock mass fragmentation. However, associated with this process are undesired effects that can compromise overall blasting outcomes, such as backbreak. This phenomenon has the potential to generate negative impacts on subsequent processes, particularly concerning safety, fragmentation quality, long-term mining planning, and geotechnics. Recognizing the relevance of this topic, this dissertation aims to: analyze a database from 37 blasting in an open-pit mine to evaluate the correlation between different controllable blasting parameters and backbreak, develop a predictive model based on multiple linear regression to estimate average overbreak, and analyze its applicability for the area under study. For this purpose, the study considers input data such as average burden, average spacing, average depth, maximum charge per delay in production holes, maximum charge per delay in the last row of holes, loading ratio, number of decks in production holes, number of decks in the last row of holes, number of rows, P80, and top size. Simple linear regressions indicated that the blasting parameters with the highest correlation to backbreak are: maximum charge per delay in production holes, maximum charge per delay in the last row of holes, loading ratio, number of decks in production holes, and number of decks in the last row. Furthermore, multiple linear regression analysis shows that these aforementioned variables exhibit a strong correlation with average backbreak when considered collectively. Finally, the developed predictive model demonstrated a strong correlation between the measured and simulated average damage. Additionally, when evaluating a second scenario by excluding blasts with the highest maximum charges per delay, it was observed that the presence of these data positively influences the correlation of parameters with backbreak. However, it is essential to highlight that the model does not consider intrinsic rock mass characteristics, which may negatively impact correlation with certain parameters.

**Keywords:** blasting; explosives; simulation, mathematical modeling, optimization.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Geologia simplificada do Quadrilátero Ferrífero (Dorr, 1969, <i>apud</i> Roeser e Roeser, 2013).....	21
Figura 2 - Parâmetros geométricos básicos para projeto de desmonte.....	24
Figura 3 - Modelo de carregamento com a utilização de <i>decks</i> .....	25
Figura 4 - Esquematisação das características dos explosivos.....	26
Figura 5 - Esquema básico de composição de um detonador eletrônico.....	30
Figura 6 - Processo inicial da detonação de uma carga explosiva.....	31
Figura 7 - Atuação de onda de choque compressiva. ....	32
Figura 8 - Reflexão da onda de choque. ....	32
Figura 9 - Abertura das trincas e separação dos fragmentos causados pela expansão dos gases .....	33
Figura 10 - Lançamento dos fragmentos de rocha. ....	33
Figura 11 – Maciço rochoso densamente estratificado. ....	34
Figura 12 - Fragmentação de desmonte impactada pelo <i>backbreak</i> em zona de alta estratificação .....	35
Figura 13 - Visão lateral de um <i>backbreak</i> .....	38
Figura 14 - Visão superior de um <i>endbreak</i> . ....	38
Figura 15 - Representação da linha final de dano e da extensão do dano gerado por um desmonte em minério de ferro. ....	39
Figura 16 - Ângulo de deslocamento recomendado para controle de dano.....	41
Figura 17 - Maciço altamente estratificado. ....	42
Figura 18 - Representação de desmonte com amortecimento .....	43
Figura 19 - Desmonte de acabamento com ajuste de malha e configuração de carregamento .....	44
Figura 20 - Representação de um projeto de desmonte utilizando linha de furos para pré-corte. .....	45
Figura 21 - Antiga concepção para geração do plano de fratura quando realizado o pré-corte. .....	46
Figura 22 - Modelos de carregamento para pré-corte.....	47
Figura 23 - Representação de desmonte utilizando perfuração em linha. ....	48
Figura 24 - Diagrama de dispersão simples.....	50

Figura 25 - Gráfico de dispersão para regressão linear múltipla. ....	51
Figura 26 - Representação gráfica de não correlação de variáveis X e Y .....	53
Figura 27 - Representação gráfica de correlação positiva entre variáveis X e Y.....	53
Figura 28 - Representação gráfica de correlação negativa entre variáveis X e Y.....	54
Figura 29 – Levantamento aéreo de pilha desmontada e sua curva de distribuição granulométrica.....	58
Figura 30 - Metodologia do trabalho.....	60
Figura 31- Esquema de medição do afastamento e espaçamento.....	61
Figura 32 - Medição do <i>backbreak</i> via software QGIS.....	63
Figura 33 - Representação da identificação dos furos de produção e furos da última linha.	64
Figura 34 - Análises de correlação do <i>backbreak</i> médio x parâmetros controláveis de desmonte. ....	68
Figura 35 - Análises de correlação do <i>backbreak</i> médio x parâmetros controláveis de desmonte.(35-a) Profundidade média dos furos; 35-b) Quantidade de linhas de furos; 35-c) Afastamento médio; 35-d) Espaçamento médio) – Cenário 01.....	70
Figura 36 - Gráfico de análise de aderência entre o <i>backbreak</i> medido e simulado – Cenário 01. ....	73
Figura 37 - Correlação entre <i>backbreak</i> medido e simulado – Cenário 01. ....	74
Figura 38 – Análises de correlação entre <i>backbreak</i> e indicadores de fragmentação. ...	75
Figura 39 - Análises de correlação do <i>backbreak</i> médio x parâmetros controláveis de desmonte. ....	76
Figura 40 - Gráfico de análise de aderência entre o <i>backbreak</i> medido e simulado – Cenário 02. ....	80
Figura 41 - Correlação entre <i>backbreak</i> medido e simulado – Cenário 02. ....	80
Figura 42 - Análises de correlação entre <i>backbreak</i> e indicadores de fragmentação.....	81

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resultados de $R^2$ – Cenário 01. ....	70
Tabela 2 - Estatística de regressão – Cenário 01. ....	72
Tabela 3 - Análise de aderência para o <i>backbreak</i> – Cenário 1. ....	72
Tabela 4 - Resultados de $R^2$ – Cenário 02. ....	77
Tabela 5 - Estatística de regressão – Cenário 02. ....	78
Tabela 6 - Análise de aderência para o <i>backbreak</i> – Cenário 02. ....	79
Tabela 7 - Dados brutos analisados .....	89
Tabela 8 - Valores empregados nas simulações .....	90

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANFIS – *Adaptive Network-Based Fuzzy Inference System*

ANFO – *Ammonium Nitrate Fuel Oil*

ANN – *Artificial Neural Network*

BPNN – *Back Propagation Neural Network*

CME – Carga Máxima por Espera

GPS – *Global Positioning System*

ISEE – *International Society of Explosives Engineers*

MAPE – *Mean Absolut Percentual Error*)

QF – Quadrilátero Ferrífero

RBNN – *Radial Basis Function Neural Networks*

RMSE – *Root Mean Squared Error*

RTK – *Real Time Kinematic*

SVM – *Support Vectors Machine*

VOD – *Velocity of Detonation*

VPP – Velocidade de Pico da Partícula

$\bar{X}$  – Média da amostra para a primeira variável

$\bar{Y}$  – Média da amostra para a segunda variável

$u_i$  – Fator erro

$\beta_0$  – Termo constante

$\beta_1$  – Coeficiente angular

A – Afastamento

BB – *Backbreak*

CMEu – Carga máxima por espera na última linha de furos

D – Diâmetro do furo

E – Espaçamento

H – Altura

kg – Quilogramas

mm – Milímetros

n – Número de observações

NDp – Quantidade de *decks* nos furos de produção

NDu – Quantidade de *decks* nos furos da última linha

Nl – Número de linhas

P – Profundidade do furo

R – Coeficiente de correlação de Pearson

R<sup>2</sup> – Coeficiente de Determinação

R<sup>2</sup><sub>ajust</sub> – Coeficiente de determinação ajustado

Rc – Razão de carregamento

SF – Subfuração

S<sub>x</sub> – Desvio padrão da amostra para a primeira variável

S<sub>y</sub> – Desvio padrão da amostra para a segunda variável

T – Tampão

Ts – *Top size*

k = Número de coeficientes estimados

## **LISTA DE QUADROS**

Quadro 1 - Variáveis controláveis e não-controláveis do desmonte .....	23
Quadro 2 - Modelos empíricos para predição de backbreak .....	49
Quadro 3 - Dados de entrada para o banco de dados.....	65

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	17
<b>2</b>	<b>JUSTIFICATIVA</b> .....	19
<b>3</b>	<b>OBJETIVOS</b> .....	20
<b>4</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	21
4.1	Contexto Geológico.....	21
4.2	Desmonte de rochas.....	22
4.3	Explosivos .....	25
4.3.1	ANFO .....	28
4.3.2	Emulsão .....	29
4.4	Sistemas de iniciação eletrônica .....	29
4.5	Mecanismos de fragmentação do maciço rochoso .....	31
4.6	Influência da geologia no desmonte de rochas.....	34
4.7	Efeitos secundários do desmonte de rochas .....	35
4.8	Vibrações induzidas.....	36
4.9	<i>Backbreak</i> .....	37
4.9.1	Fatores que influenciam na geração do <i>backbreak</i> .....	40
4.9.2	Métodos de Desmonte para controle de dano.....	42
4.9.2.1	Desmonte com amortecimento .....	42
4.9.2.2	Desmonte de acabamento .....	43
4.9.2.3	Pré-corte.....	44
4.9.2.4	Perfuração em linha .....	47
4.9.3	Modelos preditivos para <i>backbreak</i> .....	48
4.10	Modelos de regressão linear .....	50
4.10.1	Regressão linear simples .....	50
4.10.2	Regressão linear múltipla .....	51
4.11	Coeficiente de correlação de Pearson (R).....	52
4.12	Coeficiente de determinação ( $R^2$ ).....	54
4.13	Coeficiente de determinação ajustado ( $R^2_{ajust}$ ).....	55

4.14	Valor médio dos erros absolutos percentuais (MAPE) .....	55
4.15	Raiz do erro médio quadrático (RMSE) .....	56
4.16	Métodos de medida de fragmentação .....	57
<b>5</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>60</b>
5.1	Levantamento de dados .....	61
5.1.1	Afastamento e Espaçamento .....	61
5.1.2	Profundidade dos furos .....	62
5.1.3	Fragmentação .....	62
5.1.4	<i>Backbreak</i> .....	62
5.1.5	Parâmetros de carregamento .....	63
5.2	Análises estatística dos dados .....	64
5.2.1	Determinação do modelo de regressão linear múltipla .....	65
5.2.2	Simulações de <i>backbreak</i> médio .....	66
5.2.3	Análise de cenários .....	66
<b>6</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>67</b>
6.1	Cenário 01 – Análise geral dos desmontes .....	67
6.1.1	Análise de regressão linear simples .....	67
6.1.2	Modelo de regressão linear múltipla .....	71
6.1.3	Análise de aderência do modelo preditivo .....	72
6.1.4	Análise do impacto do <i>backbreak</i> na fragmentação .....	74
6.2	Cenário 02 – Desconsiderando desmontes com CME's máximos .....	75
6.2.1	Análise de regressão linear simples .....	75
6.2.2	Modelo de regressão linear múltipla .....	77
6.2.3	Análise de aderência do modelo preditivo .....	78
6.2.4	Análise do impacto do <i>backbreak</i> na fragmentação .....	81
<b>7</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	<b>82</b>
	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b> .....	<b>84</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>85</b>
	<b>APÊNDICES</b> .....	<b>89</b>



## 1 INTRODUÇÃO

Em boa parte das mineradoras existe a necessidade de reduzir o tamanho dos fragmentos de rocha com o intuito de enquadrá-los as necessidades dos equipamentos e das usinas de tratamento de minério. Segundo Chapot (1981), a alternativa operacional que apresenta a maior viabilidade econômica para fragmentação de rochas, na maior parte dos maciços rochosos lavráveis, é o desmonte realizado com o uso de explosivos.

Durante o processo de detonação, uma baixa porcentagem da energia liberada atua diretamente na fragmentação da rocha, o restante é perdido por meio de efeitos secundários do desmonte, como calor, vibrações, sobrepressão acústica etc. Para Bhagade e Murthy (2020), essas energias não aproveitadas muitas vezes se manifestam fisicamente nas regiões próximas ao desmonte na forma de dano no maciço rochoso além do planejado.

Jimeno, Jimeno e Carcedo (1995) definem o *backbreak* como o limite de dano nas rochas além da última linha de furos de produção. Esse dano tem o potencial de gerar diversos impactos nos processos subsequentes ao desmonte, no que diz respeito a segurança (blocos soltos), qualidade da fragmentação (desvios no P80), planejamento de lavra de longo prazo (dificuldade de gerar uma melhor delimitação do corpo mineral) e geotecnia (desvios na geometria de talude planejada e indução de trincas na estrutura).

Sabendo do impacto que *backbreak* pode acarretar para as operações, diversos pesquisadores vêm estudando a influência de diferentes parâmetros de desmonte na intensidade do dano, bem como avaliando as melhores metodologias para sua predição. Bhagade e Murthy (2020), analisaram a correlação das vibrações induzidas e a fragmentação geradas por desmontes em carvão na geração com o *backbreak*, o que permitiu criar um modelo preditivo para avaliar este efeito. Já Khandelwal e Monjezi (2012) estudaram a possibilidade de prever a ruptura em uma mina de ferro no Irã, incorporando propriedades da rocha e parâmetros de projeto de detonação através do método da máquina de vetor de suporte (*Support Vectors Machine - SVM*).

Como forma de gerar um modelo preditivo para explicar o *backbreak*, Esmaeili *et al.* (2012), realizaram a aplicação de uma rede neural artificial (ANN) e um sistema adaptativo

de inferência *neurofuzzy* (ANFIS) e concomitante a isso compararam esta análise ao modelo tradicional de regressão múltipla. Já Sayadi *et al.* (2013), avaliaram a previsibilidade simultânea de *backbreak* e a fragmentação, baseado em rede neural, para desmontes executados em uma mineração de calcário.

Visto o potencial agravante do *backbreak* nas diferentes áreas do processo de mineração, o estudo em questão analisa a correlação de diferentes variáveis controláveis de desmonte com a sobrequebra gerada no maciço rochoso remanescente, assim como desenvolve e avalia um modelo baseado em regressão linear múltipla para simulação do dano médio gerado.

## 2 JUSTIFICATIVA

Visto que boa parte das operações de mineração a céu aberto do Brasil iniciaram no século XX, diversas minas se encontram com suas cavas em cotas profundas, o que conseqüentemente demanda maiores cuidados no que diz respeito ao controle da estabilidade de seus taludes. Em contrapartida, uma tendência histórica das atividades de desmonte de rochas em mineração é aumentar a energia envolvida no desmonte com o objetivo de melhorar a fragmentação do minério. Esta decisão, tomada de maneira não fundamentada, tem potencial de gerar a maximização de efeitos indesejados do desmonte, como é o caso das vibrações induzidas e o *backbreak*.

O *backbreak* gera risco operacional na qualidade do produto do desmonte, podendo gerar diluição, desvios na fragmentação, criar blocos soltos no talude remanescente, e problemas de estabilidade de talude. Sabendo desses potenciais riscos inerentes ao *backbreak*, o entendimento do fenômeno e a utilização de metodologias para seu controle são fundamentais para melhoria da segurança operacional das atividades de mineração.

Sendo assim, este trabalho tem o propósito de contribuir com o setor mineral através da apresentação de direcionamentos para análise e controle de *backbreak* ocasionados pelos desmontes com uso de explosivo em minas a céu aberto.

### 3 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver um modelo preditivo para o *backbreak* médio e analisar a aderência de sua aplicação, a fim de validar seu uso no controle desse fenômeno em desmontes realizados em uma mina a céu aberto em específico.

Além disso, o trabalho tem como objetivo específico, por meio de análises de regressão linear simples, identificar os principais parâmetros controláveis do desmonte que apresentam correlação com a sobrequebra gerada no maciço rochoso. Isso permitirá destacar os principais pontos para otimização dos desmontes em relação ao controle de *backbreak* para o cenário estudado.

## 4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 4.1 Contexto Geológico

O trabalho foi desenvolvido considerando dados provenientes de desmontes realizados em uma mina a céu aberto localizada no estado de Minas Gerais, em uma região denominada como Quadrilátero Ferrífero (QF). Bezerra (2014) descreve que o Quadrilátero Ferrífero é uma unidade geotectônica na porção centro-sul de Minas Gerais, caracterizada pelo alinhamento retangular de serras ricas em depósitos minerais, principalmente ouro e minério de ferro.

Roeser e Roeser (2013) descrevem o QF como uma sequência da Serra do Espinhaço com embasamento cristalino, tendo localizado acima deste o Supergrupo Arqueano Rio das Velhas, o Supergrupo Proterozóico Minas e o Grupo Proterozóico Itacolomy. A Figura 1 apresenta de maneira simplificada a geologia desta região.

Figura 1 - Geologia simplificada do Quadrilátero Ferrífero (Dorr, 1969, *apud* Roeser e Roeser, 2013)



Fonte: (ROESER; ROESER, 2013).

Do ponto de vista produtivo mineral, o Supergrupo Rio das Velhas destaca-se principalmente pela presença de jazidas de ouro. Por outro lado, o Supergrupo Minas é composto por cinco grupos principais: Caraça, Itabira, Piracicaba, Sabará e Itacolomi. O Grupo Itabira ganha destaque, sobretudo na perspectiva econômica, devido à grande presença de minério de ferro bandado.

#### 4.2 Desmorte de rochas

Em grande parte das operações de mineração, é necessário fragmentar a rocha, tanto para ajustar às dimensões dos equipamentos de carregamento e transporte, quanto para atender aos parâmetros solicitados pela planta de beneficiamento. Segundo Chapot (1981), a alternativa operacional que apresenta a maior viabilidade econômica para a fragmentação de rochas na maioria dos maciços rochosos lavráveis é o desmorte com o uso de explosivos.

Apesar da fragmentação ser o objetivo principal de um desmorte, a avaliação dos resultados depende de outros fatores, devido à necessidade de um bom controle dos subprodutos indesejados gerados pela detonação das cargas explosivas. Conforme apresenta Hustrulid (1999), os efeitos secundários do desmorte podem ser divididos da seguinte forma:

- i. Fatores ambientais externos: Geram impacto em longas distâncias e na maioria das vezes possuem limitações impostas por lei, sendo elas:
  - Vibrações em campo longo: Yang *et al.* (1994) apresentam que são as medições de vibrações induzidas pelos desmortes quando medidas em distâncias superiores a faixa de 10-20 metros das cargas explosivos.
  - Pressão acústica: Pressão provocada por uma onda de choque aérea com componentes na faixa audível (20 Hz a 20.000 Hz) e não audível (infrassom), com duração menor do que 1 s. (ABNT NBR 9653:2018)
  - Ultralançamento: Fragmento de rocha lançado pela detonação de cargas explosivas de maneira não planejada além da área operacional definida.
- ii. Fatores Ambientais internos: Geram impacto direto a mina, através do dano no maciço

rochoso.

- Danos no maciço remanescente (*backbreak e endbreak*)

Existem diversas variáveis que influenciam nos resultados de um desmonte, sendo elas divididas em controláveis e não-controláveis. Iramina *et al.* (2018) definem as variáveis controláveis como aquelas relacionadas ao projeto do desmonte e os parâmetros não-controláveis como aqueles ligados as características do maciço rochoso, ou seja, relacionadas à geologia local.

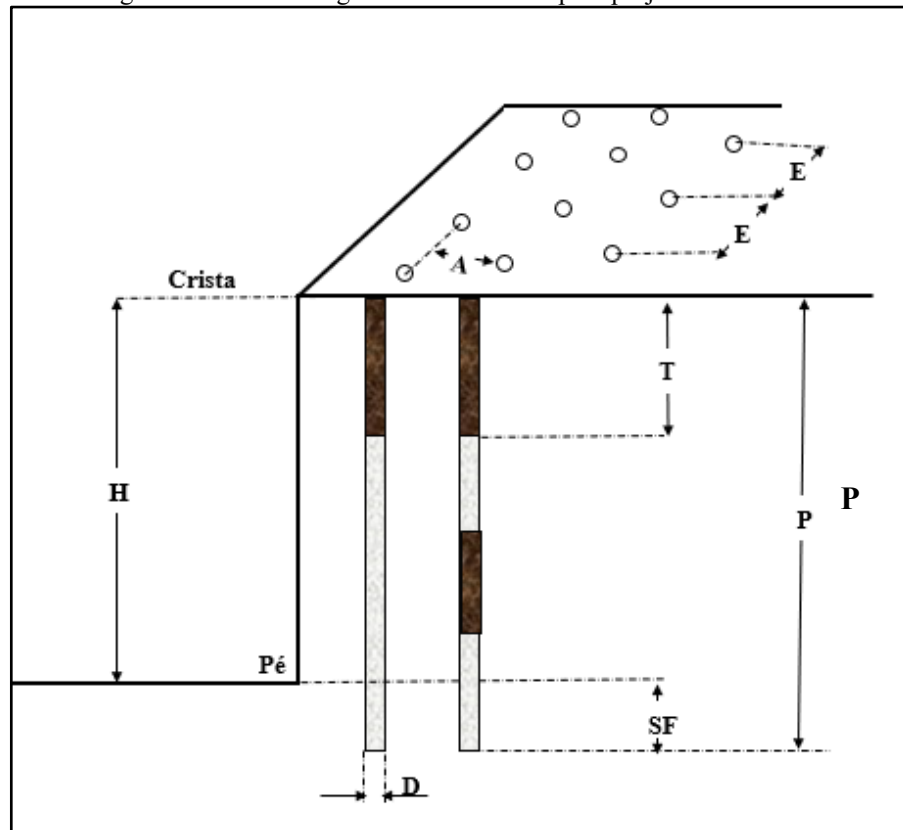
O Quadro 1 apresenta em detalhe algumas variáveis controláveis e não-controláveis relacionadas aos projetos de desmonte de rochas:

Quadro 1 - Variáveis controláveis e não-controláveis do desmonte	
Variáveis controláveis	Variáveis não-controláveis
Diâmetro dos furos	Geologia
Profundidade dos furos	Propriedades da Rocha
Subfuração	Descontinuidades
Inclinação dos furos	Condições climáticas
Tamanho do tampão	Água (às vezes controlável)
Material do tampão	-
Altura do banco	-
Espaçamento	-
Afastamento	-
Quantidade de furos	-
Direção do desmonte	-
Sistema de iniciação	-
Sequência de iniciação	-
Condições da face livre	-
Tipo de explosivo	-
Razão de carregamento	-

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

A Figura 2 apresenta as principais variáveis geométricas controláveis de desmonte que influenciam em um projeto de desmonte:

Figura 2 - Parâmetros geométricos básicos para projeto de desmonte



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Onde:

H = Altura do banco

A = Afastamento

E = Espaçamento

P = Profundidade do furo

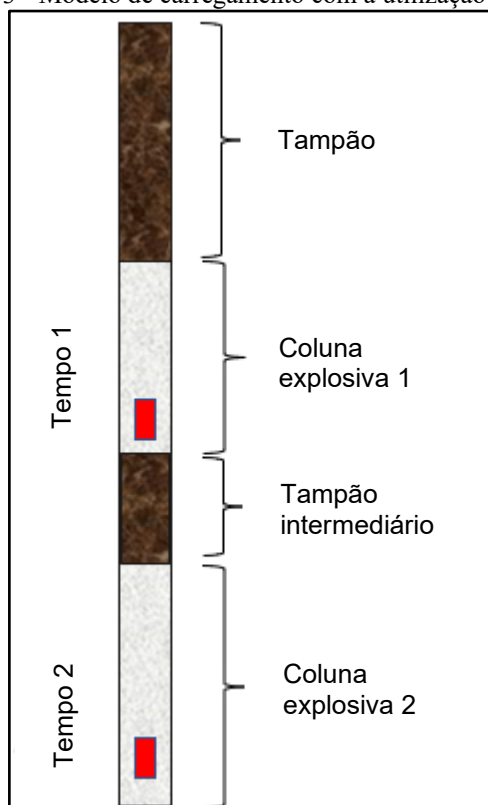
SF = Subfuração

D = Diâmetro do furo

T = Tampão

Além das variáveis controláveis mencionadas anteriormente, o modelo de construção das colunas de carregamento exerce uma influência direta nos resultados esperados para os projetos de desmonte, especialmente em cenários que demandam um maior controle dos efeitos secundários indesejáveis do desmonte de rochas. Um exemplo disso é a utilização do escalonamento de cargas explosivas (*decks*) como forma de otimizar a energia explosiva em cenários restritivos, conforme apresentado na Figura 3.



Figura 3 - Modelo de carregamento com a utilização de *decks*

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Modelos de carregamento deste tipo são construídos através da intercalação das cargas explosivas por meio da utilização de tampão intermediário (material inerte como brita) ou até mesmo utilizando acessórios específicos como bolsas de ar (*air decks*). Para Zhang *et al.* (2018) a utilização de *decks* não só pode melhorar a taxa de utilização efetiva da energia explosiva, como também pode controlar o risco e reduzir as vibrações induzidas geradas pelo desmonte.

#### 4.3 Explosivos

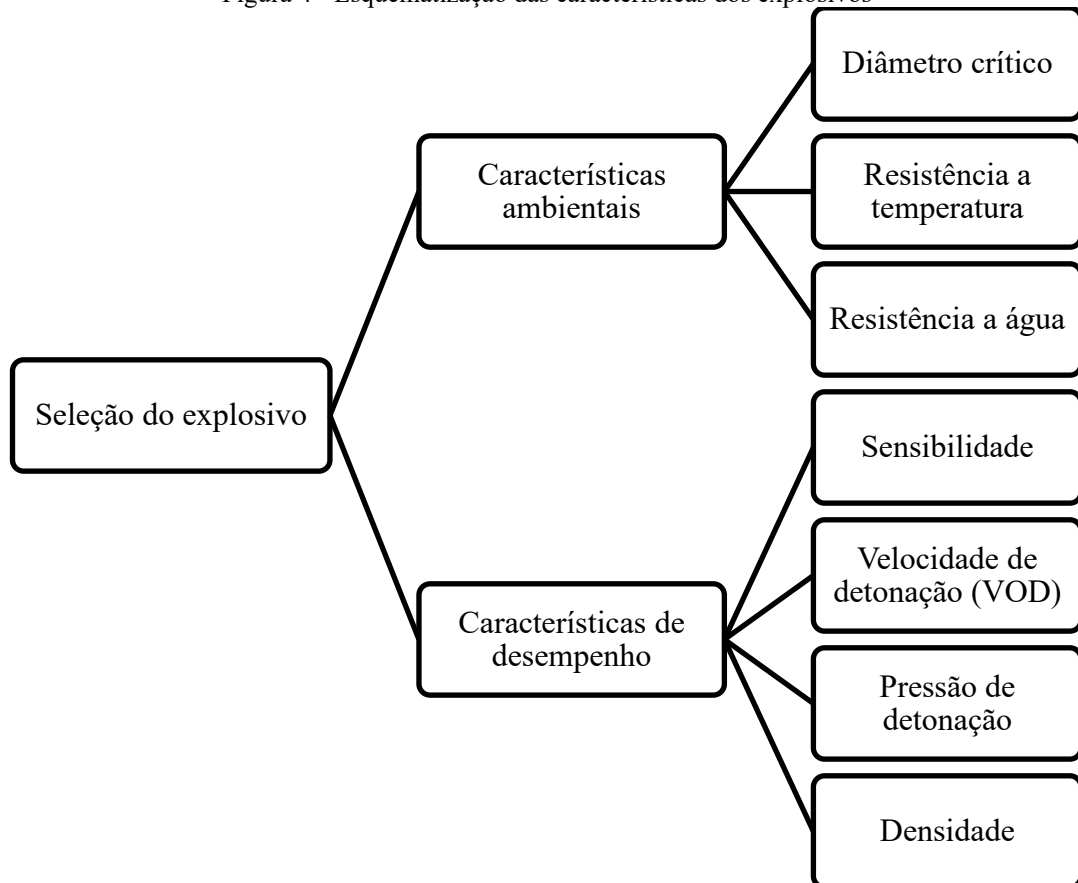
Outra variável controlável em projetos de desmonte diz respeito ao tipo de explosivo utilizado. Um explosivo, ou agente de detonação, é um composto ou uma mistura de compostos, que quando iniciada por calor, impacto, fricção ou choque, é capaz de sofrer uma rápida decomposição, liberando enormes quantidades de calor e gás (LUSK; WORSEY, 2011).

Existem diversos explosivos comerciais, com diferentes propriedade e características que os tornam mais ou menos aplicáveis para cada situação. Os principais exemplos são:

ANFO, Emulsão e Mesclas.

Os explosivos podem ser selecionados de acordo com suas características ambientais e de desempenho, como apresentado na Figura 4 abaixo:

Figura 4 - Esquematização das características dos explosivos



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

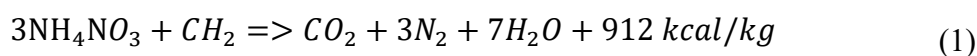
As características dos explosivos anteriormente mencionadas são definidas da seguinte maneira:

- i. Diâmetro crítico - É a menor dimensão que o explosivo confinado em orifício cilíndrico pode ter para que propagação da detonação ocorra de maneira eficiente. Resende (2011) descreve que as cargas de explosivo têm um diâmetro pelo qual a onda de detonação não se propagará ou se propaga com velocidade deficiente. Em maciços rochosos com presença de fissuras que favoreçam a percolação do explosivo pelos espaços vazios, pode haver impacto negativo na performance do explosivo.

- ii. Resistência a temperatura - Capacidade de suportar ou resistir a variações de temperatura sem sofrer degradação ou iniciar uma reação explosiva não intencional. A *International Society of Explosives Engineers (ISEE)* (2008) descreve que mudanças na temperatura inicial afetam a velocidade de detonação dos explosivos, principalmente aqueles compostos que possuem líquidos na sua composição química, como é o caso das emulsões.
- iii. Resistência a água - Capacidade do explosivo manter suas propriedades e estabilidade quando exposto à água. Real (2019), descreve que hidrogéis e dinamites gelatinosas apresentam boa resistência à água, porém substâncias explosivas com nitrato de amônio seco na sua composição perdem eficiência em ambientes com maior umidade.
- iv. Sensibilidade - A sensibilidade de um explosivo se refere à facilidade com que ele pode ser iniciado para entrar em uma reação explosiva. Jimeno, Jimeno e Carcedo (1995) definem a sensibilidade como a facilidade com que um explosivo pode ser detonado por calor, fiação, impacto ou choque.
- v. Velocidade de detonação - A velocidade de detonação, frequentemente abreviada como VOD (*Velocity of Detonation*), é uma medida que descreve a taxa na qual uma onda de detonação se propaga através de um explosivo. A velocidade da onda de detonação que se propaga através do explosivo é um parâmetro que define o ritmo de liberação de energia (RESENDE, 2011).
- vi. Pressão de detonação - A pressão de detonação de um explosivo é a pressão máxima gerada pela onda de choque resultante da detonação desse explosivo. Em outras palavras, é a medida da intensidade da onda de pressão liberada durante a explosão. Esta pressão é a principal responsável pela geração de uma onda de choque na rocha que circunda a carga explosiva (MORAIS, 2004).
- vii. Densidade - A densidade de um explosivo refere-se à sua massa por unidade de volume. A densidade determina a sensibilidade, a velocidade de detonação e o diâmetro crítico da carga. (ISEE, 2008).

#### 4.3.1 ANFO

O nitrato de amônia é um composto presente na maioria dos explosivos comerciais. No entanto, seu uso principal está relacionado ao ANFO, cuja sigla deriva de seus constituintes, *Ammonium nitrate* (AN) e *Fuel oil* (FO). Segundo o (ISEE) (2008), o ANFO é uma mistura balanceada contendo aproximadamente 94% de nitrato de amônia e 6% de óleo diesel combustível, onde a reação química básica é apresentada na equação 1:



O ANFO é um explosivo amplamente comercializado, e essa popularidade é justificada pelas seguintes vantagens:

- i. Custo reduzido em comparação com outros explosivos;
- ii. Facilidade de produção;
- iii. Manuseio seguro.

Por outro lado, conforme destacado no estudo de Widodo, Anwar e Syafitri (2019), este tipo de explosivo apresenta limitações em relação a:

- i. Sensibilidade à água, o que provoca perda de eficiência do composto em maciços rochosos com presença de água.
- ii. Densidade baixa e não ajustável, impactando negativamente na sua velocidade de detonação (VOD), ou seja, a velocidade (m/s) com que ocorre a reação química explosiva.
- iii. Maior potencial para causar danos no maciço remanescente.

#### 4.3.2 Emulsão

As emulsões são constituídas essencialmente de uma emulsificação de água-óleo contendo uma solução oxidante, óleo combustível, emulsificante e um gás ou o próprio ar (MORAIS, 2004). Hustrulid (1999) define as emulsões como misturas íntimas de dois líquidos em que um não dissolve o outro.

Os explosivos do tipo emulsão apresentam como vantagem:

- i. Alta velocidade de detonação (VOD);
- ii. Boa resistência a água;
- iii. Menor sensibilidade;
- iv. Densidade ajustável;

Por outro lado, a utilização deste tipo de explosivo apresenta como desvantagem:

- i. Maior risco de detonação por simpatia, ou seja, maior probabilidade de uma carga explosiva acionar outra devido à proximidade excessiva;
- ii. Risco de cristalização e, como consequência, perda de qualidade do explosivo;
- iii. Em maciços com presença de fissuras, existe o risco de percolação pelos espaços vazios, o que pode resultar em perda de eficiência durante o desmonte.

#### 4.4 Sistemas de iniciação eletrônica

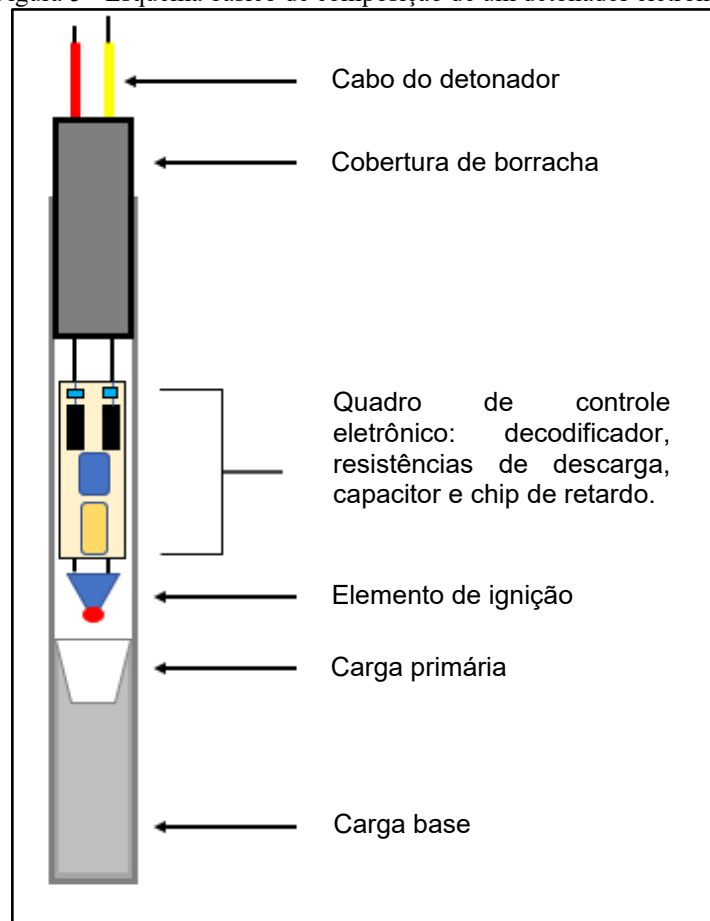
Os detonadores eletrônicos foram desenvolvidos a partir da década de 1980, nos quais, além da carga contida no detonador, há um microchip programável que permite inserir o tempo de iniciação. Segundo Silva (2009), os detonadores eletrônicos, em comparação com outros

modelos de espoletas, oferecem maior eficiência para otimizar a fragmentação, reduzir os níveis de vibração e ruído, e proporcionar maior segurança para as operações envolvidas.

Além dos benefícios já citados, a utilização dos detonadores eletrônicos oferece maior flexibilidade para a realização do plano de fogo, permitindo a adaptação da sequência de detonação de acordo com as necessidades. No entanto, Cardu, Giraudi e Oreste (2013) destacam que, apesar de todas as vantagens que os detonadores eletrônicos podem proporcionar, se o projeto de perfuração e carregamento não for garantido, os resultados podem não ser ideais.

A Figura 5 apresenta, de maneira geral, a composição dos detonadores eletrônicos:

Figura 5 - Esquema básico de composição de um detonador eletrônico



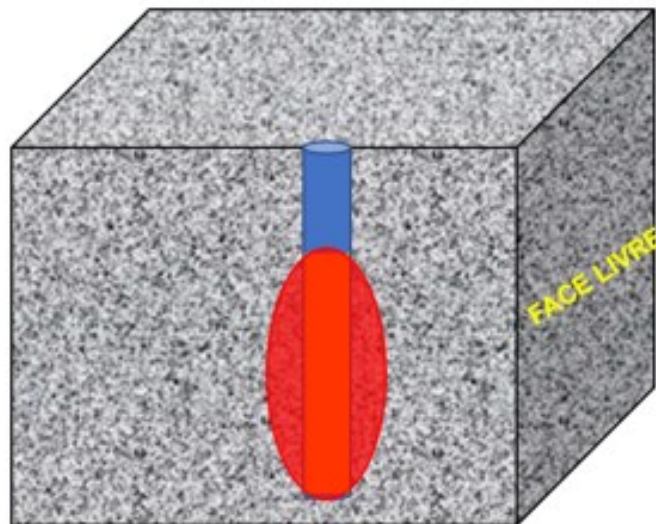
Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

#### 4.5 Mecanismos de fragmentação do maciço rochoso

O processo de fragmentação de rochas por meio do uso de cargas explosivas é um fenômeno complexo que envolve diversos mecanismos para atingir o resultado desejado. Em decorrência disso, várias teorias buscam explicar esse processo, havendo, no entanto, consenso entre os pesquisadores de que os principais mecanismos podem ser descritos da seguinte forma:

- i. A detonação da carga explosiva inicialmente gera uma grande pressão na rocha em volta do furo. Segundo Williams *et al.* (2009), a pressão da onda de choque gerará como resultado uma zona de pulverização intensa de 2-3 vezes o diâmetro da carga explosiva, conforme apresentado na Figura 6.

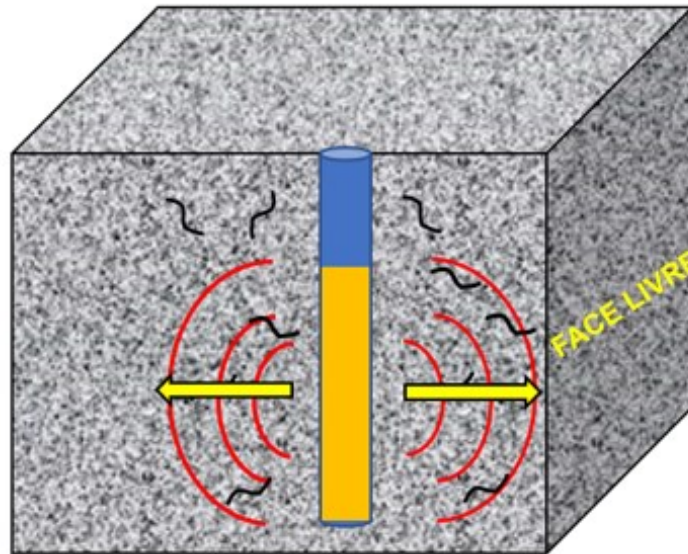
Figura 6 - Processo inicial da detonação de uma carga explosiva.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

- ii. O impacto da detonação gera uma onda de choque que atua como uma força compressiva no maciço rochoso. Essa onda promoverá a trituração da rocha em torno do furo até que sua amplitude ultrapasse o limite de resistência à compressão da rocha, como representado no fenômeno da Figura 7.

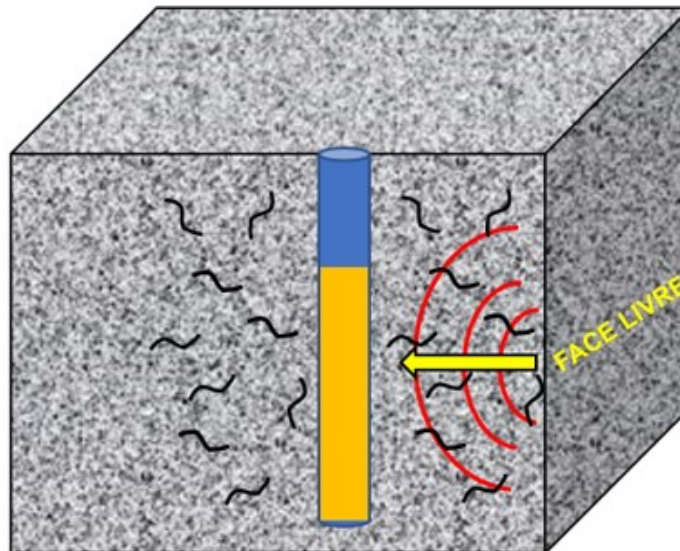
Figura 7 - Atuação de onda de choque compressiva.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

- iii. A onda de choque propagará ao longo do maciço rochoso até que encontre a face livre e se reflita, conforme Figura 8.

Figura 8 - Reflexão da onda de choque.



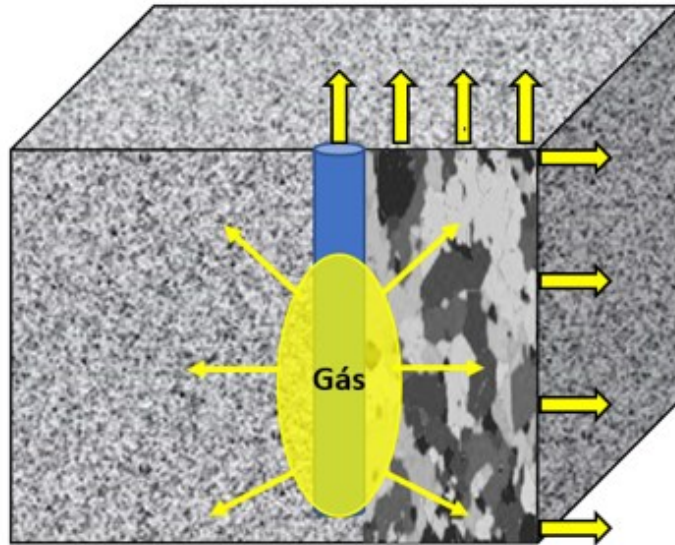
Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

- iv. Quando refletida, esta onda retornará, gerando a trituração da rocha por tração, desde a face livre até o furo, contanto que sua amplitude seja maior que o limite de resistência à tração da rocha. Quando as ondas atingem uma superfície livre, são geradas duas ondas: uma de tração e uma de cisalhamento.



- v. Com isso, as fraturas locais se unem e crescem ao longo do maciço rochoso.
- vi. Com a expansão dos gases gerados pela detonação ao longo das gretas e fraturas, ocorrerá a separação dos fragmentos da rocha, como ilustrado na Figura 9.

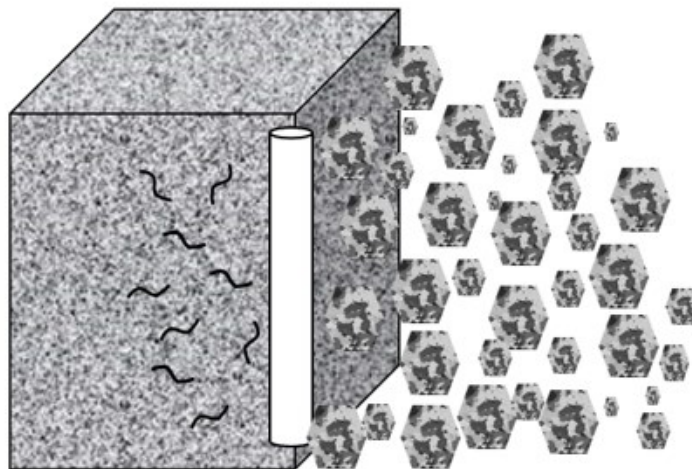
Figura 9 - Abertura das trincas e separação dos fragmentos causados pela expansão dos gases



Fonte: Elaborado pelo o autor, 2023.

- vii. Após a fragmentação gerada pelos mecanismos anteriormente citados e intensificada pela alta pressão dos gases, ocorre o lançamento dos fragmentos em direção à face livre, conforme Figura 10. Este impacto entre os blocos proporciona uma trituração adicional da rocha.

Figura 10 - Lançamento dos fragmentos de rocha.



Fonte: Elaborado pelo o autor, 2023.

#### 4.6 Influência da geologia no desmonte de rochas

De maneira equivocada, ainda hoje, uma considerável parcela das operações de desmonte considera o maciço rochoso como um meio homogêneo, e essa falsa concepção traz consigo potenciais impactos, como a geração de sobressaltos no piso, fragmentação deficiente e *backbreak*. Conforme Bakar *et al.* (2013) destacam, a qualidade do maciço rochoso a ser desmontado exerce grande influência no nível de forças dinâmicas às quais a rocha pode ser submetida e sofrer danos.

Dentre os principais fatores geológicos que influenciam na qualidade do desmonte está a presença de descontinuidades no maciço rochoso a ser desmontado (conforme Figura 11), uma vez que elas impõem consideráveis restrições na propagação das ondas de choque geradas pela detonação. Além disso, como Chakraborty *et al.* (1994) indicam, o espaçamento e a orientação dos planos de fraqueza têm ligação direta com a forma e o tamanho dos fragmentos resultantes do desmonte, conforme apresentado na Figura 12, onde foram gerados fragmentos superdimensionados na área limite de uma bancada.

Figura 11 – Maciço rochoso densamente estratificado.



Fonte: Elaborado pelo o autor, 2023.

Figura 12 - Fragmentação de desmorte impactada pelo *backbreak* em zona de alta estratificação



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Singh (2001) apresenta que a presença das discontinuidades causa um desequilíbrio na distribuição de energia durante a detonação, devido à sua atuação preferencial nos contatos de rocha pré-existentes, tornando sua atuação deficiente nos pontos de rocha intacta. Além disso, as discontinuidades também provocam múltiplas reflexões e refrações das ondas de choque, o que impacta na atuação dos mecanismos básicos de fragmentação do maciço rochoso.

#### 4.7 Efeitos secundários do desmorte de rochas

Durante o processo de detonação de cargas explosivas, uma pequena parcela da energia liberada pela reação química é aproveitada na fragmentação da rocha, enquanto o restante é perdido por meio de efeitos secundários do desmorte. Conforme Silva (2019), estima-se que apenas de 20% a 30% da energia gerada na reação de detonação dos explosivos seja aproveitada na fragmentação do maciço rochoso, sendo o restante transformado em calor e outros efeitos indesejados do desmorte. Dois dos principais subprodutos indesejados gerados pela detonação de cargas explosivas na produção mineral são as vibrações induzidas e o *backbreak*.

#### 4.8 Vibrações induzidas

Quando ocorre a detonação de uma carga explosiva, geralmente há uma região relativamente pequena de deformação plástica e trincas perto do ponto de explosão; o restante da energia é propagada como uma onda elástica no solo. (KUMAR; CHOUDHURY; BHARGAVA, 2014). As vibrações são movimentações geradas no terreno devido a passagem de uma onda sísmica.

Segundo Silva (2019) as vibrações do terreno podem ser classificadas em três grupos:

- i. Contínuas: nível constante de vibração por um período também longo.
- ii. Transitórias: impacto súbito seguido de um tempo de repouso longo, como no caso da detonação de cargas explosivas isoladas.
- iii. Intermitentes: sucessão de eventos vibratórios, cada um com pequena duração. Nesse caso, podem-se citar a detonação de cargas explosivas com uso de retardos entre si ou o uso de uma perfuratriz de percussão.

Caso as tensões dinâmicas geradas pelas vibrações induzidas excedam o limite de resistência do material que constitui uma determinada estrutura, há potencial para gerar danos. Segundo Kudelas *et al.* (2019), se a intensidade da vibração for grande o suficiente, o ambiente pode ser prejudicado ou destruído. Dado seu potencial negativo, as vibrações induzidas pelo desmonte de rochas são, em muitas operações de mineração, fatores críticos, especialmente no que diz respeito ao cumprimento de condicionantes ambientais para a proteção de monumentos naturais e à integridade de estruturas geotécnicas e civis.

Konya e Walter (1991) afirmam que os dois principais fatores que influenciam na intensidade das vibrações são: a distância da fonte emissora e a carga máxima por espera (kg de explosivo detonado para o mesmo instante de tempo), sendo esses parâmetros controláveis. A ISEE (2008) apresenta os seguintes tópicos como formas de reduzir ou controlar os níveis de vibrações induzidas por desmontes:

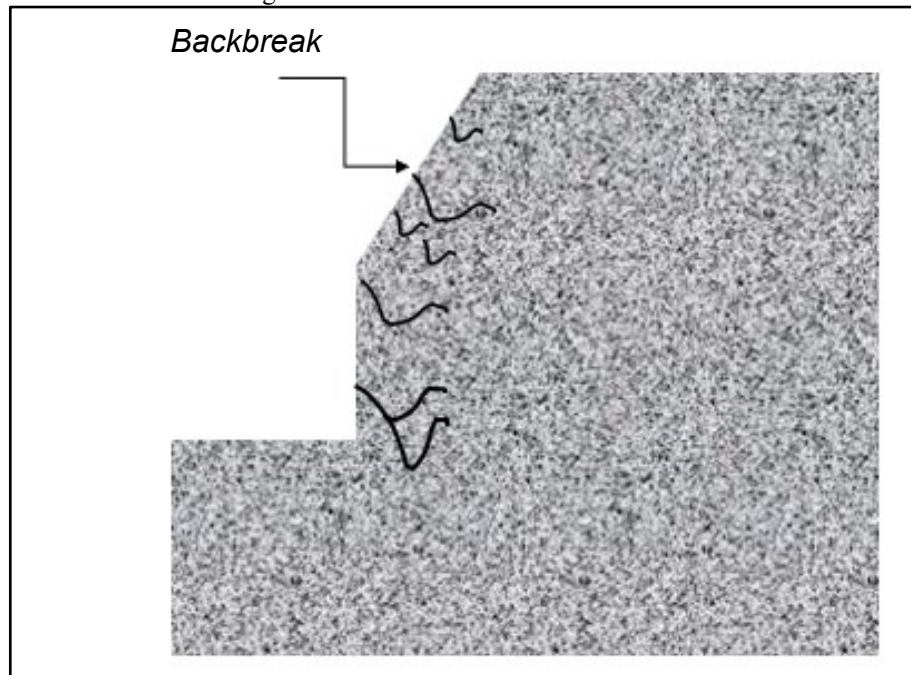
- i. Minimizar a carga máxima por espera;
- ii. Reduzir o diâmetro de perfuração;
- iii. Reduzir a profundidade dos furos;
- iv. Utilizar detonadores eletrônicos;
- v. Correto dimensionamento da malha;
- vi. Dimensionar adequadamente os retardos entre linhas de forma que permita um bom deslocamento da rocha;
- vii. Bom controle de perfuração;
- viii. Utilizar frentes que apresentem a maior face livre possível.
- ix. Direcionamento adequado da sequência de iniciação;

O comportamento das vibrações induzidas é complexo e se manifesta de diferentes maneiras de acordo com a distância da fonte, o que demanda distintas formas de análise. De maneira geral, podem ser divididas em análise de vibrações em campo afastado e campo curto, onde a primeira geralmente se manifesta na forma de danos em estruturas e sofre maior interferência do meio de propagação da onda, enquanto a segunda se manifesta na forma de danos no maciço rochoso, sendo sua magnitude mais impactada pela carga operante utilizada. Cervantes (2011) propõe que as medições sismográficas de campo curto sejam realizadas a distâncias inferiores a 30 metros e, conseqüentemente, em campo afastado, a uma distância superior dessa medida.

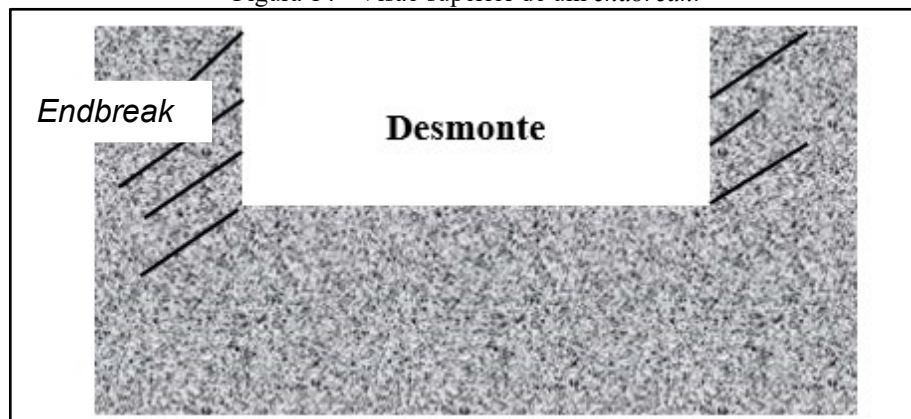
#### 4.9 *Backbreak*

Outro efeito indesejado provocado pelo desmonte de rochas é o *backbreak* (sobrequebra). Jimeno, Jimeno e Carcedo (1995) definem o *backbreak* como o dano gerado pelo desmonte além da última fileira de furos de produção. Já Konya e Walter (1991) classificam o *backbreak* e o *endbreak* como tipos de *overbreak*, sendo o primeiro o dano gerado além da última linha de furos, enquanto o segundo é a sobrequebra causada na região final do sequenciamento de cada linha de furos, representados respectivamente nas Figuras 13 e 14.



Figura 13 - Visão lateral de um *backbreak*

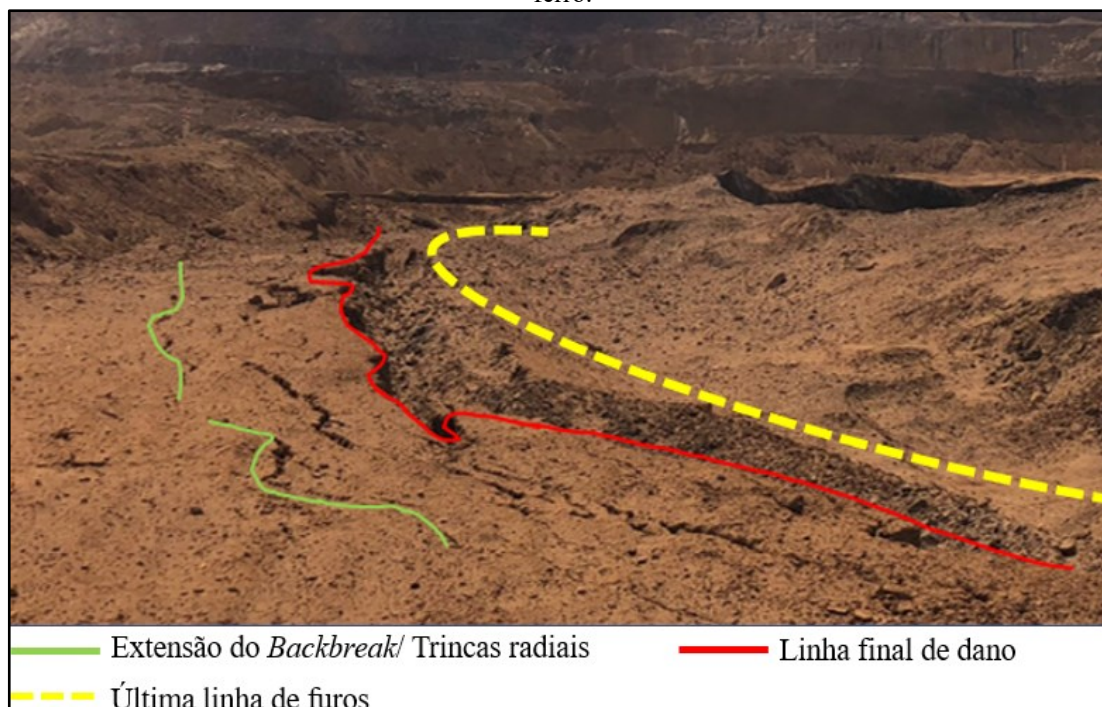
Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Figura 14 - Visão superior de um *endbreak*.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

A Figura 15 apresenta a manifestação do *backbreak* gerado por um desmonte realizado em minério de ferro, onde a linha vermelha representa a linha final de dano, ou seja, a crista imediata gerada pelo desmonte, em verde a extensão radial do dano que se manifesta na forma de trincas e amarelo a projeção da posição da última linha de furos.

Figura 15 - Representação da linha final de dano e da extensão do dano gerado por um desmorte em minério de ferro.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

O *backbreak* pode gerar diversos impactos para os empreendimentos minerários, desde questões ligadas à segurança até a implementação de custos adicionais. Eades e Perry (2019) destacam que o *backbreak* representa problemas, visto que pode induzir rachaduras nos taludes, o que de fato é uma grande preocupação na mineração moderna.

Durante as operações de detonação, as fissuras e fraturas naturais numa estrutura de maciço rochoso são prolongadas por tensões adicionais induzidas pela detonação e, com isso, a resistência ao cisalhamento do maciço rochoso é significativamente reduzida, causando assim instabilidade do maciço rochoso (KOLAPO *et al.*, 2022).

Além do mencionado anteriormente, quando as atividades de desmorte são realizadas de maneira não controlada, podem provocar danos no maciço rochoso que alteram o ângulo geral do talude. Isso, de fato, é uma preocupação para o controle da estabilidade geotécnica da estrutura. Kolapo *et al.* (2022) mencionam que o ângulo geral do talude desempenha uma função de extrema importância para a estabilidade, onde um aumento no ângulo pode aumentar a chance de falha no talude.

O *backbreak* também pode trazer impactos, principalmente em minerações de veios estreitos, por meio da diluição. A inclusão de estéril na massa de interesse implementará custos

adicionais aos processos subsequentes. Guggari *et al.* (2023) destacam que a diluição impacta as mineradoras economicamente devido ao incremento de custos nas etapas de carregamento, transporte, britagem, moagem e tratamento de resíduos. Além disso, a adição não planejada de estéril gera impacto na relação estéril/minério, sendo esse um importante parâmetro para avaliação de viabilidade econômica de um projeto de mineração.

O *backbreak* também tem o potencial de trazer consigo impactos na qualidade da fragmentação na região da última linha de furos, visto que a quebra não controlada tem o poder de incluir fragmentos com maiores dimensões nos processos subsequentes, como já apresentado na Figura 12. Isso aumenta os custos com desmontes secundários e pode causar interrupções nas plantas de britagem. Huamani (2020) apresenta que, se a fragmentação for controlada, é possível obter uma melhoria significativa nos rendimentos e custos das operações subsequentes dentro da cadeia de processo.

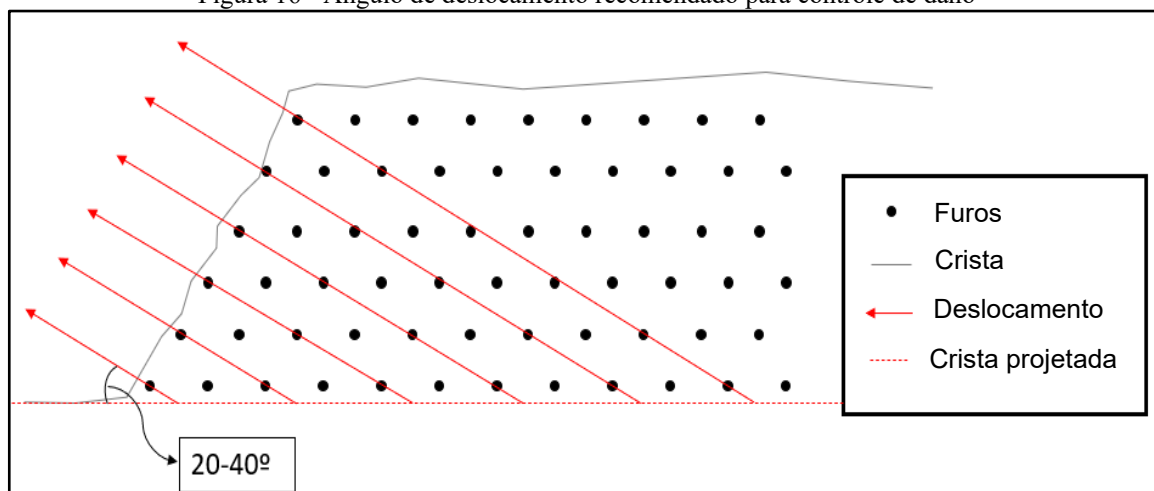
#### 4.9.1 Fatores que influenciam na geração do *backbreak*

Ao longo dos anos, diferentes pesquisas abordaram as principais causas que influenciam na intensidade do *backbreak*. Konya e Walter (1991) destacam que a utilização de cargas excessivas provoca a quebra e a geração de trincas radiais próximas dos furos da última linha.

Outro parâmetro de desmonte que tem grande influência no controle de danos no maciço remanescente e, conseqüentemente, no controle de *backbreak*, é o dimensionamento correto dos retardos empregados no desmonte. Williams *et al.* (2009) apresentam que o sequenciamento deve ser disposto de uma forma que o deslocamento da face ocorra em um ângulo baixo (20-40°), com o objetivo de reduzir o dano no maciço remanescente, conforme Figura 16.



Figura 16 - Ângulo de deslocamento recomendado para controle de dano



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Além dos parâmetros já mencionados, outros pontos que requerem atenção para o controle de dano gerado por desmontes, são: correto dimensionamento do tampão, afastamento, temporização, sequência de iniciação, número de linhas de furos e presença de trincas geradas por desmontes anteriores.

As características geológicas da área a ser desmontada também têm grande influência na magnitude do dano gerado no maciço remanescente. Áreas altamente estratificadas e com grande densidade de fraturas dificultam o seu controle, conforme ilustrado na Figura 17. Singh (2001) destaca que a frequência de juntas em uma faixa de dois a três planos por espaçamento pode produzir efeitos adversos no controle de perímetro, e que o dano é naturalmente acumulativo. Em outras palavras, quando o maciço rochoso já sofreu impacto por desmontes anteriores, pode ser necessário aplicar uma baixa energia para gerar uma sobrequebra.

Figura 17 - Maciço altamente estratificado.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

#### 4.9.2 Métodos de Desmorte para controle de dano

Devido ao impacto que o *backbreak* provoca nos processos pós-desmorte, várias metodologias de desmorte vêm sendo testadas e implementadas como forma de reduzir custos adicionais e problemas de segurança. A seguir, são apresentados alguns métodos de controle de dano, desde ajustes na perfuração/malha até modificações na construção da carga explosiva.

##### 4.9.2.1 Desmorte com amortecimento

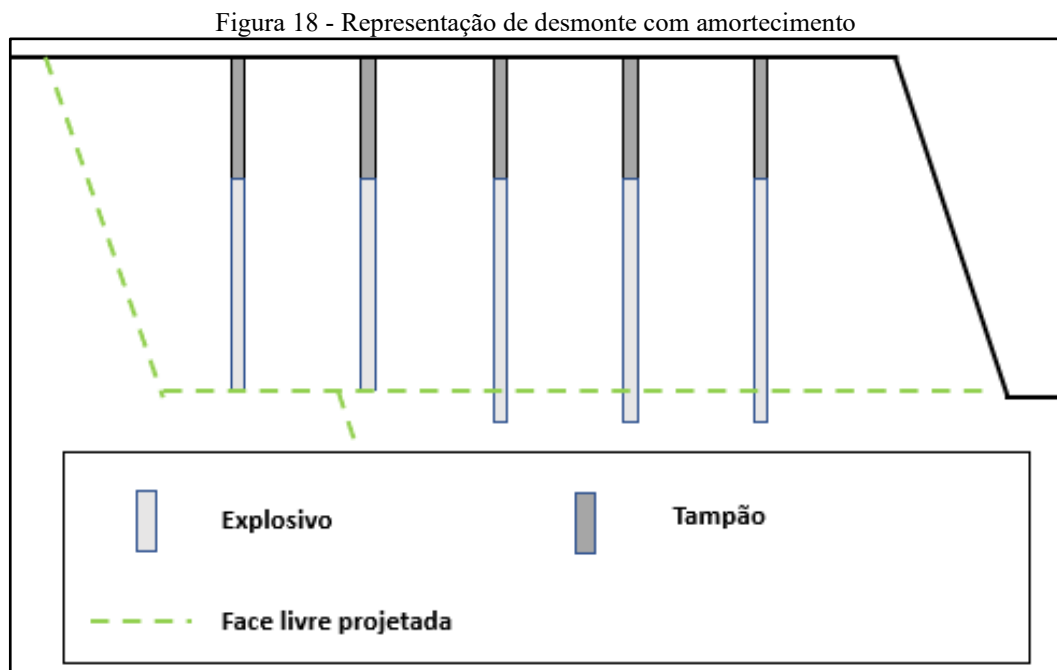
Em vários projetos de desmorte que requerem controle de dano no talude remanescente, é aplicado o método de desmorte com amortecimento. Williams (2009) descreve que essa técnica apresenta bons resultados em rochas friáveis, onde geralmente uma escavadeira pode concluir o acabamento do material não detonado. Essa metodologia consiste em posicionar a última linha de furos considerando a projeção da próxima face a ser gerada, conforme indicado na Figura 18.

Além disso, o método demanda realizar as seguintes modificações nos projetos de

desmonte:

- i. Alteração da sequência dos retardos entre furos como forma de reduzir os níveis de vibrações e o deslocamento.
- ii. Redução ou exclusão da subfuração acima da berma de segurança projetada.
- iii. A malha tende a ser reduzida de 3 a 6 linhas de furos.

A determinação do afastamento entre o furo da linha de amortecimento e o pé da próxima face é desafiadora e pode resultar em danos indesejados ao ângulo do talude.

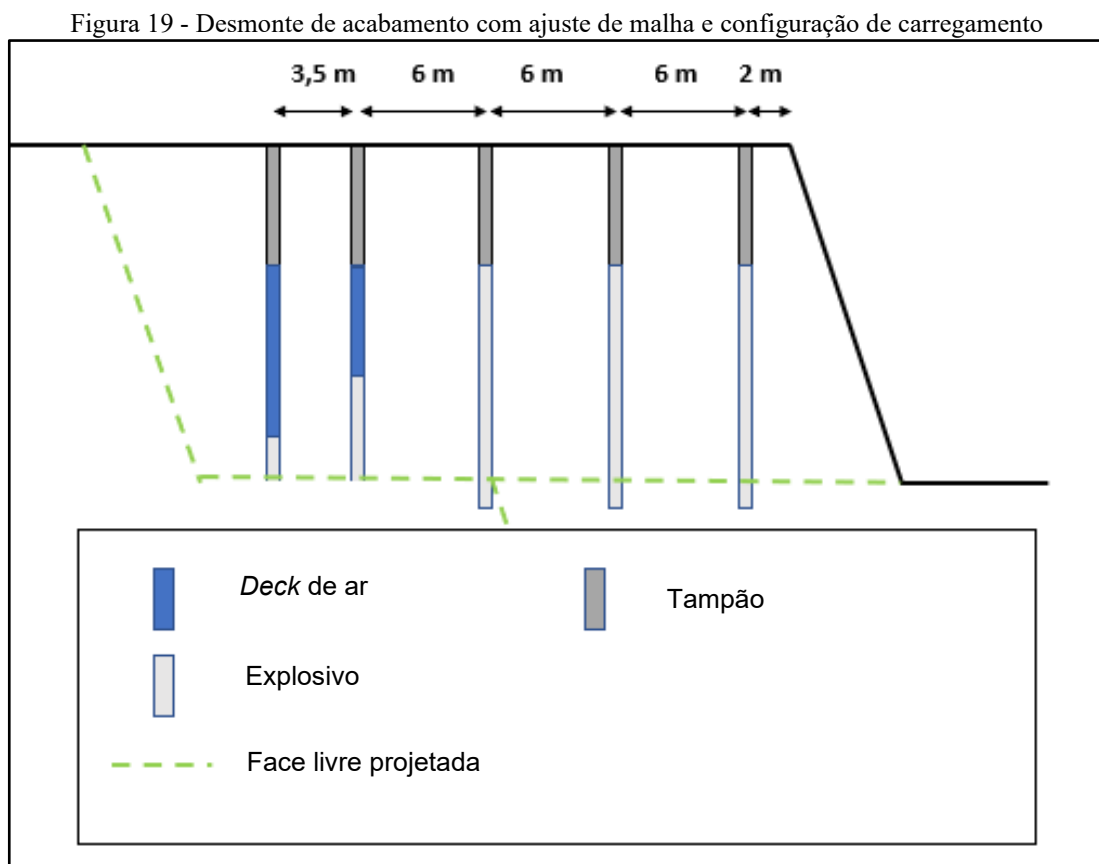


#### 4.9.2.2 Desmorte de acabamento

O desmorte de acabamento é a metodologia de desmorte mais utilizada para o controle de dano, onde relacionam ajustes da razão de carregamento e o confinamento do explosivo. Konya e Walter (1991) descrevem que o objetivo do desmorte de acabamento é criar um

perímetro estável e esteticamente atraente.

Para controlar a energia e, conseqüentemente, o dano, podem ser realizados ajustes na malha e no carregamento, visando reduzir a razão de carregamento. Em algumas situações, é possível aplicar *decks* de ar para melhorar a distribuição da energia no momento da detonação. A Figura 19 apresenta um exemplo de configuração de desmorte de acabamento, onde foram realizados ajustes na malha e na configuração de carregamento dos furos.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

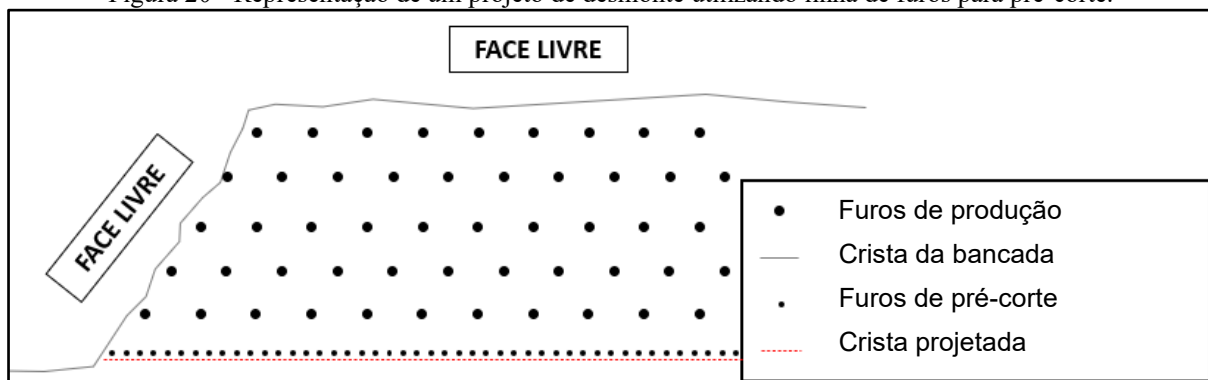
Como descrito por Yang, Pratt e Zhao (2023), esses ajustes na razão de carregamento podem resultar em uma fragmentação mais grosseira se comparado com os desmorte de produção convencionais.

#### 4.9.2.3 Pré-corte

O pré-corte é uma metodologia amplamente empregada com o objetivo de controlar danos no maciço rochoso remanescente, gerando um plano de fratura que limitará a extensão

das trincas. Konya e Walter (1991) mencionam que esse tipo de desmonte utiliza furos levemente carregados e com pequenos espaçamentos, sendo a detonação dos furos de pré-corte realizada antes dos furos de produção. A Figura 20 representa um esquema geral de perfuração para um desmonte utilizando pré-corte.

Figura 20 - Representação de um projeto de desmonte utilizando linha de furos para pré-corte.

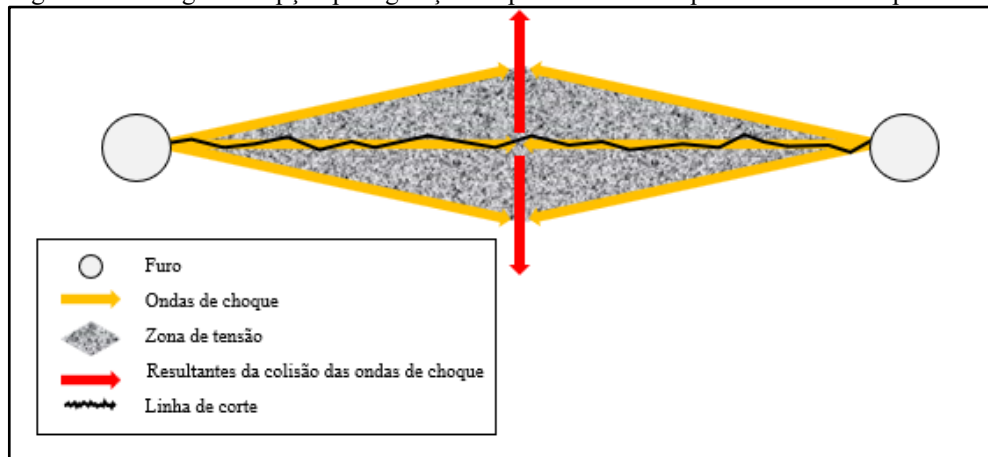


Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

O acionamento dos furos de pré-corte é preferencialmente realizado de forma simultânea, para que as ondas compressivas gerem zonas de tração que produzirão trincas. Sob a ação dos gases, ocorrerá a expansão das trincas, resultando na formação do plano de fratura. A zona altamente fissurada entre os furos torna-se o caminho mais fácil para a pressão do gás escapar e também estimula o crescimento de trincas nessa direção. Como os furos estão distantes da face livre, haverá uma baixa influência da reflexão das ondas de choque (HUSTRULID, 1999).

Atualmente entende-se que a formação do plano de fratura gerado pelo pré-corte não é um produto ligado apenas a interação das ondas de tração (Figura 21) e sim, principalmente, da interação das fraturas radiais geradas pela detonação dos furos. Konya e Walter (1991) descrevem que em muitos desmontes o pré-corte é realizado com retardos de tempo entre os furos e que são obtidos bons resultados, contrariando a antiga concepção que os furos devem sair de maneira simultânea.

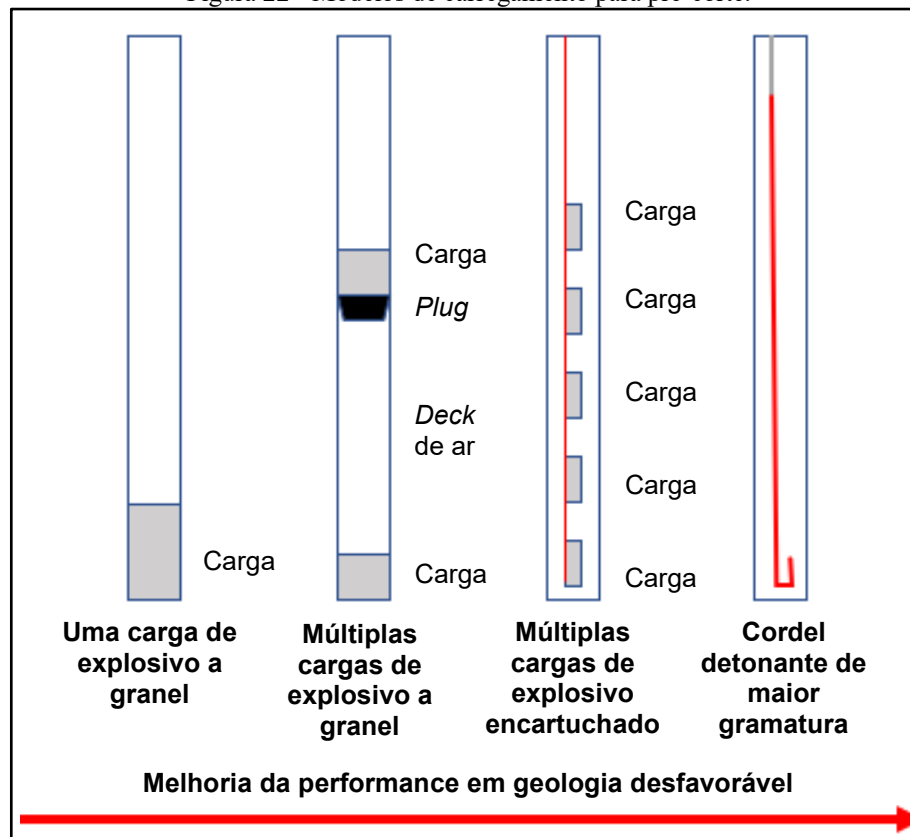
Figura 21 - Antiga concepção para geração do plano de fratura quando realizado o pré-corte.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Williams (2009) destaca que não deve haver tamponamento das cargas utilizadas nos furos de pré-corte devido à possibilidade de gerar crateramento. Além disso, os furos devem ter um dimensionamento de 0,25 a 0,33 vezes o diâmetro do furo de produção e uma inclinação de 10 a 20°. Quanto ao carregamento, é recomendado que os modelos de carga de pré-corte sigam o indicado na Figura 22, de acordo com as características geológicas do maciço rochoso a ser desmontado:

Figura 22 - Modelos de carregamento para pré-corte.



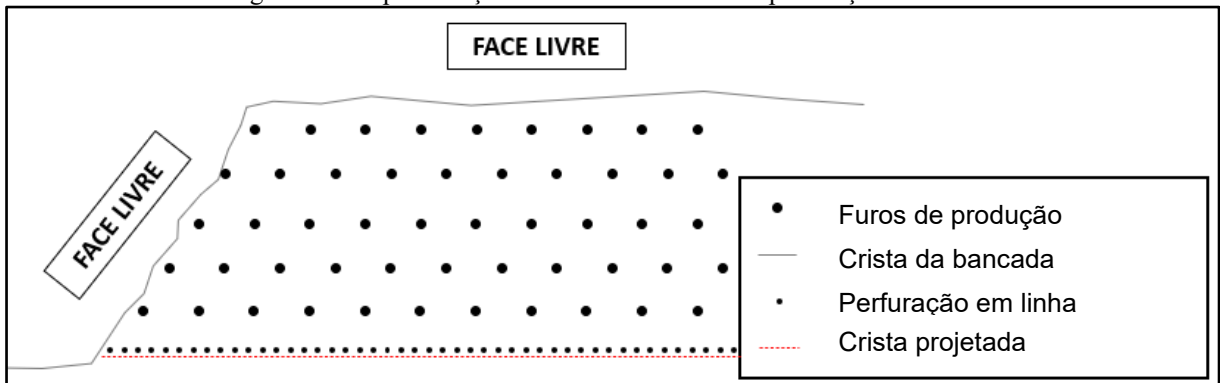
Fonte: Adaptado de Williams, 2009.

#### 4.9.2.4 Perfuração em linha

A perfuração em linha é caracterizada pela disposição de furos sem carregamento, com baixo espaçamento e diâmetro pequeno ao longo do limite da área a ser desmontada, como mostrado na Figura 23. A ISEE (2008) explica que esses furos, durante a execução do desmonte primário, funcionarão como um plano de fraqueza e, até certo ponto, refletirão as ondas de choque produzidas, reduzindo assim a desintegração e a tensão além do necessário.

A perfuração em linha apresenta melhor desempenho quando aplicada em desmontes realizados em rochas frágeis, onde os furos vazios também servirão como zonas de escape dos gases, minimizando a propagação das trincas geradas. Em materiais com geologia complicada, a perfuração em linha pode não funcionar como esperado, uma vez que as fraturas tendem a concentrar-se nos planos de fraqueza que ocorrem naturalmente (KONYA; WALTER, 1991).

Figura 23 - Representação de desmorte utilizando perfuração em linha.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

#### 4.9.3 Modelos preditivos para *backbreak*

Consciente dos riscos e custos adicionais que o *backbreak* pode acarretar nas atividades de mineração, a utilização de ferramentas capazes de mitigar ou minimizar esses problemas torna-se de grande importância para a condução de desmontes operacionais e seguros. Diversos pesquisadores desenvolveram métodos para prever o *backbreak* considerando diferentes parâmetros de desmorte. Bhagade e Murthy (2020) apresentam em seu estudo a análise da correlação entre medições de vibrações em campo próximo, fragmentação e *backbreak* para desmontes executados em bancadas lavradas por *dragline* em uma mineradora de carvão. Já Khandelwal e Monjezi (2012) estudaram a possibilidade de prever a ruptura em uma mina de ferro no Irã, incorporando propriedades da rocha e parâmetros de projeto de detonação.

A utilização de regressão múltipla para a predição de danos é relatada em diversos estudos para distintos cenários de mineração. O Quadro 2 abaixo apresenta diferentes modelos preditivos para *backbreak*.



Quadro 2 - Modelos empíricos para predição de backbreak

Autor	Ano	Equação	Parâmetros de entrada
MONJEZI; KHOSHALAN; VARJANI	2010	$Backbreak = -0,170 + 0,245D + 0,05L - 0,137S + 0,358B + 0,311T + 3,245Pf + 0,121SD + 0,221C + 0,112RMR$	Diâmetro do Furo (D); Profundidade do Furo (L); Espaçamento (S); Afastamento (B); Tampão (T); Razão de Carregamento (Pf); Perfuração específica (SD); Carga máxima por espera (Ch); RMR(RMR).
KHANDELWAL e MONJEZI	2012	$Backbreak = 1,0331L + 1,0474S + 1,5942B - 0,7228T - 2,2407PF + 0,2081SD - 15,8204$	Profundidade do Furo (L); Espaçamento (S); Afastamento (B); Tampão (T); Razão de Carregamento (Pf); Perfuração específica (SD).
ESMAEILI <i>et al.</i>	2012	$Backbreak = 1,854SC - 0,273ST + 0,003CLR + 0,076NR$	Carga específica (kg/m <sup>3</sup> ) (SC); Tampão (ST); Carga da última linha (CLR); Número de linhas (NR);
SAYADI <i>et al.</i>	2013	$Backbreak = 0,494B + 1,082S + 0,015H + 1,203T - 0,056SC + 23,576SD - 8,501$	Afastamento (B); Espaçamento (S); Profundidade do furo (H); Tampão (T); Razão de carregamento kg/m <sup>3</sup> (SC); Perfuração Específica (SD)
MOHAMMADNEJAD <i>et al.</i>	2013	$Backbreak = 0,857B + 0,763L + 0,72S + 0,634T - 0,501SD - 0,216Pf - 17,7$	Afastamento (B); Espaçamento (S); Profundidade do furo (L); Tampão (T); Perfuração específica (SD); Razão de carregamento (Pf)
BHAGADE e MURTHY	2020	$Backbreak = 0,003PVS + 0,001SI + 11,24BS$	Vibração Resultante (PVS); Índice sísmico (SI); Rigidez do banco (BS)

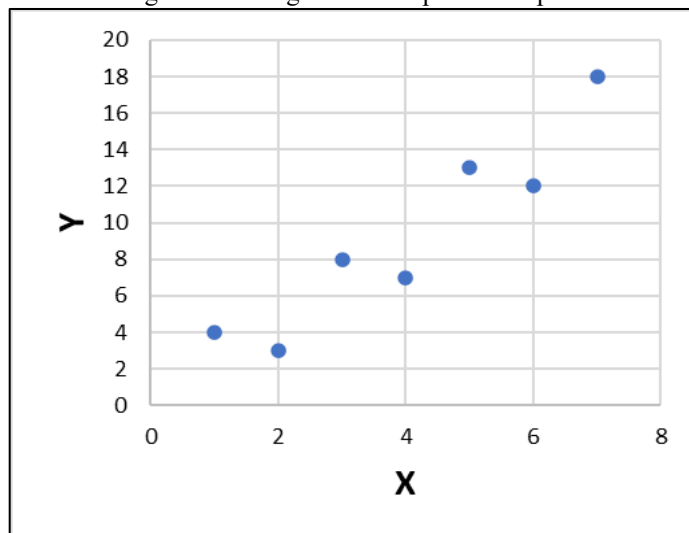
Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

#### 4.10 Modelos de regressão linear

São modelos utilizados para analisar a correlação entre duas ou mais variáveis quantitativas. Os dados podem ser representados em pares ordenados  $(x, y)$ , sendo  $x$  a variável independente e  $y$  a variável dependente. Chama-se de variável dependente ou variável endógena,  $y$ , aquela cujo comportamento será explicado pela variável  $x$ , chamada de variável explicativa, regressor ou variável independente (CHEIN, 2019).

Os modelos de regressão linear, entre outros propósitos, são empregados para explicar uma tendência ou correlação entre duas variáveis. Esses modelos podem ser representados graficamente por meio de um gráfico de dispersão simples, como exemplificado na Figura 24.

Figura 24 - Diagrama de dispersão simples.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

##### 4.10.1 Regressão linear simples

Devore (2006) define que relação matemática determinística mais simples entre duas variáveis  $x$  e  $y$  é uma relação linear, conforme apresentado na equação 2, onde o conjunto de pares  $(x, y)$  determina uma reta com coeficiente angular  $\beta_1$  e termo constante  $\beta_0$ .

$$y = \beta_0 + \beta_1 x \quad (2)$$

Dada a presença de fatores que podem ocasionar variações na estimativa de  $y$ , à equação acima é acrescido um termo de erro  $u_i$ . Este termo abrange todos os fatores, além de  $x$ , que contribuem para as diferenças, conforme apresentado na equação 3:

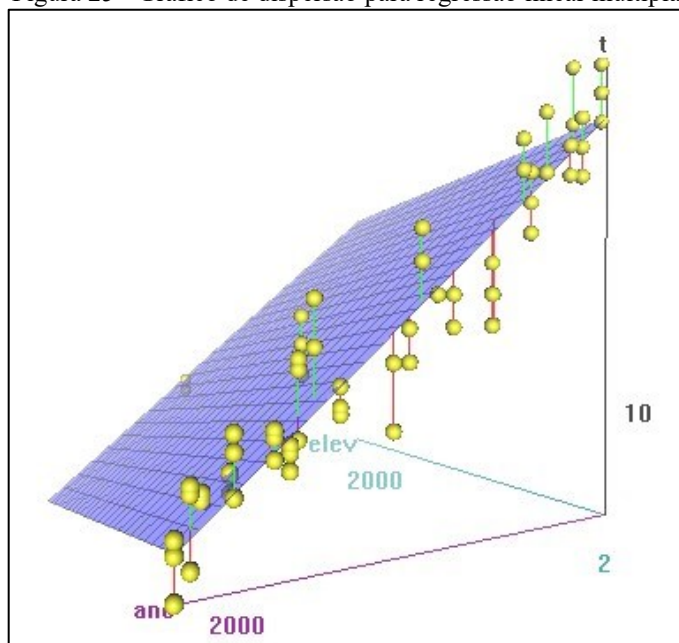
$$y = \beta_0 + \beta_1 X + u_i \quad (3)$$

#### 4.10.2 Regressão linear múltipla

Na regressão múltipla, o objetivo é elaborar um modelo probabilístico que relacione uma variável dependente  $y$  a mais de uma variável independente ou de previsão (DEVORE 2006). A equação utilizada para a estimativa na regressão linear múltipla é semelhante à usada na regressão linear simples, com a diferença de que são consideradas múltiplas variáveis  $\beta$  que afetam a inclinação da reta, como apresentado na equação 4. Figura 25 representa graficamente um modelo de dispersão considerando mais de uma variável independente.

$$y = \beta_0 + \beta_1 X_{1i} + \beta_2 X_{2i} + \dots + \beta_n X_{ni} + u_i \quad (4)$$

Figura 25 - Gráfico de dispersão para regressão linear múltipla.



Fonte: Azevedo Filho, 2023.

No contexto do desmonte de rochas, os modelos de regressão múltipla têm sido empregados para compreender e prever diversos fenômenos associados a essa atividade, como vibrações induzidas, ultralancamento e fragmentação. Além dessas variáveis, algumas pesquisas, como as conduzidas por Bhagade e Murthy (2020) e Khandelwal e Monjezi (2012), utilizam a regressão linear múltipla para desenvolver equações que melhor caracterizem o fenômeno do *backbreak*.

#### 4.11 Coeficiente de correlação de Pearson (R)

Segundo Miot (2018), a técnica mais utilizada para avaliar a correlação entre duas variáveis quantitativas é o coeficiente de correlação de Pearson, ou r de Pearson, que pode ser calculado pela Equação 5. O coeficiente de correlação toma valores entre  $-1$  e  $1$ , sendo que quanto mais próximo de  $-1$  ou  $1$  maior a relação linear entre as variáveis analisadas.

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})(y_i - \bar{Y})}{(n - 1) S_x S_y} \quad (5)$$

Sendo:

$\bar{X}$  = média da amostra para a primeira variável

$S_x$  = desvio padrão da amostra para a primeira variável

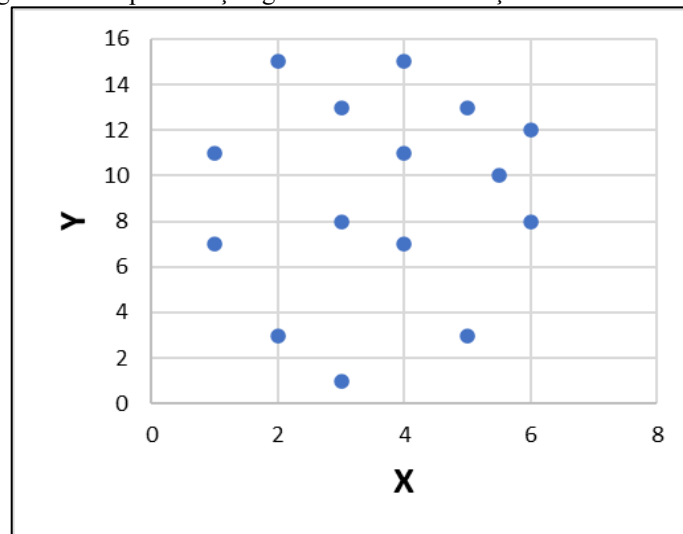
$\bar{Y}$  = média da amostra para a segunda variável

$S_y$  = desvio padrão da amostra para a segunda variável

$n$  = número de observações

Se  $R(X, Y) = 0$ ,  $X$  e  $Y$  não são correlacionadas e são representadas de forma geral em um gráfico de dispersão semelhante ao apresentado na Figura 26:

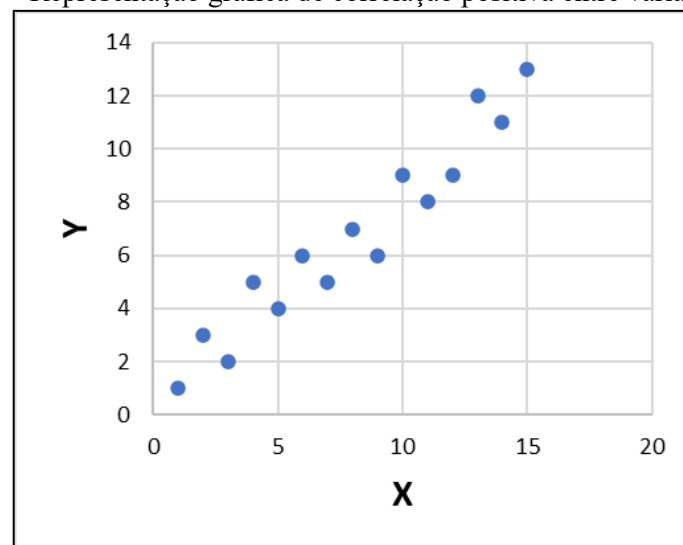
Figura 26 - Representação gráfica de não correlação de variáveis X e Y



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Por outro lado, se  $R > 0$ , é definido como uma correlação crescente, onde as duas variáveis crescem no mesmo sentido, conforme representado na Figura 27:

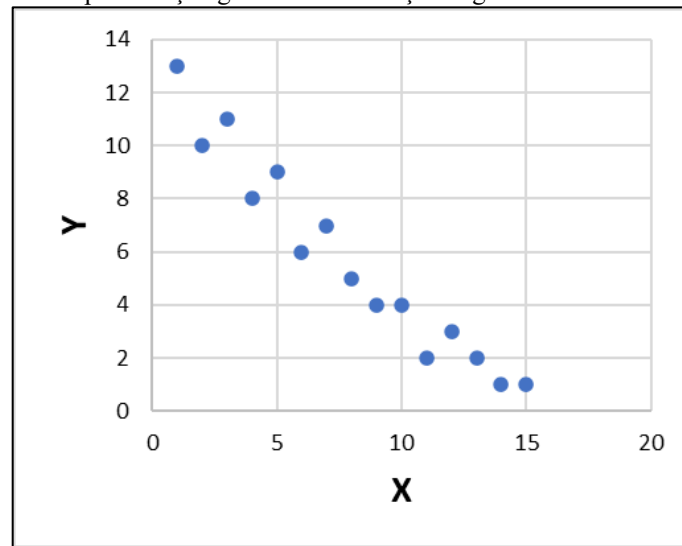
Figura 27 - Representação gráfica de correlação positiva entre variáveis X e Y.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Já para  $R < 0$ , a correlação é definida como decrescente, onde as duas variáveis crescem em sentidos contrário, conforme representado na Figura 28:

Figura 28 - Representação gráfica de correlação negativa entre variáveis X e Y.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

#### 4.12 Coeficiente de determinação ( $R^2$ )

O coeficiente de determinação é definido por Subramanian, Silva e Coutinho (2007) como a proporção da variabilidade que pode ser estimada pela equação da regressão. Este indicador estatístico também pode ser entendido como a porcentagem da variabilidade em y que pode ser explicada através da equação de regressão.

O coeficiente de determinação ( $R^2$ ) pode ser representado matematicamente através da Equação 6, apresentado a seguir:

$$R^2 = \frac{SQT - SQE}{SQT} = \frac{SQR}{SQT} \quad (6)$$

Sendo:

SQT = variação de Y, independente de X

SQE = variação de Y, considerando X

O  $R^2$  explica o grau de relação entre as variáveis analisadas, sendo assim, quanto mais próximo o valor é de 1 mais forte será a relação entre os parâmetros analisados. Vale lembrar

que o  $R^2$  relaciona todos as variáveis com a variável dependente. Chiode (2021) apresenta que a denominação se dá como  $R^2$  pelo fato de que seu valor coincide como o quadrado do coeficiente de correlação linear de Pearson.

#### 4.13 Coeficiente de determinação ajustado ( $R^2_{ajust}$ )

Para Almeida (2015), o  $R^2_{ajust}$  dá uma ideia melhor da proporção de variação da variável dependente explicada pelo modelo, uma vez que leva em consideração o número de variáveis independentes envolvidas no ajuste. O  $R^2_{ajust}$  é calculado aplicando a Equação 7.

$$R^2_{ajust} = 1 - (1 - R^2) \left( \frac{(n - 1)}{n - k} \right) \quad (7)$$

Onde:

$R^2$  = coeficiente de determinação

$n$  = número de observações

$k$  = número de coeficientes estimados

#### 4.14 Valor médio dos erros absolutos percentuais (MAPE)

MAPE (*Mean absolut percentual error*) é uma métrica estatística utilizada para avaliar a precisão de um modelo de previsão ou predição, sendo calculado como a média percentual dos erros absolutos em relação aos valores observados, conforme Equação 8. Quanto menor o valor do MAPE, melhor é a precisão do modelo. Essa métrica é útil para interpretar o quão bem o modelo está performando em termos percentuais em relação às observações reais. Oliveira (2022) apresenta que quanto mais próximo de zero, melhor o desempenho do modelo.

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \frac{|Y_t - Y'_t|}{|Y_t|} \quad (8)$$

Onde:

$Y_t$ : valor medido

$Y'_t$ : valor previsto

n: número de observações

#### 4.15 Raiz do erro médio quadrático (RMSE)

O RMSE (*Root Mean Squared Error*) fornece uma medida da diferença entre os valores previstos por um modelo e os valores reais, sendo empregada em trabalhos de regressão para avaliar a precisão das predições dos modelos de simulação. A Equação 9 apresenta o método de cálculo para este indicador.

Assim como o MAPE, quanto menor o valor do RMSE, melhor é o ajuste do modelo aos dados observados. Conforme Chai e Draxler (2014) citam, o modelo é empregado principalmente para avaliação de modelos utilizados em geociências, como estudos meteorológicos.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - Y'_i)^2} \quad (9)$$

Onde:

$Y_t$ : valor medido

$Y'_t$ : valor previsto

n: número de observações



#### 4.16 Métodos de medida de fragmentação

A fragmentação é o processo de quebra do maciço rochoso *in situ* em fragmentos menores, de forma que atendam às necessidades subsequentes ao desmonte de rochas, seja para carregamento, transporte ou beneficiamento. Com isso, é possível inferir que resultados de fragmentação insatisfatórios têm potencial impacto nas etapas seguintes, e que é de extrema importância a utilização de ferramentas que possibilitem sua medição para gestão deste indicador. Por outro lado, realizar a mensuração e análise da fragmentação de uma pilha desmontada não é um processo simples. Braga (2018) cita os seguintes motivos para que o processo de mensuração da fragmentação de uma pilha desmontada seja difícil:

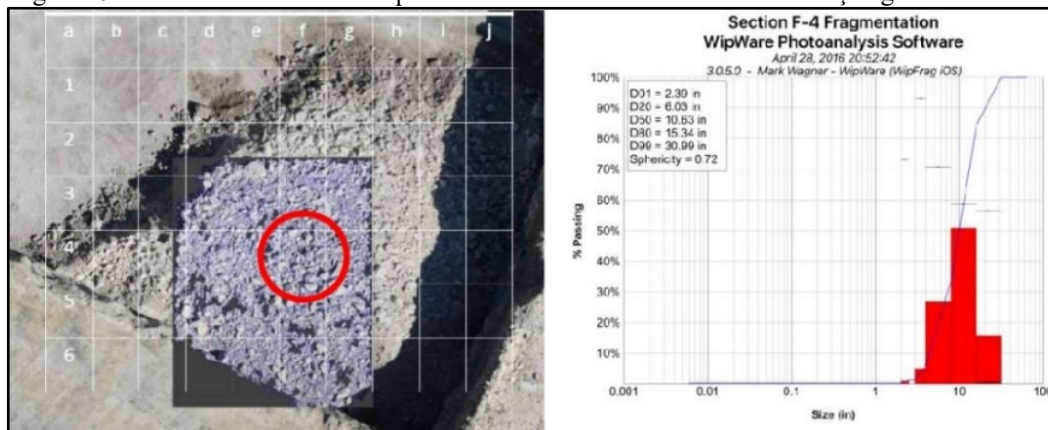
- i. Tamanho da detonação: A escala dos desmontes, que podem chegar na ordem de milhões de toneladas inviabiliza uma análise global da distribuição granulométrica. Neste tipo de situação são colhidas amostras que irão representar o todo.
- ii. Dificuldades de amostragem representativa: Para uma amostra ser considerada representativa devem ser colhidas amostras que representem cada faixa granulométrica com massas proporcionalmente iguais ao todo. Como os desmontes produzem fragmentos que variam desde a ordem de gramas até toneladas, este cenário dificulta o manuseio e análise em laboratório, o que impossibilita uma análise real das amostras finas e grosseiras.
- iii. Sobreposição dos grossos: Naturalmente a zona que tende ter a maior presença de finos é aquela mais próxima da coluna explosiva, isso devido ao efeito de pulverização instantânea da rocha na primeira etapa da detonação. Em contra partida a parte superior da pilha tende a alocar fragmentos mais grosseiros, visto a energia de detonação atua de forma menos eficaz nesta área. Essa sobreposição de fragmentos grosseiros sobre os finos dificultam uma boa amostragem.

Devido à importância de medir a fragmentação, diversos métodos e ferramentas vêm sendo aplicados para análise dos resultados dos desmontes de rocha. Dentre esses, Nanda e Pal (2020) listam:

- i. Método de análise de sobredimensionamento: Nesse método, um índice de sobredimensionamento é calculado com base em rochas sobre dimensionadas, que não podem ser transportadas ou processadas.
- ii. Método de taxa de carregamento da escavadeira: Este método assume que quanto mais rápido for o carregamento, melhor a fragmentação.
- iii. Método de análise visual: Esse método consiste basicamente na avaliação pós-desmonte da pilha desmontada pelos profissionais responsáveis pela atividade, onde é avaliada a qualidade do desmonte para ajustes nos próximos projetos e também para analisar a necessidade de desmontes secundários.
- iv. Método de análise de imagem: Com o desenvolvimento de processadores cada vez mais rápidos, câmeras portáteis com alta resolução e fotossensíveis, e algoritmos que permitem parametrizar as análises e o processamento de imagens, torna-se cada vez mais comum a aplicação da análise de fragmentação por meio de imagens.

Existem diversos softwares que permitem realizar o levantamento e a análise das imagens de maneira pontual e macro. O primeiro caso geralmente é realizado por meio de registros fotográficos em pontos específicos da pilha fragmentada, referenciados com algum objeto de dimensão conhecida para servir de escala. Já o levantamento macro da pilha de rocha fragmentada, conforme Figura 29, é obtido por meio de aerolevantamentos realizados com drones.

Figura 29 – Levantamento aéreo de pilha desmontada e sua curva de distribuição granulométrica.



Fonte: TAMIR, R. et al, 2017.

Maerz, Palangio e Franklin (1996) relatam que as principais vantagens do método são:

- i. O processamento de imagem é preciso, consome menos tempo e várias imagens podem ser analisadas simultaneamente.
- ii. O processamento da imagem não atrapalha ou interfere no processo de produção.
- iii. O processamento de imagem é barato e com amostragem mais assertiva.
- iv. É possível englobar fragmentos de todos os tamanhos na análise, ao contrário de métodos convencionais.

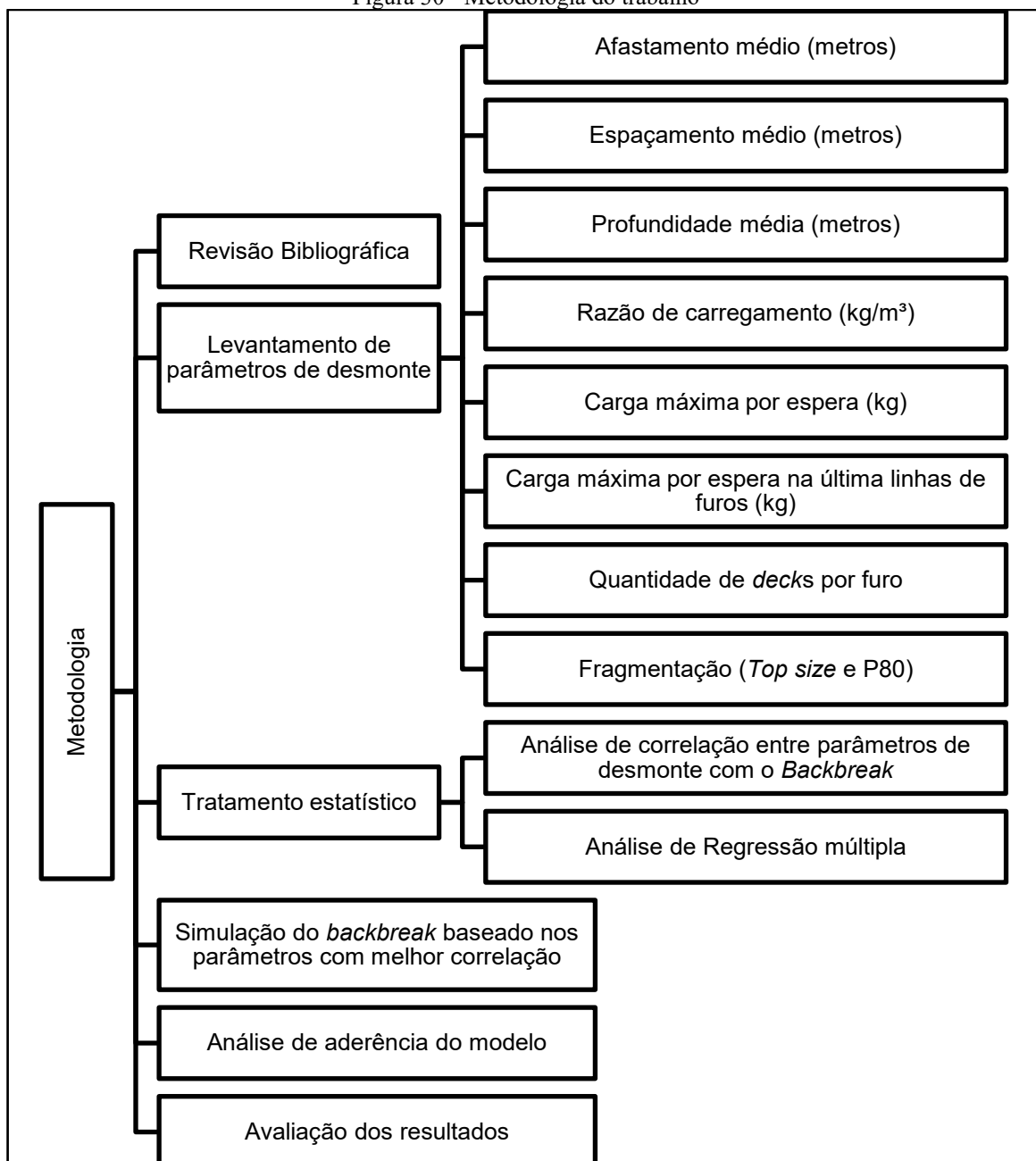
Sanchidrián *et al.* (2008) descrevem que as técnicas de análise por imagem apresentam quatro fatores principais que podem gerar erro na mensuração e conseqüentemente na análise da fragmentação:

- i. Usar uma amostragem da superfície para estimar características internas.
- ii. Qualidade das imagens levantadas.
- iii. Contorno dos fragmentos não representativos.
- iv. Estimativa de finos.

## 5 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho realizou uma análise de dados produto de desmontes executados em uma mina a céu aberto com objetivo de avaliar a correlação do *backbreak* com parâmetros controláveis de desmonte e com os resultados de fragmentação. Para isso o trabalho seguiu a metodologia representada na Figura 30.

Figura 30 - Metodologia do trabalho



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

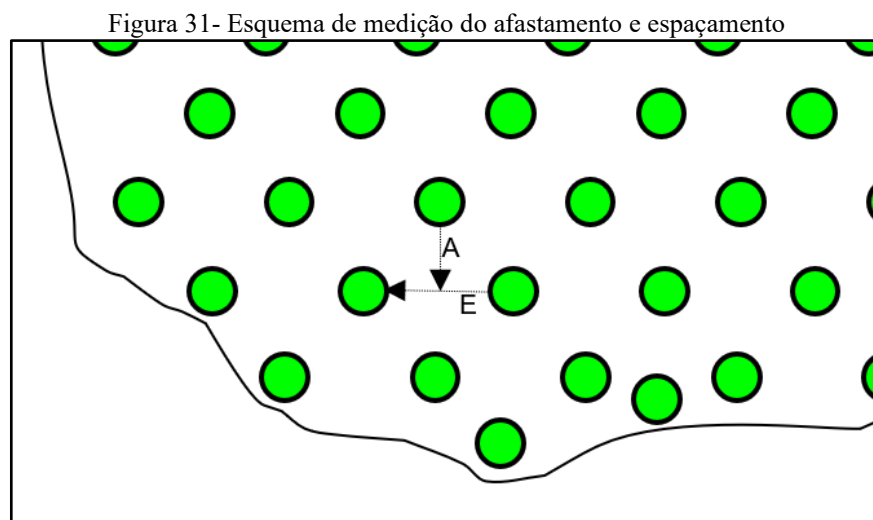
## 5.1 Levantamento de dados

Para elaboração de um modelo preditivo, é necessário compor um banco de dados robusto. Os dados utilizados foram obtidos a partir de desmontes realizados em uma mina a céu aberto localizada no Quadrilátero Ferrífero, em Minas Gerais. A seguir, são apresentadas as metodologias empregadas para o levantamento de dados de cada parâmetro.

### 5.1.1 Afastamento e Espaçamento

Os dados relativos aos parâmetros geométricos de projeto foram originados a partir do levantamento das coordenadas geográficas dos furos, utilizando um GPS de precisão RTK. Em seguida, os furos foram plotados no software QGIS, e foram realizadas as medições de espaçamento e afastamento.

Como todas as malhas de perfuração analisadas apresentavam um padrão de distribuição de furos triangular, a mensuração do afastamento considerou a medida perpendicular entre um furo e o espaçamento à sua frente. Já para o espaçamento, foi considerada a medida entre um furo e o seguinte da mesma linha. A Figura 31 apresenta a representação das medidas de espaçamento e afastamento realizadas via software.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

O banco de dados foi alimentado para cada desmonte com a média aritmética simples

de todas as medidas de afastamento e espaçamento. A unidade considerada para estes parâmetros foi metros (m).

#### 5.1.2 Profundidade dos furos

Devido à ausência de perfuratrizes de precisão na operação analisada, os valores de profundidade dos furos utilizados no banco de dados são resultado de medições realizadas por meio de trena métrica. Essas medições foram consideradas como a distância entre o fundo do furo e o colar do mesmo.

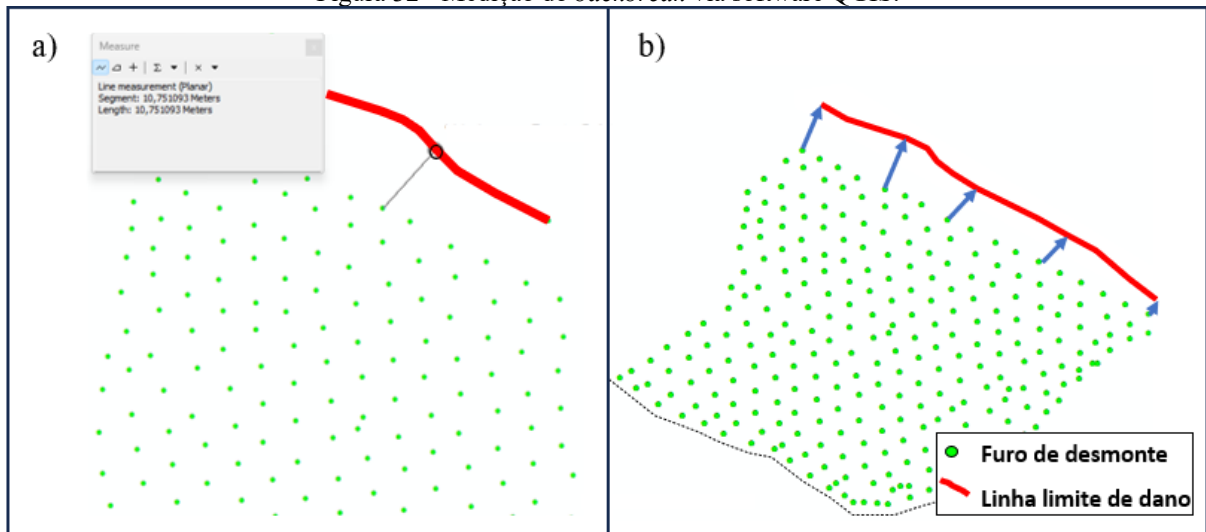
O banco de dados foi alimentado com a média aritmética simples de todas as medições de profundidades realizadas por desmonte, sendo considerado o metro (m) como unidade de medida.

#### 5.1.3 Fragmentação

Para análise e avaliação da correlação entre o *backbreak* e a fragmentação, foram considerados os resultados de P80 e *top size*, sendo esses dados produto de análises de fragmentação por imagem.

#### 5.1.4 *Backbreak*

Para a mensuração do dano gerado pelo desmonte de rochas, considerou-se a linha limite de dano como referência da extensão da sobrequebra gerada no maciço remanescente. A linha limite de dano foi levantada por meio da utilização de um GPS de precisão RTK. Posteriormente, foram realizadas as medições no software Q-GIS, como apresentado na Figura 32.

Figura 32 - Medição do *backbreak* via software QGIS.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Os dados referentes ao *backbreak* foram determinados por meio da média aritmética de pelo menos 5 medidas entre a última linha de furos até a linha limite de dano, sendo primordial a medida na área central do dano e nos seus extremos. Além dessas, foram realizadas outras medições ao longo do dano de forma que o valor médio final representasse da melhor forma o comportamento do dano.

### 5.1.5 Parâmetros de carregamento

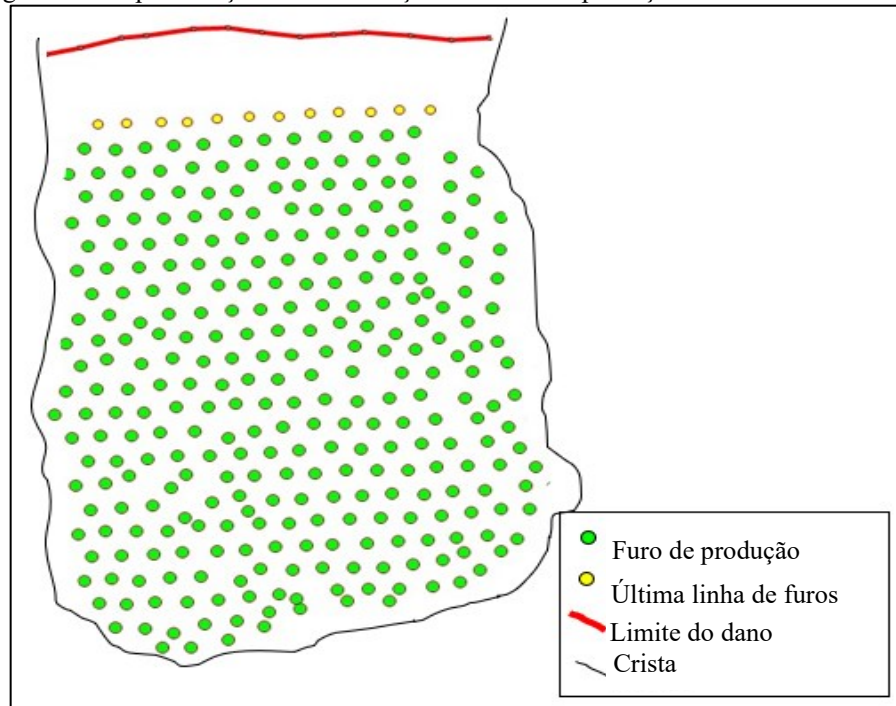
O estudo em questão também utilizou informações relativas ao carregamento dos furos na alimentação do banco de dados para posterior análise e interpretação de resultados, sendo considerado os seguintes parâmetros ligados ao carregamento dos furos:

- i. Quantidade de *decks* de carga explosiva por furo de produção (unidade): Número de *decks* por furo de produção.
- ii. Quantidade de *decks* de carga utilizada na última linha de furos (unidade): Número de *decks* por furo da última linha.
- iii. Carga máxima por espera nos furos de produção (kg): Quantidade máxima de explosivo detonado simultaneamente, desconsiderando os furos da última linha.

- iv. Carga máxima por espera na última linha de furos (kg): Quantidade máxima de explosivo detonado de forma simultânea na última linha de furos.

A Figura 33 representa graficamente a disposição dos furos de produção e dos furos considerados como da última linha.

Figura 33 - Representação da identificação dos furos de produção e furos da última linha.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

- v. Razão de carregamento ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ): Relação entre a quantidade total de explosivo por furo e o volume de rocha desmontada.
- vi. Quantidade de linhas (unidade): Quantidade de linhas de furos empregados no desmonte, sendo a quantificação levantada com base no sequenciamento da detonação.

## 5.2 Análises estatística dos dados

O banco de dados analisado neste estudo foi composto por informações de 37 desmontes realizados em uma mina a céu aberto, sendo empregado o software Excel como ferramenta para a organização das informações, análises de correlação e determinação do modelo preditivo



baseado em regressão linear múltipla. As detonações foram caracterizadas com informações numéricas de carregamento, parâmetros geométricos de projeto e resultados de fragmentação. O Quadro 3 apresenta os dados avaliados na presente pesquisa.

Quadro 3 - Dados de entrada para o banco de dados.
<b>Dados de entrada analisados</b>
<i>Backbreak</i> médio (BB)
Carga máxima por espera (CME)
Quantidade de <i>Decks</i> nos furos de produção (NDp)
Carga máxima por espera na última linha de furos (CMEu)
Quantidade de <i>Decks</i> nos furos da última linha (NDu)
Razão de carregamento (Rc)
P80 (P80)
<i>Top size</i> (Ts)
Espaçamento médio (E)
Afastamento médio (A)
Profundidade média (P)
Número de linhas (NI)

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Na análise estatística, foram avaliados dois cenários: um considerando todos os desmontes e outro desconsiderando detonações com valores extremos de CME. Essa abordagem foi adotada porque a concentração de valores deslocados poderia representar *outliers* e, conseqüentemente, exercer influência negativa sobre o modelo. Assim, para ambos os cenários, foram realizadas análises de regressão linear simples entre o *backbreak* médio e os parâmetros de desmonte para avaliação do grau de correlação, análise de regressão linear múltipla, simulação de *backbreak* médio e análise de aderência. Ao final, selecionou-se aquele que apresentasse a maior representatividade do fenômeno estudado.

### 5.2.1 Determinação do modelo de regressão linear múltipla

Após a análise de correlação, foram identificados os parâmetros que apresentam a maior correlação e, por conseguinte, impacto nos resultados do *backbreak* médio. Esses dados, que têm uma relação mais significativa com o dano no maciço rochoso, foram então levantados e considerados na análise de regressão múltipla, realizada por meio da ferramenta de regressão do Excel.

A análise de regressão linear múltipla foi conduzida com um nível de confiança estabelecido em 95%, o que significa que, mantendo as mesmas características para os parâmetros de projeto e condições idênticas para o maciço rochoso, a taxa de sucesso teórico do modelo preditivo para o *backbreak* será de 95 a cada 100.

Como forma de avaliar a performance de predição do modelo, assim como apresentado por Esmaeli *et al* (2012), foram calculados os índices raiz do erro quadrático médio (RMSE), coeficiente de correlação ( $R^2$ ) e erro percentual médio absoluto (MAPE) para controlar o desempenho da capacidade de predição do modelo preditivo desenvolvido.

### 5.2.2 Simulações de *backbreak* médio

Após determinados os coeficientes da regressão linear múltipla, foi desenvolvida a equação para predição do *backbreak* médio, onde sob seu uso foi realizada a simulação da sobrequebra gerada por 31 desmontes e posteriormente avaliada a aderência entre os valores medidos e simulados.

### 5.2.3 Análise de cenários

Durante as análises de regressão linear simples foi observada a presença de um agrupamento de amostras deslocadas com relação as demais, o que poderia caracterizá-los como *outliers*. Como forma de validar se esse agrupamento gera alguma influência negativa nas predições e análises, o estudo abordará um segundo cenário excluindo os desmontes que apresentaram esse deslocamento. Por fim, será realizada uma comparação entre os dois modelos preditivos como forma de indicar aquele que seja mais fidedigno ao fenômeno estudado

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 6.1 Cenário 01 – Análise geral dos desmontes

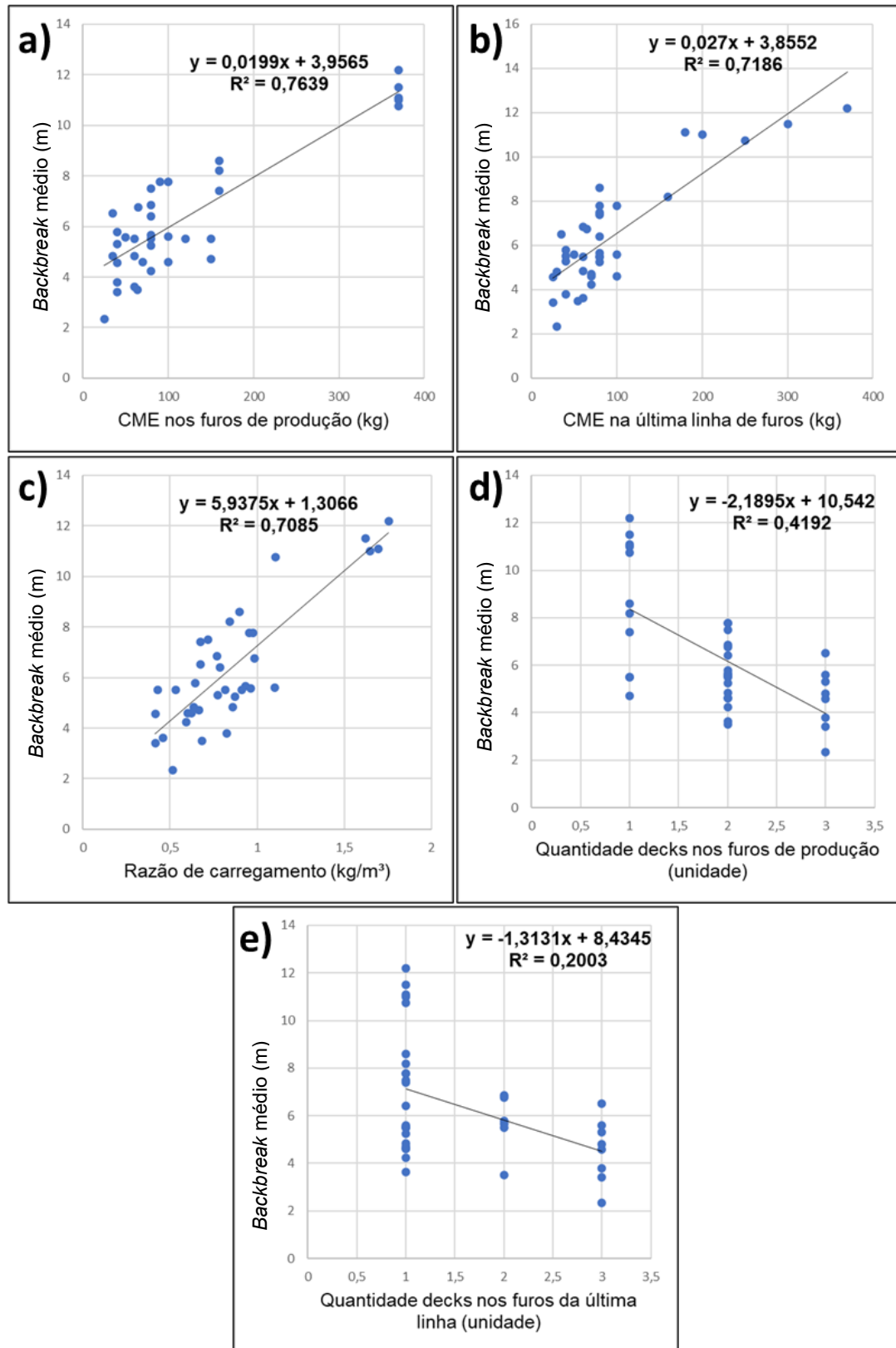
Neste cenário, foram analisados todos os 37 desmontes estudados com o objetivo de avaliar a existência de correlações entre o *backbreak* médio e os diferentes parâmetros de desmonte. Além disso, foi desenvolvido um modelo preditivo para a sobrequebra média por meio de regressão linear múltipla e realizada uma avaliação da aderência do modelo.

#### 6.1.1 Análise de regressão linear simples

Conforme apresentado na Figura 36-a, a análise da correlação entre a carga máxima por espera nos furos de produção e o *backbreak* médio revelou uma associação positiva, evidenciada por um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de 0,7639, indicando uma forte correlação. No entanto, é importante observar que esse modelo de dispersão identificou dois agrupamentos principais: um com CME variando de 25 kg a 160 kg e outro composto por desmontes realizados com as maiores cargas máximas por espera estudadas. As Figuras de 34 e 35 apresentam as análises de regressão linear simples entre as variáveis independentes e o *backbreak* médio em 37 desmontes.

O gráfico de dispersão entre o *backbreak* médio e a CME na última linha de furos apresenta uma correlação positiva e um  $R^2 = 0,7186$ , porém com uma maior concentração de dados provenientes de desmontes realizados com cargas máximas iguais ou inferiores a 100 kg, conforme representado na Figura 34-b.

Figura 34 - Análises de correlação do *backbreak* médio x parâmetros controláveis de desmonte. (34-a) CME nos furos de produção; 34-b) CME na última linha de furos; 34-c) Razão de carregamento; 34-d) Quantidade decks nos furos de produção; 34-e) Quantidade decks nos furos da última linha) – Cenário 01.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

A avaliação de correlação considerando a razão de carregamento *versus backbreak médio* apresentou coeficiente de determinação de 0,7085 e uma correlação positiva. Além disso, assim como apresentado na análise para *backbreak* médio *versus* caga máxima por espera nos furos de produção, existem dois agrupamentos bem definidos, conforme representado na Figura 34-c.

Conforme indicado nas Figuras 34-d e 34-e, a quantidade de *decks* de carga nos furos de produção e na última linha de furos apresentaram respectivamente um  $R^2$  de 0,4192 e 0,2003. Apesar dessas análises indicarem um  $R^2$  abaixo de 0,7, ambas as variáveis relacionadas ao escalonamento de cargas serão consideradas nas análises de regressão múltipla, visto que quando associadas à carga máxima por espera podem gerar uma influência significativa sobre o *backbreak* médio. Além disso, em trabalhos como o apresentado por Mohammadnejad *et al.* (2013), no desenvolvimento do modelo preditivo, são utilizadas variáveis independentes com menores coeficientes de determinação, porém que desempenham um importante papel na intensidade da sobrequebra.

A avaliação de correlação entre a sobrequebra média e a profundidade média dos furos, quantidade de linhas, afastamento médio e espaçamento médio não apresentou uma correlação significativa, conforme indicado nas Figuras de 35-a a 35-d. Esses resultados podem estar associados à falta de caracterização dos desmontes quanto à sua litologia, o que impediu uma discretização das análises com base nas características geoestruturais e geomecânicas.

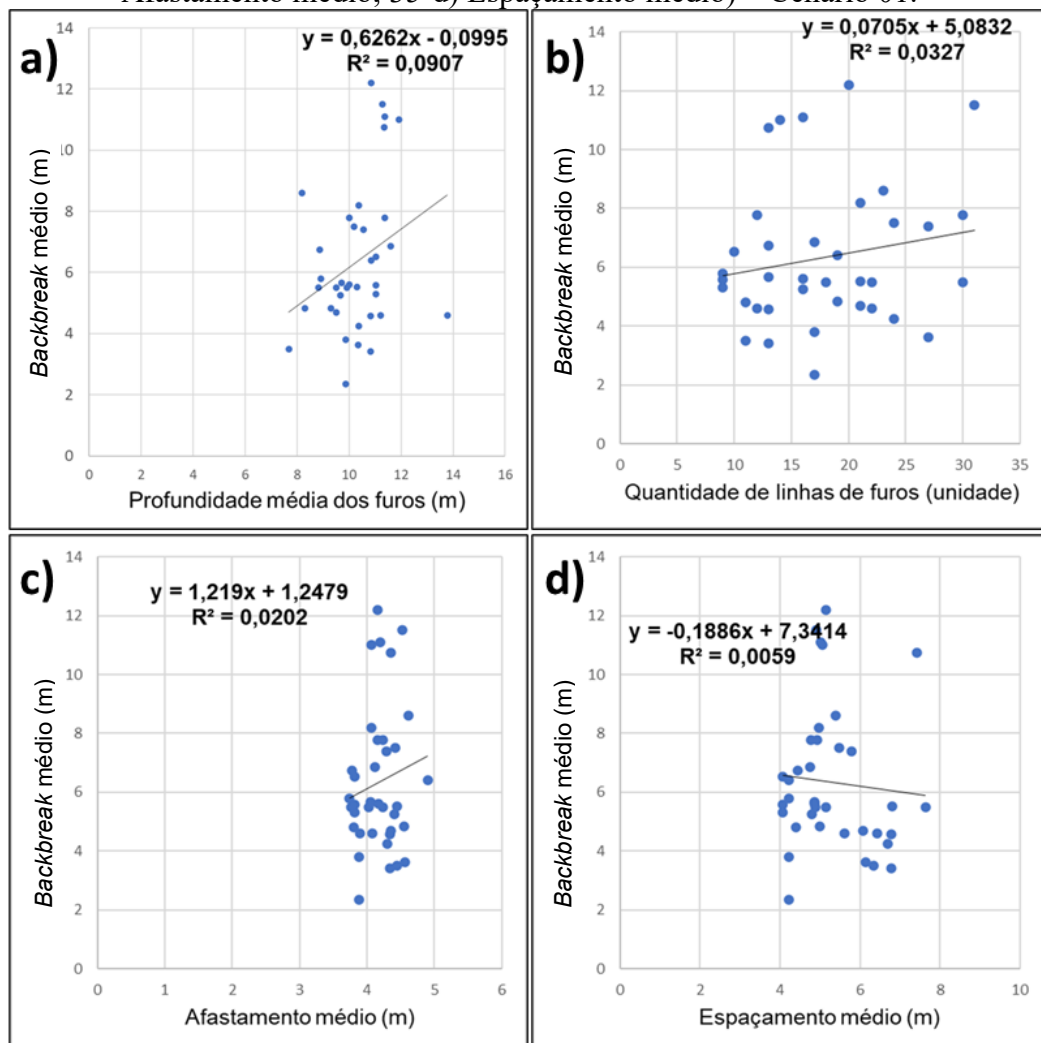
Para as análises de correlação entre os parâmetros estudados e o *backbreak*, os coeficientes de determinação ( $R^2$ ), que são indicadores da força de correlação, apresentaram os resultados conforme resumidos na Tabela 1

Tabela 1 - Resultados de  $R^2$  – Cenário 01.

Parâmetros	$R^2$
Carga máxima por espera nos furos de produção	0,7639
Carga máxima por espera na última linha de furos	0,7186
Razão de carregamento	0,7085
Quantidade de <i>decks</i> nos furos de produção	0,4192
Quantidade de <i>decks</i> nos furos da última linha	0,2003
Profundidade média dos furos	0,0907
Número de linhas de furos	0,0327
Afastamento	0,0202
Espaçamento	0,0059

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Figura 35 - Análises de correlação do *backbreak* médio x parâmetros controláveis de desmonte. (35-a) Profundidade média dos furos; 35-b) Quantidade de linhas de furos; 35-c) Afastamento médio; 35-d) Espaçamento médio) – Cenário 01.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Os coeficientes de determinação indicaram que as variáveis mais significativas, no que diz respeito à sua influência na geração do *backbreak*, são a carga máxima por espera nos furos de produção, a carga máxima por espera na última linha de furos, a razão de carregamento, a quantidade de *decks* nos furos de produção e a quantidade de *decks* nos furos da última linha. Sendo assim, as análises de regressão linear simples indicam que o correto dimensionamento desses parâmetros tende a otimizar o controle do *backbreak*.

Em contraste, a profundidade média, o número de linhas, o afastamento médio e o espaçamento médio entre furos apresentaram baixa correlação com o dano médio. No entanto, é importante salientar que, por não haver dados a respeito da caracterização geomecânica dos maciços desmontados, diferentes litologias para um mesmo tipo de análise podem interferir de forma negativa nas correlações entre parâmetros controláveis de desmonte e o *backbreak*, considerando que seriam condições distintas.

### 6.1.2 Modelo de regressão linear múltipla

Dada a presença de mais de uma variável independente, optou-se por utilizar o modelo de regressão linear múltipla para obter a equação de melhor ajuste. A análise de regressão múltipla foi conduzida considerando o *backbreak* médio como variável dependente e, como variáveis independentes, a carga máxima por espera nos furos de produção (CME), a carga máxima por espera na última linha de furos (CMEu), a quantidade de *decks* nos furos de produção (NDp), a quantidade de *decks* nos furos da última linha (NDu) e a razão de carregamento (Rc). O modelo de regressão múltipla é representado pela Equação 10, sendo essa específica para as condições estudadas:

$$BB_{simulado} = 3,44 + 0,0067CME - 0,3870NDp + 0,0055CMEu - 0,0373NDu + 2,8114Rc \quad (10)$$

A análise de regressão múltipla apresentou um coeficiente de correlação de 0,9 e um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de 0,82. Além disso, obteve-se um  $R^2$  ajustado de 0,79 e um erro padrão de 1,12, conforme representado na Tabela 2.

Tabela 2 - Estatística de regressão – Cenário 01.

Estatística de regressão	
R-Quadrado	0,82072463
R-quadrado ajustado	0,791809247
Erro padrão	1,11383495
Observações	37

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Além disso o modelo preditivo para o cenário 01 apresentou um MAPE = 16,75% e RMSE de 1,0195, estando esses indicadores abaixo do obtido no trabalho desenvolvido por Esmaeli *et al* (2012), com MAPE = 34 % e RMSE = 1,35.

### 6.1.3 Análise de aderência do modelo preditivo

Foram realizadas as simulações de 31 novos desmontes, ou seja, diferentes daquelas 37 detonações utilizadas na elaboração do modelo preditivo, e posteriormente feitas as análises de aderência entre o *backbreak* médio medido e simulado. A Tabela 3 e a Figura 36 apresentam os resultados de *backbreak* médio simulado e medido.

Tabela 3 - Análise de aderência para o *backbreak* – Cenário 1.

(Continua)

Nº do teste	<i>Backbreak</i> médio simulado	<i>Backbreak</i> médio medido	Aderência
1	4,77	5,14	-7%
2	3,75	4,09	-8%
3	6,18	4,71	31%
4	4,82	4,45	8%
5	10,08	9,95	1%
6	7,98	7,37	8%
7	4,71	4,10	15%
8	5,99	5,44	10%
9	10,28	10,30	0%
10	11,39	11,60	-2%
11	4,19	5,05	-17%
12	6,38	5,19	23%
13	9,37	8,50	10%
14	6,73	7,60	-11%
15	10,01	9,60	4%
16	6,32	6,10	4%
17	8,97	8,70	3%
18	6,62	5,30	25%
19	5,89	6,72	-12%

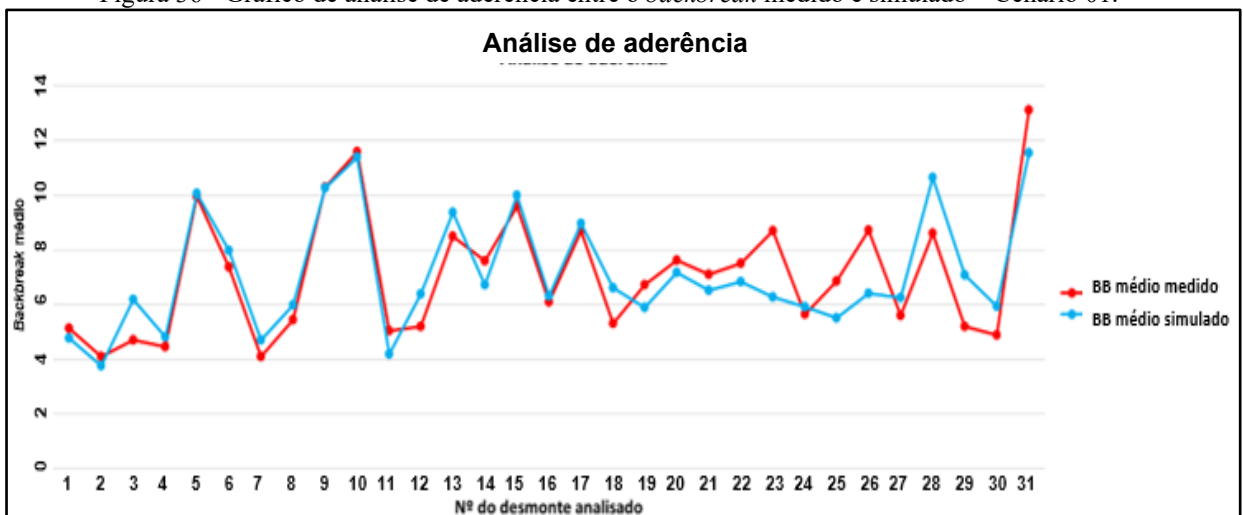


Tabela 3-Análise de aderência para o *backbreak* – Cenário 1 (Conclusão)

Nº do teste	<i>Backbreak</i> médio simulado	<i>Backbreak</i> médio medido	Aderência
20	7,17	7,62	-6%
21	6,52	7,10	-8%
22	6,84	7,51	-9%
23	6,27	8,69	-28%
24	5,92	5,64	5%
25	5,51	6,86	-20%
26	6,42	8,73	-26%
27	6,26	5,60	12%
28	10,65	8,60	24%
29	7,09	5,20	36%
30	5,93	4,89	21%
31	11,54	13,13	-12%

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Como pode ser observado, a aderência apresentou uma variação máxima entre -28% e +36%, tendo respectivamente uma diferença entre o *backbreak* simulado e medido de -2,41 m e +2,05 m, com um desvio médio de 0,86 m. Visto que o modelo não considera parâmetros geomecânicos e outros aspectos ligados a características intrínsecas do maciço rochoso, essas singularidades podem ter influência significativa na geração do *backbreak* para a área analisada.

Figura 36 - Gráfico de análise de aderência entre o *backbreak* medido e simulado – Cenário 01.

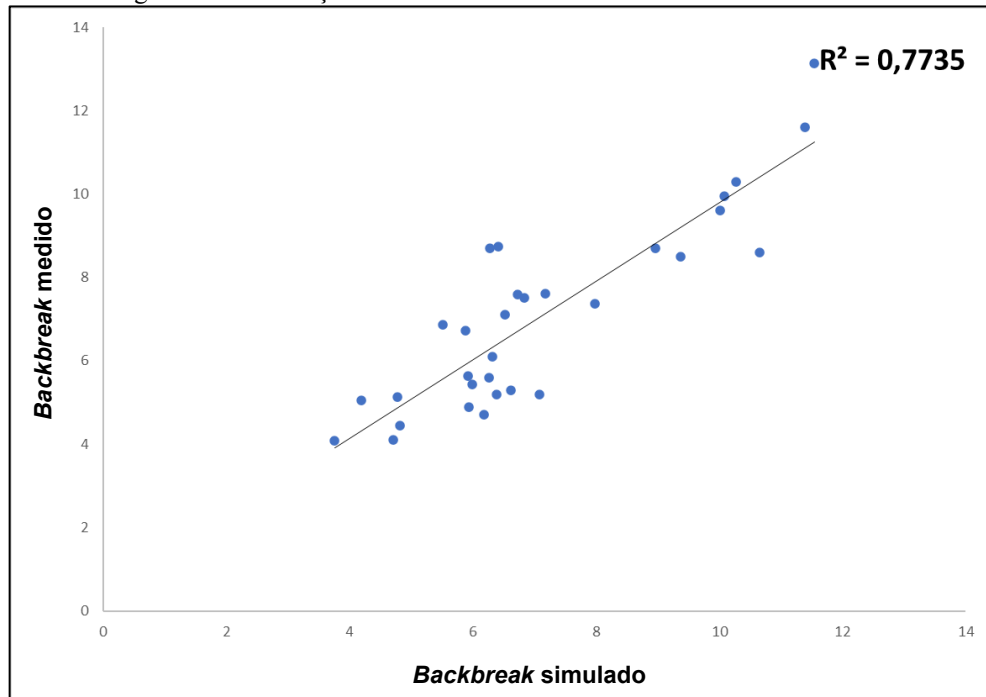
Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Analisando a Figura 36, pode-se observar que a partir do desmonte número 19 inicia-se uma maior variação, o que indica uma possível alteração condicional dos desmontes se comparado com os que alimentaram o banco de dados para elaboração do modelo preditivo. Desmontes realizados em zonas com litologias distintas e até mesmo a utilização de explosivos

com características diferentes também podem provocar esse tipo de alteração.

Conforme apresenta a Figura 37, o modelo preditivo para *backbreak* médio apresentou uma boa correlação entre o simulado e o medido, tendo um  $R^2$  de 0,7735.

Figura 37 - Correlação entre *backbreak* medido e simulado – Cenário 01.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

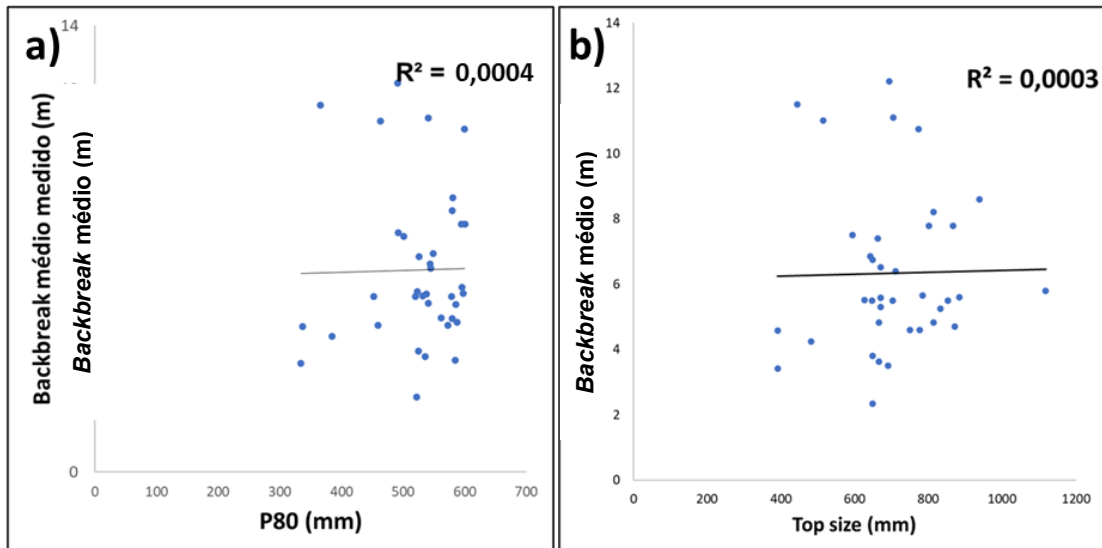
#### 6.1.4 Análise do impacto do *backbreak* na fragmentação

O estudo também avaliou a relação entre o *backbreak* médio e seus possíveis impactos na qualidade da fragmentação gerada pelo desmonte do maciço rochoso, visto a possibilidade da inclusão de fragmentos superdimensionados nos processos subsequentes ao desmonte. Conforme apresentado nas Figuras 38-a e 38-b, para ambos indicadores avaliados a correlação foi baixa, apresentando um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de 0,0004 e 0,003, para P80 e *top size*, respectivamente. A ausência de informações que caracterizem geomecanicamente o maciço rochoso dos desmontes estudados impede uma avaliação mais aprofundada. Com isso, a baixa correlação entre o *backbreak* médio e os resultados de fragmentação pode estar associada à composição de um banco de dados com detonações realizadas em diferentes cenários litológicos, o que consequentemente pode gerar diferentes comportamentos dos

mecanismos de fragmentação.

Figura 38 – Análises de correlação entre *backbreak* e indicadores de fragmentação.

(38-a) correlação entre o P80 e *backbreak* médio; 38-b) Correlação entre top size e *backbreak* médio) – Cenário 01.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

## 6.2 Cenário 02 – Desconsiderando desmontes com CME's máximos

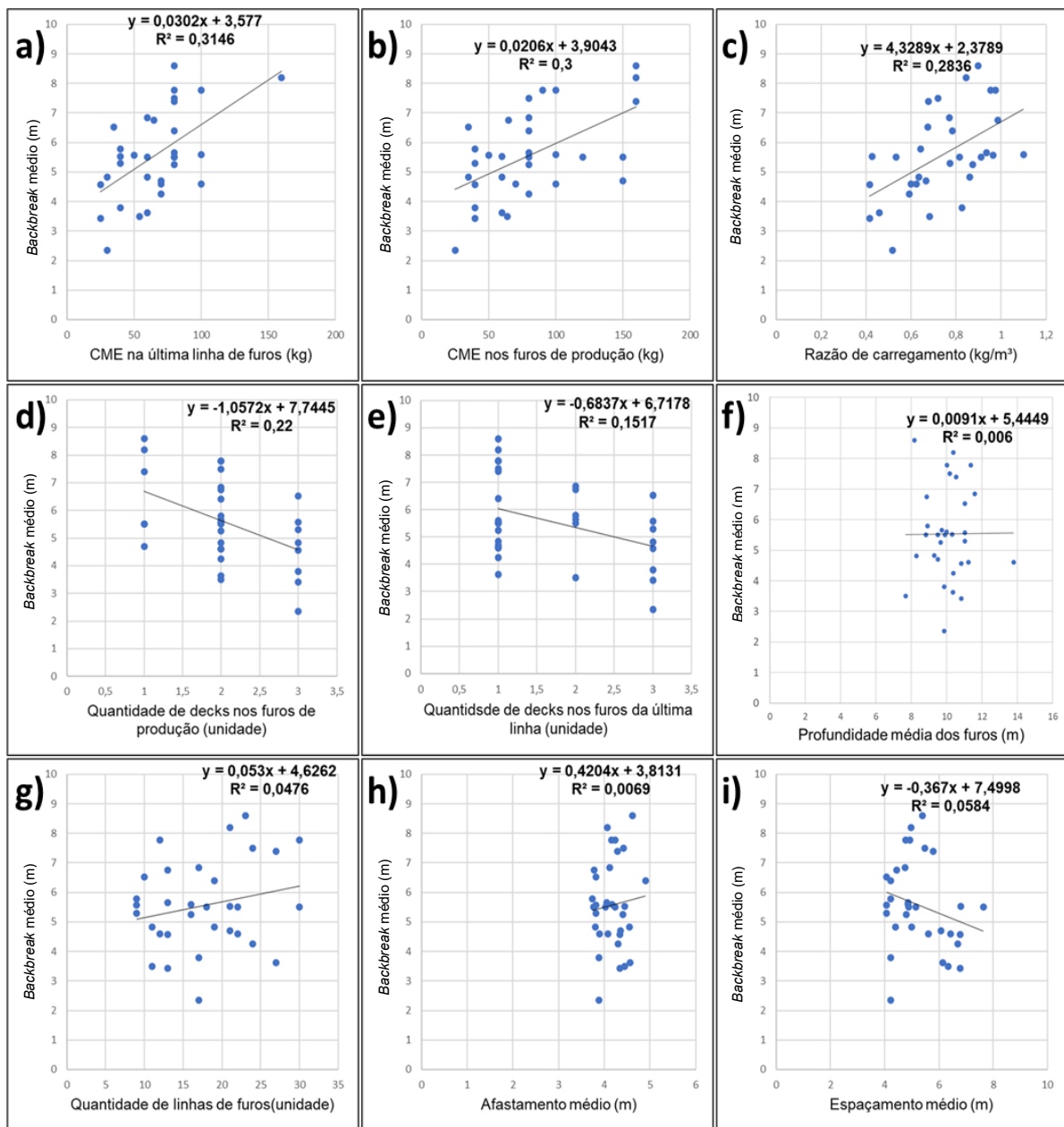
No cenário 02, foram desconsiderados os 5 desmontes com maiores cargas máximas por espera, isso com a finalidade de avaliar se as detonações com as maiores CME influenciam negativamente nas análises de regressão linear simples e múltipla. Com isso, foram utilizadas 32 detonações para avaliar a existência de correlações entre o *backbreak* médio e os diferentes parâmetros de desmonte, desenvolver por meio de regressão linear múltipla um modelo preditivo para a sobrequebra média e avaliar a aderência do modelo de simulação.

### 6.2.1 Análise de regressão linear simples

Como pode ser observado nas análises de correlação entre *backbreak* médio e as diferentes variáveis do desmonte, representadas graficamente nas Figuras de 39-a até 39-i, a exclusão nas análises dos desmontes com maiores CME's provocou, de maneira geral, a redução considerável do  $R^2$  se comparado com o cenário 01. Para as análises de correlação entre

os parâmetros controláveis de desmonte estudados e o *backbreak* médio, os coeficientes de determinação ( $R^2$ ), que é um indicador de força de correlação, apresentaram como resultado o indicado na Tabela 4.

Figura 39 - Análises de correlação do *backbreak* médio x parâmetros controláveis de desmonte. (39-a) CME na última linha de furos; 39-b) CME nos furos de produção; 39-c) Razão de carregamento; 39-d) Quantidade decks nos furos de produção; 39-e) Quantidade decks nos furos da última linha; 39-f) Profundidade média dos furos; 39-g) Quantidade de linhas de furos; 39-h) Afastamento médio; 39-i) Espaçamento médio) – Cenário 02.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Tabela 4 - Resultados de R<sup>2</sup> – Cenário 02.

Parâmetros	R <sup>2</sup>
Carga máxima por espera na última linha de furos	0,3146
Carga máxima por espera nos furos de produção	0,300
Razão de carregamento	0,2836
Quantidade de <i>decks</i> nos furos de produção	0,2200
Quantidade de <i>decks</i> nos furos da última linha	0,1517
Profundidade média dos furos	0,0060
Número de linhas de furos	0,0476
Afastamento	0,0069
Espaçamento	0,0584

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Assim como no cenário 01, os coeficientes de determinação indicaram que as variáveis mais significativas, no que diz respeito a sua influência na geração do *backbreak*, são a carga máxima por espera nos furos de produção, carga máxima por espera na última linha de furos, razão de carregamento, quantidade de *decks* nos furos de produção e quantidade de *decks* nos furos da última linha. Sendo assim, as análises de regressão linear simples indicam que o correto dimensionamento destes parâmetros tende a otimizar o controle de *backbreak*.

Oposto a isso, a profundidade média dos furos, número de linhas de furos, afastamento médio e espaçamento médio entre furos apresentaram baixa correlação com a sobrequebra média. Porém, é importante salientar que por não haver dados a respeito da caracterização geomecânica dos maciços desmontados, diferentes litologias para um mesmo tipo de análise podem interferir de forma negativa nas correlações entre parâmetros controláveis de desmonte e o *backbreak*, tendo em conta que seriam condições distintas.

### 6.2.2 Modelo de regressão linear múltipla

Visto a existência de mais de uma variável independente, utilizou-se o modelo de regressão linear múltipla para obter a equação de melhor ajuste. A análise de regressão múltipla foi realizada considerando o *backbreak* médio como variável dependente e como variáveis independentes a carga máxima por espera nos furos de produção (CME), carga máxima por

espera na última linha de furos (CMEu), quantidade de *decks* nos furos de produção (NDp), quantidade de *decks* nos furos da última linha (NDu) e razão de carregamento (Rc). O modelo de regressão múltipla é representado pela Equação 11, sendo essa específica para as condições estudadas:

$$BB_{simulado} = 2,3409 + 0,01024CME - 0,1684NDp + 0,0066CMEu - 0,0357NDu + 3,2175Rc \quad (11)$$

A análise de regressão linear múltipla para o cenário 02 aponta que todos os indicadores estatísticos foram impactados negativamente se comparados com o cenário 01, como representado na Tabela 5.

Tabela 5 - Estatística de regressão – Cenário 02.

Estatística de regressão	
R-Quadrado	0,472284
R-quadrado ajustado	0,3708
Erro padrão	1,195995
Observações	32

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Além disso o modelo preditivo para o cenário 02 apresentou um MAPE = 18,53% e RMSE de 1,0781. Com isso fica constado que o cenário 01, apresenta menores valores de RMSE e MAPE, indicando um melhor ajuste do modelo com os dados observados.

### 6.2.3 Análise de aderência do modelo preditivo

Foram realizadas as simulações de 31 novos desmontes e posteriormente feitas as análises de aderência entre o backbreak médio medido e simulado. A Tabela 6 e a Figura 40 apresentam os resultados de backbreak médio simulado e medido.

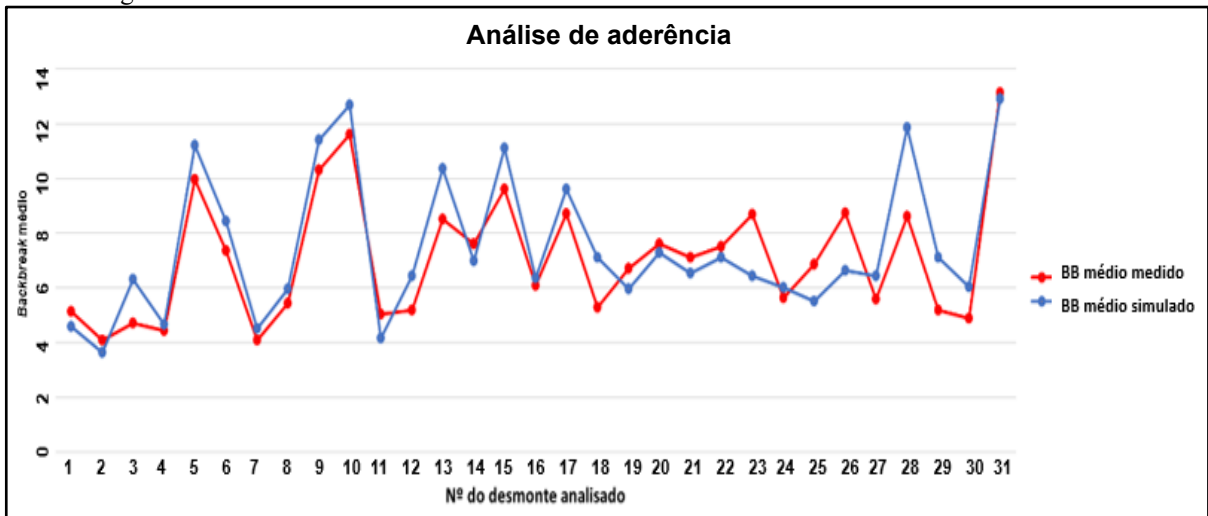
Tabela 6 - Análise de aderência para o *backbreak* – Cenário 02

Nº do teste	<i>Backbreak</i> médio simulado	<i>Backbreak</i> médio medido	Aderência
1	4,58	5,14	-11%
2	3,64	4,09	-11%
3	6,32	4,71	34%
4	4,66	4,45	5%
5	11,20	9,95	13%
6	8,43	7,37	14%
7	4,52	4,10	10%
8	5,97	5,44	10%
9	11,41	10,30	11%
10	12,68	11,60	9%
11	4,16	5,05	-18%
12	6,44	5,19	24%
13	10,36	8,50	22%
14	6,98	7,60	-8%
15	11,11	9,60	16%
16	6,37	6,10	5%
17	9,61	8,70	10%
18	7,10	5,30	34%
19	5,95	6,72	-11%
20	7,28	7,62	-5%
21	6,54	7,10	-8%
22	7,12	7,51	-5%
23	6,44	8,69	-26%
24	6,01	5,64	6%
25	5,52	6,86	-19%
26	6,65	8,73	-24%
27	6,44	5,60	15%
28	11,85	8,60	38%
29	7,12	5,20	37%
30	6,03	4,89	23%
31	12,90	13,13	-2%

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

A aderência apresentou uma variação máxima entre -26% e +38%, tendo respectivamente uma diferença entre o *backbreak* simulado e medido de - 2,25 m e +3,25 m, com um desvio médio de 1,06 m. Visto que o modelo não considera parâmetros geomecânicos e outros aspectos ligados a características intrínsecas do maciço rochoso, essas singularidades podem ter influência significativa na geração do *backbreak* para a região analisada.

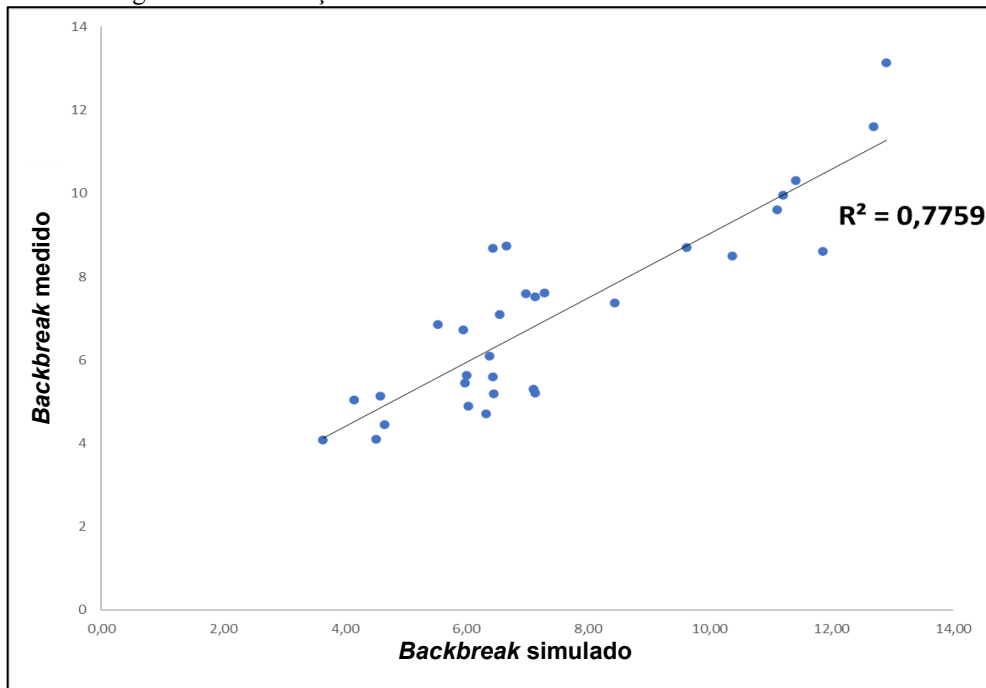
Figura 40 - Gráfico de análise de aderência entre o *backbreak* medido e simulado – Cenário 02.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Conforme apresenta na Figura 41, o modelo preditivo para *backbreak* médio apresentou uma boa correlação entre o simulado e o medido, com um  $R^2$  de 0,7759. Se comparado com o cenário 01, é possível notar que os coeficientes de determinação apresentaram valores muito próximos.

Figura 41 - Correlação entre *backbreak* medido e simulado – Cenário 02.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

Visto que o cenário 01 apresenta melhores coeficientes de correlação ( $R^2$ ),  $R^2$  ajustado, menor erro padrão e maior aderência entre os valores simulados e medidos para o *backbreak*



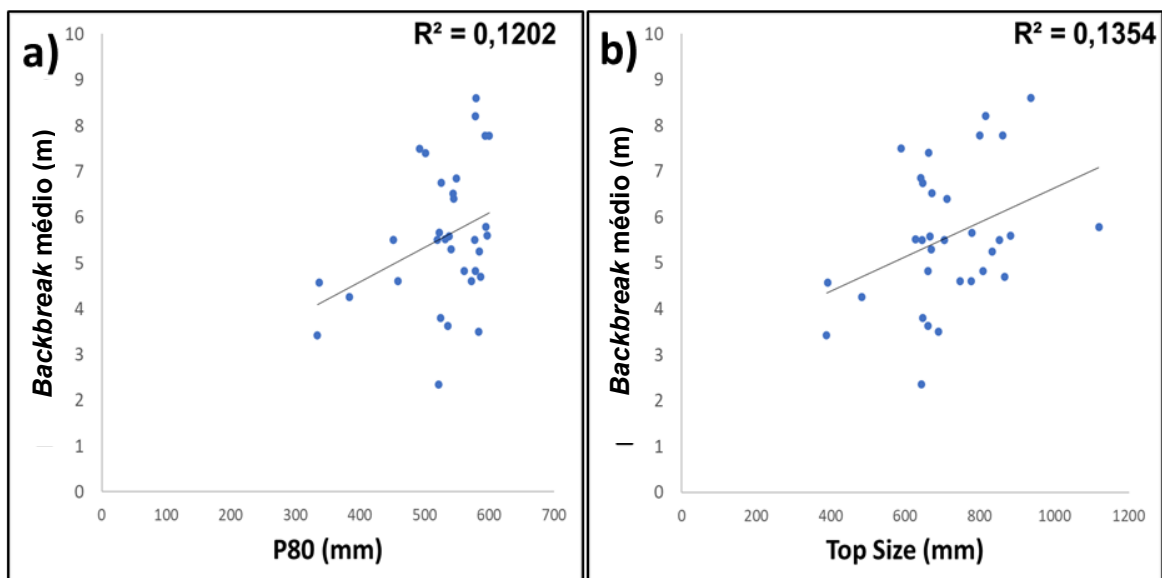
médio, é possível inferir que os dados provenientes dos 05 desmontes realizados com maiores CME's não interfeririam negativamente nas análises de regressão múltipla. Além disso, as maiores cargas tornam o modelo preditivo mais representativo, visto que incluirá informações sobre o comportamento do *backbreak* sob ação de CME mais elevados.

#### 6.2.4 Análise do impacto do *backbreak* na fragmentação

O estudo também avaliou a relação entre o *backbreak* médio e seus possíveis impactos na qualidade da fragmentação gerada pelo desmonte do maciço rochoso, visto a possibilidade da inclusão de fragmentos superdimensionados nos processos subsequentes ao desmonte.

Conforme apresentado nas Figuras 42-a e 42-b, para ambos indicadores avaliados a correlação foi baixa, apresentando um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de 0,1202 e 0,1354, para P80 e *Top size*, respectivamente.

Figura 42 - Análises de correlação entre *backbreak* e indicadores de fragmentação.  
(42-a) correlação entre o P80 e *backbreak* médio; 42-b) Correlação entre top size e *backbreak* médio) – Cenário 02.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

## 7 CONCLUSÕES

As análises de regressão linear simples para o cenário 01 revelaram que as variáveis de desmonte com os maiores  $R^2$  são: carga máxima por espera nos furos de produção, carga máxima por espera na última linha de furos, razão de carregamento, quantidade de *decks* nos furos de produção e quantidade de *decks* nos furos da última linha. Já no cenário 02, foi constatado que as mesmas variáveis apresentaram os melhores resultados de  $R^2$ , porém, se comparado ao cenário 01, ficou evidenciado a redução significativa deste indicador para maioria dos parâmetros independentes avaliados e que a carga máxima por espera na última linha de furos obteve o maior coeficiente de determinação, diferente do primeiro cenário. Portanto, entre os parâmetros controláveis de desmonte analisados, as variáveis anteriormente citadas são as que exercem a maior influência na geração do *backbreak*, necessitando assim de uma maior atenção nos seus dimensionamentos. Além disso, a aplicação de métodos de desmonte coerentes a estes achados, como é o caso desmontes de acabamento, podem contribuir para o controle de dano no maciço rochoso sob as mesmas condições do cenário estudado.

Através do banco de dados de desmontes estudado, foram desenvolvidos os modelos preditivos específicos para o cenário 01 e cenário 02, sendo esses respectivamente representados pelas equações abaixo:

$$BB_{sim.c-01} = 3,44 + 0,0067CME - 0,3870NDp + 0,0055CMEu - 0,0373NDu + 2,8114Rc$$

$$BB_{sim. c-02} = 2,3409 + 0,01024CME - 0,1684NDp + 0,0066CMEu - 0,0357NDu + 3,2175Rc$$

As análises de regressão linear múltipla indicam que o cenário 01 demonstrou um  $R^2$  ajustado superior ao cenário 02, sendo respectivamente 0,79 e 0,37. Em outras palavras, as variáveis independentes analisadas explicam uma maior porcentagem das variações do *backbreak* médio quando consideramos todos os desmontes, indicando o cenário 01 como mais representativo. A avaliação do poder de predição dos dois modelos desenvolvidos, indicou tanto para a análise via MAPE e RMSE, que o cenário 01 apresenta valores menores que o cenário 02, indicando que se ajusta melhor aos dados observados.

Para validar os modelos preditivos obtidos para os dois cenários, foi realizada a

simulação e subsequente análise de aderência em 31 desmontes. O cenário 01 apresentou um desvio médio de 0,86 m, com variações máximas entre -28% e +36%, o que representa -2,41 m e +2,05 m, respectivamente. Já o cenário 02, apresentou uma aderência com variação máxima entre -26% e +38%, tendo respectivamente uma diferença entre o *backbreak* médio simulado e medido de - 2,25 m e +3,25 m, com um desvio médio de 1,06 m. A correlação entre os valores medidos e simulados para o cenário 01 e cenário 02 apresentaram valores muito próximos, sendo respectivamente, 0,7735 e 0,7759,

O cenário 01 apresentou os melhores resultados para os indicadores estatísticos  $R^2$  e  $R^2$  ajustado. Além disso, no primeiro cenário, as análises de MAPE e RMSE, que indicam o poder de predição dos modelos de simulação, apresentaram os menores valores e conseqüentemente os melhores resultados. Com isso, fica indicado que o cenário 01, que considera os desmontes realizados com maiores CME's, é o mais representativo para as condições estudadas.

O estudo também buscou avaliar a relação entre a sobrequebra média e a qualidade da fragmentação, revelando uma baixa correlação entre o *backbreak* e os resultados de P80 e *Top size*. Essa baixa correlação pode ser atribuída aos diferentes cenários litológicos em que os desmontes foram submetidos e a impossibilidade de discretização destas informações nas análises estatísticas.

Por fim, para condições idênticas às estudadas, o controle do *backbreak* pode ser alcançado por meio de ajustes nos parâmetros identificados com maior correlação. Além disso, a aplicação de um modelo preditivo baseado em regressão linear múltipla pode servir como uma ferramenta empírica para o controle do *backbreak*, embora seja importante destacar que a não inclusão de parâmetros intrínsecos ao maciço rochoso pode resultar em desvios nas simulações, visto a influência que tais variáveis não-controláveis tem sob os mecanismos de fragmentação.

## SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Durante o desenvolvimento do trabalho, foram identificadas algumas oportunidades para trabalhos futuros. Uma sugestão para estudo é, por meio de um maior controle de carregamento, avaliar a influência da variabilidade da densidade do explosivo sobre o dano no maciço rochoso gerado pelos desmontes.

Aplicar a metodologia de desenvolvimento de modelo preditivo baseado em análise de regressão linear múltipla para o dimensionamento ótimo de desmontes esculturais, como a utilização de pré-corte, desmonte de amortecimento e perfuração em linha.

Outra sugestão para trabalhos futuros é considerar RMR (*Rock Mass Rating*) na alimentação do banco de dados como forma de desenvolver uma equação preditiva que considere aspectos geomecânicos.

Por fim, desenvolver e avaliar a utilização da regressão linear múltipla para diferentes metodologias de desmontes empregadas para o controle de dano, verificando sua efetividade e correlacionando com as tomadas de decisão gerenciais, especialmente aquelas relacionadas aos custos do processo

## REFERÊNCIAS

ALMEIDA, R. **O método dos mínimos quadrados: estudo e aplicações para o ensino médio**. 2015. 69 f. Dissertação (Mestrado)- Curso de Mestrado em Matemática - Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, 2015.

**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: ABNT, 2018.

AZEVEDO FILHO, A. **Análise de Dados com o Software R: Métodos Estatísticos, Computacionais e Econométricos**. Disponível em: [https://rstudio-pubs-static.s3.amazonaws.com/72772\\_9e20e1d9d3624aa08a498cd62f78cdca.html](https://rstudio-pubs-static.s3.amazonaws.com/72772_9e20e1d9d3624aa08a498cd62f78cdca.html). Acesso em: 20 jul. 2023.

BAKAR, M. *et al.* **Influence of geological discontinuities upon fragmentation by blasting**. Pakistan Journal Of Science, Lahore, v. 65, n. 3, p. 414-419, 3 set. 2013.

BEZERRA, D. **Quadrilátero ferrífero – MG: fatores condicionantes do relevo**. 2014. 148 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

BHAGADE, N.; MURTHY, V. **Controlling backbreak and enhancing fragmentation in dragline bench blasting - a geo-engineering approach**. Arabian Journal Of Geosciences, Dhanbad, v. 13, n. 7, p. 1-20, abr. 2020. Springer Science and Business Media LLC. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s12517-020-5244-9>.

BRAGA, N. **Análise da fragmentação de gnaiss no desmonte com explosivos por métodos analíticos e uso de imagens**. 2018. 84 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2018.

CARDU, M.; GIRAUDI, A.; ORESTE, P. **A review of the benefits of electronic detonators**. Rem: Revista Escola de Minas, Ouro Preto, v. 66, n. 3, p. 375-382, set. 2013. FapUNIFESP (SciELO). DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/s0370-44672013000300016>.

CERVANTES, L. **Resistência de Maciços Rochosos estruturalmente complexos de mineração submetidos a carregamentos dinâmicos**. 2011. 277 f. Tese (Doutorado) - Curso de Geotecnia, Universidade de Brasília, Brasília, 2011. Cap. 2.

CHAKRABORTY, A. *et al.* **Effects of joint orientation and rock mass quality on tunnel blasting**. Engineering Geology, Nagpur, v. 37, p. 247-262, abr. 1994.

CHAPOT, P. **Etude des vibrations provoquées par les explosifs dans les massifs rocheux**. Laboratoire central des ponts et chaussées., Paris, 1981.

CHEIN, F. **Introdução aos modelos de Regressão Linear**. Brasília: Enap, 2019. 76 p.

CHIODE, A. **Avaliação de propostas de coeficientes de determinação do tipo  $R^2$  em modelos de regressão logística com resposta nominal**. 2021. Dissertação (Mestrado em Estatística) - Instituto de Matemática e Estatística, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2021.

DEVORE, J. **Probabilidade e Estatística: para engenharia e ciências**. 6. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2006.

EADES, R.; PERRY, K.. **Understanding the connection between blasting and highwall stability**. International Journal Of Mining Science And Technology, Rolla, v. 29, n. 1, p. 99-103, jan. 2019. Elsevier BV. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmst.2018.11.016>.

ESMAEILI, M. *et al.* **Multiple regression, ANN and ANFIS models for prediction of backbreak in the open pit blasting**. Engineering With Computers, [S.L.], v. 30, n. 4, p. 549-558, 9 nov. 2012. Springer Science and Business Media LLC. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s00366-012-0298-2>.

GUGGARI, V. *et al.* **Numerical analysis for assessing the effects of crown pillar thickness on ore dilution around the sub-level open stopes**. Ain Shams Engineering Journal, Jharkhand, p. 1-11, maio 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.asej.2023.102301>.

HUAMANI, J. *et al.* **Design of a Predictive Model of Rock Breakage by Blasting Using Artificial Neural Networks**. Symmetry, [S.L.], v. 12, n. 9, p. 1405, 24 ago. 2020. MDPI AG. DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/sym12091405>.

HUSTRULID, W. **Blasting principles for open pit mining**. Vol 1. Rotterdam: Balkema, 1999.

IRAMINA, W. *et al.* **Comparing blast-induced ground vibration models using ANN and empirical geomechanical relationships**. Rem - International Engineering Journal, Ouro Preto, v. 71, n. 1, p. 89-95, mar. 2018. FapUNIFESP (SciELO). DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/0370-44672017710097>.

ISEE. **Manual del Especialista en Voladura**. 17ª Edição. Ohio: International Society Of Explosives Engineers, 2008.

JIMENO, E.; JIMENO, C.; CARCEDO, A. **Drilling and blasting of rocks**. CRC Press, 1995. 408 p.

KHANDELWAL, M.; MONJEZI, M.. **Prediction of Backbreak in Open-Pit Blasting Operations Using the Machine Learning Method**. Rock Mechanics And Rock Engineering, Tehran, v. 46, n. 2, p. 389-396, 12 jun. 2012. Springer Science and Business Media LLC. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s00603-012-0269-3>.

KOLAPO, P. *et al.* **An Overview of Slope Failure in Mining Operations**. Mining, [S.L.], v. 2, n. 2, p. 350-384, 2 jun. 2022. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/mining2020019>.

KONYA, C.; WALTER, E. **Rock Blasting and Overbreak Control**. Ohio: National Highway Institute, 1991. 434 p.

KUDELAS, D. *et al.* **Critical Distance of the Seismic Waves' Impact in Disintegration of Rock Blasting**. Shock And Vibration, Slovakia, v. 2019, p. 1-8, 26 mar. 2019. Hindawi Limited. DOI: <http://dx.doi.org/10.1155/2019/5134948>.

KUMAR, R.; CHOUDHURY, D.; BHARGAVA, K.. **Prediction of Blast-Induced Vibration Parameters for Soil Sites**. International Journal of Geomechanics, [S.I.], v. 14, n. 3, p. 04014007-1 – 04014007-10, jun. 2014. American Society of Civil Engineers (ASCE). DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0000355](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000355)

LUSK, B.; WORSEY, P.. **Explosives and blasting**. In: Society for Mining Metallurgy and Exploration. SME Mining Engineering Handbook. 3. ed. Portland: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, 2011. Cap. 7, p. 442.

MAERZ, N.; PALANGIO, T.; FRANKLIN, J. **WipFrag image based granulometry system**. In: **WORKSHOP ON MEASUREMENT OF BLAST FRAGMENTATION**, 5., 1996, Montreal. Proceedings [...]. Montreal: Fragblast, 1996. p. 91-99.

MIOT, H. **Análise de correlação em estudos clínicos e experimentais**. Jornal Vascular Brasileiro, Botucatu, v. 17, n. 4, p. 275-279, 29 nov. 2018. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/1677-5449.174118>.

MOHAMMADNEJAD, M. *et al.* **A new methodology to predict backbreak in blasting operation**. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Tehran, v. 60, p. 75-81, jun. 2013. Elsevier BV. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijrmms.2012.12.019>.

MONJEZI, M.; KHOSHALAN, H.; VARJANI, A. **Prediction of flyrock and backbreak in open pit blasting operation: a neuro-genetic approach**. Arabian Journal of Geosciences, Tehran, v. 5, n. 3, p. 441-448, 11 ago. 2010. Springer Science and Business Media LLC. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s12517-010-0185-3>.

MORAIS, J. **Simulação da fragmentação dos desmontes de rochas por explosivos**. 2004. 224 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.

NANDA, S.; PAL, B. **Analysis of Blast Fragmentation Using WipFrag**. International Journal of Innovative Science And Research Technology. Rourkela, p. 1561-1566. jun. 2020.

OLIVEIRA, E. F. **Análise de séries temporais para previsão de demanda no INSS**. 2022. 22 f. TCC (Graduação) - Curso de Especialista em Ciência de Dados, Escola Nacional de Administração Pública, Brasília, 2022.

REAL, G. E. R. V. **Análise do poder disruptivo de explosivos civis**. 2019. 72 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia Geológica e de Minas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.

RESENDE, Salatiel Assis. **desenvolvimento de explosivos utilizando combustíveis não-convencionais**. 2011. 100 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2011.

ROESER, H.; ROESER, P. **O quadrilátero ferrífero - MG, Brasil: aspectos sobre sua história, seus recursos minerais e problemas ambientais relacionados**. Geonomos, [S.I.], v. 18, n. 1, p. 33-37, 15 fev. 2013. GEONOMOS. <http://dx.doi.org/10.18285/geonomos.v18i1.67>.

SANCHIDRIÁN, J. *et al.* **On the accuracy of fragment size measurement by image analysis in combination with some distribution functions.** *Rock Mechanics And Rock Engineering*, Madrid, v. 42, n. 1, p. 95-116, 31 jul. 2008. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s00603-007-0161-8>.

SAYADI, A. *et al.* **A comparative study on the application of various artificial neural networks to simultaneous prediction of rock fragmentation and backbreak.** *Journal Of Rock Mechanics And Geotechnical Engineering*, Tehran, v. 5, n. 4, p. 318-324, ago. 2013. Elsevier BV. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jrmge.2013.05.007>.

SILVA, V. **Desmonte de Rochas.** 1ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2019.

SINGH, Sp. **The influence of geology on blast damage.** *Cim Bulletin*, Ontario, v. 94, n. 1, p. 121-127, 01 mar. 2001.

SUBRAMANIAN, A.; SILVA, L. B.; COUTINHO, A. S. **Aplicação de método e técnica multivariados para previsão de variáveis termoambientais e perceptivas.** *Production*, João Pessoa, v. 17, n. 1, p. 52-70, abr. 2007. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0103-65132007000100004>.

TAMIR, R. *et al.* **Utilization of aerial drones to optimize blast and stockpile fragmentation.** *The Journal of Explosives Engineering*, USA, Cleveland, OH v. 34, p. 6–15, 2017.

WIDODO, S.; ANWAR, H.; SYAFITRI, A. **Comparative analysis of ANFO and emulsion application on overbreak and underbreak at blasting development activity in underground Deep Mill Level Zone (DMLZ) PT Freeport Indonesia.** *Iop Conference Series: Earth and Environmental Science*, [S.L.], v. 279, n. 1, p. 1-8, 1 ago. 2019. IOP Publishing. DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/279/1/012001>

WILLIAMS, P. *et al.* **DESIGN IMPLEMENTATION.** In: READ, John *et al.* **GUIDELINES FOR OPEN PIT SLOPE DESIGN.** São Paulo: Csiro, 2009. Cap. 11. p. 305-371.

YANG, R. *et al.* **Measurement and analysis of near-field blast vibration and damage.** *Geotechnical And Geological Engineering*, Ontário, v. 12, n. 1, p. 169-182, maio 1994.

YANG, R.; PRATT, L.; ZHAO, G. **A Case Study on Trim Blast Fragmentation Optimization Using the MBF Model and the MSW Blast Vibration Model at an Open Pit Mine in Canada.** *Rock Mechanics And Rock Engineering*, [S.L.], v. 56, n. 5, p. 3641-3658, 7 fev. 2023. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s00603-023-03237-y>.

ZHANG, X. *et al.* **The Application of Deck Charge Technology in Hua Neng open pit Mine.** *E3S Web of Conferences*, Beijing, v. 38, p. 1-4, 2018. EDP Sciences. <http://dx.doi.org/10.1051/e3sconf/20183803031>.



## APÊNDICES

### APÊNDICE I – DADOS BRUTOS ANALISADOS

Tabela 7 - Dados brutos analisados

Desmonte	BB (m)	CME (kg)	NDp	CMEu	NDu	Rc (kg/m <sup>3</sup> )	P80 (mm)	Ts (mm)	E (m)	A (m)	P (m)	NI
1	5,50	150	1	60	1	0,81	578	853	5,14	4,02	8,91	30
2	4,60	100	2	100	1	0,62	459	747	6,43	3,90	12,78	12
3	12,20	370	1	370	1	1,75	491	689	5,15	4,16	9,85	20
4	6,40	80	2	80	1	0,78	545	711	4,23	4,90	9,84	19
5	7,78	100	2	100	1	0,95	600	799	4,77	4,24	10,37	30
6	4,70	150	1	70	1	0,67	587	867	6,08	4,36	8,50	21
7	4,60	70	2	70	1	0,60	572	777	5,60	4,08	10,22	22
8	5,60	100	2	100	1	1,10	597	882	4,85	4,17	9,00	16
9	7,78	90	2	80	1	0,98	594	862	4,92	4,16	9,01	12
10	7,40	160	1	80	1	0,68	501	663	5,78	4,29	9,54	27
11	6,85	80	2	60	2	0,77	549	641	4,76	4,12	10,60	17
12	5,66	80	2	80	2	0,93	523	779	4,85	4,05	8,72	13
13	5,50	80	2	80	2	0,91	452	704	4,88	4,23	8,50	18
14	8,60	160	1	80	1	0,90	580	937	5,38	4,61	7,18	23
15	4,82	35	3	30	3	0,86	579	809	4,40	3,80	7,30	11
16	8,20	160	1	160	1	0,84	579	815	4,98	4,06	9,37	21
17	3,80	40	3	40	3	0,83	525	647	4,22	3,88	8,87	17
18	2,35	25	3	30	3	0,52	522	644	4,22	3,88	8,87	17
19	6,52	35	3	35	3	0,68	544	672	4,07	3,81	10,03	10
20	5,30	40	3	40	3	0,77	541	669	4,07	3,81	10,03	9
21	5,58	50	3	50	3	0,96	538	666	4,07	3,81	10,03	9
22	5,79	40	2	40	2	0,64	595	1119	4,21	3,74	7,91	9
23	6,75	65	2	65	2	0,98	526	647	4,44	3,78	7,87	13
24	7,50	80	2	80	1	0,72	492	589	5,48	4,42	9,18	24
25	10,75	370	1	250	1	1,11	599	774	7,43	4,35	10,34	13
26	5,50	120	1	80	1	0,53	520	645	7,63	3,77	7,83	22
27	4,25	80	2	70	1	0,59	384	483	6,70	4,30	9,38	24
28	11,10	370	1	180	1	1,70	541	702	5,01	4,20	10,37	16
29	4,83	60	2	60	1	0,64	561	660	5,00	4,55	8,30	19
30	4,57	40	3	25	3	0,41	337	392	6,79	4,34	9,82	13
31	3,42	40	3	25	3	0,41	334	389	6,79	4,34	9,82	13
32	11,50	370	1	300	1	1,62	366	439	4,90	4,53	10,29	31
33	5,52	60	2	40	1	0,43	532	628	6,80	4,44	9,30	21
34	3,63	60	2	60	1	0,46	536	661	6,13	4,56	9,35	27
35	5,25	80	2	80	1	0,87	585	833	4,79	4,41	8,66	16
36	3,50	64	2	54	2	0,68	584	688	6,33	4,44	6,68	11
37	11,00	370	1	200	1	1,65	463	509	5,05	4,07	10,92	14

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.

## APÊNDICE II – VALORES EMPREGADOS NAS SIMULAÇÕES

Tabela 8 - Valores empregados nas simulações

Desmonte	CME (kg)	NDp	CMEu	NDu	Re (kg/m <sup>3</sup> )
1	60	2	40	1	0,54
2	35	3	35	3	0,41
3	100	2	100	2	0,84
4	60	2	60	2	0,53
5	370	1	150	1	1,33
6	230	1	100	1	1,02
7	60	2	60	1	0,48
8	160	1	80	1	0,51
9	370	1	80	1	1,54
10	370	1	80	1	1,93
11	40	3	40	3	0,54
12	170	1	80	1	0,63
13	370	1	80	1	1,21
14	110	2	110	1	0,98
15	370	1	100	1	1,40
16	170	1	60	2	0,66
17	250	1	110	1	1,30
18	100	3	100	3	1,14
19	90	2	90	1	0,76
20	140	1	100	1	0,94
21	140	1	140	1	0,63
22	120	2	120	1	0,97
23	104	2	104	1	0,84
24	94	2	94	1	0,76
25	90	2	90	2	0,64
26	120	2	120	1	0,82
27	110	2	110	1	0,81
28	370	1	110	1	1,61
29	120	1	70	1	1,02
30	100	2	100	1	0,74
31	370	1	200	1	1,75

Fonte: Elaborado pelo autor, 2024.