



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



GÉSSICA FERNANDES DA SILVA

**APLICAÇÃO DE EXPLOSIVOS BLENDADOS E AUMENTO DE MALHA NAS
OPERAÇÕES DE PERFURAÇÃO E DESMONTE, VISANDO REDUÇÃO DE
CUSTOS, EM MINAS DE FERRO**

OURO PRETO

2022

GÉSSICA FERNANDES DA SILVA

Aplicação de explosivo blendado e aumento de malha nas operações de perfuração e desmonte, visando redução de custos, em minas de ferro

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.

Professor orientador: Prof. Dr. Carlos Enrique Arroyo Ortiz

OURO PRETO

2022

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

S586a Silva, Géssica Fernandes da.

Aplicação de explosivo blendado e aumento de malha nas operações de perfuração e desmonte, visando redução de custos, em minas de ferro. [manuscrito] / Géssica Fernandes da Silva. - 2022.

74 f.: il.: color., gráf., tab., mapa. + Quadro.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Enrique Arroyo Ortiz.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia de Minas.

1. Mineração a céu aberto. 2. Desmonte de rochas. 3. Rochas - Perfuração. 4. Explosivos. I. Ortiz, Carlos Enrique Arroyo. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 622.23/.24

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



FOLHA DE APROVAÇÃO

Géssica Fernandes da Silva

Aplicação de explosivo blendado e aumento de malha nas Operações de perfuração e desmonte, visando redução de Custos, em minas de ferro

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 28 de Julho de 2022

Membros da banca

Dr. Carlos Enrique Arroyo Ortiz - Orientador(a) Universidade Federal de Ouro Preto
Dr. Vladimir Kronenberger Alves - Universidade Federal de Ouro Preto
Eng. Jorhs Enrique Casimiro Huayhua - DNA Blast - Group

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 28/07/2022



Documento assinado eletronicamente por **Carlos Enrique Arroyo Ortiz, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 10/08/2022, às 10:32, 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 **0377449** e o código CRC **CC5FEE2D**.

Dedico este trabalho aos meus pais José e Vani pelo suporte e amor incondicional, além do incessante incentivo à ciência, educação, respeito ao próximo e ética. Aos meus irmãos Mônica e Jeferson por todo carinho e por serem fonte de minha alegria. Ao Rafael pelo companheirismo e apoio durante minha trajetória. Ao meu amigo Sandro Aurélio, que dividiu comigo com todo carinho e paciência todo seu conhecimento, que você possa buscar continuamente o caminho do conhecimento e sucesso juntamente com o respeito à vida.

AGRADECIMENTOS

Ao meu Senhor Deus, pelo seu infinito amor e cuidado.

Aos meus pais, José e Vani, por terem me proporcionado todas as condições para essa conquista a qual dedico a vocês.

À Escola de Minas pelo ensino de qualidade proporcionado.

Ao programa Escuela de Verano — DELPHOS, por ter sido fator crucial para meu amadurecimento acadêmico e pessoal.

À CSN Mineração Casa de Pedra por ter sido fonte de conhecimentos e desenvolvimento profissional.

A Heuzer Montes, Aline Aparecida e Sandro Aurélio por todo ensinamento, pela oportunidade e pela credibilidade para que eu pudesse desenvolver este trabalho e me tornar a profissional que sou hoje.

A toda equipe de perfuração e desmonte da CSN Mineração Casa de Pedra, por apoiar minhas ideias e torná-las práticas.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Carlos Enrique Arroyo Ortiz, pelo suporte, pela confiança e pela orientação neste trabalho.

Às famílias Júlio e Fernandes por todo o carinho e incentivo.

Aos meus amigos Rafael Viana e Fernanda Ilkiu, por estarem sempre presentes em todos os momentos.

À República Sonegada e à Tomara ki Caia por terem sido meu lar inicial, e à casa 05 por estar comigo durante minha graduação.

Ao meu amor, Lincoln Maldini pelo companheirismo e parceria.

A todos que passaram pela minha vida, pela fraternidade, momentos de felicidades e aprendizados compartilhados.

RESUMO

Perfuração e desmonte são operações de grande importância dentre os processos envolvidos em mineração a céu aberto. A busca por otimização desses processos deve ser constante a fim de que essas atividades possam ser feitas de formas mais efetivas e rentáveis para as empresas. Sendo o desmonte responsável em média por 20% do custo unitário da produção; são muitos os fatores determinantes ditados através das condições existentes de campo e por considerações econômicas para a escolha de qual é o melhor explosivo a ser aplicado. Este trabalho busca identificar os privilégios técnicos do uso da emulsão bombeada em comparação ao blendado, e qual proporciona maior custo-benefício durante o desmonte de corpos rochosos realizado com explosivos. A presente pesquisa apresentou resultados significativos na comparação da eficiência do uso da emulsão bombeada em relação ao explosivo blendado e suas aplicabilidades, e apontou melhor custo-benefício nos processos de detonações dos corpos rochosos, em uma empresa mineradora de ferro, localizada na região central, mais conhecida como quadrilátero ferrífero de Minas Gerais. A introdução de explosivos blendados visa a reduzir custos com explosivos e perfuração, menor número de manobras das unidades móveis de bombeamento e ergonomia do trabalho, além de promover melhor fragmentação e conseqüentemente maior produtividade de britadores e equipamentos. Este trabalho busca analisar tecnicamente e economicamente a utilização de explosivos blendados nos processos de perfuração e desmonte. São demonstradas formas de se fazerem análises econômicas prévias pela metodologia PDCA a fim de que as otimizações aplicadas atinjam uma meta de economia de R\$ 3.000.000,00 com explosivos em uma projeção anual.

Palavras-chave: Perfuração. Desmonte. Explosivos Blendados. Malha de perfuração. Mineração a céu aberto. Ferramenta PDCA.

ABSTRACT

Drilling and blasting are important unit processes among the open pit mining operations. Optimization of these operations ought to be constantly performed, in order to make them more effective and economically interesting for the companies. The dismantling is responsible on average for 20% of the unit cost of production; there are many determining factors dictated by the existing field conditions and economic considerations for choosing which is the best explosive to be applied. This work seeks to identify the technical privileges of using pumped emulsion in comparison to blended one, and which one offers greater cost-benefit during the dismantling of rock bodies carried out with explosives. The present research results obtained in the comparison of the efficiency of the use of the pumped emulsion in relation to the blended explosive, its applicability and pointed out the best cost-benefit in the processes of detonation of rock bodies, in an iron mining company, located in the central region, better known as the Iron Quadrangle of Minas Gerais. The introduction of blended explosives aims to reduce costs with explosives and drilling, fewer maneuvers by mobile pumping units, work ergonomics, in addition to promoting better fragmentation and consequently greater productivity of crushers and equipment. This work seeks to technically and economically analyze the use of blended explosives in drilling and blasting processes. Ways to carry out previous analyzes using the PDCA methodology are demonstrated so that the applied optimizations reach a savings target of R\$ 3.000.000,00 with explosives in an annual projection.

Keywords: Drilling. Blasting. Blended explosive. Perforation mesh. Open pit mining. PDCA Tool.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Resumo dos mecanismos de ruptura da rocha	21
Figura 2 - Parâmetros geométricos de um plano de fogo	23
Figura 3 - a) Malha quadrada (b) Malha retangular (c) Malha estagiada.....	25
Figura 4 - Ciclo de PDCA utilizado como ferramenta	28
Figura 5 - Exemplo de malhas para diretrizes	41
Figura 6 - Áreas testes 7K, 11J e 10K	42
Figura 7 - Imagem após desmonte da área 7K	48
Figura 8 - Imagem após desmonte da área 11J.....	54
Figura 9 - Imagem após desmonte da área 10K	57
Figura 10 - Imagem após desmonte da área 7k - teste final 1	62
Figura 11 - Imagem após desmonte da área 7K - teste final 2	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição de Emulsões Explosivas.....	26
---	----

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Modelos dos Planos de Fogo com ANFO e emulsão bombeada “convencional” e blendado (70/30).....	31
Quadro 2 - Relação de custos com insumos.....	34
Quadro 3 - Explosivos comparados da empresa X e Y.....	36
Quadro 4 - Simulador de malhas por densidade.....	40
Quadro 5 - Planilha da área 7K - carregamento com blendado.....	43
Quadro 6 - Resultado	46
Quadro 7 - Planilha da área 7K - carregamento “convencional”	47
Quadro 8 - Análise econômica da área 7K - carregamento “convencional”	47
Quadro 9 - Análise econômica da área 7K - carregamento com blendado	48
Quadro 10 - Dados gerais da área 7K	49
Quadro 11 - Resultados da área 7K.....	50
Quadro 12 - Relação de custos de insumos	51
Quadro 13 - Análise econômica da área 11J	52
Quadro 14 - Planilha da área 11J - carregamento com blendado.....	53
Quadro 15 - Resultado	53
Quadro 16 - Relação de custos de insumos	55
Quadro 17 - Análise econômica da área 10K.....	55
Quadro 18 - Planilha da área 10K - carregamento com blendado.....	56
Quadro 19 - Resultado	56
Quadro 20 - Dados gerais da área 10K	58
Quadro 21 - Resultado da área 10K	59
Quadro 22 - Relação de custos de insumos do teste final	61
Quadro 23 - Planilha da área 7K: carregamento com blendado - teste final 1	61
Quadro 24 - Resultados	61
Quadro 25 - Análise econômica dos testes finais da área 7k	62
Quadro 26 - Resultados do teste final 1 da área 7K	63
Quadro 27 - Planilha da área 7K: carregamento com blendado - teste final 2.....	64
Quadro 28 - Resultados	64
Quadro 29 - Análise econômica da área 7K - teste final 2.....	65
Quadro 30 - Resultados do teste final 2 da área 7K	66
Quadro 31 - Dados gerais da área 7K do teste final 2	67
Quadro 32 - Análise cronológica de viabilidade do projeto.....	69

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1- Gráficos de massa desmontada	15
Gráfico 2 - Médias de toneladas por furo, carga de coluna e razão de carga	39
Gráfico 3 - Tipos de malhas em m ² para cada tipo de explosivo	39
Gráfico 4 - Medição de Velocidade de Detonação da área 7K	49
Gráfico 5 - Resultado de fragmentação da área 7K.....	51
Gráfico 6 - Medição de Velocidade de Detonação da área 10K	58
Gráfico 7 - Resultado de fragmentação da área 10K.....	60
Gráfico 8 - Resultado de fragmentação da área 7K do teste final 1	64
Gráfico 9 - Resultado de fragmentação da área 7K do teste final 2	67
Gráfico 10 - Medição de Velocidade de Detonação da área 7K - teste final 2	68

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 Objeto de Estudo	14
1.2 Problemática	15
1.3 Justificativa	16
1.4 Objetivos	16
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
2.1 Caracterização dos Maciços Rochosos	17
2.2 Propriedades físicas e mecânicas das rochas	17
2.3 Descontinuidades	18
2.4 Tipos de descontinuidades	18
2.5 Mecanismos de Fragmentação da Rocha	20
2.6 Explosivos.....	21
2.7 Propriedades dos explosivos.....	22
2.8 Parâmetros de design de carregamento com explosivos.....	23
2.9 Malhas de perfuração	24
2.10 Explosivo blindado	25
2.11 Explosivo bombeado	255
2.12 Definição de PDCA.....	26
3 METODOLOGIA	28
3.1 PDCA.....	28
3.2 Projeto Piloto	29
3.3 Interpretação dos dados.....	30
4 CASO DE ESTUDO.....	33
4.1 Memória de cálculo	33
4.2 Explosivos das empresas comparadas “X” e “Y”	35
4.3 Malhas pré-definidas.....	39
4.4 Testes de desmonte da área 7K	43
4.5 Testes de desmontes da área 11J.....	51
4.6 Teste de desmonte da área 10K.....	54
4.7 Testes finais de desmonte da área 7K.....	60
4.7.1 Teste final 1 da área 7K.....	60

4.7.2 Teste final 2 da área 7K.....	64
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	69
6 CONCLUSÃO.....	70
REFERÊNCIAS.....	72

1 INTRODUÇÃO

1.1 Objeto de Estudo

O objeto de estudo deste trabalho refere-se a uma das unidades de uma companhia localizada no quadrilátero ferrífero. Sociedade por ações de capital aberto, foi fundada em 9 de abril de 1941. A Companhia tem sede e foro na Cidade de São Paulo, Estado de São Paulo, e, segundo estatuto social, tem por objeto a fabricação, a transformação, a comercialização e inclusive a importação e a exportação de produtos siderúrgicos e subprodutos derivados da atividade siderúrgica, bem como a exploração de quaisquer outras atividades correlatas e afins, que direta ou indiretamente digam respeito às finalidades da companhia, tais como: indústrias de mineração, de cimento e de carboquímicas, fabricação e montagem de estruturas metálicas, construção, transporte, navegação, atividades portuárias, bem como geração, gestão e comercialização de energia em diferentes formas e modalidades. Ainda, há participação no capital de outras sociedades nacionais ou internacionais constituídas sob qualquer forma societária.

Segundo informações do site da companhia, é ela a segunda maior exportadora de minério de ferro do Brasil e está entre as cinco mais competitivas no mercado transoceânico. Com reservas certificadas em mais de 3 bilhões de toneladas, a empresa detém diferentes minas, complexo de beneficiamento, participação na ferrovia MRS e terminal cativo para exportação de minério de ferro no Porto de Itaguaí (TECAR).

É a mineração de ferro mais antiga do Brasil. Os ativos de alta qualidade encontram-se no quadrilátero ferrífero. Além disso, a empresa possui uma mina a qual produz três tipos de calcário, matéria prima na fabricação de aço e clínquer para o cimento.

A unidade em estudo detém 6 bilhões de toneladas em recursos e 3 bilhões de toneladas em reservas segundo o site da instituição.

A empresa possui uma ampla frota de equipamentos de infraestrutura e de operação. O minério é lavrado por escavadeiras hidráulicas, tratores e pás carregadeiras em conjunto às operações de perfuração de desmonte. O minério é transportado por caminhões Caterpillar com capacidade de 240 toneladas da série 793-B e segue para o beneficiamento na Planta Central (rota úmida) ou nas Plantas Móveis (rota seca) localizadas próximas às áreas de extração.

Os produtos do minério de ferro destinados à exportação são transportados pela empresa MRS, da qual a companhia possui parte das ações, e destinados para o Porto de Itaguaí (TECAR), no Estado do Rio de Janeiro.

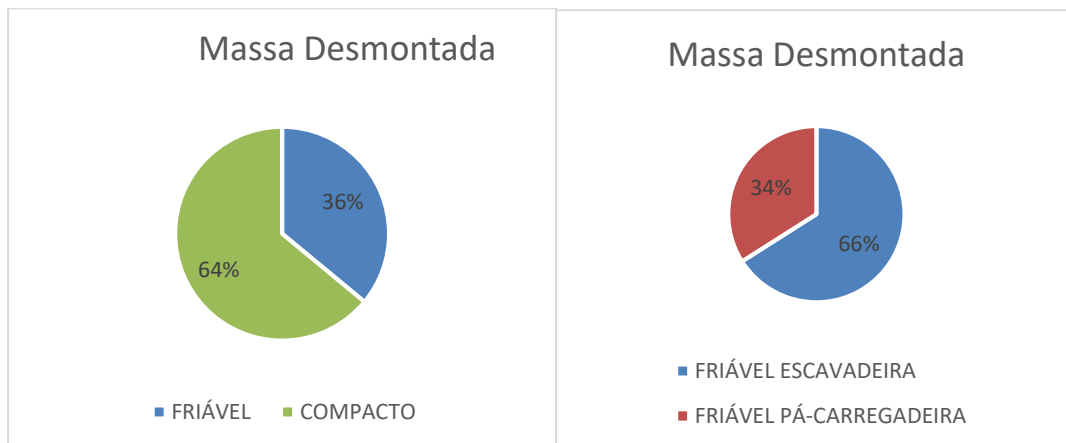
1.2 Problemática

A mina em estudo possui 36 litologias, e grande parte delas apresentam características friáveis. As escavadeiras e pás carregadeiras normalmente efetuam suas operações em cargas desmontadas, portanto são efetuados desmontes diariamente nos diferentes corpos da unidade.

Segundo dados coletados na empresa no ano de 2019, foram desmontados um total de 46.175.847,07 t de rochas, correspondente a 100% da movimentação da mina neste período. Da massa total movimentada, 32.784.851,42 t de rocha, foi realizado por meio de desmonte com explosivos em litologias friáveis na referente unidade, representando aproximadamente 71% da massa total acima citada. O restante da massa, 13.390.995,56 t de rocha, 29% “insitu”, foi desmontada por equipamentos auxiliares, tratores de esteira e ou escavadeiras Shovel.

Desse valor desmontado em litologias friáveis, 34% da massa foi gerada para pás carregadeiras e 66% para escavadeiras. Esses dados estão representados no Gráfico 1.

Gráfico 1- Gráficos de massa desmontada



Fonte: Companhia (2019)

De acordo com a Gerência de Infraestrutura de Mina, foram gastos 7.299.503 kg de blendado nesses desmontes em 2020, gerando nesse ano um gasto R\$19.897.322,00 com as operações de desmonte com explosivos. Esses gastos representam 8,3% do orçamento mensal aplicados em perfuração, desmonte e infraestrutura.

No intuito de reduzir os custos com desmonte paralelo à perfuração, foi abordada entre

as gerências da empresa a necessidade de otimizar o carregamento e as malhas de perfuração aplicadas em litologias friáveis e semi-compactas, para escavadeiras e pás mecânicas, visto que os desmontes anteriormente praticados foram satisfatórios e poderiam sofrer modificações sem provocar impedimentos operacionais.

1.3 Justificativa

Otimizar a razão de carga por meio de diferentes técnicas implica em redução de custos, melhorias em produtividade e indicadores das operações de perfuração e desmonte. A introdução da técnica de explosivos blendados nessas operações pode atender a esses quesitos, além de promover ergonomia do trabalho.

Toda redução de custos sem que se promovam aspectos inseguros e improdutivos é interessante para a empresa.

1.4 Objetivos

O principal objetivo deste trabalho é fazer uma comparação entre a aplicação de explosivo blendado x a aplicação de emulsão com carga de fundo e ANFO com carga de coluna, a fim de promover uma redução nos custos de perfuração e desmonte em 15% por ano e garantir uma melhor fragmentação e um aumento de 25% no percentual em metros quadrados da malha de perfuração, assim como ganho ergonômico.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Caracterização dos Maciços Rochosos

O maciço rochoso apresenta peculiaridades próprias a cada região, cada qual com propriedades e características específicas. O desempenho da perfuração, assim como do desmonte apresentam ligações diretas com essas propriedades, uma vez que para que se obtenham resultados satisfatórios é necessário que se faça uma boa interpretação do maciço. Para isso, portanto, é necessário conhecer o conjunto de parâmetros que mais representam a condição geotécnica do maciço.

2.2 Propriedades físicas e mecânicas das rochas

As propriedades físicas das rochas caracterizam o estado físico da mesma, enquanto as propriedades mecânicas são as variedades dessas propriedades (densidade, porosidade, dureza, resistência mecânica, deformabilidade, tensão “in situ”).

As propriedades que mais influenciam nas operações de perfuração e desmonte são:

- Densidade ou peso específico: depende principalmente do peso específico de seus elementos constituintes e de suas porosidades;
- Porosidade: A quantidade de água ou outro fluido, armazenado em um determinado material (rocha, solo) depende da sua porosidade. A porosidade é normalmente expressa como a razão percentual entre o volume de interstícios ou vazios, e o volume total da rocha ou do sólido;
- Dureza: propriedade geológica que indica a facilidade ou dificuldade com que um mineral presente nas rochas se desgasta quando submetido a ações de forças externas;
- Resistência mecânica: é a tensão na qual o material se rompe quando submetido à ação de uma carga estática ou dinâmica.
- Deformabilidade: propriedade que a rocha possui de alterar sua forma quando for submetida a forças externas, também conhecidas por deformação plástica ou elástica;
- Tensão “in situ”: é definida pela tensão no maciço rochosos no seu estado natural, antes da execução do furo é a pressão referente ao próprio peso dos maciços rochosos.

2.3 Descontinuidades

São as descontinuidades, com efeito, que condicionam as propriedades geotécnicas de grande número de terrenos (maciços terrosos rijos e maciços rochosos) conferindo-lhes um comportamento em termos de deformabilidade, resistência ao corte e permeabilidade substancialmente diferente do material que constitui esses maciços.

A análise de estabilidade de blocos em fundações rochosas requer o conhecimento de informação fidedigna de dois tipos de características das descontinuidades: – orientação e dimensões das descontinuidades, as quais definem a forma e grandeza dos blocos, e a direção segundo a qual o bloco pode deslizar; – as propriedades de resistência ao deslizamento das descontinuidades, que determinam a resistência ao escorregamento dos blocos.

2.4 Tipos de descontinuidades

Sob a designação de descontinuidade engloba-se qualquer entidade geológica que interrompa a continuidade física de uma dada formação. As caracterizações geológicas classificam geralmente as descontinuidades de acordo com o modo da sua formação. Isto é usual na geologia de engenharia porque descontinuidades de cada categoria têm propriedades similares, no que respeita às dimensões e propriedades de resistência ao deslizamento, que podem ser utilizadas nas análises preliminares das condições de estabilidade do local. Apresentam-se em seguida os tipos mais frequentes de descontinuidades que se podem observar na natureza.

a) Falha (*fault*): fratura em que houve um deslocamento de grandeza significativa ao longo da superfície de separação das partes, esta usualmente designada por superfície ou plano de falha. As superfícies dos blocos que delimitam a falha designam-se por paredes de falha e o espaço compreendido entre estas designa-se por caixa de falha. Uma parede de falha polida por atrito entre blocos designa-se por espelho de falha (*slickenside*), enquanto que a brecha de esmagamento das paredes de uma falha é designada por milonito. As falhas raramente são unidades planas singulares já que ocorrem normalmente como conjuntos de descontinuidades paralelas ou sub-paralelas, constituindo famílias, ao longo das quais se registou movimento numa maior ou menor extensão.

b) Superfície de estratificação (*bedding*): descontinuidade paralela à superfície de deposição

dos sedimentos, a qual pode ou não ter uma expressão física. De notar que a atitude original da superfície de estratificação não deverá ser assumida como horizontal.

c) Foliação (*foliation*): descontinuidade determinada pela orientação paralela dos minerais lamelares ou bandas minerais nas rochas metamórficas.

d) Diaclase (*joint*): fratura em que não houve significativo deslocamento ao longo da superfície de rotura. Em geral diaclases intersectam superfícies primárias tais como superfícies de estratificação, de clivagem e de xistosidade. Designam-se por diaclases de corte (*shear joint*) aquelas que são devidas a tensões de corte e por diaclases de tração (*tension joint*) as que são originadas por tensões de tração.

Um conjunto de diaclases sensivelmente paralelas numa dada região designa-se por família de diaclases (*joint set*), enquanto o conjunto de duas ou mais famílias de diaclases nessa região designasse por sistema de diaclases (*joint sistem*). Duas famílias de diaclases com orientações aproximadamente normais entre si designam-se por ortogonais. No caso das diaclases, é relativamente frequente a ocorrência de três famílias principais com atitudes sensivelmente normais entre si, como ocorre muitas vezes em maciços de rochas ígneas, ou mesmo nos maciços sedimentares e metamórficos em que uma das famílias corresponde, respectivamente, às superfícies de estratificação e de xistosidade.

e) Clivagem de fratura (*cleavage*): Fraturas paralelas formadas em camadas rochosas de baixa resistência, ditas incompetentes, intercaladas em camadas com graus de resistência superior (competentes) são descontinuidades conhecidas por clivagens de fratura. Tais tipos de descontinuidades podem, por exemplo, formar-se num xisto argiloso intercalado entre duas camadas de arenito de resistência muito superior que, ao serem dobrados, levam ao surgimento de superfícies de fratura oblíquas à superfície de estratificação. Subentende-se, nesta designação, que a formação das superfícies de clivagem não é controlada pela orientação paralela das partículas minerais.

f) Xistosidade (*schistosity*): é a foliação no xisto ou em outra rocha cristalina de grão grosseiro resultante da disposição em planos paralelos dos minerais do tipo lamelar e/ou prismáticos, tal como a mica.

2.5 Mecanismos de Fragmentação da Rocha

A fragmentação do furo acontece durante a pressão inicial de detonação. Inicialmente, segundo Alonso, Gómez, Herbert (2013), produz-se um forte impacto devido à onda de choque, vinculada à Energia de Tensão durante um curto espaço de tempo. Durante o processo de detonação, os explosivos são rapidamente convertidos em um gás de alta temperatura e pressão. Segundo INC (2014), em operações típicas, uma coluna de explosivo de 35 pés é consumida em menos de 2 milissegundos e pode gerar uma pressão no furo de detonação de até 200.000 libras.

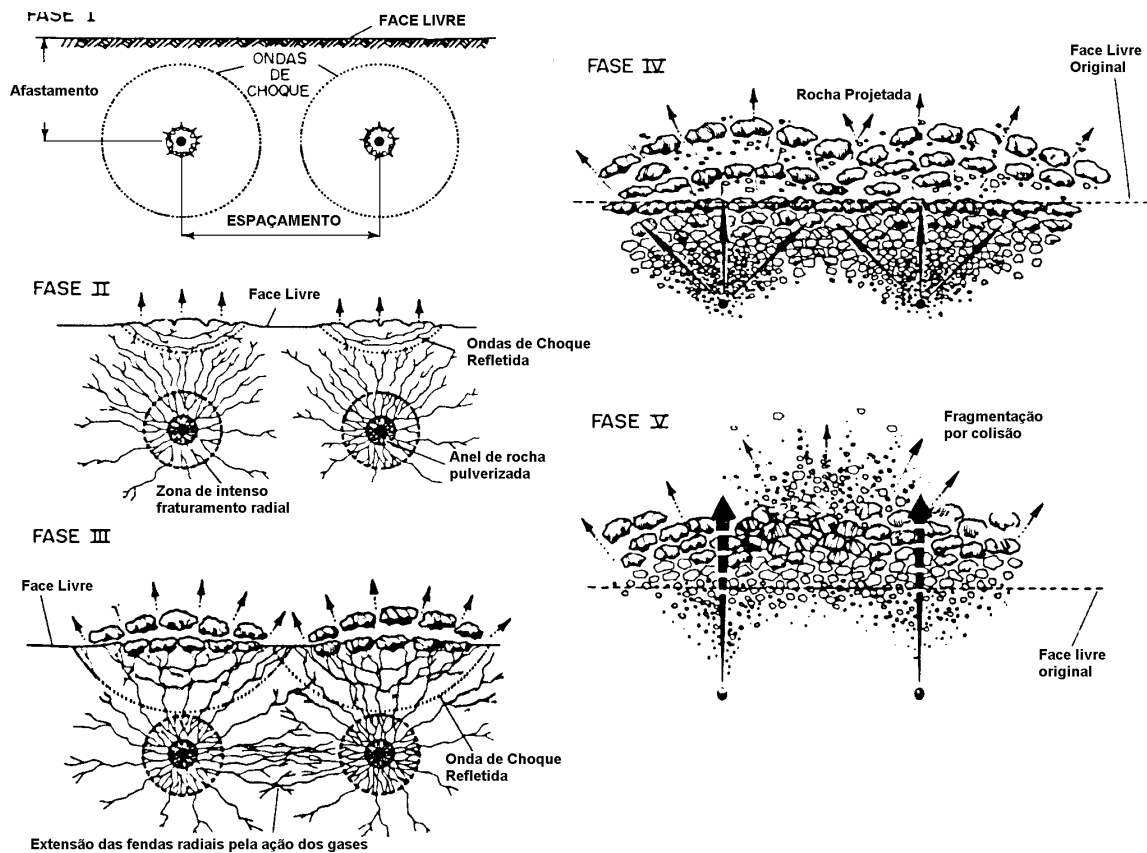
Imediatamente, nas redondezas da carga as pressões geradas pela detonação são propagadas pelo maciço rochoso em forma de ondas de tensões. Segundo INC (2014), as pressões iniciais dessas ondas de choque são bem maiores que a resistência da rocha. Em uma zona de duas a três vezes o diâmetro do furo, o maciço é fragmentado.

As ondas de choque viajam através das rochas adjacentes, formam-se fissuras e os gases da explosão se infiltram nas fissuras para fragmentar a rocha. As ondas formadas comprimem o maciço radialmente. Quando os pulsos formados pelas ondas de tensão interagem com fissuras e poros, o pulso é refletido. As fraturas promovem zonas de alívio das tensões, conseqüentemente expandindo e formando novas fissuras.

Posteriormente, os gases produzidos se movem e fragmentam o maciço rochoso, provocando a ruptura flexural. Segundo INC (2014), assim que ocorre esse último processo, as tensões são aliviadas e posteriores processos de fragmentação ocorrem devido a colisões entre os fragmentos durante o lançamento da carga desmontada.

A energia de detonação se move na direção da linha de menor resistência, ou seja, a face livre. A rocha é lançada da zona de detonação em direção à linha de menor resistência, conseqüentemente deixando uma zona de detonação desimpedida, com base em uma sequência lógica determinada por meio de temporizações da detonação. A Figura 1 ilustra o resumo dos mecanismos de ruptura dos maciços rochosos.

Figura 1 - Resumo dos mecanismos de ruptura da rocha



Fonte: Alonso; Gómez Herbert (2013)

2.6 Explosivos

Segundo Llera et al. (2013), os explosivos industriais são constituídos de uma mistura de combustíveis e comburentes que, devidamente iniciados, dão lugar a uma reação química cuja característica fundamental é sua rapidez. A reação gerada produz gases de alta pressão e temperatura, que serão as propriedades encarregadas de promover a fragmentação e o movimento do maciço rochoso.

Cada tipo de explosivo possui uma composição específica e definida. Isso pressupõe que suas características são diferentes e, conseqüentemente, cada explosivo tem uma aplicação diferente em função das necessidades do desmonte. Normalmente, estão vinculados a compostos de nitratos e são comumente aplicados em mineração e em construções civis.

Este trabalho tratará apenas do explosivo industrial e praticado no caso de estudo, sendo ele o blendado.

O explosivo denominado ANFO (Ammonium Nitrate and Fuel Oil) é uma mistura de Nitrato de Amônio Granulado e Óleo Combustível. Possui potência média, baixa densidade (em torno de $0,8 \text{ g/cm}^3$), baixa resistência à água e velocidade de detonação entre 2.000 a 3.000 m/s. Devido a sua consistência granular e sua solubilidade, não resiste à água, porém isso facilita seu carregamento mecanizado.

As emulsões são produtos à base de água e óleos, que consistem em sais de nitrato em solução, mais combustíveis e emulsificantes. Segundo Alonso, Gómez, Herbert (2013), suas principais características são resistência à água e alta velocidade de detonação, entre 4.500 e 5.500 m/s. Sua densidade é próxima de $1,15 \text{ g/cm}^3$.

2.7 Propriedades dos explosivos

Assim como apresentado anteriormente, os explosivos possuem diferentes propriedades. A densidade é a relação entre a massa e o volume dessa massa explosiva definida em g/cm^3 . Segundo Silva (2014), para detonações difíceis, em que uma fina fragmentação é desejada, recomenda-se um explosivo denso.

Na detonação de uma coluna de carga explosiva, ocorrerá a transformação dessa em um volume de gases a elevadas temperaturas e pressões. A velocidade em que se produz essa transformação se denomina velocidade de detonação, sendo sua unidade medida em metros por segundo (m/s). De acordo com Silva (2014), a velocidade de detonação de um explosivo (VOD) é o índice mais importante do desempenho do mesmo e é um fator determinante na seleção de um explosivo para determinados desmontes de rochas. Opta-se por explosivos que se detonam lentamente, permitindo que sua energia se desenvolva de forma progressiva, quando são aplicados a rochas brandas. Do mesmo modo, para rochas mais compactas, e quando se pretendem fragmentações mais intensas, é recomendável o uso de explosivos dotados de maior velocidade de detonação.

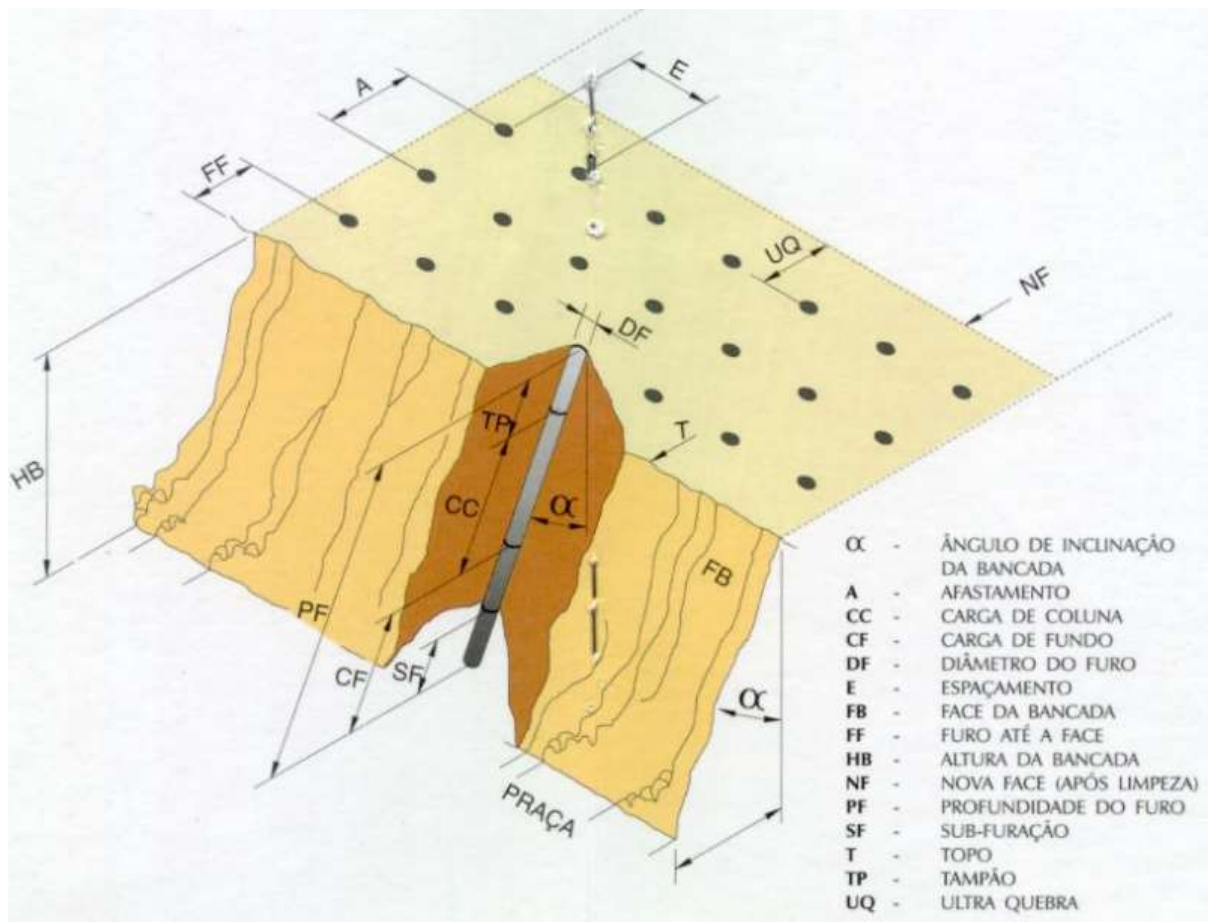
Resistência à água é uma das características mandatórias na seleção de explosivos. Segundo Alonso, Gómez, Herbert (2013), se entende por resistência à água a característica pela qual um explosivo, sem necessidade de tratamentos superficiais, mantém suas propriedades inalteráveis durante um período em contato com a água. As emulsões resistem perfeitamente quando são carregadas em furos de detonação com água, entretanto produtos granulados como o ANFO não resistem à água pelo seu caráter solúvel.

2.8 Parâmetros de design de carregamento com explosivos

As características das malhas de perfuração são muito importantes e podem representar uma variação muito grande na qualidade do desmonte de rochas. Elas são cruciais para um bom planejamento e uma execução coerente do desmonte de rochas.

Na Figura 2, podemos observar algumas variáveis geométricas em um plano de fogo.

Figura 2 - Parâmetros geométricos de um plano de fogo



Fonte: Silva (2014)

O afastamento é definido pela menor distância do furo até sua face livre. É um dos parâmetros críticos em um dimensionamento de malhas de perfuração e desmonte. Um afastamento excessivo pode provocar ultra lançamento dos fragmentos, devido à distância excessiva à face livre, e pode provocar uma fragmentação grosseira, necessitando posteriormente de um desmonte secundário.

O espaçamento é a menor distância entre os furos de uma mesma linha. Assim como o afastamento, a definição do tamanho do espaçamento deve ser devidamente dimensionada.

Espaçamentos menores do que o afastamento podem provocar fragmentação grosseira e espaçamentos excessivos são indicados apenas para litologias friáveis.

A subperfuração é o comprimento perfurado abaixo da cota definida à praça do equipamento de lavra. Essa técnica consiste em garantir que o maciço rochoso estará fragmentado como necessário, para que o equipamento de corte ou de carga consiga atingir a cota da praça definida.

O tampão é a coluna de material, responsável pelo confinamento dos gases e energia dos furos de detonação. Essa coluna pode ser carregada por material inerte presente na praça de perfuração ou algum outro material que promova o confinamento desejado.

O diâmetro do furo é definido pelos equipamentos e acessórios utilizados durante o processo de perfuração das malhas de detonação.

2.9 Malhas de perfuração

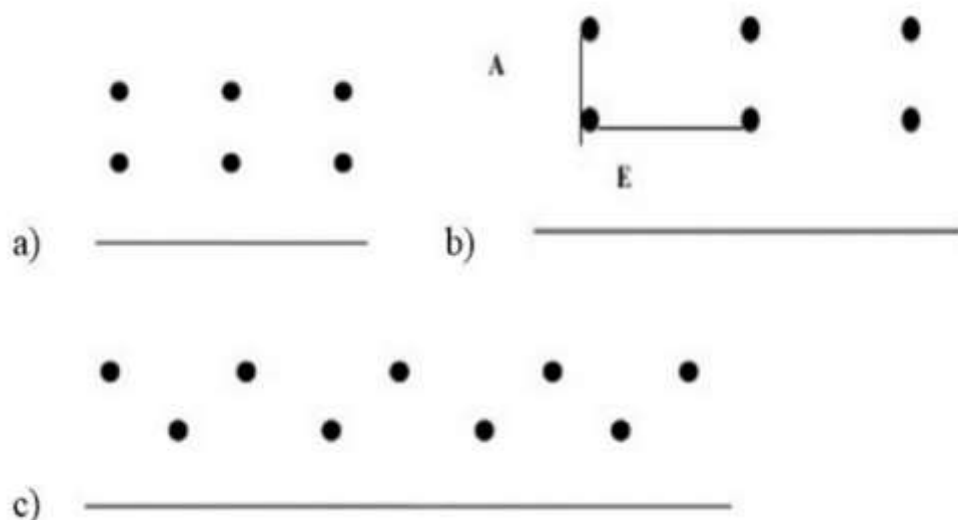
Silva (2014), explica que a geometria das malhas de perfuração se divide em:

- Quadrada
- Retangular
- Estagiada
- Triângulo equilátero
- Malha alongada

Segundo o mesmo autor, as malhas quadradas possuem afastamento igual ao espaçamento e as retangulares possuem espaçamento maior que afastamento, o que em alguns casos pode gerar ultra lançamento. Jimeno et al. (1987), complementa dizendo que as malhas quadrada e retangular são normalmente utilizadas devido à facilidade da marcação e perfuração, ainda que percam no quesito efetividade.

Silva (2014), pensa que as malhas em forma de triângulo equilátero, ditas estagiadas e que possuem relação espaçamento/afastamento igual a 1,15 são indicadas para rochas compactas e duras. Jimeno et al. (1987), adiciona que a relação $E/A=1,15$ é usada para furos verticais e que $E/A = 1,15 \cos U$, onde U é o ângulo entre os furos e a vertical, é utilizada para furos inclinados, sendo E o espaçamento e A o afastamento. Além disso, o autor relata que em malhas quadradas existe uma deficiência de cerca de 23% de energia em relação às estagiadas. Os diferentes tipos de malha são retratados nas Figura 3.

Figura 3 - a) Malha quadrada (b) Malha retangular (c) Malha estagiada



Fonte: Adaptado de Silva (2014)

2.10 Explosivo blendado

O blendado um tipo de explosivo utilizado em sua maior frequência em minas a céu aberto onde se mesclam o ANFO e a EMULSÃO BOMBEADA no intuito de aumentar a performance X potência de ruptura do maciço rochoso no ato da detonação. A sua aplicação pode ser feita por meio de MMU's (Unidades de Aplicação Moveis) nas fórmulas: F 80 (80X20) 80% de EMULSÃO BOMBEADA X 20% de ANFO - F 70 (70X30) 70% de EMULSÃO BOMBEADA X 30% de ANFO - F 60 (60X40) 60% de EMULSÃO BOMBEADA X 40% de ANFO. Nas situações empregadas acima faz-se a mescla por meio de bombeamento.

Pode-se optar pela aplicação por meio do sistema de derramamento em que as fórmulas são aplicadas nos seguintes parâmetros: 50X50 – 50% ANFO X 50% EMULSÃO BOMBEADA; 40X60 – 60% ANFO X 40% EMULSÃO BOMBEADA; 30X70 – 70% ANFO X 30% EMULSÃO BOMBEADA.

2.11 Explosivo bombeado

As emulsões explosivas (explosivos bombeados) são sistemas compostos por uma fase aquosa rica em oxidantes e por uma fase combustível. Quimicamente, são sistemas polidispersos de dois líquidos imiscíveis (água e óleo) por meio da criação de uma interface; trata-se de uma suspensão significativamente estável de partículas líquidas, organizadas

estruturalmente em micelas, sendo a fase dispersa composta por água e sais oxidantes, e a fase contínua, por óleo combustível e emulsificante. Ela é classificada como macro emulsão do tipo água em óleo (A/O) (WANG, 1994). Esses sistemas são constituídos, principalmente, por nitrato de amônio, e são normalmente aplicados em furos maiores ou iguais a 3” ou, aproximadamente, 75 mm (TAB. 1). (SUDWEEKS, LAWRENCE, 1982; JESSOP, FUNK, 1982; ANEPAC, 2015).

Tabela 1 - Composição de Emulsões Explosivas

Classificação do componente	Nomes dos possíveis ingredientes	Porcentagem (%)
Oxidante	Nitrato de amônio (AN), nitrato de sódio (SN), nitrato de cálcio (CN), perclorato de sódio (SP), perclorato de amônio (AP), nitrato de ureia (UN), ácido nítrico (HNO ₃)	50-85
Combustível	Combustíveis insolúveis em água (como parafina, óleo combustível)	2-7
Água		8-15
Espessante solúvel em água	Raramente utilizado	
Tensoativo	Emulsificantes com HLB entre 3 e 7 ou emulsificantes como Span-80.	0,5-2,5
Sensibilizante solúvel em água	Não adicionar ou adicionar nitrato de monometilamina (MMAN), ácido nítrico (HN) etc	0-30
Sensibilizante insolúvel em água	Alumínio em pó, compostos nitro	0-15
Sensibilizantes físicos	Microbalões de vidro, perlita expandida, espumante químico etc	15-35 (v.v-1)
Aditivos	Estabilizante, promotor de emulsificação, modificador cristalino	0,05-1,0

Fonte: Wang (1994)

2.12 Definição de PDCA

O conceito do Ciclo PDCA surgiu na década de 30, idealizado pelo americano Walter Andrew Shewhart. Deming foi responsável por sua ampla divulgação ao levá-lo para o Japão e aplicar na indústria local. Sua definição de da pelas iniciais em inglês das palavras:

- Plan
- Do
- Check
- Act

Em português, temos:

- Planejar
- Fazer
- Verificar
- Agir

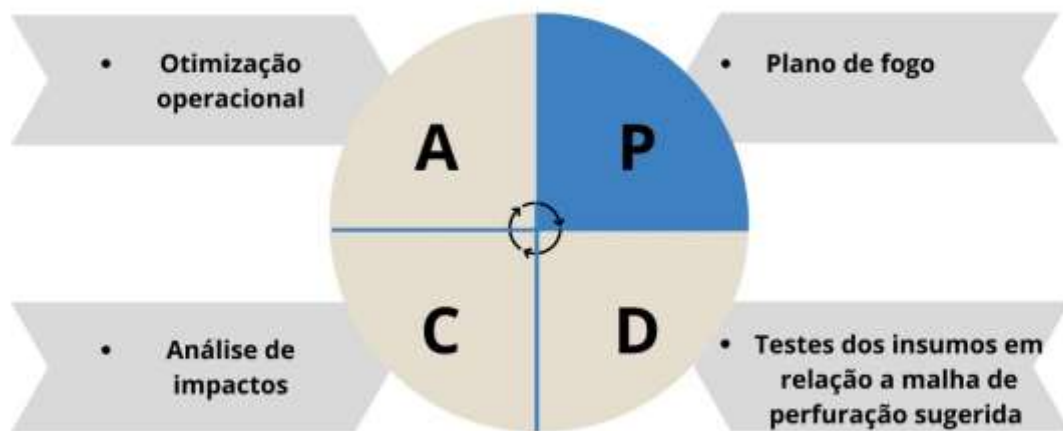
Como o próprio nome diz, trata-se de um ciclo. Portanto, a melhoria se torna contínua a cada vez que o ciclo é ativado e retorna ao seu início.

3 METODOLOGIA

3.1 PDCA

Para a realização do trabalho, foi utilizado o método de PDCA assim como representado na Figura 4.

Figura 4 - Ciclo de PDCA utilizado como ferramenta



Fonte: A autora (2022)

Para obter a aprovação gerencial e operacional para a execução do projeto, foi necessário produzir um projeto piloto, apresentando os aspectos econômicos, produtivos, de meio ambiente e segurança, além de busca de informações com fornecedores dos insumos a serem utilizados e entre as equipes de perfuração e desmonte, pois qualquer experimento feito envolveria os ativos da empresa, compreendendo, portanto, a maior parte das atividades.

Após a aprovação, foi definido um plano de ação com todas as atividades a serem desenvolvidas e com suas respectivas *deadlines*, a fim de manter o desenvolvimento efetivo e observar a aderência das equipes às atividades determinadas.

Em seguida foram definidas as áreas a serem aplicadas a técnica de acordo com dados da equipe de geologia, em relação às litologias e às massas a serem desmontadas de acordo com a equipe de planejamento de lavra.

Definidas as áreas, foram executados os desmontes em suas respectivas datas definidas pela equipe de perfuração e desmonte e a relação de malhas a serem aplicadas X explosivos a

serem analisados.

Os desmontes foram registrados em vídeos e fotografias. Os insumos gastos foram relatados nos dados coletados em campo e registrados no plano de fogo. Por meio desses dados e registros, foi possível analisar os impactos em vibrações, geração de particulados, projeção de fragmentos e os gastos financeiros com explosivos.

Comparando-se os impactos gerados pelo desmonte executado e os que haveriam pelo método convencional, foram feitas simulações em softwares cedidos pelas empresas X e Y. Onde foram observados vibrações, melhor temporização de acordo com a litologia existente, curva de fragmentação, plataforma de carregamento do horizonte do furo e otimização de tampão. Assim, definindo as ações para otimizar as operações para que o projeto seja viável em termos de segurança, meio ambiente, ergonomia e principalmente economicamente.

3.2 Projeto Piloto

Na implementação do projeto piloto foram sugeridos testes práticos com explosivos blendados e bombeados observando sua densidade, VOD (Velocidade de Detonação) e sua pressão de detonação, além da análise de fragmentação, na intenção de comparar as performances, ganhos na malha de perfuração em m² e o custo-benefício, visando a atingir uma redução nos custos de aplicação de explosivos em bancada.

Para atingir esse intento será necessário correlacionar a performance do explosivo blendado/bombeado e a fragmentação/cominuição pós-detonação balizando com o possível aumento da malha de detonação em seu percentual (%) em m². Os explosivos a serem comparados serão providos pelas empresas “X” e “Y”.

Para que o projeto atinja o seu intento, opera-se a substituição da aplicação do misto de explosivos aplicados atualmente para o desmonte de rochas na empresa, sendo o preenchimento da base de um furo de 14 m, com diâmetro de 9” (228,6 mm), feito por emulsão bombeada F 100 (Fórmula 100) de aproximadamente 100 kg considerando a RLC (Razão Linear de Carga) de 47 kg/m e o preenchimento da coluna do furo feito por ANFO — aproximadamente 300 kg — considerando a RLC de 35 kg/m. O tampão usual corresponde a 5,5 m (carregamento convencional).

$$RLC = \pi * (Df)^2 * \rho / 4000 \text{ (unidade kg/m)}$$

Em que:

RLC – Razão Linear de Carga

Df – Diâmetro do furo (em mm)

ρ – Densidade do Explosivo aplicado

A aplicação do misto de explosivos “Convencional” será substituída pela do explosivo blendado no intuito de melhorar a dinâmica do carregamento dos furos na questão ergonômica e da agilidade no carregamento por meio da aplicação mecanizada pelas MMU’s (Unidades de Aplicação Moveis), já que, no processo da aplicação do misto de explosivos, parte desta era feita de forma manual com sacarias de ANFO.

Na aplicação do blendado em furos também de 14 m, com diâmetro de 9” (228,6 mm), será aplicada no horizonte da coluna uma carga de aproximadamente 394 kg de blendado, considerando uma razão de carga de 47 kg/m.

O projeto foi analisado para utilizar a aplicação de explosivo blendado observando os custos-benefícios e a viabilidade econômica, portanto, haveria uma economia significativa partindo desses dados teóricos. Entretanto o objetivo deste trabalho é garantir com confiabilidade a economia em explosivos a partir da técnica utilizada, portanto somente com os dados obtidos após aplicação da técnica e com dados de campo seria possível fazer uma análise segura.

3.3 Interpretação dos dados

Este trabalho apresentará a análise de diferentes desmontes em diferentes frentes de lavra. Para que as análises econômicas fossem feitas de forma efetiva por meio das planilhas geradas com os dados de campo, foi definida a seguinte metodologia de interpretação de dados (QUADRO 1):

Quadro 1 - Modelos dos Planos de Fogo com ANFO e emulsão bombeada “convencional” e blendado (70/30)

Ângulo		Afast(m)	Esp (m)	Prof. Planejada (M)	Diâmetro de Perfuração (mm)	Litologia	Densidade Rocha g/cm3	Encartuchado	Emulsão Bombeada	Razão Linear de Carga Fundo	ANFO	Nitrato (ANFO Derramado)	Razão Linear de Carga Coluna	Carga Total Planejada (KG)	Tampão Planejado (M)
Inclinação	Face														
10°	L	3,5	7.00	14.00	228.60	HBA	3.416	0.00	100.00	47.20	224.00	0.00	34.89	324.45	5,6
10°	L	3,5	7.00	14.00	228.60	HBA	3.416	0.00	100.00	47.20	224.00	0.00	34.89	324.70	5,6
10°	L	3,5	7.00	14.00	228.60	HBA	3.416	0.00	100.00	47.20	224.00	0.00	34.89	324.70	5,6

Ângulo		Afast(m)	Esp (m)	Diâmetro de Perfuração (mm)	Litologia	Densidade Rocha g/cm3	Profundidade	Encartuchado	Razão Linear de Carga Fundo	Ibenite		Emulsão Bombeada	Nitrato de Amônio (ANFO)	Carga Total (KG)	Tampão Realizado (M)
Inclinação	Face									70%	30%				
10°	L	3,5	7.00	228.60	ICS	3.045	14.00	0.00	44.33	350.00	250.00	100.00	350.90	6.30	
10°	L	3,5	7.00	228.60	ICS	3.045	14.00	0.00	44.33	350.00	250.00	100.00	350.90	6.30	
10°	L	3,5	7.00	228.60	ICS	3.045	14.00	0.00	44.33	350.00	250.00	100.00	350.90	6.30	

Fonte: Dados coletados durante o carregamento (2022)

Profundidade Calculada (m):

A “Profundidade Calculada” é um valor a que se chega a partir dos dados obtidos em campo, calculada pelo somatório das alturas que os explosivos ocupam nos furos com suas massas acrescidas da altura do tampão.

Profundidade Calculada (m) = (MEmulsão (kg)/RLCEmulsão (kg/m)) + (MANFO (kg)/RLCANFO (kg/m)) + Tampão Realizado (m)

Em que:

$$\Phi = 228,6 \text{ mm} = 9''$$

Para o explosivo blendado (Fórmula – 70) 70X30 (70% Emulsão Bombeado X 30% Nitrato de amônia), calcula-se pelo horizonte preenchido pelo explosivo no furo acrescido da altura do tampão.

Profundidade Calculada (m) = (MBlendado (kg)/RLCBlendado (kg/m) + Tampão realizado (m)

Em que:

$$\Phi = 228,6 \text{ mm} = 9''$$

$$RLC = \pi * (Df)^2 * \rho / 4000 \text{ (unidade kg/m)}$$

Em que:

$$\Phi = \text{Diâmetro Teórico (mm)} \rho_{\text{Explosivo}} \text{ fornecido pela empresa "X" e "Y" (g/cm}^3\text{)}$$

$$\text{Diâmetro } 228,6 \text{ mm} = 9'' \text{ – (Teórico)}$$

4 CASO DE ESTUDO

Para o estudo do caso foram definidas as frentes de carregamento correlacionando o tipo de explosivo a ser aplicado versus a malha aplicada. O trabalho será analisado utilizando uma configuração de perfuração, carregamento e design para uma bancada de 13 m e 1 m de subperfuração. O diâmetro de perfuração base será o de brocas tricônicas utilizadas na mina, de 9" (228,5 mm) em malhas triângulo equilátero, substituindo as malhas estagiadas, em litologias friáveis, semi-compactas e compactas.

$$A=(S)^{1/2}/R$$

$$E=A*R$$

$$R=E/A$$

Em que:

R: Relação Espaçamento Afastamento

S: Área (m²)

A: Afastamento

E: Espaçamento

Serão comparados dois tipos de carregamento:

- 1- aplicando-se carga de base (Emulsão Bombeada) e carga de coluna (ANFO) "Convencional";
- 2- aplicando-se blendado 70X30 (Fórmula 70) no horizonte do furo.

4.1 Memória de cálculo

$$HCarga\ Coluna(m) = HFuro - (HTampão + HCarga\ de\ Fundo)$$

$$HCarga\ Coluna(m) = HFuro - (HTampão)$$

$$RLC = \pi * (Df)^2 * \rho / 4000 \text{ (unidade kg/m)}$$

$$HCarga\ de\ Fundo(m) = MEmulsão / RLCEmulsão \text{ (kg/m)}$$

$$MANFO \text{ (kg)} = RLCANFO \text{ (kg/m)} * HCarga\ Coluna \text{ (m)}$$

$$MTotal\ de\ Explosivos \text{ (kg)} = (MANFO + MEmulsão) * Nfuros$$

$$N_{\text{furos}} = \text{Área (m}^2\text{)} / A(\text{m}) * E(\text{m})$$

$$M_{\text{Desmontada (t)}} = A(\text{m}) * E(\text{m}) * N_{\text{furos}} * H_{\text{Bancada}} * \rho_{\text{Litologia}}$$

$$\text{Razão de Carga (g/t)} = M_{\text{Total de Explosivos (kg)}} * N_{\text{furos}} / M_{\text{Desmontada (t)}}$$

Malha Praticada “Convencional” sendo:

Afastamento (m)	Espaçamento (m)	Diâmetro (mm)	Litologia
3,5	7,0	228,6	ICS/IBS

Quadro 2 - Relação de custos com insumos

Código	Denominação	Custo Unitário - Orç.	Custo Unitário - Real
8680322	REAGENTE NITRATO AMONIO FERTILIZ.	R\$ 2,10	R\$ 2,17
8526086	EMULSÃO BOMBEADA	- R\$ 3,89	R\$ 3,99
8680329	ANFO	R\$ 2,10	R\$ 2,17

Fonte: Empresa X (2022)

Os testes foram definidos e realizados nas frentes de lavra mediante o acordo do planejamento de mina e pela gerência de infraestrutura. O tipo de carregamento utilizado nas frentes de lavra definidas foi realizado com explosivo blendado, já que se possui um padrão observado de formato de malha e aplicação do carregamento convencional (CB: Emulsão F100 e CC: ANFO e ou Nitrato de amônio), os quais são denominados por quadrantes (Exemplo: 7K). O trabalho será analisado utilizando uma configuração de perfuração, carregamento e design para uma bancada de 13 m e 1 m de subperfuração. O diâmetro de perfuração base será o de brocas tricônicas utilizadas na mina, de 9” (228,5 mm). A relação da malha será alterada de malha estagiada (Relação E/A = 2) para malha triângulo equilátero (Relação E/A = 1,15) em litologias friáveis, semi-compactas e compactas.

Serão comparados os dois métodos de carregamento: “Convencional”, o qual será o método padrão a ser comparado (CB: Emulsão F100 e CC: ANFO e ou Nitrato de amônio); e pela aplicação do explosivo blendado em todo horizonte da coluna.

Os cálculos dos diferentes carregamentos podem ser feitos utilizando as seguintes

formulações:

$$HCarga\ Coluna(m) = HFuro - (HTampão + HCarga\ de\ Fundo)$$

$$HCarga\ Coluna(m) = HFuro - (HTampão)$$

$$RLC = \pi * (Df)^2 * \rho / 4000 \text{ (unidade kg/m)}$$

$$HCarga\ de\ Fundo(m) = MEmulsão / RLCEmulsão \text{ (kg/m)}$$

$$HCarga\ de\ Coluna(m) = MEBlendado / RLCBlendado \text{ (kg/m)}$$

$$MANFO \text{ (kg)} = RLCANFO \text{ (kg/m)} * HCarga\ Coluna \text{ (m)}$$

$$MTotal\ de\ Explosivos \text{ (kg)} = (MANFO + MEmulsão) * Nfuros$$

$$MTotal\ de\ Explosivos \text{ (kg)} = (MEBlendado) * Nfuros$$

$$Nfuros = Área \text{ (m}^2\text{)} / A(m) * E(m)$$

$$MDesmontada \text{ (t)} = A(m) * E(m) * Nfuros * HBancada * \rho_{Litologia}$$

$$Razão\ de\ Carga \text{ (g/t)} = MTotal\ de\ Explosivos \text{ (kg)} * Nfuros / MDesmontada \text{ (t)}$$

4.2 Explosivos das empresas comparadas “X” e “Y”

Os explosivos fornecidos pelas empresas “X” e “Y” foram comparados com a finalidade de serem observados em relação à sua pressão de detonação e à sua pressão de explosão no intuito de aumentar a área da malha em m² (QUADRO 3).

Formulações:

$$P = 432 X 0,000001 X \eta X (VOD)^2 \text{ (}\mu\text{Pa)}$$

$$P_E = P_D / 2 \text{ (}\mu\text{Pa)}$$

$$ABS = d X AWS \text{ (kcal/l)}$$

$$RBS = ET_x / ET_p x \xi_x / \xi_p = RWS x \xi_x / \xi_p \text{ (kcal/kg)}$$

$$RBS = RWS (d/0,84) \text{ (kc)}$$

Quadro 3 - Explosivos comparados da empresa X e Y

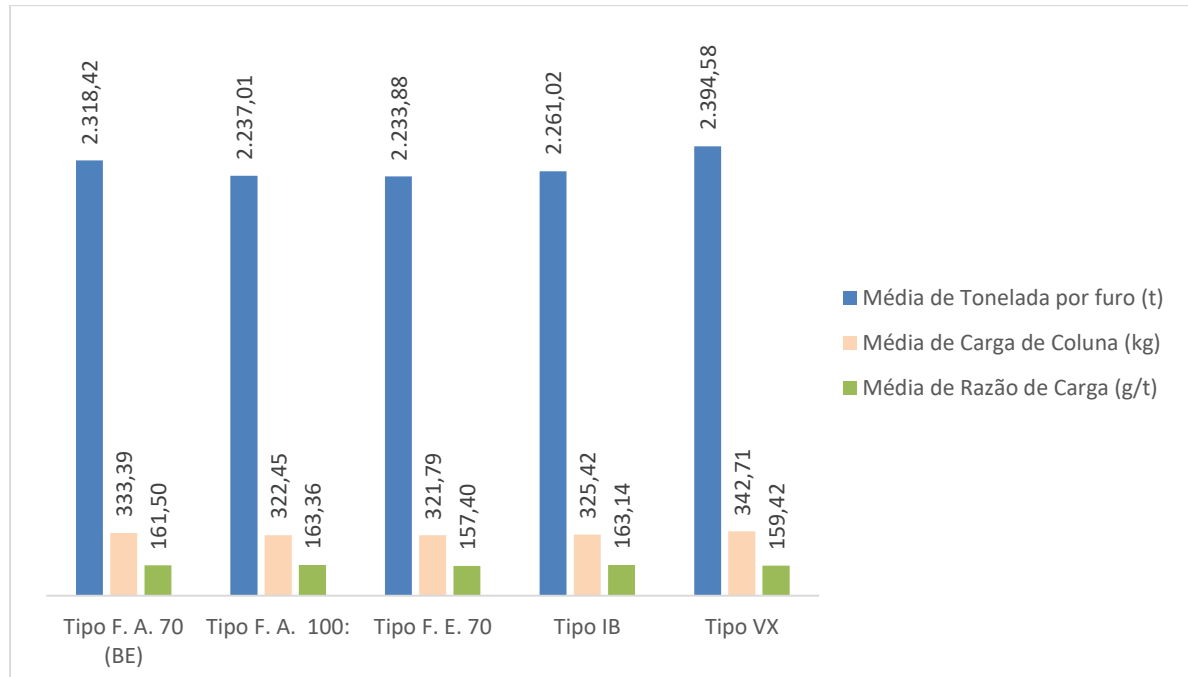
Empresa	Produto	Diâmetro	Densidade	Carga de Coluna (kg)	Tonelada por furo (t)	Razão de Carga (g/t)	Tampão (m)	Malha Alongada (m)	Malha Estagiada (m)	Triângulo Equilátero (m)	Malha Alongada (m²)	Malha Estagiada (m²)	Malha Triângulo equilátero (m²)
X	Tipo F. E. 70	8"3/4	1,22 g/cm³	313,12	2.104,57	163,66	5,10	6,8 x 11,8	6,5 x 13	8,3 x 9,5	80,24	84,5	78,85
X	Tipo F. E. 70	8"3/4	1,08 g/cm³	283,60	1.918,47	162,61	5,00	6,5 x 11,3	6,0 x 12	8,0 x 9,2	73,45	72	73,6
X	Tipo F. E. 70	9"	1,22 g/cm³	326,43	2.226,54	161,27	5,22	7,0 x 12,2	6,5 x 13	8,6 x 9,9	85,4	84,5	85,14
X	Tipo F. E. 70	9"	1,08 g/cm³	295,95	2.029,67	160,39	5,00	6,6 x 11,6	6,0 x 12	8,2 x 9,4	76,56	72	77,08
X	Tipo F. E. 70	9"7/8	1,22 g/cm³	372,58	2.680,53	152,90	5,73	7,6 x 13,4	7,0 x 14	8,2 x 9,4	101,84	98	77,08
X	Tipo F. E. 70	9"7/8	1,08 g/cm³	339,05	2.443,51	152,63	5,50	7,3 x 12,8	7,0 x 14	9,0 x 10,3	93,44	98	92,7
X	Tipo F. A. 70 (BE)	8"3/4	1,33 g/cm³	353,40	2.256,82	163,35	5,30	7,0 x 12,3	6,5 x 13	8,6 x 9,9	86,1	84,5	85,14
X	Tipo F. A. 70 (BE)	8"3/4	1,08 g/cm³	283,60	1.918,47	162,61	5,00	6,5 x 11,3	6,0 x 12	7,9 x 9,2	73,45	72	72,68

X	Tipo F. A. 70 (BE)	9"	1,33 g/cm ³	349,10	2.387,62	160,84	5,41	7,2 x 12,6	6,5 x 13	8,9 x 10,2	90,72	84,5	90,78
X	Tipo F. A. 70 (BE)	9"	1,08 g/cm ³	295,95	2.029,67	160,39	5,00	6,6 x 11,6	6,0 x 12	8,2 x 9,4	76,56	72	77,08
X	Tipo F. A. 70 (BE)	9"7/8	1,33 g/cm ³	379,25	2.874,45	152,02	6,00	7,9 x 13,8	7,0 x 14	9,7 x 11,2	109,02	98	108,64
X	Tipo F. A. 70 (BE)	9"7/8	1,08 g/cm ³	339,05	2.443,51	152,63	5,50	7,3 x 12,8	6,5 x 13	9,0 x 10,3	93,44	84,5	92,7
X	Tipo F. A. 100:	8"3/4	1,15 g/cm ³	298,57	2.010,44	163,36	5,00	6,6 x 11,6	6,0 x 12	8,2 x 9,4	76,56	72	77,08
X	Tipo F. A. 100:	9"	1,15 g/cm ³	311,41	2.126,97	161,05	5,10	6,8 x 11,9	6,5 x 13	8,4 x 9,6	80,92	84,5	80,64
X	Tipo F. A. 100:	9"7/8	1,15 g/cm ³	357,38	2.573,63	152,75	5,60	7,5 x 13,1	7,0 x 14	9,2 x 10,6	98,25	98	97,52
Y	Tipo IB	8"3/4	1,25 g/cm ³	319,23	2.145,56	163,66	5,00	6,8 x 12,0	6,5 x 13	8,4 x 9,7	81,6	84,5	81,48
Y	Tipo IB	8"3/4	1,08 g/cm ³	283,60	1.918,47	162,61	5,00	6,5 x 11,3	6,0 x 12	7,9 x 9,2	73,45	72	72,68
Y	Tipo IB	9"	1,25 g/cm ³	332,72	2.269,92	161,24	5,30	7,0 x 12,3	6,5 x 13	8,7 x 10,0	86,1	84,5	87
Y	Tipo IB	9"	1,08 g/cm ³	295,95	2.029,67	160,39	5,00	6,6 x 11,6	6,0 x 12	8,2 x 9,4	76,56	72	77,08
Y	Tipo IB	9"7/8	1,25 g/cm ³	380,77	2.746,60	152,50	5,80	7,7 x 13,5	7,0 x 14	9,5 x 11,0	103,95	98	104,5
Y	Tipo IB	9"7/8	1,08 g/cm ³	340,27	2.455,90	152,41	5,50	7,3 x 12,8	6,5 x 13	9,0 x 10,4	93,44	84,5	93,6

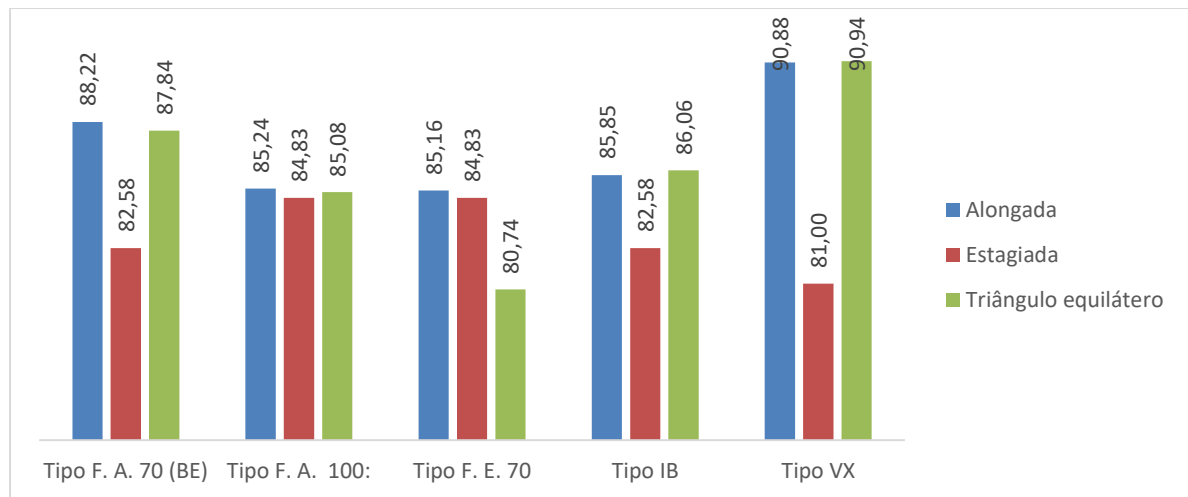
Y	Tipo VX	8"3/4	1,41 g/cm ³	353,40	2.398,07	162,11	5,40	7,2 x 12,6	6,5 x 13	8,9 x 10,2	90,72	84,5	90,78
Y	Tipo VX	8"3/4	1,08 g/cm ³	286,07	1.940,46	162,17	5,00	6,5 x 11,4	6,0 x 12	8,0 x 9,2	74,1	72	73,6
Y	Tipo VX	9"	1,41 g/cm ³	364,90	2.508,31	160,02	5,50	7,4 x 12,9	7,0 x 14	9,1 x 10,5	95,46	98	95,55
Y	Tipo VX	9"	1,08 g/cm ³	295,95	2.029,67	160,39	5,00	6,6 x 11,6	6,0 x 12	8,2 x 9,4	76,56	72	77,08
Y	Tipo VX	9"7/8	1,41 g/cm ³	415,65	3.035,05	150,0	6,10	8,1 x 14,2	5,0 x 15	10 x 11,5	115,02	75	115
Y	Tipo VX	9"7/8	1,08 g/cm ³	340,27	2.455,90	152,41	5,50	7,3 x 12,8	6,5 x 13	9,0 x 10,4	93,44	84,5	93,6

Fonte: A autora (2022)

Gráfico 2 - Médias de toneladas por furo, carga de coluna e razão de carga



Fonte: A autora (2022)

Gráfico 3 - Tipos de malhas em m² para cada tipo de explosivo

Fonte: A autora (2022)

4.3 Malhas pré-definidas

As malhas pré-definidas foram simuladas por meio de um simulador de malhas, observando-se os seguintes parâmetros (QUADRO 4):

- Altura da bancada – HB (m)

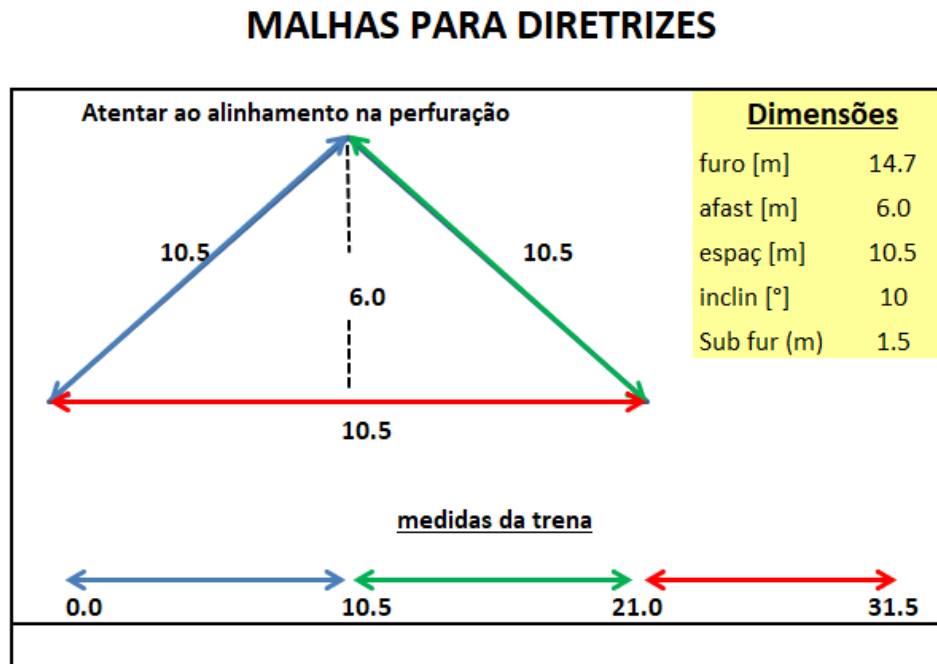
- Inclinação do furo – I (°)
- Densidade da rocha – DR (g/cm³)
- Diâmetro do furo – DF (“)
- Densidade do explosivo carga de coluna – DEC (g/cm³)
- Densidade do explosivo carga de fundo – DEF (g/cm³)
- Altura da carga de fundo – ACF (m)

Quadro 4 - Simulador de malhas por densidade

Parâmetros	SIMULADOR DE MALHAS POR DENSIDADE			Litologia:Densidade			Litologia:Densidade		
	Unidade	Dados	Legenda		Densidade			Densidade	
Altura do Banco	m	13.0	HB	HBA	3.416	Minério	FILB	2.182	Estéril
Inclinação	°	10	I	HCP	4.77	Minério	XISC	2.62	Estéril
Densidade da Rocha	g/cm ³	3.416	DR	ICR	4.236	Minério	XISB	2.027	Estéril
Diâmetro do Furo	”	9.0	DF	IBR	2.968	Minério	DOLC	2.686	Estéril
Densidade Explosivo "c	g/cm ³	1.08	DEC	IBS	2.569	Minério	DOLB	1.635	Estéril
Densidade Explosivo "f	g/cm ³	1.08	DEF	ICS	3.045	Minério	QT2C	2.3	Estéril
Altura da Carga de fundo	m	0.0	ACF	IBC	1.799	Minério	QT2B	1.67	Estéril
MALHA PROJETADA				ICC	3.134	Minério	BRS	2.92	Estéril
Afastamento	m	6.0	A	IBM	2.522	Minério	RBIB	2.066	Estéril
Espaçamento	m	10.5	E	ICM	2.839	Minério	RBIC	2.694	Estéril
Área de Malha	m ²	62.91	AM	ICG	2.97	Minério	CHTB	2.381	Estéril
Profundidade do Furo	m	14.70	HF	ICA	2.8	Minério	CHTC	2.987	Estéril
Sub-Furação	m	1.50	S	CEL	2.879	Minério	RMNB	1.705	Estéril
Toneladas por Furo	ton	2.933.29	TF	CGM	2.282	Minério	SOL	2.159	Estéril
Tamponamento	m	4.50	T				ATE	2.529	Estéril
Carga de Coluna	kg	452.25	CC				TUR	1.2	Estéril
Carga de fundo	kg	0.00	CF				ARG	1.974	Estéril
Carga de Coluna / m	kg/m	44.33	CC/m				PES	2.05	Estéril
Carga de fundo / m	kg/m	44.33	CF/m				FILC	2.548	Estéril
Razão de Carga	g/ton	169.60	RC						

Fonte: A autora (2022)

Figura 5 - Exemplo de malhas para diretrizes



Fonte: A autora (2022)

As malhas projetadas pelo simulador são malhas alongadas na relação $E/A = 1,75$. As malhas foram também simuladas nas relações $E/A = 1,15$ (triângulo equilátero) e na relação $E/A = 2$ (estagiada), a fim de ser observado teoricamente qual seria o ganho em m^2 referenciando-se a pressão de detonação dos explosivos apresentados pelas duas empresas versus litologias presentes na mina.

Os explosivos foram carregados pelos caminhões da empresa “X”, os quais reportam a massa em quilogramas do explosivo utilizado nos furos. Além disso, a altura do tampão é aferida após o carregamento de explosivos utilizando-se uma trena.

O carregamento convencional serviu como parâmetro para aplicação do explosivo blendado.

Durante o carregamento com explosivo blendado, ocorreu uma anomalia no sensor de tolva da MMU da empresa “X”, o que não propiciou o carregamento de todos os furos da malha separados para realização do teste: 41 furos foram carregados com Emulsão Bombeada 100% do total de 101 furos planejados.

A malha empregada na realização desse primeiro experimento foi a malha 5,3 X 6,1 (relação $E/A = 1,15$ – triângulo equilátero) correspondente à malha 4 X 8 (relação $E/A = 2$). A malha foi perfurada por brocas tricônicas de 9” (228,6 mm) na litologia IBS (Itabirito brando silicoso – friável).

De acordo com a memória de cálculo em teoria balizou-se uma média dos resultados obtidos para sugerir a malha aplicada no teste.

A malha foi aumentada em 23% na sua relação, e a cominuição/fragmentação do material foi satisfatória.

Área definidas (FIG. 6):

Figura 6 - Áreas testes 7K, 11J e 10K



Fonte: Google Earth®

A seguir, será apresentada a planilha resumida para os cálculos do desmonte da frente de lavra da área 7K.

4.4 Testes de desmonte da área 7K

Quadro 5 - Planilha da área 7K - carregamento com blindado

Mina	Ângulo		Afast(m)	Esp (m)	Diâmetro de Perfuração (mm)	Litologia	Densidade Rocha g/cm ³	Profundidade	Encartuchado	Razão Linear de Carga Fundo	Ibenite	Emulsão Bombeada	Nitrato de Amônio (ANFO)	Carga Total (KG)	Tampão Realizado (M)
	Inclinação	Face									70%				
											30%				
1	10°	L	5.30	6.10	228.60	IBS	2.569	14.00	0.00	47.20	370.00	260.00	110.00	370.90	6.30
2	10°	L	5.30	6.10	228.60	IBS	2.569	14.30	0.00	47.20	380.00	270.00	110.00	380.90	6.44
3	10°	L	5.30	6.10	228.60	IBS	2.569	14.30	0.00	47.20	380.00	270.00	110.00	380.90	6.44
4	10°	L	5.30	6.10	228.60	IBS	2.569	14.10	0.00	47.20	370.00	260.00	110.00	370.90	6.35
5	10°	L	5.30	6.10	228.60	IBS	2.569	13.90	0.00	47.20	370.00	260.00	110.00	370.90	6.26
6	10°	L	5.30	6.10	228.60	IBS	2.569	13.70	0.00	47.20	360.00	260.00	100.00	360.90	6.17
7	10°	L	5.30	6.10	228.60	IBS	2.569	14.10	0.00	47.20	370.00	260.00	110.00	370.90	6.35
8	10°	L	5.30	6.10	228.60	IBS	2.569	14.20	0.00	47.20	370.00	260.00	110.00	370.90	6.39
9	10°	L	5.30	6.10	228.60	IBS	2.569	14.10	0.00	47.20	370.00	260.00	110.00	370.90	6.35
10	10°	L	5.30	6.10	228.60	IBS	2.569	13.70	0.00	47.20	360.00	260.00	100.00	360.90	6.17
11	10°	L	5.30	6.10	228.60	IBS	2.569	14.00	0.00	47.20	370.00	260.00	110.00	370.90	6.30
12	10°	L	5.30	6.10	228.60	IBS	2.569	14.30	0.00	47.20	380.00	270.00	110.00	380.90	6.44
13	10°	L	5.30	6.10	228.60	IBS	2.569	14.60	0.00	47.20	380.00	230.00	150.00	380.90	6.57
14	10°	L	5.30	6.10	228.60	IBS	2.569	13.90	0.00	47.20	370.00	230.00	140.00	370.90	6.26
15	10°	L	5.30	6.10	228.60	IBS	2.569	13.90	0.00	47.20	370.00	230.00	140.00	370.90	6.26
16	10°	L	5.30	6.10	228.60	IBS	2.569	13.60	0.00	47.20	360.00	220.00	140.00	360.90	6.12
17	10°	L	5.30	6.10	228.60	IBS	2.569	13.70	0.00	47.20	360.00	220.00	140.00	360.90	6.17
18	10°	L	5.30	6.10	228.60	IBS	2.569	14.20	0.00	47.20	370.00	230.00	140.00	370.90	6.39
19	10°	L	5.30	6.10	228.60	IBS	2.569	14.50	0.00	47.20	380.00	230.00	150.00	380.90	6.53
20	10°	L	5.30	6.10	228.60	IBS	2.569	14.20	0.00	47.20	370.00	230.00	140.00	370.90	6.39
21	10°	L	5.30	6.10	228.60	IBS	2.569	14.30	0.00	47.20	380.00	230.00	150.00	380.90	6.44
22	10°	L	5.30	6.10	228.60	IBS	2.569	14.10	0.00	47.20	370.00	230.00	140.00	370.90	6.35
23	10°	L	5.30	6.10	228.60	IBS	2.569	13.90	0.00	47.20	370.00	230.00	140.00	370.90	6.26
24	10°	L	5.30	6.10	228.60	IBS	2.569	13.90	0.00	47.20	370.00	230.00	140.00	370.90	6.26
25	10°	L	5.30	6.10	228.60	IBS	2.569	13.60	0.00	47.20	360.00	220.00	140.00	360.90	6.12
26	10°	L	5.30	6.10	228.60	IBS	2.569	13.70	0.00	47.20	360.00	220.00	140.00	360.90	6.17
27	10°	L	5.30	6.10	228.60	IBS	2.569	14.20	0.00	47.20	370.00	230.00	140.00	370.90	6.39

28	10°	L	5.30	6.10	228.60	IBS	2.569	14.50	0.00	47.20	380.00	230.00	150.00	380.90	6.53
29	10°	L	5.30	6.10	228.60	IBS	2.569	14.20	0.00	47.20	370.00	230.00	140.00	370.90	6.39
30	10°	L	5.30	6.10	228.60	IBS	2.569	14.30	0.00	47.20	380.00	230.00	150.00	380.90	6.44
31	10°	L	5.30	6.10	228.60	IBS	2.569	14.60	0.00	47.20	380.00	230.00	150.00	380.90	6.57
32	10°	L	5.30	6.10	228.60	IBS	2.569	13.90	0.00	47.20	370.00	230.00	140.00	370.90	6.26
33	10°	L	5.30	6.10	228.60	IBS	2.569	14.50	0.00	47.20	380.00	230.00	150.00	380.90	6.53
34	10°	L	5.30	6.10	228.60	IBS	2.569	14.00	0.00	47.20	370.00	230.00	140.00	370.90	6.30
35	10°	L	5.30	6.10	228.60	IBS	2.569	14.20	0.00	47.20	370.00	230.00	140.00	370.90	6.39
36	10°	L	5.30	6.10	228.60	IBS	2.569	14.10	0.00	47.20	370.00	230.00	140.00	370.90	6.35
37	10°	L	5.30	6.10	228.60	IBS	2.569	13.90	0.00	47.20	370.00	230.00	140.00	370.90	6.26
38	10°	L	5.30	6.10	228.60	IBS	2.569	13.90	0.00	47.20	370.00	230.00	140.00	370.90	6.26
39	10°	L	5.30	6.10	228.60	IBS	2.569	13.60	0.00	47.20	360.00	220.00	140.00	360.90	6.12
40	10°	L	5.30	6.10	228.60	IBS	2.569	13.70	0.00	47.20	360.00	220.00	140.00	360.90	6.17
41	10°	L	5.30	6.10	228.60	IBS	2.569	14.20	0.00	47.20	370.00	230.00	140.00	370.90	6.39
42	10°	L	5.30	6.10	228.60	IBS	2.569	14.50	0.00	47.20	380.00	230.00	150.00	380.90	6.53

42	10°	L	5.30	6.10	228.60	IBS	2.569	14.50	0.00	47.20	380.00	230.00	150.00	380.90	6.53
43	10°	L	5.30	6.10	228.60	IBS	2.569	14.20	0.00	47.20	370.00	230.00	140.00	370.90	6.39
44	10°	L	5.30	6.10	228.60	IBS	2.569	14.30	0.00	47.20	380.00	230.00	150.00	380.90	6.44
45	10°	L	5.30	6.10	228.60	IBS	2.569	14.60	0.00	47.20	380.00	230.00	150.00	380.90	6.57
46	10°	L	5.30	6.10	228.60	IBS	2.569	13.90	0.00	47.20	370.00	230.00	140.00	370.90	6.26
47	10°	L	5.30	6.10	228.60	IBS	2.569	13.90	0.00	47.20	370.00	230.00	140.00	370.90	6.26
48	10°	L	5.30	6.10	228.60	IBS	2.569	13.60	0.00	47.20	360.00	220.00	140.00	360.90	6.12
49	10°	L	5.30	6.10	228.60	IBS	2.569	13.70	0.00	47.20	360.00	220.00	140.00	360.90	6.17
50	10°	L	5.30	6.10	228.60	IBS	2.569	14.20	0.00	47.20	370.00	230.00	140.00	370.90	6.39
51	10°	L	5.30	6.10	228.60	IBS	2.569	14.50	0.00	47.20	380.00	230.00	150.00	380.90	6.53
52	10°	L	5.30	6.10	228.60	IBS	2.569	14.20	0.00	47.20	370.00	230.00	140.00	370.90	6.39
53	10°	L	5.30	6.10	228.60	IBS	2.569	14.30	0.00	47.20	380.00	230.00	150.00	380.90	6.44
54	10°	L	5.30	6.10	228.60	IBS	2.569	14.10	0.00	47.20	370.00	230.00	140.00	370.90	6.35
55	10°	L	5.30	6.10	228.60	IBS	2.569	13.90	0.00	47.20	370.00	230.00	140.00	370.90	6.26
56	10°	L	5.30	6.10	228.60	IBS	2.569	13.90	0.00	47.20	370.00	230.00	140.00	370.90	6.26
57	10°	L	5.30	6.10	228.60	IBS	2.569	13.60	0.00	47.20	360.00	220.00	140.00	360.90	6.12

58	10°	L	5.30	6.10	228.60	IBS	2.569	13.70	0.00	47.20	360.00	220.00	140.00	360.90	6.17
59	10°	L	5.30	6.10	228.60	IBS	2.569	14.20	0.00	47.20	370.00	230.00	140.00	370.90	6.39
60	10°	L	5.30	6.10	228.60	IBS	2.569	14.50	0.00	47.20	380.00	230.00	150.00	380.90	6.53
61	10°	L	5.30	6.10	228.60	IBS	2.569	14.20	0.00	47.20	370.00	230.00	140.00	370.90	6.39
62	10°	L	5.30	6.10	228.60	IBS	2.569	14.30	0.00	47.20	380.00	230.00	150.00	380.90	6.44
63	10°	L	5.30	6.10	228.60	IBS	2.569	14.60	0.00	47.20	380.00	230.00	150.00	380.90	6.57
64	10°	L	5.30	6.10	228.60	IBS	2.569	13.90	0.00	47.20	370.00	230.00	140.00	370.90	6.26
65	10°	L	5.30	6.10	228.60	IBS	2.569	14.20	0.00	47.20	370.00	230.00	140.00	370.90	6.39
66	10°	L	5.30	6.10	228.60	IBS	2.569	14.30	0.00	47.20	380.00	230.00	150.00	380.90	6.44
67	10°	L	5.30	6.10	228.60	IBS	2.569	14.10	0.00	47.20	370.00	230.00	140.00	370.90	6.35
68	10°	L	5.30	6.10	228.60	IBS	2.569	13.90	0.00	47.20	370.00	230.00	140.00	370.90	6.26
69	10°	L	5.30	6.10	228.60	IBS	2.569	13.90	0.00	47.20	370.00	230.00	140.00	370.90	6.26
70	10°	L	5.30	6.10	228.60	IBS	2.569	13.60	0.00	47.20	360.00	220.00	140.00	360.90	6.12
71	10°	L	5.30	6.10	228.60	IBS	2.569	13.70	0.00	47.20	360.00	220.00	140.00	360.90	6.17
72	10°	L	5.30	6.10	228.60	IBS	2.569	14.20	0.00	47.20	370.00	230.00	140.00	370.90	6.39
73	10°	L	5.30	6.10	228.60	IBS	2.569	14.50	0.00	47.20	380.00	230.00	150.00	380.90	6.53

74	10°	L	5.30	6.10	228.60	IBS	2.569	14.20	0.00	47.20	370.00	230.00	140.00	370.90	6.39
75	10°	L	5.30	6.10	228.60	IBS	2.569	14.30	0.00	47.20	380.00	230.00	150.00	380.90	6.44
76	10°	L	5.30	6.10	228.60	IBS	2.569	14.60	0.00	47.20	380.00	230.00	150.00	380.90	6.57
77	10°	L	5.30	6.10	228.60	IBS	2.569	13.90	0.00	47.20	370.00	230.00	140.00	370.90	6.26
78	10°	L	5.30	6.10	228.60	IBS	2.569	14.50	0.00	47.20	380.00	230.00	150.00	380.90	6.53
79	10°	L	5.30	6.10	228.60	IBS	2.569	14.00	0.00	47.20	370.00	230.00	140.00	370.90	6.30
80	10°	L	5.30	6.10	228.60	IBS	2.569	14.20	0.00	47.20	370.00	230.00	140.00	370.90	6.39
81	10°	L	5.30	6.10	228.60	IBS	2.569	14.10	0.00	47.20	370.00	230.00	140.00	370.90	6.35
82	10°	L	5.30	6.10	228.60	IBS	2.569	13.90	0.00	47.20	370.00	230.00	140.00	370.90	6.26
83	10°	L	5.30	6.10	228.60	IBS	2.569	13.90	0.00	47.20	370.00	230.00	140.00	370.90	6.26
84	10°	L	5.30	6.10	228.60	IBS	2.569	13.60	0.00	47.20	360.00	220.00	140.00	360.90	6.12
85	10°	L	5.30	6.10	228.60	IBS	2.569	13.70	0.00	47.20	360.00	220.00	140.00	360.90	6.17
86	10°	L	5.30	6.10	228.60	IBS	2.569	14.20	0.00	47.20	370.00	230.00	140.00	370.90	6.39
87	10°	L	5.30	6.10	228.60	IBS	2.569	14.50	0.00	47.20	380.00	230.00	150.00	380.90	6.53
88	10°	L	5.30	6.10	228.60	IBS	2.569	14.20	0.00	47.20	370.00	230.00	140.00	370.90	6.39
89	10°	L	5.30	6.10	228.60	IBS	2.569	14.30	0.00	47.20	380.00	230.00	150.00	380.90	6.44

90	10°	L	5.30	6.10	228.60	IBS	2.569	14.60	0.00	47.20	380.00	230.00	150.00	380.90	6.57
91	10°	L	5.30	6.10	228.60	IBS	2.569	13.90	0.00	47.20	370.00	230.00	140.00	370.90	6.26
92	10°	L	5.30	6.10	228.60	IBS	2.569	13.90	0.00	47.20	370.00	230.00	140.00	370.90	6.26
93	10°	L	5.30	6.10	228.60	IBS	2.569	13.60	0.00	47.20	360.00	220.00	140.00	360.90	6.12
94	10°	L	5.30	6.10	228.60	IBS	2.569	13.70	0.00	47.20	360.00	220.00	140.00	360.90	6.17
95	10°	L	5.30	6.10	228.60	IBS	2.569	14.20	0.00	47.20	370.00	230.00	140.00	370.90	6.39
96	10°	L	5.30	6.10	228.60	IBS	2.569	14.50	0.00	47.20	380.00	230.00	150.00	380.90	6.53
97	10°	L	5.30	6.10	228.60	IBS	2.569	14.20	0.00	47.20	370.00	230.00	140.00	370.90	6.39
98	10°	L	5.30	6.10	228.60	IBS	2.569	14.30	0.00	47.20	380.00	230.00	150.00	380.90	6.44
99	10°	L	5.30	6.10	228.60	IBS	2.569	14.10	0.00	47.20	370.00	230.00	140.00	370.90	6.35
100	10°	L	5.30	6.10	228.60	IBS	2.569	13.90	0.00	47.20	370.00	230.00	140.00	370.90	6.26
101	10°	L	5.30	6.10	228.60	IBS	2.569	13.90	0.00	47.20	370.00	230.00	140.00	370.90	6.26

Fonte: A autora (2022)

Quadro 6 – Resultado

Total	
Quant. Furo	101
Volume m3	46,515.05
Explosivo Gasto:	37,390.90
M. Desmontada:	119,497.15
Razão de Carga:	312.90
Minério	119,497.15
Estéril	0.00

Fonte: A autora (2022)

Usaremos como parâmetro de estudo a malha aplicada para esse tipo de litologia, atualmente 3,5 X. Para realizarmos a mesma massa descrita na área denominada 7K teremos os seguintes parâmetros (QUADRO 7):

Quadro 7 - Planilha da área 7K - carregamento “convencional”

Total	
Quant. Furo	131
Volume m3	45,937.14
Explosivo Gasto:	48,727.90
M. Desmontada:	118,012.51
Razão de Carga:	412.90
Minério	118,012.51
Estéril	0.00

Fonte: A autora (2022)

Quadro 8 - Análise econômica da área 7K - carregamento “convencional”

Descrição	EXECUTADO
Quant. Furo (un)	131
Explosivo Gasto (kg)	48.727,90
Razão de Carga(g/t)	412,90
M. Desmontada Minério (t)	118.012,51
Explosivo Emulsão 5800m/S Granel (kg)	34.109,53
Nitrato de Amônio (ANFO Derramado) (kg)	14.618,37
Gastos com Nitrato de Amônio (R\$)	R\$ 31.721,86
Gastos Emulsão 5800m/S	R\$ 136.097,00

Fonte: A autora (2022)

Apesar da boa fragmentação nota-se que a razão de carga (RC) ainda não foi satisfatória. Esse indicador retrata que houve um gasto de volume de explosivo além do necessário para a cominuição desse tipo de litologia, que levou à reflexão em usar uma carga reduzida para esse tipo de litologia (com auxílio de bolsas de ar a fim de criar um deck entre a massa de explosivo e o tampão) ou aumentar a malha usada nesse teste em 23%, minimizando a RC. Optou-se por aumentar a malha em 23%, observando-se um consumo menor de explosivo nesse primeiro teste e uma redução de 23,3% no valor dos explosivos aplicados, e manteve-se o volume de massa desmontada.

Na mina em questão, existem 36 tipos de litologias distintas. Essas litologias tiveram suas malhas ajustadas e a relação de malha estagiada foi reformulada para malha triângulo equilátero.

Quanto ao desmonte da área 7K, os indicativos dos gastos com explosivos são mostrados na tabela abaixo (QUADRO 9):

Quadro 9 - Análise econômica da área 7K - carregamento com blindado

Descrição	Executado
Quant. Furo (un)	101
Explosivo Gasto (kg)	37.390,90
Razão de Carga(g/t)	312,90
M. Desmontada Minério (t)	119.497,15
Explosivo Emulsão 5800m/S Granel (kg)	26.173,63
Nitrato de Amônio (kg)	11.217,27
Gastos com Nitrato de Amônio (R\$)	R\$ 24.341,47
Gastos com Emulsão 5800m/S (R\$)	R\$ 104432,78

Fonte: A autora (2022)

Figura 7 - Imagem após desmonte da área 7K



Fonte: A autora (2022)

Observamos que após o desmonte não foram gerados blocos, o que é um ponto positivo para possibilitar o aumento da malha na litologia.

Durante o carregamento foram observados os seguintes gargalos:

- O sensor da tolva da MMU exigiu uma manutenção corretiva;
- Realização de pré-testes antes da aplicação do insumo em bancada;
- Uma distribuição mais criteriosa dos acessórios explosivos na bancada a fim de garantir uma melhor manobra das MMU's na malha perfurada;
- Melhor sincronia entre os operadores das MMU's e auxiliares de bancada;

A malha aplicada para esse tipo de litologia foi economicamente satisfatória e garantiu uma excelente fragmentação. Nas observações durante o carregamento e detonação não foram observados impactos inseguros como ultra lançamentos, vibrações excessivas ou improdutividades para os equipamentos de mina, o que fomentou a realização de posteriores testes.

Quadro 10 - Dados gerais da área 7K

LOCAL	7K
DATA DA MEDIÇÃO	03-05-20
HORA	13:10
CAPTAÇÃO	1 furo
PROFUNDIDADE (m)	13,0 m
TAMPÃO (m)	5,0 m
DIÂMETRO (pol.)	9
INICIADOR	Booster 900g
EXPLOSIVO	Fortis Extra 70/30
DENSIDADE (g/cm³)	1,15

Fonte: A autora (2022)

Gráfico 4 - Medição de Velocidade de Detonação da área 7K



Fonte: Equipamento de medição da empresa X (2022)

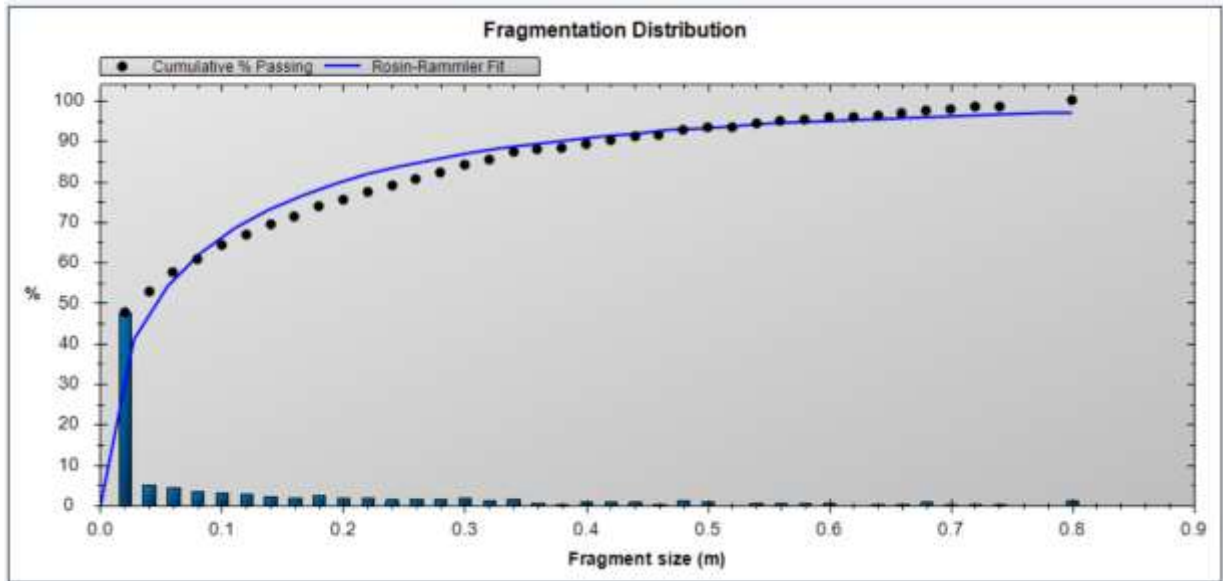
Quadro 11 - Resultados da área 7K

Bin Number	Size (m)	Area (m ²)	(%) in bin	Cumulative (%)
>	1	0.020	62.18	47.7
	2	0.040	6.87	5.3
	3	0.060	5.98	4.6
	4	0.080	4.53	3.5
	5	0.100	4.35	3.3
	6	0.120	3.58	2.7
	7	0.140	3.01	2.3
	8	0.160	2.60	2.0
	9	0.180	3.34	2.6
	10	0.200	2.30	1.8
	11	0.220	2.45	1.9
	12	0.240	1.93	1.5
	13	0.260	2.16	1.7
	14	0.280	1.92	1.5
	15	0.300	2.52	1.9
	16	0.320	1.79	1.4
	17	0.340	2.28	1.7
	18	0.360	0.82	0.6
	19	0.380	0.48	0.4
	20	0.400	1.38	1.1
	21	0.420	1.19	0.9

% Passing	Rosin Rammler Size (m)	Swebrec Size(m)
	10	0.002
	20	0.006
	30	0.014
	40	0.026
	50	0.045
	60	0.073
	70	0.119
>	80	0.199
	90	0.376
	100	n/a

Fonte: Software da empresa X (2022)

Gráfico 5 - Resultado de fragmentação da área 7K



Fonte: Software da empresa X (2022)

4.5 Testes de desmontes da área 11J

Foi realizado um novo teste na área denominada 11J, a qual apresentava litologias friáveis como colúvios e itabiritos brandos silicosos. A seguir são apresentados dados, parâmetros e cálculos referentes ao desmonte com:

Afastamento (m)	Espaçamento (m)	Diâmetro (mm)	Litologia
5,6	6,5	228,6	CEL/IBS

Quadro 12 - Relação de custos de insumos

Código	Denominação	Custo Unitário - Orç.	Custo Unitário - Real	Unid.
8680322	REAGENTE NITRATO AMONIO FERTILIZ.	R\$ 2,10	R\$ 2,17	kg
8526086	EMULSÃO BOMBEADA	R\$ 3,89	R\$ 3,99	kg

Fonte: Empresa X (2022)

A análise desse teste seguirá os mesmos procedimentos adotados no primeiro teste, assim como no posterior, comparando seus parâmetros.

Planilha utilizada para os cálculos do desmonte referente a área 11J:

Quadro 13 - Análise econômica da área 11J

Descrição	EXECUTADO
Quant. Furo (un)	132
Explosivo Gasto (kg)	42.208,80
Razão de Carga(g/t)	231,26
M. Desmontada Minério (t)	182.518,28
Explosivo Emulsão 5800m/S Granel (kg)	29.546,16
Nitrato de Amônio (ANFO Derramado) (kg)	12.662,64
Gastos com Nitrato de Amônio (R\$)	R\$ 27.477,92
Gastos Emulsão 5800m/S	R\$ 117.889,18

Fonte: A autora (2022)

Quadro 14 - Planilha da área 11J - carregamento com blindado

Mina	Ângulo		Afast(m)	Esp (m)	Diâmetro de Perfuração (mm)	Litologia	Densidade Rocha g/cm3	Profundidade	Encartuchado	Razão Linear de Carga Fundo	Ibenite	Emulsão Bombeada	Nitrato de Amônio (ANFO)	Carga Total (KG)	Tempo Realizado (M)
	Inclinação	Face									70%				
											30%				
1	10°	L	5.60	6.50	228.60	CEL	2.879	14.10	0.00	44.33	350.00	250.00	100.00	350.90	6.35
2	10°	L	5.60	6.50	228.60	CEL	2.879	13.80	0.00	44.33	340.00	240.00	100.00	340.90	6.21
3	10°	L	5.60	6.50	228.60	CEL	2.879	13.90	0.00	44.33	340.00	240.00	100.00	340.90	6.26
4	10°	L	5.60	6.50	228.60	CEL	2.879	14.20	0.00	44.33	350.00	250.00	100.00	350.90	6.39
5	10°	L	5.60	6.50	228.60	CEL	2.879	14.00	0.00	44.33	350.00	250.00	100.00	350.90	6.30
6	10°	L	5.60	6.50	228.60	CEL	2.879	13.90	0.00	44.33	340.00	240.00	100.00	340.90	6.26
7	10°	L	5.60	6.50	228.60	CEL	2.879	14.10	0.00	44.33	350.00	250.00	100.00	350.90	6.35
8	10°	L	5.60	6.50	228.60	CEL	2.879	14.00	0.00	44.33	350.00	250.00	100.00	350.90	6.30
9	10°	L	5.60	6.50	228.60	CEL	2.879	14.00	0.00	44.33	350.00	250.00	100.00	350.90	6.30
10	10°	L	5.60	6.50	228.60	CEL	2.879	13.70	0.00	44.33	340.00	240.00	100.00	340.90	6.17
11	10°	L	5.60	6.50	228.60	CEL	2.879	14.00	0.00	44.33	350.00	250.00	100.00	350.90	6.30

Fonte: A autora (2022)

Quadro 15 – Resultado

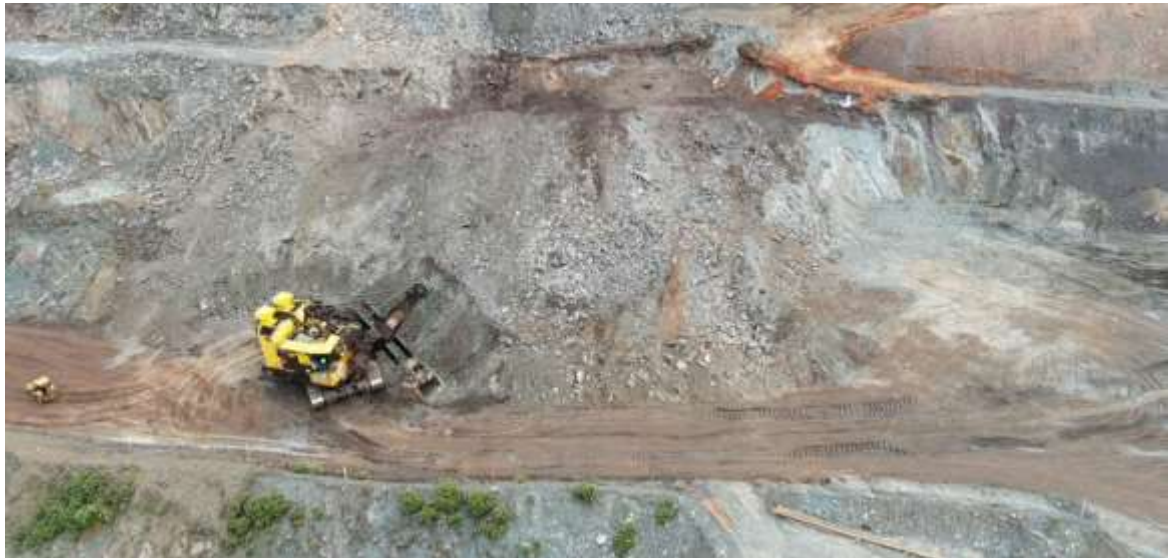
Total	
Quant. Furo	132
Volume m3	63,396.41
Explosivo Gasto:	42,208.80
M. Desmontada:	182,518.28
Razão de Carga:	231.26
Minério	182,518.28
Estéril	0.00

Fonte: A autora (2022)

Foi observada nesse teste uma redução na razão de carga pelo aumento da malha de perfuração em 32% em comparação com o teste anterior na área da 7K. Como já esperávamos, o aumento da malha para esse(s) tipo(s) de litologia(s) foi eficiente, ocasionando uma redução do explosivo aplicado, o que proporcionou uma redução de 16% em custos de insumos.

Durante o carregamento, houve melhoras em relação aos gargalos apresentados no teste anterior. Não houve impedimentos operacionais dos equipamentos de carga relatados em campo. A massa fragmentada atendeu ao top size exigido.

Figura 8 - Imagem após desmonte da área 11J



Fonte: A autora (2022)

4.6 Teste de desmonte da área 10K

Foi realizado um teste nessa mesma região, área denominada 10K, a qual apresentava litologias friáveis como colúvios e itabiritos brandos silicosos. A seguir são apresentados dados, parâmetros e cálculos referentes ao desmonte.

Afastamento (m)	Espaçamento (m)	Diâmetro (mm)	Litologia
5,9	6,5	228,6	IBS

Quadro 16 - Relação de custos de insumos

Código	Denominação	Custo Unitário - Orç.	Custo Unitário - Real	Unid.
8680322	Reagente Nitrato Amonio Fertiliz.	R\$ 2,10	R\$ 2,35	kg
8526086	Emulsão bombeada	R\$ 3,89	R\$ 3,90	kg

Fonte: A autora (2022)

A análise desse teste seguirá os mesmos procedimentos adotados no primeiro teste, assim como no posterior, comparando seus parâmetros. A planilha seguinte é utilizada para os cálculos do desmonte referente à área 10K:

Quadro 17 - Análise econômica da área 10K

Descrição	Executado
Quant. Furo (un)	120
Explosivo Gasto (kg)	37628
Razão de Carga(g/t)	180,78
M. Desmontada Minério (t)	208.143,49
Explosivo Emulsão 5800m/S Granel (kg)	26.339,60
Nitrato de Amônio (ANFO Derramado) (kg)	11.228,4
Gastos com Nitrato de Amônio (R\$)	R\$ 24.495,83
Gastos Emulsão 5800m/S	R\$ 105.095,00

Fonte A autora (2022)

Quadro 18 - Planilha da área 10K - carregamento com blindado

Mina	Ângulo		Afast(m)	Esp (m)	Diâmetro de Perfuração (mm)	Litologia	Densidade Rocha g/cm ³	Profundidade	Encartuchado	Razão Linear de Carga Fundo	Ibenite	Emulsão Bombeada	Nitrato de Amônio (ANFO)	Carga Total (KG)	Tampão Realizado (M)
	Inclinação	Face									70%				
1	10°	L	5.90	6.80	228.60	ICS	3.045	14.90	0.00	47.20	390.00	280.00	110.00	390.90	6.71
2	10°	L	5.90	6.80	228.60	ICS	3.045	13.70	0.00	47.20	360.00	260.00	100.00	360.90	6.17
3	10°	L	5.90	6.80	228.60	ICS	3.045	14.10	0.00	47.20	370.00	260.00	110.00	370.90	6.35
4	10°	L	5.90	6.80	228.60	ICS	3.045	14.00	0.00	47.20	370.00	260.00	110.00	370.90	6.30
5	10°	L	5.90	6.80	228.60	ICS	3.045	14.00	0.00	47.20	370.00	260.00	110.00	370.90	6.30
6	10°	L	5.90	6.80	228.60	ICS	3.045	13.90	0.00	47.20	370.00	260.00	110.00	370.90	6.26
7	10°	L	5.90	6.80	228.60	ICS	3.045	14.30	0.00	47.20	380.00	270.00	110.00	380.90	6.44
8	10°	L	5.90	6.80	228.60	ICS	3.045	14.20	0.00	47.20	370.00	260.00	110.00	370.90	6.39
9	10°	L	5.90	6.80	228.60	ICS	3.045	14.00	0.00	47.20	370.00	260.00	110.00	370.90	6.30
10	10°	L	5.90	6.80	228.60	ICS	3.045	14.00	0.00	47.20	370.00	260.00	110.00	370.90	6.30
11	10°	L	5.90	6.80	228.60	ICS	3.045	13.60	0.00	47.20	360.00	260.00	100.00	360.90	6.12
12	10°	L	5.90	6.80	228.60	ICS	3.045	13.80	0.00	47.20	360.00	260.00	100.00	360.90	6.21
13	10°	L	5.90	6.80	228.60	ICS	3.045	13.50	0.00	47.20	100.00	70.00	30.00	100.90	6.08

Fonte: A autora (2022)

Quadro 19 – Resultado

Total	
Quant. Furo	120
Volume m ³	68,355.83
Explosivo Gasto:	37,628.00
M. Desmontada:	208,143.49
Razão de Carga:	180.78
Minério	208,143.49
Estéril	0.00

Fonte: A autora (2022)

Foi observada nesse teste uma redução na RC pelo aumento da malha de perfuração em 42,4% em comparação com o teste anterior da área 7K. Como esperado, o aumento da malha para esse(s) tipo(s) de litologia(s) foi eficiente, o que ocasionou uma redução do explosivo aplicado, e proporcionou uma redução de 11% em custos de insumos em relação às malhas 5,6 X 6,5 para 5,9 X 6,8.

Durante o carregamento, mantiveram-se melhoras em relação aos gargalos apresentados no teste anterior. Não houve impedimentos operacionais dos equipamentos de carga relatados em campo, e a massa fragmentada atendeu ao top size exigido.

Figura 9 - Imagem após desmonte da área 10K



Fonte: A autora (2022)

Quadro 20 - Dados gerais da área 10K

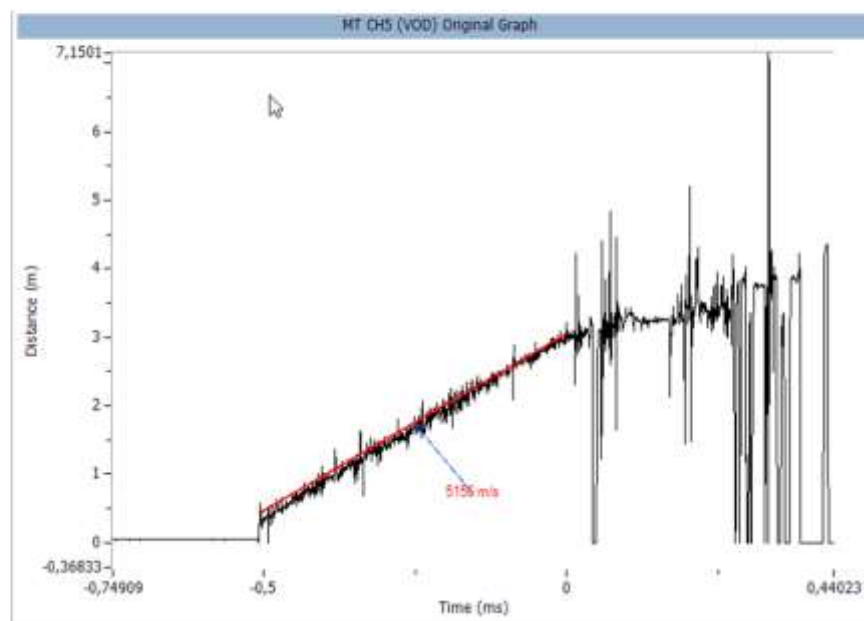
LOCAL	10K
DATA DA MEDIÇÃO	20-03-2022
HORA	13:04
CAPTAÇÃO	1 furo
PROFUNDIDADE (m)	16m
TAMPÃO (m)	7m
DIÂMETRO (pol.)	9
INICIADOR	Booster 900g
EXPLOSIVO	Fortis Extra 70
DENSIDADE (g/cm³)	1,22

Fonte: A autora (2022)

Gráfico 6 - Medição de Velocidade de Detonação da área 10K

Resultado

VOD = 5156 m/s



Fonte: Equipamento de medição da empresa X (2022)

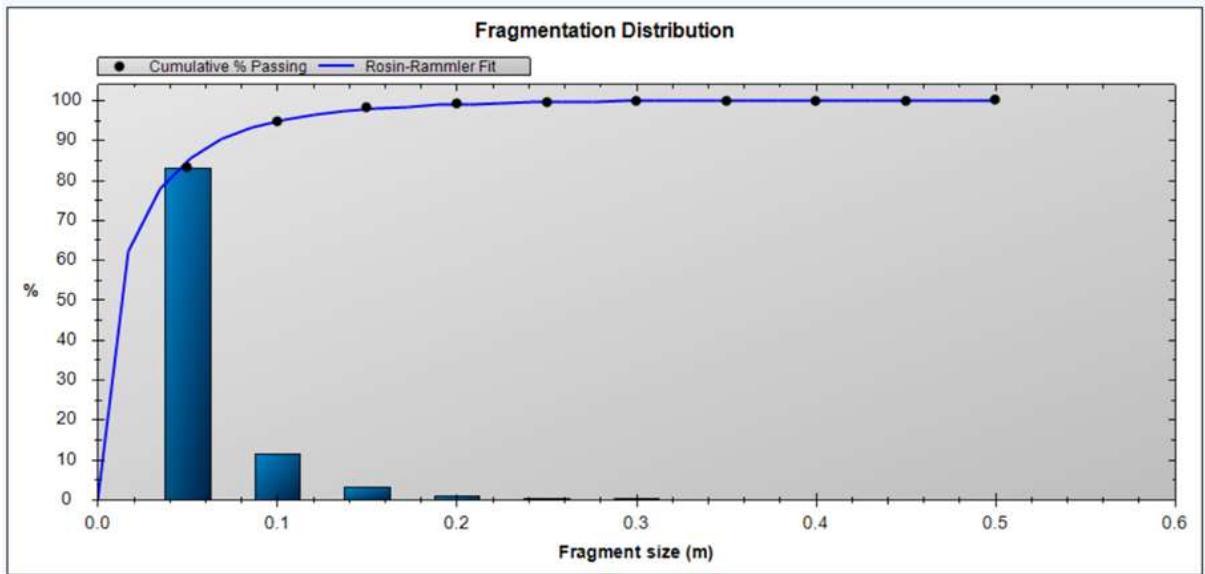
Quadro 21 - Resultado da área 10K

Bin Number	Size (m)	Area (m ²)	(%) in bin	Cumulative (%)
>	1	0.050	315.30	83.2
	2	0.100	44.14	11.6
	3	0.150	12.54	3.3
	4	0.200	3.55	0.9
	5	0.250	1.83	0.5
	6	0.300	0.82	0.2
	7	0.350	0.30	0.1
	8	0.400	0.25	0.1
	9	0.450	0.04	0.0
	10	0.500	0.37	0.1

% Passing	Rosin Rammler Size (m)	Swebrec Size(m)
	10	0.000
	20	0.002
	30	0.003
	40	0.006
	50	0.010
	60	0.016
	70	0.024
>	80	0.039
	90	0.068
	100	n/a

Fonte: Software da empresa X (2022)

Gráfico 7 - Resultado de fragmentação da área 10K



Fonte: Software da empresa X (2022)

4.7 Testes finais de desmonte da área 7K

4.7.1 Teste final 1 da área 7K

Foi definido um desmonte final para concluir os ensaios do projeto, a fim de definir uma malha que padronize uma ótima fragmentação e garanta uma RC mínima promovendo uma minimização no gasto de insumos.

Foram realizados dois desmontes na denominada área 7K, a qual apresentava litologias friáveis e compactas como itabiritos brandos silicosos e itabiritos compactos silicosos. A seguir serão apresentados os dados, cálculos e parâmetros do desmonte.

Afastamento (m)	Espaçamento (m)	Diâmetro (mm)	Litologia
6,6	7,6	228,6	IBS
Afastamento (m)	Espaçamento (m)	Diâmetro (mm)	Litologia
5,9	6,8	228,6	ICS

Quadro 22 - Relação de custos de insumos do teste final

Código	Denominação	Custo Unitário – Orç.	Custo Unitário – Real	Unid.
8680322	REAGENTE NITRATO AMONIO FERTILIZ.	R\$ 2,10	R\$ 2,35	kg
8526086	EMULSÃO BOMBEADA	R\$ 3,89	R\$ 3,99	kg

Fonte: Empresa X (2022)

Quadro 23 - Planilha da área 7K: carregamento com blendado - teste final 1

1	10 ^a	L	6.60	7.60	228.60	IBS	2.569	13.90	0.00	47.20	370.00	230.00	140.00	370.90	6.26
2	10 ^a	L	6.60	7.60	228.60	IBS	2.569	14.20	0.00	47.20	370.00	230.00	140.00	370.90	6.39
3	10 ^a	L	6.60	7.60	228.60	IBS	2.569	14.10	0.00	47.20	370.00	230.00	140.00	370.90	6.35
4	10 ^a	L	6.60	7.60	228.60	IBS	2.569	13.80	0.00	47.20	360.00	220.00	140.00	360.90	6.21
5	10 ^a	L	6.60	7.60	228.60	IBS	2.569	13.70	0.00	47.20	360.00	220.00	140.00	360.90	6.17
6	10 ^a	L	6.60	7.60	228.60	IBS	2.569	14.00	0.00	47.20	370.00	230.00	140.00	370.90	6.30
7	10 ^a	L	6.60	7.60	228.60	IBS	2.569	13.60	0.00	47.20	360.00	220.00	140.00	360.90	6.12
8	10 ^a	L	6.60	7.60	228.60	IBS	2.569	14.00	0.00	47.20	370.00	230.00	140.00	370.90	6.30
9	10 ^a	L	6.60	7.60	228.60	IBS	2.569	14.00	0.00	47.20	370.00	230.00	140.00	370.90	6.30
10	10 ^a	L	6.60	7.60	228.60	IBS	2.569	14.30	0.00	47.20	380.00	230.00	150.00	380.90	6.44
11	10 ^a	L	6.60	7.60	228.60	IBS	2.569	14.50	0.00	47.20	380.00	230.00	150.00	380.90	6.53
12	10 ^a	L	6.60	7.60	228.60	IBS	2.569	14.30	0.00	47.20	380.00	230.00	150.00	380.90	6.44
13	10 ^a	L	6.60	7.60	228.60	IBS	2.569	14.40	0.00	47.20	380.00	230.00	150.00	380.90	6.48
14	10 ^a	L	6.60	7.60	228.60	IBS	2.569	14.00	0.00	47.20	370.00	230.00	140.00	370.90	6.30
15	10 ^a	L	6.60	7.60	228.60	IBS	2.569	14.00	0.00	47.20	100.00	60.00	40.00	100.90	6.30
16	10 ^a	L	6.60	7.60	228.60	IBS	2.569	13.90	0.00	47.20	370.00	230.00	140.00	370.90	6.26

Fonte: A autora (2022)

Quadro 24 – Resultados

Total	
Quant. Furo	105
Volume m3	75,112.07
Explosivo Gasto:	33,564.50
M. Desmontada:	192,962.92
Razão de Carga:	173.94
Minério	192,962.92
Estéril	0.00

Fonte: A autora (2022)

Quadro 25 - Análise econômica dos testes finais da área 7k

Descrição	EXECUTADO
Quant. Furo (un)	105
Explosivo Gasto (kg)	33.564,5
Razão de Carga(g/t)	173,94
M. Desmontada Minério (t)	237.984,78
Explosivo Emulsão 5800m/S Granel (kg)	23.495,15
Nitrato de Amônio (ANFO Derramado) (kg)	10069,35
Gastos com Nitrato de Amônio (R\$)	R\$ 21.850,48
Gastos Emulsão 5800m/S	R\$ 93.745,65

Fonte: A autora (2022)

Figura 10 - Imagem após desmonte da área 7k - teste final 1



Fonte: A autora (2022)

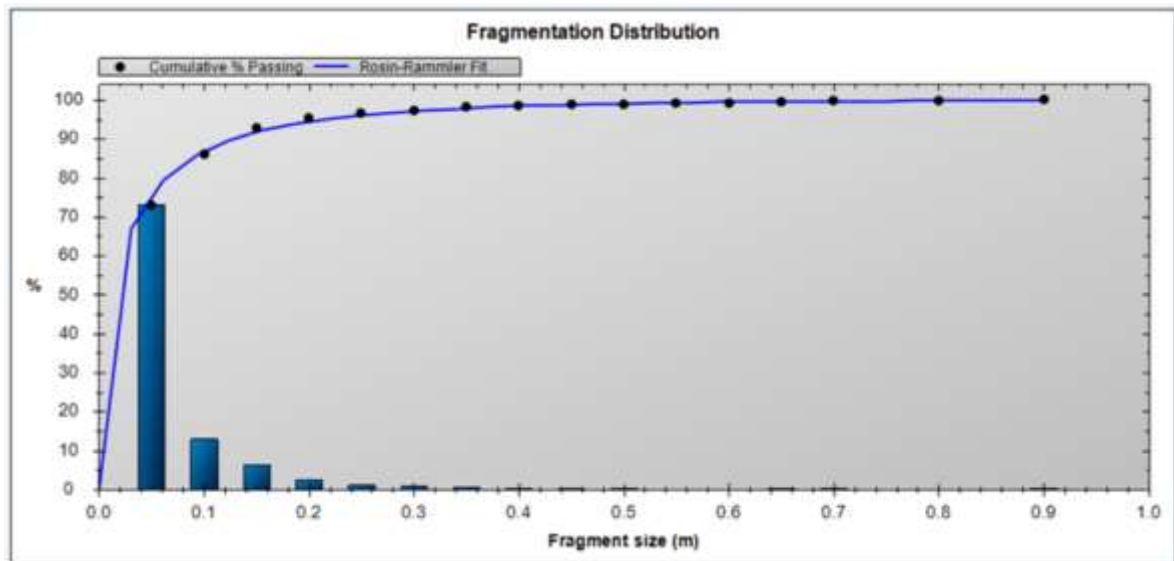
Quadro 26 - Resultados do teste final 1 da área 7K

Bin Number	Size (m)	Area (m ²)	(%) in bin	Cumulative (%)	
>	1	0.050	222.32	73.1	73.1
	2	0.100	39.60	13.0	86.2
	3	0.150	19.89	6.5	92.7
	4	0.200	7.76	2.6	95.2
	5	0.250	3.89	1.3	96.5
	6	0.300	2.54	0.8	97.4
	7	0.350	2.12	0.7	98.1
	8	0.400	1.38	0.5	98.5
	9	0.450	0.53	0.2	98.7
	10	0.500	0.90	0.3	99.0
	11	0.550	0.39	0.1	99.1
	12	0.600	0.03	0.0	99.1
	13	0.650	0.63	0.2	99.3
	14	0.700	0.96	0.3	99.7
	15	0.750	0.00	0.0	99.7
	16	0.800	0.05	0.0	99.7
	17	0.850	0.00	0.0	99.7
	18	0.900	1.01	0.3	100.0

% Passing	Rosin Rammler Size (m)	Swebrec Size(m)	
	10	0.000	n/a
	20	0.001	n/a
	30	0.003	n/a
	40	0.007	n/a
	50	0.012	n/a
	60	0.021	n/a
	70	0.037	n/a
>	80	0.064	n/a
	90	0.129	n/a
	100	n/a	n/a

Fonte: Software da empresa X (2022)

Gráfico 8 - Resultado de fragmentação da área 7K do teste final 1



Fonte: Software da empresa X (2022)

4.7.2 Teste final 2 da área 7K

Quadro 27 - Planilha da área 7K: carregamento com blendado - teste final 2

1	10"	L	5.90	6.80	228.60	ICS	3.045	14.30	0.00	47.20	380.00	270.00	110.00	380.90	6.44
2	10"	L	5.90	6.80	228.60	ICS	3.045	14.50	0.00	47.20	380.00	270.00	110.00	380.90	6.53
3	10"	L	5.90	6.80	228.60	ICS	3.045	14.30	0.00	47.20	380.00	270.00	110.00	380.90	6.44
4	10"	L	5.90	6.80	228.60	ICS	3.045	14.40	0.00	47.20	380.00	270.00	110.00	380.90	6.48
5	10"	L	5.90	6.80	228.60	ICS	3.045	14.00	0.00	47.20	370.00	260.00	110.00	370.90	6.30
6	10"	L	5.90	6.80	228.60	ICS	3.045	14.00	0.00	47.20	370.00	260.00	110.00	370.90	6.30
7	10"	L	5.90	6.80	228.60	ICS	3.045	13.90	0.00	47.20	370.00	260.00	110.00	370.90	6.26
8	10"	L	5.90	6.80	228.60	ICS	3.045	13.70	0.00	47.20	360.00	260.00	100.00	360.90	6.17
9	10"	L	5.90	6.80	228.60	ICS	3.045	13.80	0.00	47.20	360.00	260.00	100.00	360.90	6.21
10	10"	L	5.90	6.80	228.60	ICS	3.045	14.10	0.00	47.20	370.00	260.00	110.00	370.90	6.35
11	10"	L	5.90	6.80	228.60	ICS	3.045	13.70	0.00	47.20	360.00	260.00	100.00	360.90	6.17
12	10"	L	5.90	6.80	228.60	ICS	3.045	14.00	0.00	47.20	370.00	260.00	110.00	370.90	6.30
13	10"	L	5.90	6.80	228.60	ICS	3.045	13.60	0.00	47.20	100.00	70.00	30.00	100.90	6.12
14	10"	L	5.90	6.80	228.60	ICS	3.045	14.00	0.00	47.20	370.00	260.00	110.00	370.90	6.30
15	10"	L	5.90	6.80	228.60	ICS	3.045	14.00	0.00	47.20	100.00	70.00	30.00	100.90	6.30
16	10"	L	5.90	6.80	228.60	ICS	3.045	13.90	0.00	47.20	370.00	260.00	110.00	370.90	6.26

Fonte: A autora (2022)

Quadro 28 - Resultados

Total	
Quant. Furo	107
Volume m3	61,198.00
Explosivo Gasto:	32,926.30
M. Desmontada:	186,347.91
Razão de Carga:	176.69
Minério	186,347.91
Estéril	0.00

Fonte: A autora (2022)

Quadro 29 - Análise econômica da área 7K - teste final 2

Descrição	EXECUTADO
Quant. Furo (un)	107
Explosivo Gasto (kg)	32.926,30
Razão de Carga(g/t)	176,69
M. Desmontada Minério (t)	186.374,91
Explosivo Emulsão 5800m/S Granel (kg)	23.048,41
Nitrato de Amônio (ANFO Derramado) (kg)	9.877,89
Gastos com Nitrato de Amônio (R\$)	R\$ 21.435,02
Gastos Emulsão 5800m/S	R\$ 91.963,15

Fonte: A autora (2022)

Figura 11 - Imagem após desmonte da área 7K - teste final 2



Fonte: A autora (2022)

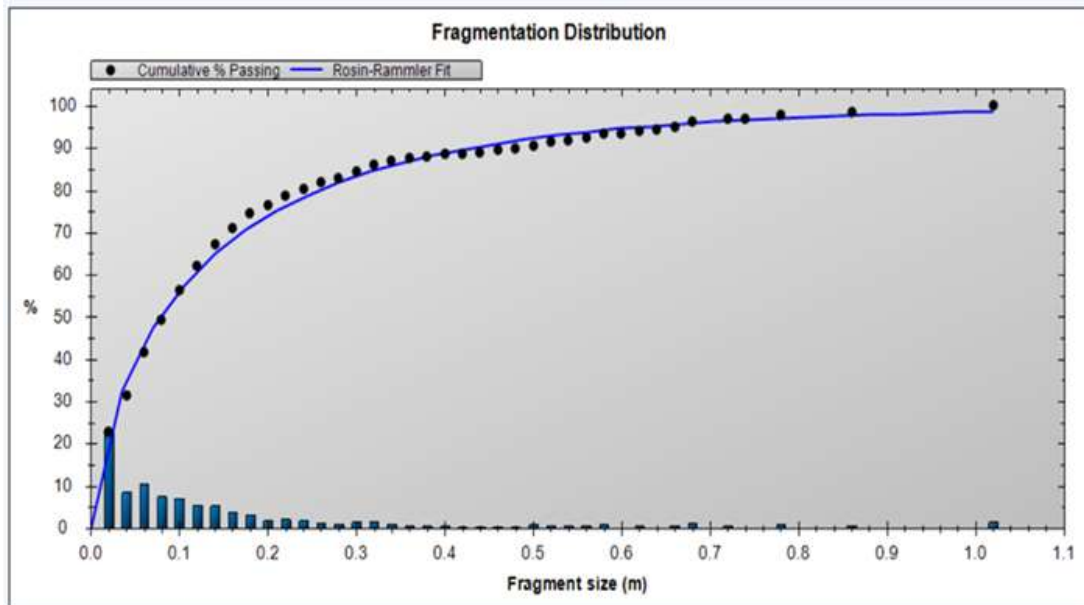
Quadro 30 - Resultados do teste final 2 da área 7K

Bin Number	Size (m)	Area (m ²)	(%) in bin	Cumulative (%)
>	1	0.020	33.94	22.9
	2	0.040	12.56	31.4
	3	0.060	15.43	41.8
	4	0.080	11.14	49.3
	5	0.100	10.51	56.4
	6	0.120	8.21	62.0
	7	0.140	7.88	67.3
	8	0.160	5.78	71.2
	9	0.180	4.93	74.5
	10	0.200	2.70	76.4
	11	0.220	3.29	78.6
	12	0.240	2.71	80.4
	13	0.260	2.12	81.8
	14	0.280	1.55	82.9
	15	0.300	2.21	84.4
	16	0.320	2.39	86.0
	17	0.340	1.35	86.9
	18	0.360	1.00	87.6
	19	0.380	0.74	88.1
	20	0.400	0.73	88.6
	21	0.420	0.25	88.7

% Passing	Rosin Rammler Size (m)	Swebrec Size(m)
	10	0.005
	20	0.016
	30	0.031
	40	0.051
	50	0.079
	60	0.117
	70	0.172
>	80	0.259
	90	0.429
	100	n/a

Fonte: Software da empresa X (2022)

Gráfico 9 - Resultado de fragmentação da área 7K do teste final 2



Fonte: Software da empresa X (2022)

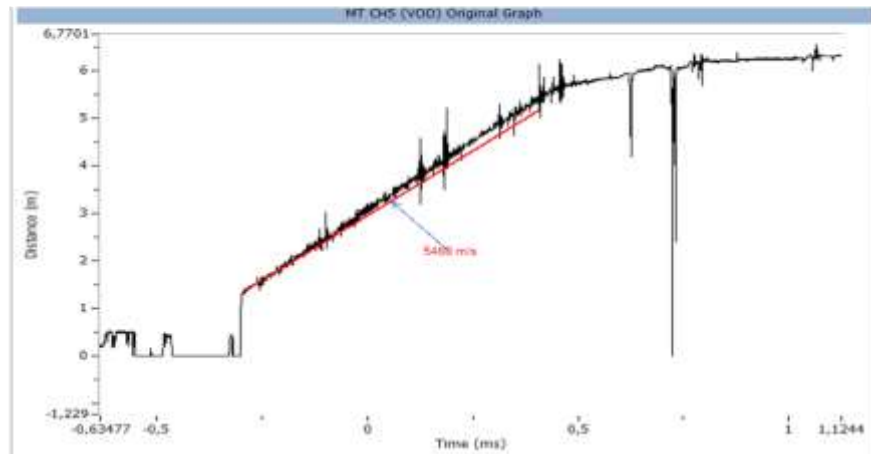
Quadro 31 - Dados gerais da área 7K do teste final 2

LOCAL	7K
DATA DA MEDIÇÃO	03-07-20
HORA	13:20
CAPTAÇÃO	1 furo
PROFUNDIDADE (m)	15m
TAMPÃO (m)	8,5m
DIÂMETRO (pol.)	9 7/8
INICIADOR	Booster 900g
EXPLOSIVO	Fortis Extra 70
DENSIDADE (g/cm³)	1,28

Fonte: A autora (2022)

Gráfico 10 - Medição de Velocidade de Detonação da área 7K - teste final 2

Resultado
VOD = 5460 m/s



Fonte: Equipamento de medição da empresa X (2022)

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na tabela abaixo podemos observar os resultados obtidos com o projeto:

Quadro 32 - Análise cronológica de viabilidade do projeto

Área	Data	Convencional Malha (3,5 X 7)	Blendado Custo por desmonte	Massa Desmontada (T)	Malha Aplicada	Varição
7K	17/04/20	R\$ 132327,30	R\$ 167818,86	118012,51	(3,5 X 7,0)	-R\$ 35491,56
7K	04/05/20	R\$ 132327,30	R\$ 128744,25	119497,15	(5,3 X 6,1)	+R\$ 3583,05
11J	15/05/20	R\$ 132327,30	R\$ 145367,10	182518,28	(5,6 X 6,5)	-R\$ 13039,80
10K	20/06/20	R\$ 132327,30	R\$ 129590,83	208143,49	(5,9 X 6,8)	+R\$ 2736,47
7K	16/07/20	R\$ 132327,30	R\$ 115596,13	237984,78	(6,6 X 7,6)	+R\$ 16731,17
7K	03/07/20	R\$ 132327,30	R\$ 113398,17	186372,91	(5,9 X 6,8)	+R\$ 18929,13

Fonte: A autora (2022)

Os ensaios estão separados em suas respectivas datas e áreas em que foram executados. Podemos observar os gastos com carregamento aplicando explosivos (blendado) X aplicação com carregamento convencional (emulsão bombeada + ANFO) e os gastos com explosivos que seria obtido com utilização o carregamento convencional em cada desmonte.

Nos primeiros testes, os gastos com blendado foram maiores em relação ao carregamento convencional baseando-se na malha utilizada (3,5 X 7). Mediante as simulações feitas para as litologias presentes nas áreas de ensaios junto às simulações de capacidade de fragmentação dos explosivos da empresa “X”, obteve-se o parâmetro médio de 24,3% no aumento da malha aplicada. Com a constante otimização nos planos de fogo, aumentando-se gradualmente as malhas estudadas em uma proporção de 11% em sua área de acordo com a litologia, foi notável o ganho na redução dos custos diretamente proporcional ao aumento na produção de massa desmontada, nas análises e tratativas após os desmontes ocorridos. Ao final de todos os testes foi obtida uma economia de R\$17.830,15.

Não foram relatados casos de “matações” após o desmonte e durante o carregamento, paradas nos britadores ou redução de produtividade dos equipamentos de lavra por parte das gerências de produção e britagem.

Tomando-se os últimos testes (7K) como parâmetro, obtivemos uma redução de custos com explosivos de 32,4%. Utilizando os dados de 2020 em que foram utilizados 7.299.503 kg de blendado com desmontes em litologias friáveis e semi-compactas com o seu respectivo valor de R\$6,16/kg, obtivemos uma projeção de redução de custo anual de R\$ 4.707.159,60.

6 CONCLUSÃO

Os desmontes de rochas com uso de explosivo blendado mediante os ensaios nas áreas operacionais aplicadas proporcionaram uma melhor performance de fragmentação devido ao aumento da potência e da pressão de detonação de forma notória. Em comparação, na forma de carregamento convencional foi notória também a melhoria na performance de aplicação do explosivo, já que em uma única passada permite o preenchimento de todo horizonte do furo versus o carregamento convencional, em que se fazem necessárias duas passadas — carga de fundo aplicada com emulsão bombeada e carga de coluna aplicada com ANFO mecanizado. Com o uso de sacarias, feito de forma manual, a aplicação se torna morosa e prejudicial à ergonomia dos colaboradores.

Nos ensaios nas áreas aplicadas foram observadas relações diretas entre explosivo blendado e o aumento no percentual das malhas em litologias friáveis/semi-compactas e também pela massa gerada após a detonação. Essa relação baseia-se em regiões friáveis e semi-compactas. Em outras regiões da mina com litologias de densidades maiores, regiões com litologias compactas, serão necessários uma nova abordagem e novos ensaios, a fim de evitar expectativas irreais.

O estudo é focado em demonstrar que, com a utilização/otimização de um explosivo mais energético (explosivo blendado), é possível um aumento de forma gradual da malha de perfuração a fim de gerar um resultado positivo em termos de economia em consumo de insumos explosivos sem promover impactos em termos de segurança e produtividade.

Após a realização dos ensaios não foi apontado nenhum relato inseguro ou de impactos operacionais por parte das gerências da mina.

Com os testes realizados nas áreas citadas, foi possível observar a necessidade de uma melhor sincronização entre operadores de unidade de aplicação móvel e auxiliares de carregamento em bancada. A parte operacional é de influência direta nos resultados obtidos, o que torna justificável a necessidade de se seguir uma metodologia como a PDCA e/ou similar, durante todas as fases da aplicação de explosivos, em busca de uma melhoria contínua em todos os processos.

Os resultados após o desmontes demonstraram de forma satisfatória, visualmente e por medições, o alcance do intento. A coleta dos dados em campo demonstrou um cuidado junto ao aumento da malha em algumas regiões da mina mediante determinadas litologias, pontualmente as que se apresentarem compactas. Nessas regiões será necessário um estudo mais aprofundado para evitar impactos operacionais.

Economicamente os ganhos nos custos com aplicação de explosivo blendado apresentaram-se de forma positiva, proporcionando uma redução média de 14,4 % mediante os testes realizados. A otimização das malhas com uso de explosivo blendado promoveu uma economia anual projetada de R\$ 4.707.159,60 nos desmontes em litologias friáveis e semi-compactas, superando assim a meta definida no objetivo deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- ALONSO, J. B.; GÓMEZ, J. C.; HERBERT, J. H. H. **Peforación y Voladura de Rocan en Minería**. Madri: Universidad Politécnica de Madrid, 2013.
- CHIAPPETTA, R. F. Nueva Técnica de Voladura. **Journal of Explosives Engineering**, 20 p., 2004.
- CHISTOFOLLETTI, C. 310 p. **Correlação entre as classificações geomecânicas RMR e Q e sua relevância geológica**. 2014. Dissertação (Programa de pós-graduação em Geoquímica e Geotécnica) - Universidade de São Paulo, 2014. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/44/44141/tde-09102014-134001/pt-br.php>. Acesso em: 13 jul. 2022
- DAHN, C. J.; JAMES, R. W., **Cycled Prill, A New Generation of High Performance High Density ANFO Explosives**. Proceedings of the 6th General ISEE Annual Conference, Tampa, USA, International Society of Explosive Engineers Reference Database on CD-ROM, 12 p. 2000.
- DICK, R. A. **The Impact of Blasting Agents and Slurries on Explosives Technology**. US Bureau of Mines Information Circular, IC 8560, International Society of Explosive Engineers Reference Database on CD-ROM, 40 p. 2000.
- MENDES, M. L. **Curso de Desmonte de Rochas por Explosivos - Formação de Blaster**. Disponível em: <https://www.academia.edu/10183750/CURSO_DE_DESMONTE_DE_ROCHAS_POR_EXPLOSIVOS_-FORMA%C3%87%C3%83°_DE_BLASTER_Instrutor_Marcelo_Lopes_Mendes_-Engenheiro_de_Minas_CREAMG_73.235_D>. Acesso em: 20 abr. 2019.
- OLIVEIRA, A. M. S. **Geologia de engenharia**. Editora Abge, 1998.
- SILVA, V. C. **Desmonte de rochas com explosivos**. INSTITUTO DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA, 126 p. 1998.
- SILVA, V. C. **Curso de min 210. Operações mineiras**. Ouro Preto: Departamento de Engenharia de Minas, 2009.
- SILVA, V. C. **Apostila do Curso de Desmonte de Rochas**. Escola de Minas. Ouro Preto, 172 p., 2014.
- SILVA, V. C. **Apostila do Curso de Desmonte de Rochas**. Universidade Federal de Ouro Preto. Departamento de Engenharia de Minas, 2014.
- SUDWEEKS, W. B.; LAWRENCE, L. D. **Thermally stable emulsion explosive composition**. Aplicação nº 92,897. US 4,322,258. EUA. IRECO Chemicals. 1982
- SHEWHART, W. A. **Statistical Method from the Viewpoint of Quality Control**. Washington: Department of Agriculture, 1939. Disponível em: <https://www.worldcat.org/title/statistical-method-from-the-viewpoint-of-quality-control/oclc/1249225>. Acesso em: 20 abr. 2019.
- VALENÇA, U. S.; REIS, S. S.; PALAZZO, J. F.; ATHAYDE, A. A. C. **Engenharia dos Explosivos: um enfoque dual**. Rio de Janeiro, 583 p. 2013.

WANG, X. **Emulsion Explosives**. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1994.