



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



THOMÁS ANDRADE CAMARGOS

**OTIMIZAÇÃO DAS MALHAS DE PERFURAÇÃO POR TIPO DE MATERIAL, EM
UMA MINA DE MINÉRIO DE FERRO DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO**

OURO PRETO - MG

Janeiro de 2023

THOMÁS ANDRADE CAMARGOS

**OTIMIZAÇÃO DAS MALHAS DE PERFURAÇÃO POR TIPO DE MATERIAL, EM
UMA MINA DE MINÉRIO DE FERRO DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Minas. **Área de concentração:** Lavra de Minas/Perfuração e Desmonte de rochas.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Enrique Arroyo Ortiz
(*DEMIN/EM/UFOP*)

OURO PRETO - MG

Janeiro de 2023

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

C172o Camargos, Thomas Andrade.

Otimização das malhas de perfuração por tipo de material, em uma mina de minério de ferro do Quadrilátero Ferrífero. [manuscrito] / Thomas Andrade Camargos. - 2023.
55 f.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Enrique Arroyo Ortiz.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto.
Escola de Minas. Graduação em Engenharia de Minas .

1. Desmonte de rochas. 2. Perfuração (Minas). 3. Geometria - Minas e mineração - Variáveis geométricas. 4. Controle de custo. I. Ortiz, Carlos Enrique Arroyo. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 622.235

Bibliotecário(a) Responsável: Sione Galvão Rodrigues - CRB6 / 2526



FOLHA DE APROVAÇÃO

Thomas Andrade Camargos

Otimização das malhas de perfuração por tipo de material, em uma mina de minério de ferro do Quadrilátero Ferrífero

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Minas

Aprovada em 24 de Janeiro de 2023

Membros da banca

Dr - Carlos Enrique Arroyo Ortiz - Orientador(a) (Universidade Federal de Ouro Preto)
Eng. Ronan Cândido Mendes - Companhia Siderurgica Nacional
MSc Alcides Eloy Nuñez Cano - Universidade Federal de Catalão

Carlos Enrique Arroyo Ortiz, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 02/02/2023



Documento assinado eletronicamente por **Carlos Enrique Arroyo Ortiz, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 02/02/2023, às 21:15, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0468527** e o código CRC **9E3324D5**.

RESUMO

A atividade do desmonte de rochas é realizada por meio de explosivos em uma produção de grande escala, sendo responsável pelo desenvolvimento de um empreendimento minerário. Porém, seus altos custos operacionais muitas das vezes encarecem o processo e conseqüentemente o produto. Dessa forma, o trabalho que será apresentado a seguir trata-se de um estudo de caso realizado em uma mina de minério de ferro do Quadrilátero Ferrífero, onde ao longo do ano de 2022 foi desenvolvido um projeto de melhoria contínua. O foco do trabalho é a definição de novas variáveis do plano de fogo a fim de aproveitar melhor a energia de fragmentação do explosivo. Como objetivos específicos foi realizado a definição das malhas de perfuração para cada litologia presente na mina, de modo que fosse possível realizar uma redução de custos em litologias friáveis, sem renunciar à qualidade de fragmentação, além da adequação granulométrica para as litologias compactas favorecendo as etapas subseqüentes do processo. O trabalho realizado trouxe uma redução de custos no indicador reais por tonelada desmontada, e conseqüentemente a possibilidade de economizar até R\$10M nas atividades de perfuração e desmonte de rochas, segundo o plano de lavra de 2023.

Palavras-chave: Desmonte de rochas, Variáveis geométricas, Melhoria contínua, Redução de custos.

ABSTRACT

Rock blasting mining activity is performed through explosives in a large production scale, it's responsible for the development of a mining enterprise. However, its high operating costs often make the process and consequently the final product more expensive. In this way, the study that will be presented below is a case study carried out in an iron ore mine in the Quadrilátero Ferrífero, which, throughout the year 2022, a continuous improvement project was developed. This study is focused to find out the best solution to reach an optimal fragmentation. By getting new blast layout variables in order to make better use of the fragmentation energy of the explosive. As specific objectives, the definition of the drilling pattern for each lithology present in the mine was carried out, so that it was possible to reduce costs in friable lithologies, without compromising the quality of fragmentation, in addition to the granulometric adequacy for compact lithologies, favoring the subsequent steps of the process. In the other hand, it was demonstrated a general reduction costs. Such statement can be verified by the indicator per ton blasted. So, consequently the possibility of saving up to R\$10M in drilling and rock blasting activities, according to the 2023 mining plan.

Keywords: Rock Blasting, Blast layout variables, Continuous improvement, Saving up.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Dureza dos minerais segundo Escala de Mohs	15
Figura 2 – Ensaio de resistência a compressão uniaxial.....	16
Figura 3 – Brocas tricônicas Sandvik	17
Figura 4 – Ábaco para seleção do método de perfuração.....	18
Figura 5 – Malhas de perfuração a céu aberto.....	19
Figura 6 – Raio de atuação dos explosivos nas malhas triângulo equilátero	21
Figura 7 – Unidade móvel de bombeamento.....	23
Figura 8 - Sistema de iniciação eletrônica Daveytronic Swift	25
Figura 9 – Variáveis geométricas do plano de fogo para minas a céu aberto	26
Figura 10 – Influência do diâmetro do furo nas variáveis do desmonte de rochas	27
Figura 11 - Fases de ruptura da rocha devido ação do explosivo.....	30
Figura 12 - Ciclo do PDCA para o trabalho proposto	33
Figura 13 - Cenário proposto para realização de testes	34
Figura 14 - Localização da cidade de Congonhas, MG.....	35
Figura 15 – Operação da mina local com equipamentos fora de estrada	36
Figura 16 - Malhas de perfuração praticadas entre Janeiro e Abril de 2022.....	38
Figura 17 – Divisão dos materiais por litologia	39
Figura 18 – Metodologia de realização dos testes	42
Figura 19 - Visão superficial do material compacto desmontado.	43
Figura 20 - Trator auxiliando o carregamento do material desmontado em 2021.	45
Figura 21 - Pilha de material desmontado após alterações técnicas de 2022.....	45
Figura 22 - Análise granulométrica realizado pelo software WipFrag.	46
Figura 23 - Frente de lavra após termino do carregamento do material desmontado.	46
Figura 24 - Nova tabela de malhas de perfuração praticadas pela empresa.....	47
Figura 25 – Comparativo via I-Blast entre croquis do plano de fogo para uma mesma área desmontada.....	48
Figura 26 – Análise quantitativa dos cenários A e B para o segundo teste realizado no Estéril Franco	49
Figura 27 – Projeção para economia de custos segundo Plano de Lavra 2023	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Malhas de perfuração calculadas	41
Tabela 2: Cronograma de testes a serem realizados	42
Tabela 3: Variáveis praticadas para Hematita Compacta e carregamento por Pá Mecânica ...	44
Tabela 4: Comparativo financeiro dos cenários	49
Tabela 5: Comparativo financeiro R\$ por tonelada desmontada	50

LISTA DE SIGLAS

HCP – Hematita Compacta

IBS – Itabirito Brando Silicoso

ICS – Itabirito Compacto Silicoso

RBIB – Rocha Básica Intrusiva Branda

ROM – *Run of Mine*

UMB – Unidade moveis de bombeamento

UPM – Unidade de peneiramento móvel

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	12
2. OBJETIVOS.....	13
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	14
3.1. APLICAÇÕES DA PERFURAÇÃO DE ROCHAS	14
3.2. PARÂMETROS IMPORTANTES DO MACIÇO ROCHOSO NO DESMONTE DE ROCHAS.....	14
3.2.1. Dureza.....	15
3.2.2. Densidade	15
3.2.3. Fraturas e descontinuidades.....	15
3.2.4. Resistência a compressão uniaxial	16
3.3. MÉTODOS DE PERFURAÇÃO	17
3.3.1. Perfuração rotativa.....	17
3.3.2. Perfuração rotopercussiva.....	17
3.4. PERFURATRIZES AUTÔNOMAS	18
3.5. MALHAS DE PERFURAÇÃO A CÉU ABERTO	19
3.5.1. Malhas quadradas	19
3.5.2. Malhas retangulares	20
3.5.3. Malhas estagiadas	20
3.5.4. Malhas triângulo equilátero	20
3.6. EXPLOSIVOS	21
3.6.1. ANFO	22
3.6.2. Emulsão bombeada.....	22
3.6.3. Explosivo blendado	23
3.7. ACESSÓRIOS	24

3.7.1.	Reforçadores (<i>booster</i>)	24
3.7.2.	Espoletas não elétricas.....	24
3.7.3.	Espoletas eletrônicas.....	24
3.8.	PLANO DE FOGO	25
3.8.1.	Diâmetro do furo	26
3.8.2.	Definição das malhas de perfuração	27
3.8.3.	Afastamento (A)	27
3.8.4.	Espaçamento (E).....	28
3.8.5.	Subfuração (S).....	28
3.8.6.	Profundidade do furo (<i>Hf</i>)	29
3.8.7.	Tampão (T).....	29
3.8.8.	Retilidade.....	29
3.9.	FRAGMENTAÇÃO DA ROCHA	30
3.10.	TEMPORIZAÇÃO DO DESMONTE.....	31
3.11.	SEQUENCIAMENTO DO DESMONTE	31
3.12.	RAZÃO DE CARGA (G/T).....	31
4.	METODOLOGIA.....	33
5.	ESTUDO DE CASO	35
5.1.	APRESENTAÇÃO DO PROCESSO INDUSTRIAL PRATICADO NA MINA EM QUESTÃO	35
5.2.	CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA.....	37
5.3.	LEVANTAMENTO HISTÓRICO DE DADOS	38
5.4.	DESENVOLVIMENTO DO PROJETO	39
5.5.	DEFINIÇÃO DOS TESTES A SEREM REALIZADOS	41
6.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	43
6.1.	ACOMPANHAMENTO DO PROCESSO DE MELHORIA	43
6.2.	DESMONTE TESTE 24J 1450	44

6.3. PROJETO DE PADRONIZAÇÃO E DEFINIÇÃO DAS MALHAS.....	47
6.4. ANÁLISE FINANCEIRA	48
7. CONCLUSÃO.....	51
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	52

1. INTRODUÇÃO

Em um empreendimento minerário, todas as etapas do processo devem ser elaboradas e realizadas de forma mais técnica possível. Após a fase de pesquisa e prospecção, a criação e análise do modelo de blocos é fundamental para iniciar as atividades de exploração da jazida, quando essa for economicamente viável.

A extração dos materiais minério e estéril são realizadas através das operações unitárias de perfuração, desmonte, escavação, carregamento e transporte. No entanto, nessa primeira etapa é importante ressaltar que, muitas das vezes o equipamento de carga não possui escavabilidade suficiente para desagregar a rocha *in situ*, tornando necessário a utilização de outros métodos de fragmentação (CURI, 2017).

A partir daí, destacam-se a perfuração e desmonte de rochas por explosivos, que é o processo cuja finalidade é a fragmentação do maciço rochoso, a fim de garantir condições adequadas de carregamento para as máquinas responsáveis, através de características granulométricas determinadas que favorecerão as próximas etapas de carregamento, transporte, britagem e moagem. É considerada uma etapa de grande importância na mineração, por viabilizar a exploração de uma jazida (SILVA, 2019).

Devido a criticidade do processo e altos custos operacionais, que chegam a representar cerca de 20% no valor unitário de produção, a realização de projetos de otimização é de suma importância por possuírem impacto financeiro significativos para as empresas (FREITAS e MORAIS, 2020).

No entanto, um bom dimensionamento deve envolver uma análise minuciosa para encontrar as variáveis geométricas que definem o plano de fogo, de maneira que seja utilizada melhor a energia do explosivo para uma fragmentação adequada, a menores custos e máxima segurança operacional (SILVA, 2019).

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

Definição das malhas de perfuração para minério friável, minério compacto e estéril franco que visam otimizar a fragmentação do maciço rochoso no desmonte de rochas com explosivos, em uma mina de minério de ferro do Quadrilátero Ferrífero.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- 1) Padronização das malhas de perfuração por litologias;
- 2) Definição das malhas de perfuração em litologias compactas, em busca de atingir os padrões granulométricos;
- 3) Definição das malhas de perfuração em litologias friáveis, em busca de menor consumo de explosivos e metragem perfurada, porém mantendo a qualidade.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No presente capítulo será apresentada a revisão bibliográfica dos aspectos relevantes relacionados à perfuração e desmonte de rochas, que possuem a finalidade de fragmentar o maciço rochoso e possibilitar as operações unitárias subsequentes em um empreendimento mineiro.

3.1.APLICAÇÕES DA PERFURAÇÃO DE ROCHAS

A perfuração de rochas possui várias aplicações para a engenharia, desde realização de poços para captação de água ou rebaixando de nível, sondagens, bases para construção civil, abertura de estradas, extração de petróleo e gás natural. Mas, acredita-se que seu maior uso é na mineração devido as largas escalas de produção (SILVA, 2019).

Em um empreendimento mineiro, a perfuração geralmente ocorre quando as máquinas de carregamento não possuem escavabilidade suficiente para desagregar a rocha *in situ*, sendo assim torna-se necessário realizar sua fragmentação através do uso de explosivos. Pode também ser utilizada quando deseja-se aumentar a produtividade da máquina de carga, garantindo maior eficiência durante o carregamento e conseqüentemente menor tempo de ciclo.

3.2.PARÂMETROS IMPORTANTES DO MACIÇO ROCHOSO NO DESMONTE DE ROCHAS

O maciço rochoso é considerado um meio descontínuo formado pela rocha matriz e suas descontinuidades. Esse aglomerado de rocha possui propriedades intrínsecas, sendo elas físicas, químicas ou mecânicas, como por exemplo: densidade, porosidade, coesão, dureza, resistência mecânica, módulo de elasticidade, etc. (SILVA, 2019).

Em função das propriedades de estruturas rochosas é definido o arranjo e o tipo de lavra a ser realizado. Além disso, também possuem grande influência no desmonte de rochas por explosivos (SILVA, 2019). Através dessas informações é possível modelar as litologias presentes em um empreendimento mineiro no que se diz respeito a propagação de ondas e fragmentação das rochas, a fim de garantir um melhor dimensionamento das malhas de perfuração e escolha de explosivos.

3.2.1. Dureza

A dureza de um mineral representa sua resistência ao risco, e se expressa por uma escala crescente dos minerais, conhecida como Escala de Mohs (POMEROL, LAGABRIELLE, et al., 2013). Segundo Friedrich Mohs (1812), os minerais referência em relação a dureza de 1 a 10 são: talco, gipsita, calcita, fluorita, apatita, ortoclásio, quartzo, topázio, coríndon e diamante.

Figura 1 – Dureza dos minerais segundo Escala de Mohs



Fonte: adaptado de (Vaz e Carneiro, 2015).

A dureza da rocha é expressa pela resistência ao risco de todos os materiais constitutivos, e tal característica influencia diretamente na escolha das ferramentas de perfuração, hastes e bits (SILVA, 2019).

3.2.2. Densidade

A densidade da rocha representa a relação entre a quantidade de massa expressa por uma unidade de volume, para casos de mineração geralmente expressa em t/m^3 (CURI, 2014).

Esse valor encontrado possui relação direta com a massa específica dos seus elementos formadores, grau de alteração, porosidade e estado de compactação/confinamento. Além disso Silva (2019) afirma que, rochas com baixa densidade necessitam de menos energia para sua fragmentação, ao ponto que em rochas densas o oposto é válido.

3.2.3. Faturas e descontinuidades

Entende-se como descontinuidades qualquer interrupção geológica na continuidade física da rocha, essas alterações podem ser preenchidas ou não, e ocorrem em várias escalas de tamanho (FRIORI, 2015).

Geralmente, são consideradas pontos de atenção pelas equipes de geotecnia, visto que os preenchimentos por outros materiais diferentes da rocha sã normalmente possuem menor resistência ao cisalhamento, tornando então um plano preferencial para possíveis rupturas (FRIORI, 2015).

Segundo Silva (2019), as fraturas e discontinuidades possuem relação direta com produtividade das perfuratrizes e fragmentação do material desmontado, uma vez que pode ocorrer menor eficiência da limpeza dos furos, aprisionamento das ferramentas de perfuração, além da perda de gases explosivos através das fendas, diminuindo a ação energética no local.

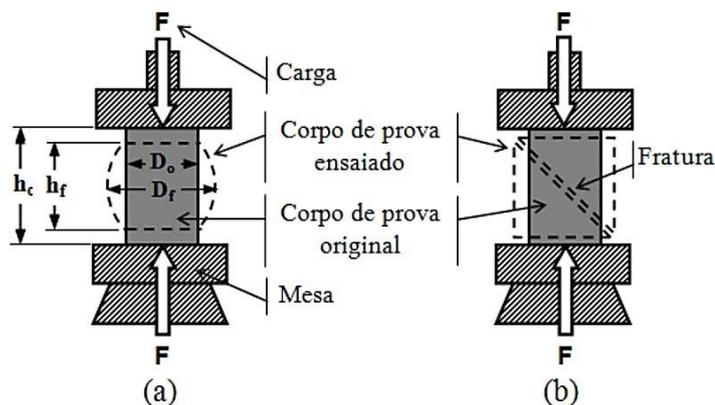
3.2.4. Resistência a compressão uniaxial

Representa o limite de resistência de certo material a um esforço aplicado em uma única direção. Quando esse valor é atingido ocorre a ruptura da rocha devido compressão (CURI, 2014).

Estudos comprovam que a resistência a tração tende a ser 10 a 15 vezes menor que a resistência a compressão. Dessa forma, representam respectivamente o limite inferior e superior de fragmentação da rocha. (HINO, 1959).

Para determinação dessa propriedade é realizado ensaios laboratoriais com amostras de rochas indeformadas, idealizando a compressão in situ (SILVA, 2019).

Figura 2 – Ensaio de resistência a compressão uniaxial



Fonte: adaptado de Biopdi.

3.3.MÉTODOS DE PERFURAÇÃO

3.3.1. Perfuração rotativa

A perfuração rotativa muitas das vezes é reconhecida pelas brocas tricônicas que garantem alta produtividade. Esse método é empregado em rochas friáveis e solos que possuem baixa abrasividade, podendo então serem perfuradas apenas com a velocidade de rotação e pressão exercida no fundo do furo (pull-down) (CURI, 2017).

Figura 3 – Brocas tricônicas Sandvik



Fonte: Sandvik

Essas ferramentas de perfuração ganharam espaço no mercado devido sua maior taxa de penetração, menor custo por metro perfurado e maior vida útil quando comparada com outros tipos de brocas (SANDVIK).

3.3.2. Perfuração rotopercussiva

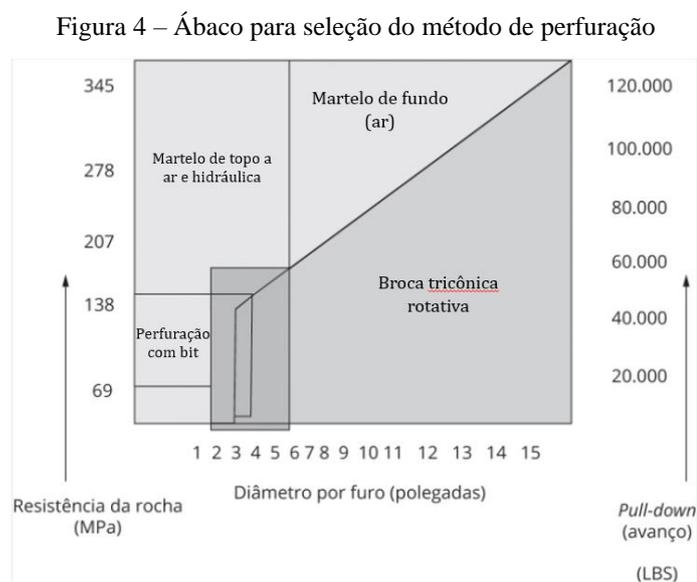
Esse método de perfuração geralmente é conhecido como perfuração com martelo, é muito utilizado onde se tem uma rocha com maior dureza e abrasividade (CURI, 2017). Nesse caso, utilizam-se ferramentas conhecidas como bits, que são selecionados com base nos índices de perfurabilidade. Para isso, é utilizado a combinação de dois métodos clássicos de perfuração, rotação e percussão, a fim de garantir maior performance das máquinas (SILVA, 2019).

As perfuratrizes que utilizam essa metodologia de trabalho podem ser down the hole (DTH) ou top hammer, a principal diferença é referente a posição do martelo em relação ao furo. Perfuratrizes com martelo de fundo de furo tendem a ter maior taxa de penetração e conforto quando comparadas com as de superfície, visto que não ocorre perda de energia ao

longo das hastes, e o ruído operacional é reduzido consideravelmente por estar abafado no subsolo (SILVA, 2019).

Por outro lado, necessitam de altos investimentos, e quando se ocorre aprisionamento das ferramentas de perfuração das máquinas DTH, o prejuízo financeiro tende a ser maior devido o martelo também ser aprisionado (SILVA, 2019).

Segundo Silva (2019), existem ábacos para auxiliar na determinação de qual método de perfuração utilizar, levando em consideração a resistência a compressão da rocha, diâmetro do furo e pressão de avanço.



Fonte: adaptado de Silva (2019)

3.4.PERFURATRIZES AUTÔNOMAS

Atualmente, muitas empresas estão investindo na automação de seus processos, em busca de ganhos em segurança, produtividade e redução de custos. Dessa forma, a etapa de perfuração também sofre mudanças com o avanço das tecnologias. Nessa operação, a máquina realiza todo o trabalho sem qualquer tipo de intervenção humana no processo, geralmente são posicionadas com base em GPS de alta precisão e executam a perfuração sem interferências (EL-MOWAFY, 2009).

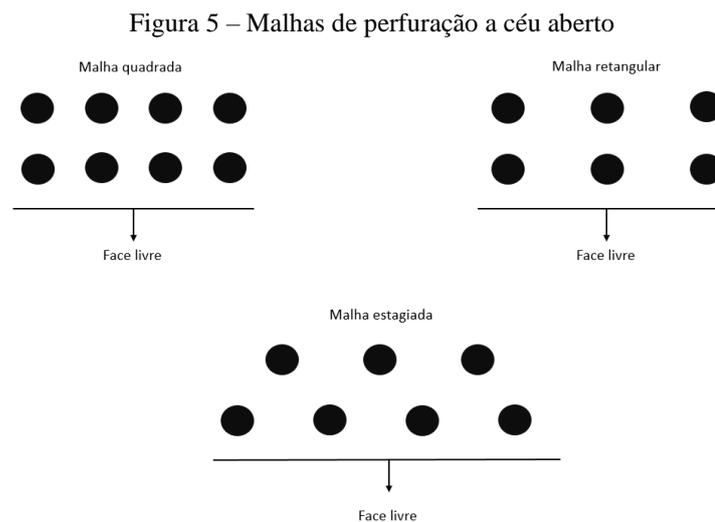
Outro ponto importante é que, a diferença entre o plano de fogo planejado e o realizado tende a ser mínima, isso porque dificilmente ocorrerão variação de metragens, posicionamento dos furos, inclinações, etc. Tudo o que é planejado tende a ser atendido pelas máquinas,

garantindo então uma maior aderência e conseqüentemente maior eficiência no desmonte de rochas (DE FATO ONLINE, 2014).

Os ganhos estimados na transição de operação embarcada para operação autônoma chegam a representar 10% em produtividade e até 8% em horas paradas (DE FATO ONLINE, 2014). Além disso, é garantido o funcionamento adequado da máquina conforme programado e requerido pelo fabricante.

3.5.MALHAS DE PERFURAÇÃO A CÉU ABERTO

As malhas de perfuração geralmente levam seu nome de acordo com a geometria de distribuição dos furos na praça, podendo ser: quadradas, retangulares, estagiadas, triângulo equilátero, etc.



Fonte: O autor.

3.5.1. Malhas quadradas

Nessa configuração de malha, os furos possuem a mesma distância entre o espaçamento e afastamento, ou seja:

$$A = E \quad (1)$$

As malhas quadradas possuem vantagem em relação a velocidade de perfuração, visto que diminui o tempo gasto entre o embocamento de um furo a outro. Porém, em termos de

fragmentação é necessária uma maior atenção, já que o centro do quadrado da malha é o local com menos influência de explosivo, tornando então um potencial para geração de matacões e repés (JIMENO, LLERA, et al., 1987).

3.5.2. Malhas retangulares

Assim como nas malhas quadradas, possui ponto positivo em relação ao menor tempo de deslocamento furo a furo, porém menor abrangência de explosivo no centro do retângulo (SILVA, 2019).

A principal diferença em relação à anterior é que, nesse caso o espaçamento entre furos tende a ser maior que o afastamento, ou seja:

$$E > A \quad (2)$$

3.5.3. Malhas estagiadas

Muito conhecida como malhas “pé de galinha” devido ao layout de configuração dos furos na praça de perfuração. Nesse caso o centro da malha tende a ser o local com grande influência de explosivo dos furos circundantes. Porém, o tempo de perfuração geralmente é maior devido ao deslocamento entre furos. Essas malhas podem ser alongadas, ou em forma de triângulos equiláteros (SILVA, 2019).

3.5.4. Malhas triângulo equilátero

Trata-se de uma variação em relação as malhas estagiadas, isso porque, a única diferença entre elas é que todos os lados do triângulo possuem as mesmas distâncias. Para se chegar nessa configuração, deve-se obedecer a seguinte razão:

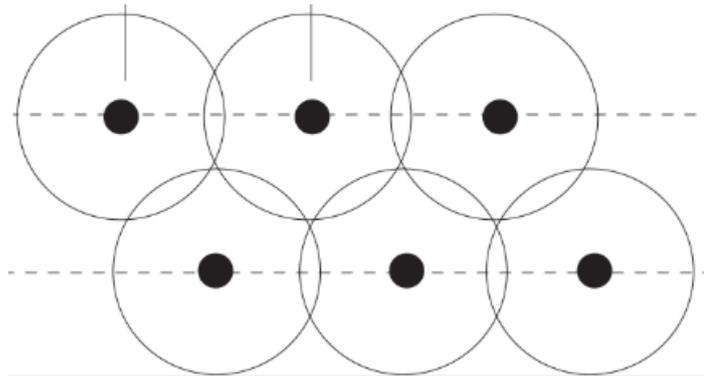
$$\frac{E}{A} = 1,15 \quad (3)$$

Sua principal vantagem é a possibilidade de diferentes amarrações e temporizações do desmonte, o que não é possível nas outras malhas. Além de, garantir no centro do triângulo equilátero o local com maior influência de explosivos de toda a malha, diminuindo ao máximo

as possibilidades de retrabalho no local. Porém, assim como as malhas estagiadas comuns, possuem menor produtividade devido ao tempo de deslocamento entre furos (SILVA, 2019).

Segundo Jimeno (1987), é uma malha indicada para rochas com alta resistência a compressão, abrasividade e dureza, por garantir o melhor aproveitamento dos gases do explosivo.

Figura 6 – Raio de atuação dos explosivos nas malhas triângulo equilátero



Fonte: adaptado de Silva (2019)

3.6.EXPLOSIVOS

Valdir Costa e Silva define em seu livro que:

Explosivos são substâncias ou misturas em qualquer estado físico que, quando submetidas a uma causa térmica ou mecânica suficientemente energética (calor, atrito, impacto, etc.), se transformam, total ou parcialmente, em gases, tendo como consequência um aumento repentino de pressão em um intervalo de tempo muito curto (SILVA, 2019, p. 86).

A utilização dessas substâncias químicas é bastante representativa na atualidade. Geralmente são empregados em grande escala nas minerações, construções civis, aberturas de estradas, tuneis, setor petrolífero, airbags da indústria automobilística, etc. (SILVA, 2019).

No entanto, com o avanço das minerações, a tendência de se trabalhar com materiais compactos e próximos a áreas urbanas é cada vez mais realista. Devido a isso, os explosivos vêm passando por mudanças em suas propriedades, a fim de garantir melhorias de fragmentação, controle na emissão de ondas sísmicas e sonoras, melhor segurança, resistência a água, condições de transporte e estocagem, etc.

3.6.1. ANFO

O ANFO (*ammonium nitrate e fuel oil*) faz parte de um seleto grupo de explosivos granulares, é produzido através da mistura entre Nitrato de Amônia e Óleo Diesel (NIEBLE, 2017).

Segundo Silva (2019), sua principal característica é a baixa densidade ($0,85 \text{ g/cm}^3$) quando comparada com as emulsões. Por isso, garante uma menor razão linear de carregamento e conseqüentemente um menor consumo de explosivos de maneira geral. Em suas condições adequadas de uso traz bons resultados, devido possuir alta energia em forma de gases e preencher todo o espaço vazio dos furos, garantindo que não ocorra perda de energia entre o explosivo e as paredes do furo.

Porém, como aspecto negativo, não deve ser utilizado em furos úmidos ou com presença de água, já que é considerado um material higroscópico, que quando em contato com água perde suas propriedades explosivas (NIEBLE, 2017).

3.6.2. Emulsão bombeada

Dentre as tecnologias de mercado para desmonte de rochas com explosivos, a emulsão bombeada é considerada uma revolução. Isso porque inúmeros benefícios são acrescentados na sua aplicação. A utilização de substâncias explosivas de maneira mais seguras, menos sensíveis, com maior produtividade de carregamento, e principalmente a possibilidade de utilização em furos com água, ganharam espaço nos últimos anos (FREITAS e MORAIS, 2020).

As emulsões podem ser aplicadas através das UMB's (unidades móveis de bombeamento), ou de maneira encartuchadas. A principal vantagem da emulsão bombeada quando comparada as emulsões encartuchadas se diz respeito a possibilidade de alteração das proporções de nitrito na mistura, podendo então alterar a densidade do explosivo de acordo com o tipo de material a ser detonado (SILVA, 2019).

Figura 7 – Unidade móvel de bombeamento



Fonte: Enaex

Importante ressaltar que, para seu transporte terrestre por rodovias não é necessária escolta armada, já que a emulsão é considerada um produto inerte, e somente se torna explosivo quando é adicionado um agente emulsificante. Diferentemente das emulsões encartuchadas que são vendidas prontas para uso, e dessa forma se faz necessário uma tratativa especial (ALVES, COSTA, et al., 2019).

3.6.3. Explosivo blendado

Diante das necessidades da mineração, e das características de cada explosivo, cada vez mais se faz necessário a utilização da blendagem entre ANFO e emulsão bombeada.

As propriedades do explosivo granulado, em garantir maior aproveitamento dos gases e lançamento do material desmontado, quando combinadas com as propriedades da emulsão em resistência a água e alta energia de fragmentação garantem uma alta eficiência ao desmonte de rochas (ENAEX).

Segundo Silva (2019), sua aplicação também é realizada através de UMB, e pode-se alterar a proporção entre as misturas. Geralmente são utilizadas as proporções de 70% de emulsão para 30% de ANFO.

3.7.ACESSÓRIOS

Os acessórios, também considerados como explosivos primários, possuem a função de iniciar as cargas explosivas, e também a possibilidade de temporização dos furos para garantir uma melhor distribuição de energia, melhor lançamento e fragmentação, além de menores ondas sísmicas e sonoras (ALVES, COSTA, et al., 2019).

3.7.1. Reforçadores (*booster*)

Segundo Silva (2019), os *boosters* possuem uma carga pirotécnica constituída de nitropenta, que é responsável por garantir a iniciação dos explosivos contidos no furo.

Sua utilização garante a transmissão de energia ao longo da carga de coluna, concedendo então uma maior velocidade de detonação do explosivo. Importante ressaltar que seu diâmetro deve ser o mais próximo possível do diâmetro do furo para maximizar as propriedades energéticas das cargas explosivas (MENDES, 2018).

3.7.2. Espoletas não elétricas

Com o avanço da tecnologia após a invenção do cordel detonante, outro acessório de iniciação são as espoletas não elétricas. Segundo Mendes (2018), trata-se de um iniciador que possui em seu interior azida de chumbo, nitropenta e elemento de retardo.

Quando comparado ao cordel, pode-se afirmar que as espoletas não elétricas são mais silenciosas, seguras e emitem menos ondas sísmicas e sonoras ao ambiente. Porém, na utilização explosivos encartuchados é mais tendencioso a ocorrer falhas de iniciação, já que possui uma iniciação pontual e seu cabo não é explosivo lateralmente como no caso do cordel. Dessa forma, se houver um gap entre um encartuchado e outro a possibilidade de não detonar todo o furo é maior (SILVA, 2019).

3.7.3. Espoletas eletrônicas

As espoletas eletrônicas fazem parte das últimas revoluções da engenharia de explosivos. Vêm sendo utilizadas nas grandes mineradoras devido sua maior segurança e praticidade, mesmo mediante a custos mais elevados de aquisição.

Em seu interior, o que as diferencia das espoletas não elétricas é a presença de um chip onde é armazenado as informações de temporização individual das espoletas (SILVA, 2019). Possui mínima dispersão em relação ao tempo programado, permitindo então um melhor sequenciamento e temporização do plano de fogo, afim de reduzir efeitos de vibrações, ruídos e maximizar a fragmentação (CARDU, GIRAUDI e ORESTE, 2013).

Figura 8 - Sistema de iniciação eletrônica Daveytronic Swift



Fonte: Enaex

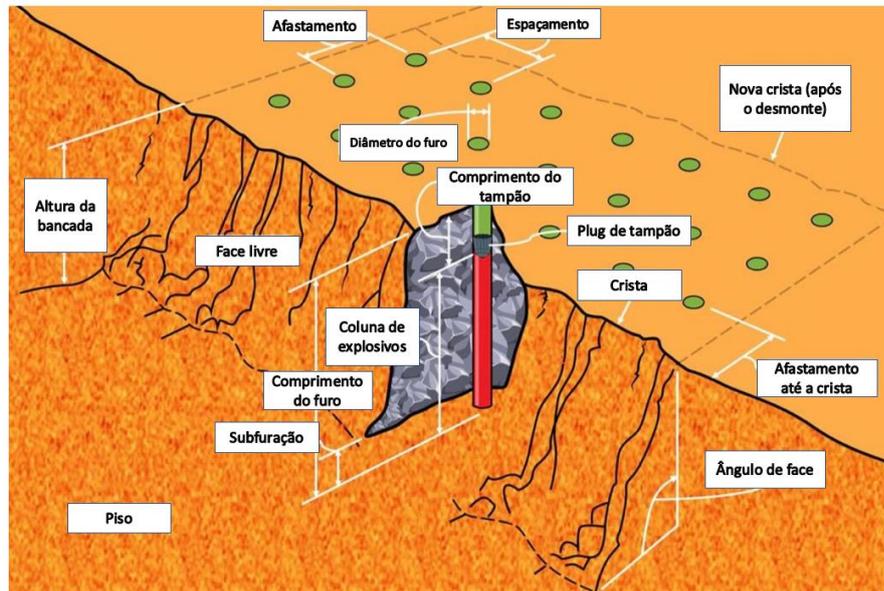
3.8.PLANO DE FOGO

O plano de fogo, ou plano de desmonte tem como objetivo principal a fragmentação do maciço rochoso afim de permitir o carregamento e transporte do material para as etapas subsequentes da mineração. Dessa forma, deve ser calculado aos mínimos detalhes afim de garantir a granulometria ideal de acordo com os limites do britador primário e minimização de custos com os explosivos e perfuração.

De maneira geral, uma boa qualidade de desmonte está diretamente atrelada a um bom dimensionamento da malha de perfuração e aderência ao plano. Se tratando de malhas, geralmente são expressas em termos de sua geometria relação de afastamento x espaçamento (SILVA, 2019).

As variáveis geométricas do plano de fogo contidas na figura abaixo serão descritas a seguir.

Figura 9 – Variáveis geométricas do plano de fogo para minas a céu aberto



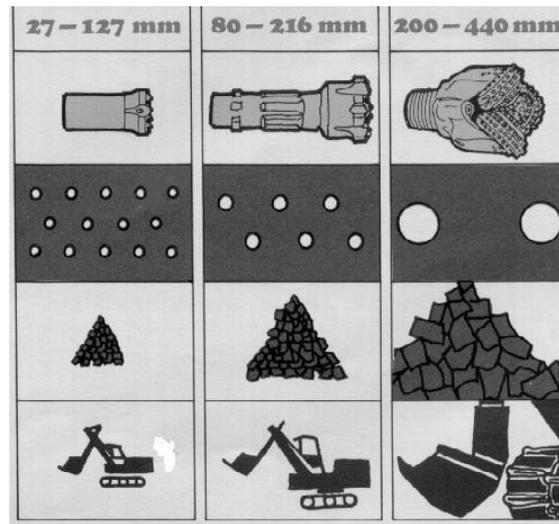
Fonte: adaptado de ERG Industrial (2022)

3.8.1. Diâmetro do furo

O diâmetro do furo de perfuração para desmonte de rochas depende de vários fatores, dentre eles: a fragmentação desejada, produção estimada, porte dos equipamentos de perfuração, equipamentos de carga e transporte, tipo de explosivos, altura da bancada e distribuição dos furos na praça. O correto dimensionamento do diâmetro traz benefícios em termos de fragmentação, consumo de explosivos, propagação de ondas sísmicas e sonoras pelo terreno (SILVA, 2019).

Segundo Silva (2019), os furos podem ser considerados de pequeno porte (até 5”), médio porte (entre 5” e 8”) e grande porte (maior que 8”). A escolha pelos maiores diâmetros traz ganhos em produtividade devido a menor necessidade de deslocamentos nas praças de perfuração, e superior taxa de penetração quando comparada com as menores máquinas (SILVA, 2019).

Figura 10 – Influência do diâmetro do furo nas variáveis do desmonte de rochas



Fonte: adaptado de Silva (2019)

3.8.2. Definição das malhas de perfuração

Atualmente, muitos são os modelos existentes para definir uma malha de perfuração inicial ao processo. A busca pela primeira variável geralmente é o afastamento (A), uma vez que as outras possuem relação direta com o valor encontrado.

Como uma aproximação mais grosseira, segundo Silva (2019), o afastamento tende a ser entre 33 a 39 vezes o valor do diâmetro do furo. Porém, o mesmo autor ressalta a importância de analisar de forma mais detalhada de acordo com a resistência a compressão uniaxial da rocha.

Dessa forma, propõe três faixas de resistência que devem ser levadas em consideração, alternando as equações presentes para cada tipo de material e/ou litologia, destacam-se: rochas macias (<70MPa), rochas médias (70MPa até 120MPa) e rochas duras (>120MPa).

Porém, no entanto é importante ressaltar que essas aproximações desconhecem as características do maciço rochoso, as propriedades físicas dos explosivos, a qualidade de perfuração, temporização e sequenciamento do desmonte. Por isso, as equações empíricas tornam-se um pontapé inicial ao processo, sendo necessário a busca pelas variáveis ideais do processo através do método de tentativas (MENDES, 2018).

3.8.3. Afastamento (A)

O afastamento representa a distância entre as linhas de perfuração, ou a menor distância do furo até a face livre da bancada. É a dimensão mais crítica do plano de fogo. Isso porque,

quando muito alto seu valor pode-se ocorrer problemas de repé e má fragmentação. Por outro lado, quando muito baixo é comum a ocorrência de ultra lançamentos e altos índices de ruídos e vibrações no terreno (NIEBLE, 2017).

De forma empírica, o afastamento tende a ser 33 a 39 vezes o valor do diâmetro do furo em milímetros, a depender também da resistência a compressão da rocha. Já para diâmetros maiores, afim de identificar um pontapé inicial do afastamento ideal pode-se utilizar as expressões teóricas sugeridas no livro de Desmonte de Rochas do Valdir Costa e Silva, 2019.

3.8.4. Espaçamento (E)

O espaçamento representa a distância entre furos de uma mesma linha (MENDES, 2018). Silva (2019) afirma que, para rochas duras é recomendado a utilização de malhas triângulo equilátero para melhor aproveitamento da energia. Nesse caso a seguinte equação é válida:

$$E = A * 1,15 \quad (4)$$

Um mal dimensionamento do espaçamento poderá causar problemas de fragmentação excessiva ou grosseira, além de um aumento na razão de carga. Para melhor adequação dos valores de afastamento e espaçamento é recomendado métodos de tentativas até se atingir o cenário ideal (SILVA, 2019).

3.8.5. Subfuração (S)

Segundo Silva (2019), a subfuração representa a metragem perfurada além da altura de corte necessária. É utilizada para garantir que se evitem problemas com repés e garantir a fragmentação da parte inferior do banco. Segundo o autor, é recomendada sua utilização conforme relação abaixo:

$$S = 0,3 * A \quad (5)$$

Um dimensionamento excessivo dessa variável pode gerar problemas de embocamento de furo no próximo banco, aumentando o desgaste das ferramentas de perfuração, além de aumentar consideravelmente os custos de perfuração e desmonte da área. Por outro lado, a não

utilização de subfuração em litologias mais abrasivas e resistentes acarreta uma má fragmentação e repés (SILVA, 2019).

3.8.6. Profundidade do furo (H_f)

A profundidade do furo está diretamente relacionada com o corte necessário para que a bancada atinja o nível desejado pela equipe de planejamento de mina. Representa todo o comprimento realizado pela perfuratriz, podendo ou não ter variações devido a subfuração, inclinação e sistemas de medição não aferidos (SILVA, 2019).

A escolha do equipamento ideal de perfuração depende da profundidade que se deseja atingir, para grandes comprimentos é preferível a escolha por uma perfuratriz que possua um sistema de martelo de fundo, afim de diminuir as perdas de energia através das hastes, que chegam a representar até 6% de perda de energia por acoplamento (SILVA, 2019).

O comprimento do furo pode ser calculado pela seguinte equação:

$$H_f = \frac{H_b}{\cos\alpha} + \left(1 - \frac{\alpha}{100}\right) * S \quad (6)$$

3.8.7. Tampão (T)

O tampão representa a quantidade de material inerte compactado acima da carga explosiva afim de confinar os gases e garantir uma melhor fragmentação. Possui certa relação com a VOD, já que maximiza a ação do explosivo no furo (MENDES, 2018).

Quando dimensionado de forma excessiva, pode-se obter uma fragmentação grosseira no topo da carga devido a menor influência de explosivos na região. Ou, quando muito pequeno pode ocorrer perda dos gases e ultralaçamentos de fragmentos rochosos (SILVA, 2019).

Pode ser empiricamente calculado através da seguinte relação:

$$T = 0,7 * A \quad (7)$$

3.8.8. Retilidade

A aderência ao planejado do plano de fogo é de extrema importância para evitar retrabalhos com repés, matações, ultralaçamentos, etc. Dessa forma, a retilidade é um dos

principais fatores a serem observados, visto que caso a furação ocorra um desvio não calculado anteriormente, existe um grande potencial de riscos e de má eficiência de fragmentação devido a não abrangência de explosivo no local desejado.

Comumente, os desvios na furação ocorrem em sua maioria em perfuratrizes com martelo de topo devido ao baixo diâmetro das hastes de perfuração e a maior distância da fonte de energia em relação ao fundo do furo, ou seja, à medida que os furos ficam mais profundos a tendência é que tenha um desvio maior na furação (SILVA, 2019).

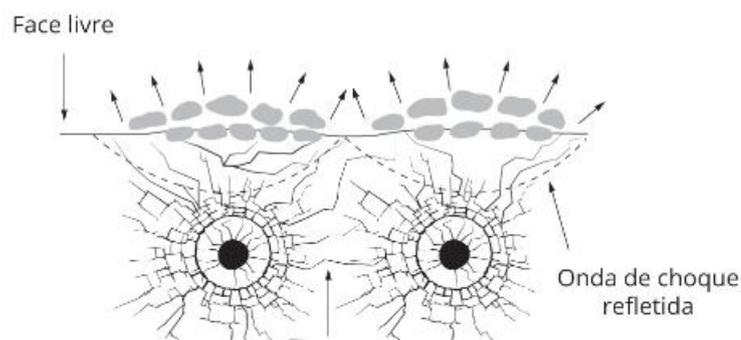
3.9.FRAGMENTAÇÃO DA ROCHA

Como o principal objetivo do desmonte de rochas é a fragmentação do maciço rochoso de modo a permitir seu carregamento e transporte, é importante que se obtenha uma fragmentação adequada de acordo com o top size do britador, com mínimos danos ao maciço remanescente e problemas ambientais (FREITAS e MORAIS, 2020).

Durante a ação do explosivo no maciço é importante a máxima permanência de energia no interior dos furos, por isso o tampão deve ser realizado e compactado de forma adequada (MENDES, 2018).

Outro ponto importante é que, a fase de maior fragmentação do desmonte acontece quando a onda de choque é refletida na face livre e retorna como uma força de tração. Isso ocorre porque geralmente a resistência a tração de um maciço rochoso é aproximadamente 10 vezes menor do que a resistência a compressão. Daí a importância da existência de uma face livre limpa e adequada, afim de permitir a reflexão das ondas de choque (SILVA, 2019).

Figura 11 - Fases de ruptura da rocha devido ação do explosivo



Fonte: adaptado de Silva (2019)

3.10. TEMPORIZAÇÃO DO DESMONTE

Desde o início da utilização de explosivos pela indústria mineral, a temporização é um importante parâmetro do plano de fogo. Ele representa a sequência cronológica em que os furos serão iniciados. É muito utilizado afim de se reduzir vibrações pelo terreno, ruídos e garantir eficiência de fragmentação (SILVA, 2019).

Atualmente com a utilização das espoletas eletrônicas tornou-se muito mais prático esse hábito. Isso porque, através de softwares é possível realizar a simulação de várias temporizações, garantindo maior assertividade ao blaster de campo para dimensionamento da carga máxima por espera (CARDU, GIRAUDI e ORESTE, 2013).

3.11. SEQUENCIAMENTO DO DESMONTE

Assim como a temporização, o sequenciamento é de extrema importância para garantir fragmentação adequada, a minimização dos efeitos de back break, vibrações e ruídos. Ele representa a ordem em que os furos irão ser detonados em relação a sua posição (BERNARDO, 2015).

Segundo Bernardo (2015), é de extrema importância um bom sequenciamento para garantir que a cada furo detonado libere face livre para os furos subsequentes, afim de garantir a possibilidade de reflexão das ondas de compressão e conseqüentemente a fragmentação por tração.

3.12. RAZÃO DE CARGA (G/T)

A razão de carga é um dos KPI (key performance indicator) mais utilizados pelas gerências para acompanhar as operações de desmonte. Ele representa a quantidade de explosivo, em gramas, que foi gasto para desmontar uma tonelada de material (SILVA, 2019).

Naturalmente, para litologias mais compactas e abrasivas, tende-se a ter uma maior razão de carga devido a necessidade de se aproximar os furos afim de garantir a fragmentação adequada. Por outro lado, em litologias mais friáveis existe a possibilidade de se compensar os altos valores dos compactos com a redução da carga de coluna e/ou a utilização de uma malha de perfuração mais alongada (JÚNIOR, 2021).

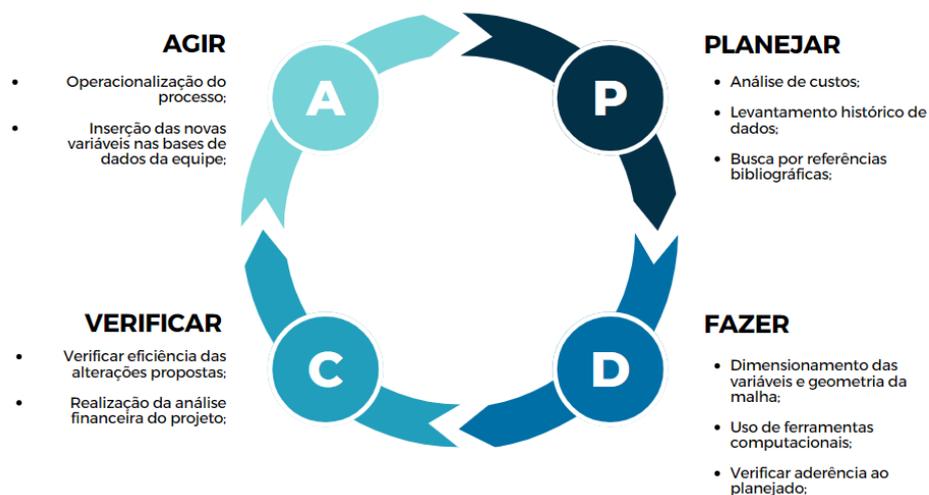
Importante ressaltar que, também é percebido uma certa variação nesse indicador quando se comparado os equipamentos de carregamento. Isso porque a utilização de

escavadeiras na pilha formada, permite uma fragmentação um pouco mais grosseira quando comparada a utilização de pás mecânicas, devido a maior força de desagregação presente nas escavadeiras.

4. METODOLOGIA

Para que os objetivos específicos do projeto fossem alcançados, foi utilizado a metodologia de trabalho do PDCA, que é uma ferramenta elaborada pelo estatístico americano Walter Andrew Shewhart. Essa metodologia se baseia em 4 etapas para atingir a excelência operacional através dos passos de Planejar, Fazer, Checar e Agir, que foram realizados no trabalho conforme figura abaixo.

Figura 12 - Ciclo do PDCA para o trabalho proposto



Fonte: O autor.

A definição do projeto foi realizada pela equipe de Perfuração e Desmonte de Rochas, com a aprovação da Gerência de Infraestrutura de Mina. O principal ponto relatado seria uma tentativa de encontrar as malhas de perfuração ideal para cada tipo de litologia presente na mina em questão.

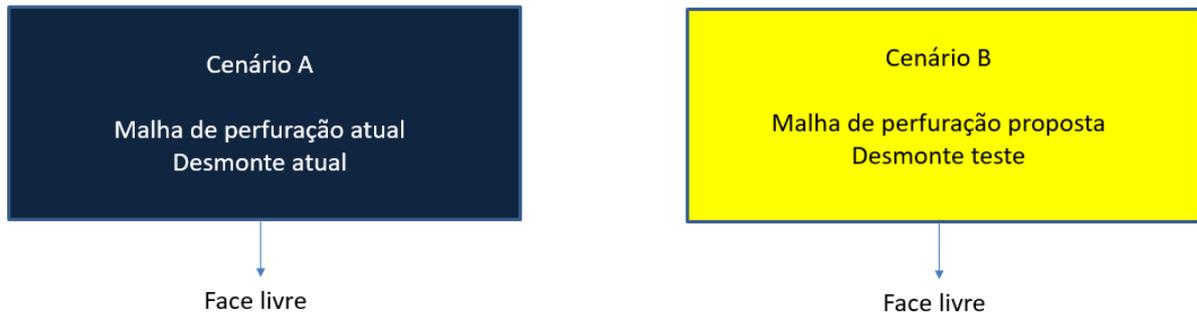
O foco do trabalho não foi voltado apenas para redução de custos no processo conjunto, mas principalmente para a otimização das malhas de perfuração, e conseqüentemente uma melhor fragmentação no resultado final do desmonte.

Após a definição do trabalho, foi realizado o planejamento do mesmo, de modo a entender a maneira com que era praticada o desmonte de rochas na empresa. Dessa forma, foi levantado uma baseline dos últimos 4 meses antecedentes ao início do trabalho, janeiro a abril 2022.

Mediante a isso, foram definidas as metodologias de realização de testes com as novas variáveis geométricas encontradas através de cálculos teóricos para os diferentes tipos de

materiais. Durante esse estudo, as praças de perfuração foram realizadas em sua totalidade com as variáveis propostas, a fim de se comparar com o cenário antigo, conforme figura abaixo.

Figura 13 - Cenário proposto para realização de testes



Fonte: O autor.

Após tais definições, foi acordado entre a equipe de perfuração e desmonte de rochas, juntamente com o planejamento de mina quais áreas seriam realizadas as primeiras alterações nas malhas, de acordo com o modelo de blocos do polígono a ser desmontado.

Os desmontes realizados foram filmados através de drones, de modo que se pudessem acompanhar a movimentação, fragmentação do maciço rochoso e impactos gerados ao maciço remanescente.

Em relação aos insumos gastos no processo, esses por sua vez são lançados em planilhas da própria equipe a fim de abastecer a base de dados da empresa, e também prestar controle ao SicoEx, que é a ferramenta de gestão para gerenciamento das atividades que envolvam utilização de explosivos.

A metodologia de comparação dos cenários foi realizada através do software I-Blast, onde foi possível verificar a variação do consumo de explosivos e metragem perfurada devido as alterações das variáveis geométricas, a identificação da curva de fragmentação da pilha desmontada dentro dos parâmetros esperados pelos clientes do processo, e por fim o balancete financeiro final dos testes realizados.

5. ESTUDO DE CASO

5.1. APRESENTAÇÃO DO PROCESSO INDUSTRIAL PRATICADO NA MINA EM QUESTÃO

O empreendimento mineiro está localizado no Quadrilátero Ferrífero de Minas Gerais, mais especificamente na região da cidade de Congonhas, onde através das operações unitárias é extraído minério de ferro da jazida. Essa empresa possui grande parte do seu produto destinado ao abastecimento siderúrgico nacional, e devido a produção em larga escala também possui parte destinado ao mercado interno e externo.

Figura 14 - Localização da cidade de Congonhas, MG.



Fonte: Wikipedia

Na operação de mina, a exploração do minério é realizada através das operações de decapeamento, perfuração, desmonte (mecânico ou por explosivos), carregamento e transporte.

O desmonte do material é realizado de forma mecânica quando os equipamentos de carga possuem força de desagregação superior a resistência da rocha. Ou, de forma química, através de explosivos quando a resistência da rocha é superior a capacidade de escavação do equipamento de carga.

Na utilização de desmonte por explosivos é necessário a realização de furos no maciço rochoso através das perfuratrizes. Esses por sua vez, são carregados com substâncias químicas, capazes de gerar expansão de gases a altas velocidades e temperaturas desagregando a rocha a fim de possibilitar o seu carregamento e transporte.

Dentro dos furos normalmente são alocados 3 produtos diferentes, a fim de garantir a fragmentação do material resistente: *booster* (reforçadores), espoletas detonadoras (não elétricas e/ou eletrônicas), e a carga explosiva (blend de emulsão e nitrato de amônia).

As espoletas são utilizadas para garantir o choque inicial para iniciação do conjunto de explosivos. No caso da mina em estudo, são utilizadas espoletas eletrônicas, mesmo com custo 10 vezes maior que as espoletas não elétricas. Após inúmeros testes foi padronizado sua utilização devido às vantagens oferecida, dentre elas destacam-se: melhor segurança da operação, maior produtividade de temporização, iniciação a distância, menor dispersão de tempo entre furos garantindo melhor fragmentação, menor emissão de ondas sísmicas e sonoras, e conseqüentemente menor impacto ambiental.

Como o choque inicial das espoletas nem sempre é suficiente para garantir a iniciação da carga de coluna, é comum a utilização de *booster* a fim de obter uma melhor energia de fragmentação com a rápida expansão dos gases presentes no blend de explosivo.

Após a etapa de desmonte, os equipamentos de carga possuem condições e produtividades adequadas para realizar o carregamento do material desmontado. Essa operação é realizada através de equipamentos de grande porte, destacando os caminhões fora de estrada com capacidade de 240t responsáveis pela movimentação de materiais com interesse econômico ou estéreis.

Figura 15 – Operação da mina local com equipamentos fora de estrada



Fonte: O autor

Durante a etapa de transporte, o ROM (*Run of Mine*) pode haver 3 possibilidades de destinação: Britador, Pilha de Estéril, Pátios de estocagem.

O material será destinado aos pátios de estocagem quando houver interesse econômico e alto teor de Fe, sem a necessidade de realizar sua concentração através dos métodos físico-químicos, apenas será realizada a classificação através de UPM (unidade de peneiramento

móvel). Nessa etapa são gerados dois produtos, o Granulado (acima de 6,3 mm) e Sinter Feed (entre 6,3 mm e 0,150 mm). Em seguida, é realizado transporte para o pátio de carregamento de vagões. O método ferroviário representa a principal matriz de transporte dos produtos para o mercado interno e externo.

Outra possibilidade do ROM é para o britador primário, quando o material houver interesse econômico, porém com teor de Fe inferior ao granulado e pellet feed. Nesse caso, o material precisa passar pelo processo de beneficiamento de minérios, realizado através do método de concentração físico-químico da flotação. Ao fim da etapa de concentração são obtidos 2 produtos: o concentrado de minério de ferro Pellet feed (menor que 0,150 mm), e rejeito (material sem interesse econômico). O Pellet feed é destinado ao carregamento de vagões para realizar o escoamento da produção, e o rejeito é destinado às plantas de filtração e secagem para posterior realização do empilhamento a seco.

Quando o material extraído da frente lavra não houver interesse econômico, será destinado a locais para disposição, conhecidas como pilha de estéril. Essa etapa exige todo o controle geotécnico necessário para garantir a estabilização das pilhas, além de um altíssimo controle ambiental a fim de mitigar os impactos gerados pela disposição do material inerte.

5.2.CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA

Conforme mencionado, a definição do projeto foi realizada pela equipe de perfuração e desmonte de rochas, com aprovação da gerência de infraestrutura de mina. O principal ponto relatado foi a falta de padronização das malhas de perfuração de acordo com o tipo de material presente no polígono a ser detonado.

Em conversas com os técnicos *blasters* responsáveis foi possível perceber que o fator de escolha das malhas era pautada nos comentários e retornos da equipe de operação de mina do último desmonte realizado na área, e principalmente na experiência pessoal. Além disso, era notório a predominância de uma certa malha padrão para grande parte das litologias presentes na mina.

Diante disso, existia-se a necessidade de trabalhar nessa área a fim de identificar as melhores variáveis geométricas para cada tipo de material. A utilização de uma malha padrão para grande maioria dos desmontes faz com que exista energia acima do necessário para algumas áreas, gerando custos desnecessários, e para outras áreas falte energia para fragmentação de materiais mais abrasivos e compactos, ocasionando problemas de fragmentação grosseira.

Dessa forma, o foco do trabalho é a definição das variáveis geométricas adequadas que visam garantir a melhor distribuição de energia no maciço, a redução de custos nos desmontes de litologias friáveis e melhores fragmentações nos materiais compactos.

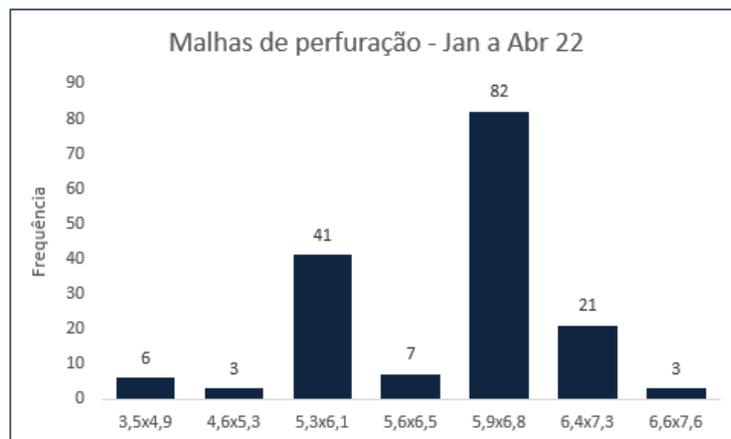
5.3.LEVANTAMENTO HISTÓRICO DE DADOS

Na primeira etapa do PDCA foi necessário realizar uma retroavaliação do processo de desmonte da mina em questão. Dessa forma, foi utilizado o banco de dados mensal disponibilizado pela equipe, a fim de agrupar todas as informações úteis ao projeto em uma única planilha, de maneira que se obtivesse uma interpretação de dados mais fidedigna e ágil.

Durante a análise foi possível perceber a existência de uma certa variação na malha de perfuração, para um mesmo tipo de material quando se altera o equipamento de carregamento. Conforme mencionado, as escavadeiras de grande porte possuem uma escavabilidade superior as pás mecânicas. Dessa forma, não é necessário o mesmo padrão de cominuição que é aplicado para os equipamentos de pneus, porém deve sempre estar atento as dimensões limites do britador primário da empresa.

Conforme mencionado no item 5.2, era notório a presença de malhas padronizadas para grande maioria das áreas, ocasionando aumento de custos em alguns desmontes, e fragmentações grosseiras em outros. A figura 16 mostra a predominância delas quando comparadas as outras.

Figura 16 - Malhas de perfuração praticadas entre Janeiro e Abril de 2022.



Fonte: O autor

Dessa forma é possível perceber que as configurações 5,3x6,1 e 5,9x6,8 foram as mais utilizadas entre os meses de janeiro a abril de 2022. A malha menor, era praticada e padronizada para carregamentos realizados por pás mecânicas, e a malha maior padronizada para carregamentos de escavadeiras.

5.4.DESENVOLVIMENTO DO PROJETO

A mina em questão possui aproximadamente 36 litologias diferentes catalogadas pela equipe de geologia. Dessa forma, durante o projeto foi definido o agrupamento das litologias de acordo com suas propriedades físicas semelhantes, principalmente em relação a sua resistência e interesse econômico.

No entanto, foram definidos 3 grandes grupos conforme figura abaixo: minérios friáveis, minérios compactos e estéril franco. Dentre elas, existem os subgrupos de variações de malhas conforme a escolha do equipamento de carga que irá atuar na pilha desmontada.

Figura 17 – Divisão dos materiais por litologia



Fonte: O autor

A partir dessas definições foi possível estudar um pouco mais sobre as litologias e suas características para realizar o dimensionamento ideal das variáveis geométricas segundo o modelo proposto por Silva (2019).

Primeiramente é importante ressaltar a preferência da equipe de desmonte pela utilização das malhas de perfuração triângulo equilátero, devido seu maior aproveitamento de energia no maciço rochoso, e diversas possibilidades de temporização e sequenciamento, que devem ser levadas em conta mediante a algum imprevisto.

Segundo Silva (2019), para calcular o afastamento da malha de perfuração é necessário ter conhecimento das seguintes informações: diâmetro de perfuração, densidade do explosivo e

do maciço rochoso, e resistência a compressão uniaxial da rocha. Devido a variabilidade de resistência por litologia, o autor propõe 3 diferentes equações de acordo com essa propriedade: rochas macias (menor que 70 MPa), rochas médias (entre 70 MPa e 120 MPa), rochas duras (maior que 120 MPa).

Considerando os parâmetros descritos pelo autor com o diâmetro de perfuração de 9” (228,6mm), a densidade do explosivo como 1,15 g/cm³ e a densidade da rocha como a média aritmética das densidades dos materiais da categoria pode-se calcular o afastamento para todas os materiais presentes na mina em questão.

Se tratando dos minérios friáveis, onde a própria denominação da geologia representa um material brando, com baixa resistência e dureza foi enquadrado conforme o primeiro intervalo de malhas, utilizando a seguinte equação:

$$A = 0,01053 * \left[2 \left(\frac{\rho_e}{\rho_r} \right) + 1,5 \right] * d_e \quad (7)$$

Considerando a densidade média do material como 2,60 t/m³, foi encontrado o valor de 5,74 m para o afastamento teórico segundo esse tipo de material, e como consequência foi definido através da relação de triangulo equilátero, o valor de 6,60 m no espaçamento.

Já para as litologias de minérios compactos, que possuem um valor de resistência a compressão acima de 120 MPa foi utilizado a seguinte equação.

$$A = 0,00877 * \left[2 \left(\frac{\rho_e}{\rho_r} \right) + 1,5 \right] * d_e \quad (8)$$

Nesse caso, considerando a densidade média dos itabiritos compactos como 3,17 t/m³, foram encontrados os valores teóricos de 4,46 m para afastamento e 5,13 m para espaçamento.

Por outro lado, para as litologias de estéril franco, materiais também com baixa resistência a compressão, dureza e abrasividade, foi utilizado a mesma equação presente nos minérios friáveis, alterando apenas a densidade média das litologias para 2,12 t/m³. Como resultado foi obtido o valor de 6,22 m para afastamento e 7,16 m para espaçamento.

Outro ponto importante a destacar é que, dentre os minérios compactos existe uma litologia específica na mina que traz grandes problemas de fragmentação e geração de blocos, muita das vezes sendo necessário a utilização de trator de esteiras durante a lavra para auxiliar o carregamento do material desmontado.

Com isso, foi definido em comum acordo com a equipe uma malha específica para esse tipo de material. Sendo assim, foi utilizada a mesma equação dos minérios compactos, porém utilizando a densidade de $4,77 \text{ t/m}^3$ referente a Hematita Compacta. Por fim, foi encontrado o valor de 3,97 m para afastamento e 4,57 m para espaçamento.

Baseando-se em análises históricas dos desmontes realizados foi possível perceber que algumas das malhas calculadas são mais adensadas do que as comumente realizadas, como por exemplo os minérios friáveis e minérios compactos. Por outro lado, no estéril franco a malha utilizada é inferior a sugerida pelo método.

Tabela 1: Malhas de perfuração calculadas

Tipo de material	Malha utilizada	Malha calculada
Minério friável	5,9 x 6,8	5,7 x 6,6
Estéril franco	5,9 x 6,8	6,2 x 7,2
Minério compacto	5,3 x 6,1	4,5 x 5,1
Hematita compacta	3,5 x 4,9	4,0 x 4,6

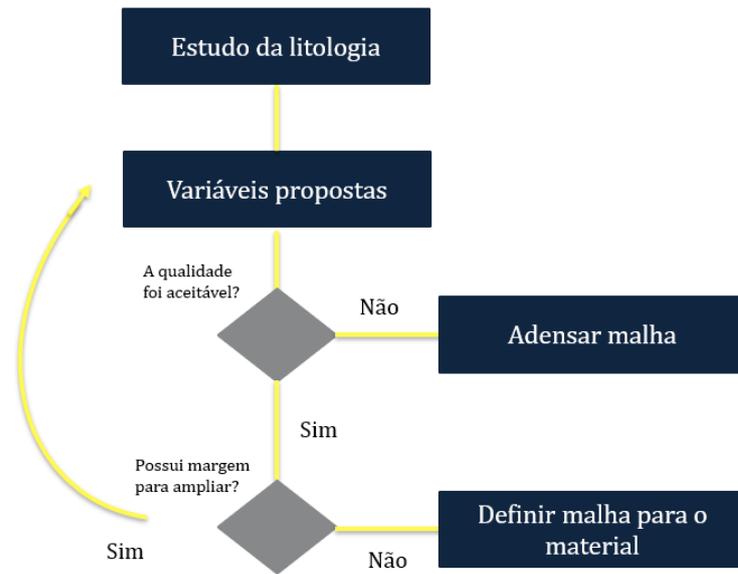
Com isso, através de análises foram decididas as novas variáveis a serem testadas, uma vez que ainda era possível a realização de abertura da malha em alguns materiais e o adensamento em outros a fim de garantir a fragmentação.

5.5.DEFINIÇÃO DOS TESTES A SEREM REALIZADOS

Após encontrado os valores teóricos para cada tipo de material e comparado com os praticados na empresa, foi definido a realização dos testes para verificar a eficácia das novas variáveis.

Sendo assim, foram estabelecidas variações graduais a fim de compreender o comportamento do maciço perante as alterações. Para realização foi seguido a seguinte metodologia conforme a figura 18.

Figura 18 – Metodologia de realização dos testes



Fonte: O autor

Dessa forma, foi realizado a programação da seguinte forma:

Tabela 2: Cronograma de testes a serem realizados

Número do teste	Tipo de material	Equipamento de carga	Malha utilizada	Malha a ser testada
1	Minério friável	Escavadeira	5,9 x 6,8	6,2 x 7,1
2	Minério friável	Escavadeira	5,9 x 6,8	6,4 x 7,3
3	Estéril franco	Escavadeira	5,9 x 6,8	6,4 x 7,3
4	Estéril franco	Escavadeira	5,9 x 6,8	6,6 x 7,6
5	Minério compacto	Escavadeira	5,3 x 6,1	4,6 x 5,3
6	Minério compacto	Pá mecânica	3,5 x 4,9	3,7 x 4,3

Importante ressaltar que, variáveis como tampão, razão linear de carregamento, densidade do explosivo, dentre outros, não foram alterados durante a realização dos testes, a fim de que fosse possível perceber a variação devido as variáveis geométricas do plano de fogo.

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1. ACOMPANHAMENTO DO PROCESSO DE MELHORIA

Foi realizado acompanhamento dos testes em campo de modo a identificar possíveis gargalos. Devido a maioria das alterações propostas serem para litologias muito friáveis como por exemplo IBS e RBIB, não é comum a utilização de análise granulométrica para a pilha desmontada. Por outro lado, se tratando de materiais compactos como HCP, é realizado uma análise mais detalhada.

Dessa forma, o principal indicador de qualidade nas litologias friáveis, foi o tempo de carregamento das máquinas e relatos da equipe de operação de mina. Após análise, foi possível perceber que as novas variáveis propostas para escavadeiras de grande porte não houveram impactos negativos, como já era esperado, e nem mesmo nas litologias compactas, uma vez que foi realizado o adensamento da malha de perfuração a fim de garantir melhor fragmentação.

Figura 19 - Visão superficial do material compacto desmontado.



Fonte: O autor

Já para as pás mecânicas, não houveram variações nos materiais friáveis, as únicas alterações propostas foram em relação a hematita compacta presente na região do Alto do Bandeira, por ser considerado um gargalo no processo. Dessa forma, foi realizado adensamento da malha e reconfiguração do *layout* para triângulo equilátero. O resultado também foi agradável e será discutido a diante.

6.2.DESMONTE TESTE 24J 1450

A realização desse teste foi feita em locais com litologia de hematita compacta e carregamento por pás mecânicas. Devido a criticidade e escassez de desmontes na área, foi definido em comum acordo entre as equipes a alteração de outras variáveis além da malha de perfuração. A seguir, serão detalhadas as alterações.

Tabela 3: Variáveis praticadas para Hematita Compacta e carregamento por Pá Mecânica

Variáveis	Realizado 2021	Realizado 2022
Malha de perfuração	3,5 x 4,9	3,7 x 4,3
Inclinação do furo	0°	10°
Profundidade do furo	10m	10m
Blend do explosivo	80/20	80/20
Tampão	45%	3,5m
Carga de coluna	5,5m	6,5m

Conforme podemos perceber na figura 20, o cenário realizado em 2021 não atendia os padrões de qualidade de esperados. Devido à grande geração de blocos, muitas das vezes era necessário a utilização de trator de esteiras para auxiliar no carregamento do material desmontado.

Figura 20 - Trator auxiliando o carregamento do material desmontado em 2021.



Fonte: O autor

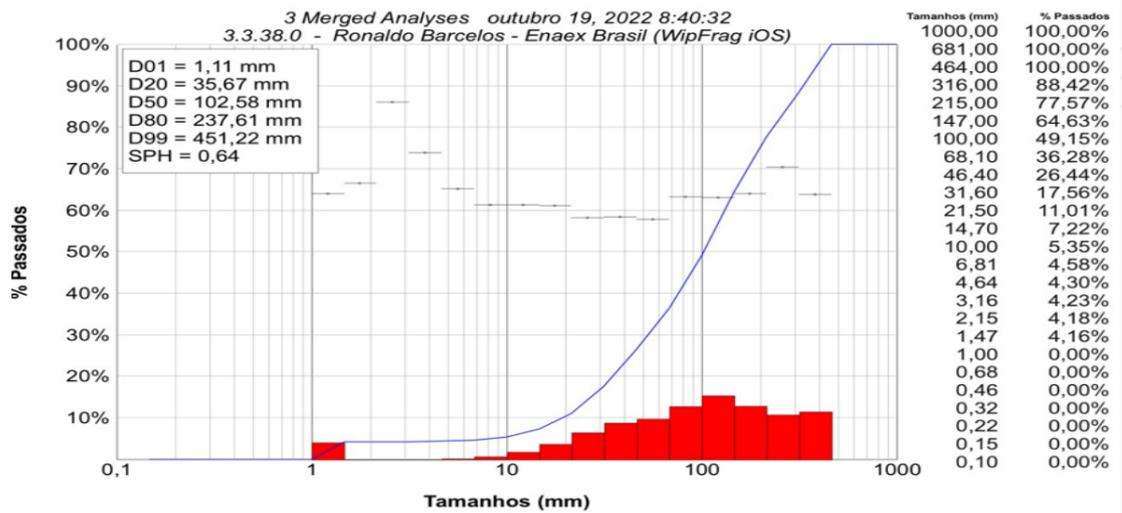
No entanto, através da figura 21 e análise visual de campo foi possível perceber que, as alterações técnicas realizadas, principalmente a readequação da malha para triângulo equilátero trouxeram uma redução da incidência de matacos no material desmontado. Fato comprovado através da análise granulométrica representada na figura 22, que foi cedida pela empresa terceirizada.

Figura 21 - Pilha de material desmontado após alterações técnicas de 2022.



Fonte: O autor

Figura 22 - Análise granulométrica realizado pelo software WipFrag.



Fonte: O autor

Além disso, as novas variáveis do plano de fogo garantiram melhor aproveitamento de energia na fragmentação do maciço, e condições adequadas de trabalho para os equipamentos de carga, não ocorrendo presença de repés e nem mesmo a necessidade de auxílio através de tratores.

Figura 23 - Frente de lavra após término do carregamento do material desmontado.



Fonte: O autor

6.3.PROJETO DE PADRONIZAÇÃO E DEFINIÇÃO DAS MALHAS

Como projeto de estágio, após a comprovação através dos testes foi necessário realizar a implementação das alterações no processo. Dessa forma, todas as novas variáveis aprovadas foram catalogadas e fazem parte do banco de dados da equipe de perfuração e desmonte de rochas.

Dados esses que, são utilizados para realizar o planejamento semanal de desmonte de acordo com a litologia presente no avanço planejado. Além disso, para disseminar o conhecimento das alterações foi criado uma tabela contendo as malhas de perfuração praticadas pela equipe e o tipo de material recomendado para seu uso.

Importante ressaltar que, foi determinado a possibilidade de alteração da malha em aproximadamente 0,2cm. Isso devido à heterogeneidade de materiais presentes em um mesmo avanço, fazendo com que o ajuste fino seja realizado pelo *blaster* responsável pelo planejamento.

Figura 24 - Nova tabela de malhas de perfuração praticadas pela empresa.

Malha de perfuração - Pá Mecânica					
Triângulo Equilátero					
Afastamento (m)	Espaçamento (m)	Área (m ²)	Minério/Estéril	Friável/Compacto	Litologia
3,5	4,0	14,00	Minério	Compacto	Hematita Compacta
3,7	4,3	15,91			
3,9	4,5	17,55			
4,6	5,3	24,4	Minério	Compacto	Itabiritos Compacto
5,3	6,1	32,3	Minério	Friável	Itabirito Friável
5,6	6,5	36,8			
5,6	6,5	36,4			
5,9	6,8	40,5	Estéril	Friável	Estéril Franco

Malha de perfuração - Escavadeira					
Triângulo Equilátero					
Afastamento (m)	Espaçamento (m)	Área (m ²)	Minério/Estéril	Friável/Compacto	Litologia
3,5	4,0	14,00	Minério	Compacto	Hematita Compacta
3,7	4,3	15,91			
3,9	4,5	17,55			
4,6	5,3	24,38	Minério	Compacto	Itabiritos Compacto - Alto Bandeira
5,3	6,1	32,33	Minério	Compacto	Itabiritos Compactos - Geral
5,6	6,5	36,40			
5,9	6,8	40,12			
6,2	7,1	44,02	Minério	Friável	Itabirito Friável - Geral
6,4	7,3	46,72			
6,6	7,6	50,16			
6,4	7,4	47,36			
6,6	7,6	50,16	Estéril	Friável	Estéril Franco
6,8	7,8	53,04			

Fonte: O autor

6.4. ANÁLISE FINANCEIRA

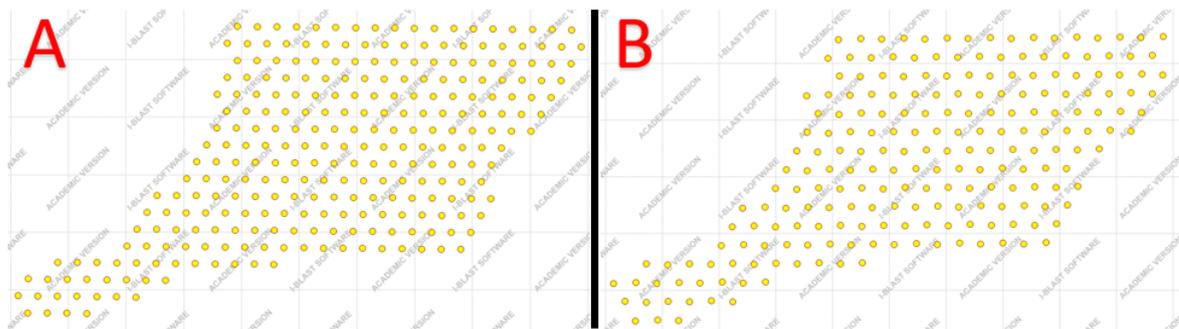
Mesmo sabendo que o foco do projeto não era pautado em redução de custos, e sim na melhoria de fragmentação, foi possível realizar o balancete financeiro com as alterações propostas.

Para realização desses cálculos foi considerado o preço médio praticado até o mês de outubro de 2022 para cada uma das operações. Para o caso da equipe de perfuração foi considerado o indicador R\$/m perfurado com o valor médio de R\$59,80/m. Já para equipe de desmonte de rochas foi considerado o indicador R\$/Kg de explosivo aplicado com valor médio de R\$6,62/Kg.

A fins de comparação, será considerado um desmonte para cada teste como proposto na tabela 2, comparando o realizado *versus* o cenário anteriormente praticado ao projeto, mantendo todas as variáveis como constantes e alterando somente a malha de perfuração conforme determinado, para assim obtermos a variação dos custos de cada cenário.

No entanto, a figura 25 representa essa comparação realizada para litologia de estéril franco. No cenário A temos a projeção do croqui com as variáveis de 2021, e no cenário B o realizado em 2022 após o projeto.

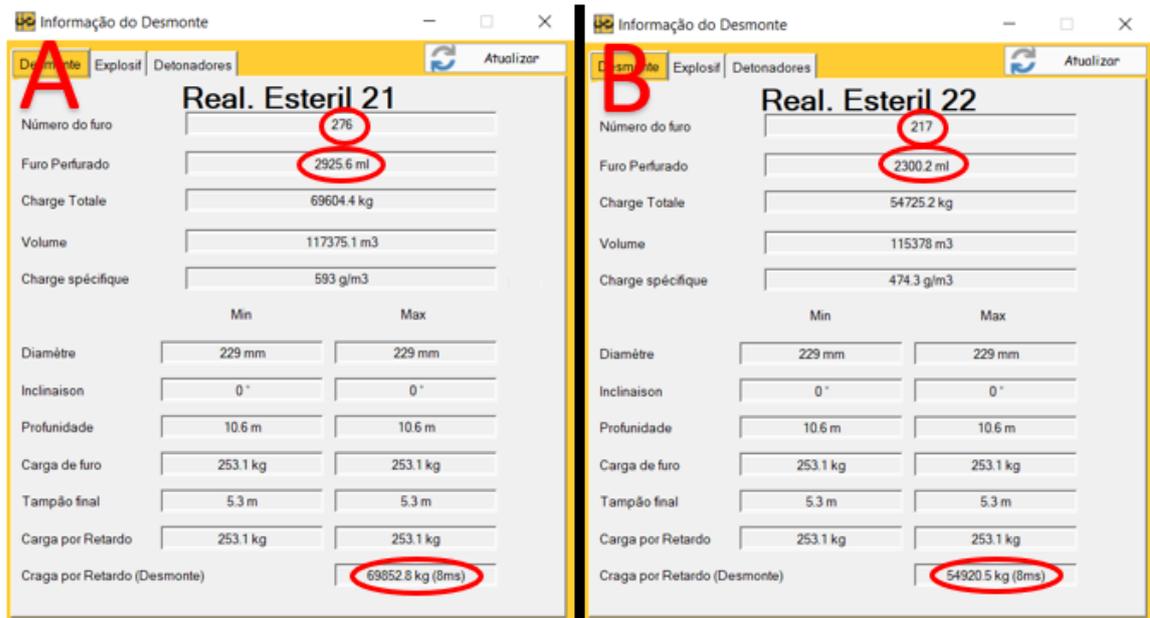
Figura 25 – Comparativo via I-Blast entre croquis do plano de fogo para uma mesma área desmontada



Fonte: O autor.

Com isso, a figura 26 traz o quantitativo de número de furos, metragem perfurada e consumo de explosivo para os dois cenários a fim de comparar os custos realizados realizado em 2022 e com o cenário de 2021.

Figura 26 – Análise quantitativa dos cenários A e B para o segundo teste realizado no Estéril Franco



Fonte: O autor.

Essa metodologia foi aplicada a todos os testes realizados, e a tabela 4 mostra os impactos financeiros gerados pelo projeto. Dessa forma, foi possível perceber um aumento de custos em alguns cenários e redução em outros, atingindo o valor final positivo de R\$160.088 quando mensurado os 6 testes realizados.

Tabela 4: Comparativo financeiro dos cenários

Desmonte teste	Cenário 2021	Realizado 2022
Minério Friável – Escavadeira – Teste 1	R\$272.612	R\$247.576
Minério Friável – Escavadeira – Teste 2	R\$391.365	R\$344.779
Estéril Franco – Escavadeira – Teste 1	R\$312.177	R\$267.019
Estéril Franco – Escavadeira – Teste 2	R\$637.376	R\$501.126
Minério Compacto – Escavadeira	R\$187.516	R\$264.227
Minério Compacto – Pá Carregadeira	R\$58.521	R\$74.482

Além disso, conforme mencionado na tabela 4, foi possível realizar os cálculos de custo por tonelada desmontada, podendo perceber novamente aumento de custos em alguns tipos de materiais e redução de custos em outros.

Tabela 5: Comparativo financeiro R\$ por tonelada desmontada

Tipo de material e máquina de carga	2021	2022
Minério Friável – Escavadeira	R\$2,23	R\$1,91
Estéril Franco - Escavadeira	R\$2,75	R\$2,18
Minério Compacto – Escavadeira	R\$2,37	R\$3,14
Minério compacto – Pá Mecânica	R\$2,97	R\$3,63

Porém, ao analisar esses resultados de acordo com o plano de lavra para 2023, conforme mostrado na figura 27 foi comprovado que o projeto possui relevância devido potencial redução de aproximadamente R\$10M na operação conjunta de perfuração e desmonte, quando realizado os desmontes com as novas variáveis propostas e mesmo padrão de carregamento realizado.

Figura 27 – Projeção para economia de custos segundo Plano de Lavra 2023

Material/Equipamento	Massa a ser desmontada (t)	Custo/t 2021		Custo/t 2022		Varição	
Minério Friável - Escavadeira	4.936.098	R\$	2,23	R\$	1,91	R\$	1.552.546
Minério Compacto - Escavadeira	6.121.535	R\$	2,37	R\$	3,14	-R\$	4.727.347
Minério Compacto - Pá Mecânica	410.233	R\$	2,97	R\$	3,63	-R\$	274.051
Estéril Franco - Escavadeira	24.031.550	R\$	2,75	R\$	2,18	R\$	13.657.458
						R\$	10.208.607

Fonte: O autor

7. CONCLUSÃO

Com a realização do projeto foi possível perceber os impactos financeiros gerados ao se reduzir a metragem perfurada e consumo de explosivos, quando se alteraram as variáveis da malha de perfuração, sem renunciar à qualidade do produto entregue as etapas subsequentes.

Conclui-se também, a importância de analisar o processo como um todo, e não somente separado por áreas. O trabalho realizado no ano de 2022 representou muito bem isso, uma vez que trouxe aumento de custos de aproximadamente 30% em determinadas litologias em prol de uma melhor fragmentação que concedesse condições adequadas de trabalho para os equipamentos de carga, reduzindo a necessidade de máquinas auxiliares na pilha desmontada, além da menor incidência de matacos, possivelmente relacionados a engaiolamentos de blocos no britador primário. Ou seja, um feito positivo com efeito em cadeia a fim de beneficiar todo o processo.

Por outro lado, se tratando das litologias friáveis os ganhos financeiros são bastantes representativos, uma vez que representa mais de 80% do material a ser desmontado na mina em 2023. A redução em 20% no valor da tonelada desmontada foi possível devido muitas das vezes os desmontes serem realizados com excesso de energia e fragmentação para essas litologias. A identificação dessa oportunidade foi a virada de chave para a otimização do processo.

Ao fim do projeto, chegou-se à conclusão que segundo o Plano de Lavra de 2023 existe potencial para redução de custos em até R\$10M no processo conjunto de perfuração e desmonte, se utilizado os padrões propostos no trabalho realizado.

E, por fim é importante ressaltar a importância dos projetos de melhoria contínua, visto que sempre há espaços para aperfeiçoamentos no processo, mesmo que pequenos, mas que quando realizados possuem um valor bastante representativo para o aproveitamento de recursos da empresa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, Dionatha Silvano; COSTA, Joelma Silva; COSTA, Leandro Vilhena; BONFIM, Rosa Jussara: **ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE DOIS EXPLOSIVOS: EMULSÃO BOMBEADA E ANFO (GRANULADO)**. Anais do 1º Simpósio de TCC, das faculdades FINOM e Tecsona. 2019; 844- 852

BERNARDO, P. A. M. **Análise comparativa das substâncias explosivas mais utilizadas no desmonte de rochas com explosivos**. 4º Explomim. Cachoeiro de Itapemirim, Espírito Santo. 16 p. 2015.

BIOPDI (Brasil). **Ensaio de compressão**. Disponível em: <https://biopdi.com/ensaio-de-compressao/>. Acesso em: 29 set. 2022.

CARDU, Marilena; GIRAUDI, Alessandro; ORESTE, Pierpaolo. A review of the benefits of electronic detonators. **REM: Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, p. 375-382, set. 2013.

CURI, Adilson. **Lavra de minas**. São Paulo: Oficina de Textos, 2017.

CURI, Adilson. **Minas a céu aberto planejamento de lavra**. São Paulo: Oficina de Textos, 2014.

DE FATO ONLINE (Brasil). **Perfuratriz Autônoma, em teste na Mina Brucutu, trabalha sem operador na cabine**. 2014. Disponível em: <https://defatoonline.com.br/perfuratriz-autonoma-em-teste-na-mina-brucutu-trabalha-sem-operador-na-cabine/>. Acesso em: 29 set. 2022.

EL-MOWAFY, A. Machine automation using RTK GPS positioning. **Department of Spatial Sciences Spatial Data Directorate**, 2009.

ENAEX (Brasil). **Ibinite - Emulsões a Granel**. Disponível em: <https://www.enaex.com/br/pt/ibenite-2/>. Acesso em: 01 out. 2022.

FREITAS, Márcia Eliane Pereira de; MORAIS, Douglas Souza. COMPARAÇÃO DA EFICIÊNCIA ENTRE OS EXPLOSIVOS EMULSÃO BOMBEADA E ANFO NO PROCESSO DE DESMONTE DE ROCHAS: Um estudo de caso. **Revista Multidisciplinar**: Faculdade do Noroeste de Minas, Paracatu - Mg, p. 349-367, 01 out. 2022.

FRIORI, Alberto Pio. **Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas**: aplicações na estabilidade de taludes. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.

HINO, K. **Theory and practice of blasting**. Asa, Japan: Nippon Kayaku Co., 1959.

JIMENO, C. L. et al. **Manual de perforacion y voladura de rocas**. Madrid, España: Instituto geologico y minero de España, 1987.

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

NIEBLE, Carlos Manoel. **Desmontes cuidadosos com explosivos**: aspectos de engenharia e ambientais. São Paulo: Oficina de Textos, 2017. 126 p.

OLIVEIRA, A. M. D. S.; BRITO, S. N. A. D. **Geologia de Engenharia**. São Paulo: ABGE, 1998.

POMEROL, C. et al. **Princípios da geologia**: Técnicas, Modelos e Teorias. Porto Alegre: Bookman, 2013.

RESENDE JÚNIOR, Henrique Ribeiro de. **ANÁLISE COMPARATIVA DE INICIADORES DE DETONAÇÃO ELETRÔNICOS E NÃO ELETRÔNICOS A PARTIR DO MODELO DE FRAGMENTAÇÃO KUZRAM**. 2021. 48 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia de Minas, Instituto Federal do Espírito Santo, Cachoeiro de Itapemirim, 2021.

SANDVIK (Brasil). **BROCA TRICÔNICA CHARGER™ RR440**. Disponível em: <https://www.rocktechnology.sandvik/pt-br/produtos/ferramentas-de-perfura%C3%A7%C3%A3o-de-rocha/ferramentas-de-perfura%C3%A7%C3%A3o-rotativa/brocas-de-perfura%C3%A7%C3%A3o-rotativa/broca-rotativa-rr440/>. Acesso em: 01 out. 2022.

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

VAZ, J. G.; CARNEIRO, V. A. Escala de Mohs: O grau de dureza dos minerais dos estojos didáticos do acervo da SEGEP - Seção de Geologia e Paleontologia da UEG/CCET. **Revista Percorso**, Anápolis, Goiás, 2015.