



CENTRO UNIVERSITÁRIO LUTERANO DE PALMAS

Recredenciado pela Portaria Ministerial nº 3.607, de 17/10/05, D.O.U. nº 202, de 20/10/2005

ASSOCIAÇÃO EDUCACIONAL LUTERANA DO BRASIL

LUANA ALVES RODRIGUES

OTIMIZAÇÃO DE DESMONTE DE ROCHA: Com o Auxílio do Software

O-PITBLAST

Palmas – TO

2017

LUANA ALVES RODRIGUES

OTIMIZAÇÃO DE DESMONTE DE ROCHA: Com o Auxílio do Software

O-PITBLAST

Projeto de Pesquisa elaborado e apresentado como requisito parcial para aprovação na disciplina Projeto Organizacional (TCC II) do curso de bacharel em Engenharia de Minas pelo Centro Universitário Luterano de Palmas (CEULP/ULBRA).

Orientador (a): Prof. Esp. Caroline Dourado Moreira Lima

Palmas – TO

2017

LUANA ALVES RODRIGUES

OTIMIZAÇÃO DE DESMONTE DE ROCHA: Com o Auxílio do Software

O-PITBLAST

Projeto de Pesquisa elaborado e apresentado como requisito parcial para aprovação na disciplina Projeto Organizacional (TCC II) do curso de bacharel em Engenharia de Minas pelo Centro Universitário Luterano de Palmas (CEULP/ULBRA).

Orientador (a): Prof. Esp. Caroline Dourado Moreira Lima

Aprovada em ____/____/____

BANCA EXAMINADORA

Orientador (a): Prof. Esp. CAROLINE DOURADO MOREIRA LIMA

Centro Universitário Luterano de Palmas – CEULP

Prof. M.Sc. DANIEL FRANCISCO PADILHA SETTI

Centro Universitário Luterano de Palmas – CEULP

Prof. Dr. ERWIN TOCHTROP JUNIOR

Centro Universitário Luterano de Palmas – CEULP

Palmas – TO

2017

*“Melhor é adquirir sabedoria que ouro precioso;
E adquirir inteligência vale mais que a prata”.*
Provérbios 16.16

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, por me permitir chegar onde estou, sem Ele eu nada seria. Agradeço também por todas as bênçãos alcançadas.

Aos meus pais, Josefa Helena Alves e Francisco Gomes Rodrigues, por me proporcionarem chegar até aqui, por acreditarem no meu potencial e se dedicarem a me oferecer o melhor que podem.

Os engenheiros de minas Vinicius Miranda e Francisco Leite, por me disponibilizarem a licença do software O-Pitblast, para que possa ser realizado os experimentos do TCC, agradeço também pelo material que me disponibilizaram.

Aos engenheiros de minas Eraldo Florêncio, Kleber Nascimento e Carlos Henrique Xavier, aos professores José Cleuton e Rodrigo Rodrigues pela paciência e pela dedicação que propuseram a me oferecer ajuda sempre que necessário.

A engenheira de minas Hayanne Freitas, por ter sido ponte na segunda etapa do projeto e ter me apresentado ao Mário Gonzaga, responsável por abrir várias outras portas, aos engenheiros de minas da São Francisco Mineração, Bruna Lima e João Henrique Aguiar, por tudo que fizeram e ainda fazem por mim.

Toda equipe de Feira de Santana e Recife da ENAEX – Britanite, em especial ao Paulo Diniz, pela oportunidade que me destes de acompanhar os desmontes realizados pela empresa.

RESUMO

RODRIGUES, Luana Alves. **OTIMIZAÇÃO DE DESMONTE DE ROCHA: Com o Auxílio do Software O-PITBLAST**. 2017. 105 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Minas, Centro Universitário Luterano de Palmas, Palmas - To, 2017.

Um dos setores da engenharia de minas que mais vem chamando a atenção e crescendo é a área de lavra e suas variáveis. Em decorrência disso novas técnicas de aperfeiçoamento da área estão em destaque no mercado, proporcionando ferramentas de otimização de processos de forma simples e rápida. Neste contexto é focado o uso do software O-Pitblast como auxílio na otimização nos parâmetros do plano de fogo. O objetivo desta pesquisa consiste em alcançar os melhores resultados, visando o melhor custo benefício de acordo com os princípios teóricos abordados.

Palavras-chave: Otimização, Desmonte de rocha, O-Pitblast, Plano de fogo.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – São Francisco Mineração.....	6
Figura 2 – Mapa Geológico Local.....	7
Figura 3 – Gnaisse de coloração alaranjada constituídos por quartzo, feldspato e k-feldspato, do local de extração e exposta no relatório final de pesquisa.....	8
Figura 4 – Explosivo granulado. ANFO.....	12
Figura 5 – Emulsão encartuchada.....	13
Figura 6 – Cordel detonante.....	15
Figura 7 – Boosters.....	16
Figura 8 – Estação Total.....	17
Figura 9 – Malha de perfuração. (Afastamento X Espaçamento).....	20
Figura 10 – Carregamento de furo com emulsão.....	25
Figura 11 – Tipos de amarrações de malha de perfuração.....	26
Figura 12 – Fases de ruptura do furo.....	28
Figura 13 – Zonas resultantes de um furo de desmonte.....	29
Figura 14 – Etapas do controle de processo no software Split-Desktop.....	30
Figura 15 – Porta Metrics.....	31
Figura 16 – Comparação da curva granulométrica prevista pelo modelo Kuz-Ram com a Análise Granulométrica por Imagem.....	32
Figura 17 – Componentes do furo de acordo com o Modelo de Fragmentação TCM.....	36
Figura 18 – Software Vulcan.....	41
Figura 19 – Simulação de bancada e furos no software O-Pitblast.....	43
Figura 20 – Simulação de furos no software O-Pitblast.....	44
Figura 21 – Geologia Local.....	49
Figura 22 – Distanciamento de 3 pontos na malha de perfuração.....	52
Figura 23 – Posicionamento dos furos em relação ao ângulo.....	52
Figura 24 – Malhas de perfuração.....	53
Figura 25 – Croqui Plano de Fogo.....	55
Figura 26 – Marcação dos furos da malha de perfuração.....	56
Figura 27 – Perfuratriz FÊNIX 70 mini AIR Service.....	57
Figura 28 – Carregamento dos furos com emulsão bombeada (a), perfil de um furo já carregado e tamponado (b) detalhe da escorva mostrando um booster de 150g já imerso em emulsão (c).....	59
Figura 29 – Aferimento da profundidade do tampão.....	60
Figura 30 – Tamponamento dos furos.....	61

Figura 31 – Conexão de Brineis na Amarração.....	61
Figura 32 – Fragmentação do desmonte	64
Figura 33 – Escavadeira Case CX220C.....	65
Figura 34 – Malha de perfuração no O-Pitblast.....	68
Figura 35 – Malha de amarração	69
Figura 36 – Informação do plano de fogo antes da otimização	71
Figura 37 – Otimização 01	73
Figura 38 – Otimização 02	75
Figura 39 – Otimização 03	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação de Lilly	35
Tabela 2 – Tabela de restrições	38
Tabela 3 – Tabela de Restrições.....	39
Tabela 4 – Rochas Graníticas	50
Tabela 5 – Informação do desmonte. Mês: Abril	62
Tabela 6 – Guia para fator de pó e rocha para vários tipos de rocha.....	70
Tabela 7 – Comparativo de Fragmentação das Otimizações Geradas	78
Tabela 8 – Análise dos Processos de Otimizações.....	80

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Previsão de Fragmentação.....	72
Gráfico 2 – Previsão de Fragmentação da Otimização 01	74
Gráfico 3 – Previsão de Fragmentação da Otimização 02	76
Gráfico 4 – Previsão de Fragmentação da Otimização 03	78
Gráfico 5 – Comparativo de Fragmentação das Otimizações Geradas	79

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
BA	Bahia
ha	Hectare
KPI's	Key Performance Indicators - Indicadores chave de performance
m/s	Metros por segundo
CO ₂	Dióxido de carbono
N ₂	Nitrogênio
H ₂ O	Água
CO	Monóxido de carbono
NO e NO ₂	Óxido de nitrogênio
KNO ₃	Nitrato de potássio
TNT	Trinitrotolueno
ANFO	Ammonium Nitrate and Fuel Oil
NCN	Nitrocarbonitratos
NA	Nitrato de amônio
NP	Nitropenta
g/m	Gramas por metro

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	4
2	REFERENCIAL TEÓRICO	5
2.1	Geologia	5
2.1.1	Geologia Local	5
2.2	Desmonte	8
2.2.1	Perfuração	9
2.2.2	Explosivos e acessórios de detonação	10
2.2.3	Topografia da bancada	17
2.2.4	Parâmetros não Controláveis no Plano de Fogo	18
2.2.5	Parâmetros Controláveis no Plano de Fogo	18
2.2.6	Plano de fogo	18
2.2.7	Carregamento dos furos	25
2.2.8	Amarração dos furos	26
2.2.9	Avaliação do Desmonte	27
2.3	Fragmentação	27
2.3.1	Mecanismo de Fratura de Rocha	27
2.3.2	Modelos de Avaliação	29
2.3.3	Previsão de Fragmentação	32
2.4	Otimização	36
2.4.1	KPI's	37
2.4.2	Ferramentas de Otimização	40
2.4.3	Tecnologia	42
2.5	Software O-Pitblast	42
3	METODOLOGIA	46
3.1	Desenho de Estudo	46
3.2	Objetivo do Estudo	46
3.3	Local e Período da Realização da Pesquisa	47
3.4	Apresentação das Técnicas	47
3.5	Análise e Apresentação dos Dados	47
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	48
4.1	Estudo Geológico Local	48
4.2	Acompanhamento da elaboração do plano de fogo da empresa	51

4.3	Inspeção da marcação e perfuração dos furos do plano de fogo elaborado pela empresa	56
4.4	Coleta dos dados da bancada antes do desmonte	58
4.5	Verificação do dimensionamento do desmonte	59
4.6	Análise do desmonte elaborado e executado pela empresa e seu custo	63
4.7	Elaboração e sugestão de um diagrama de fogo com auxílio do software O-Pitblast.....	68
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	82
6	REFERÊNCIAS.....	83
	ANEXOS	87

1 INTRODUÇÃO

A otimização do desmonte de rochas com uso de explosivos possui um elevado número de fatores contribuintes, como parâmetros geológicos, elementos do plano fogo, propriedades dos explosivos, previsão de fragmentação, ferramentas de otimização e o processo percorrido para alcançar o objetivo final. Um estudo mais aprofundado sobre as variáveis que englobam esse processo se torna indispensável na etapa para a otimização, proporcionando as aplicações dos melhores métodos de operação.

Diante da expansão no setor mineral e os meios criados para melhoramento das técnicas já existentes, as empresas do ramo buscam profissionais cada vez mais capacitados a atender as necessidades, sendo eles profissionais que saibam manusear softwares que contribuem para otimização de processos.

Nos processos referentes a lavra, é comum nos depararmos com desmontes mal executados, o que gera graves problemas, como a produção de matacos e repés, produzidos através de uma malha inapropriada e perfuração precária, elevando assim os custos e agravando a segurança. Visando os problemas existentes nesse setor, buscou-se reunir informações com a finalidade de responder o problema de pesquisa de como minimizar ou extinguir os agravantes gerados no setor de lavra, mais especificadamente, no desmonte de rocha com explosivos.

A resolução dos problemas gerados pela ineficiência do desmonte, podem ser solucionadas através de: Desmonte de rochas utilizando técnicas inovadoras como o software de design e otimização de desmonte O-Pitblast, produzindo um bom desempenho, economia e segurança; Desmonte de rochas que gere uma fragmentação adequada, com o objetivo de facilitar o beneficiamento do minério; Métodos de plano de fogo, juntamente com as técnicas inovadoras do software O-Pitblast, beneficia os processos de lavra e resulta na otimização do desmonte.

A otimização do desmonte de rochas tem objetivo de possibilitar uma melhor fragmentação e assim favorecer os processos de beneficiamento do minério, gerando uma diminuição no custo unitário final de produção, por meio de estudos dos dados geológicos, acompanhando os processos referentes ao plano de fogo, inspecionando o desmonte e elaborando o novo plano de fogo no software O-Pitblast com parâmetros que gere resultados satisfatórios.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Este projeto de pesquisa tem como essência, explorar novas fontes sobre os parâmetros referentes aos mecanismos do plano de fogo e suas variáveis, por meio de novas técnicas de instigação, sendo essas, por meio de simulação no software de otimização e design de desmonte de rochas O-Pitblast.

2.1 Geologia

Geologia é a ciência responsável pelo estudo da origem, vida e estrutura da Terra, através desse estudo podemos exercer as funções do âmbito da engenharia, como: projetos, planejamento e execução de fundações, escavações, estabilidade de taludes, seleção de jazidas, etc. Por meio dela, conseguimos compreender os fenômenos que envolvem a fragmentação das rochas no desmonte com explosivos (GERALDI, 2011).

Para Galiza et al. (2011) os estudos dos parâmetros geológicos e geotécnicos do maciço rochoso, servem como base para assimilar os mecanismos de ruptura da rocha, propagação e dissipação da energia agregada na detonação. O sucesso das operações de desmonte está interligado a análise das propriedades do maciço rochoso, as variações nos parâmetros como, composição mineralógica, textura e estrutura geológica, afetando não somente na perfuração, mas também no método a ser utilizado, os equipamentos necessários, diagrama do plano de fogo e escolha dos explosivos.

2.1.1 Geologia Local

São Francisco Mineração LTDA está localizada no município de Feira de Santana, estado da Bahia. Feira de Santana localiza-se a 108 km de distância da capital da Bahia, Salvador, e é vizinha dos municípios de Conceição do Jacuípe, São Gonçalo dos Campos e Coração de Maria (BRASIL, 2017).

Figura 1 – São Francisco Mineração



Fonte: São Francisco Mineração (2016).

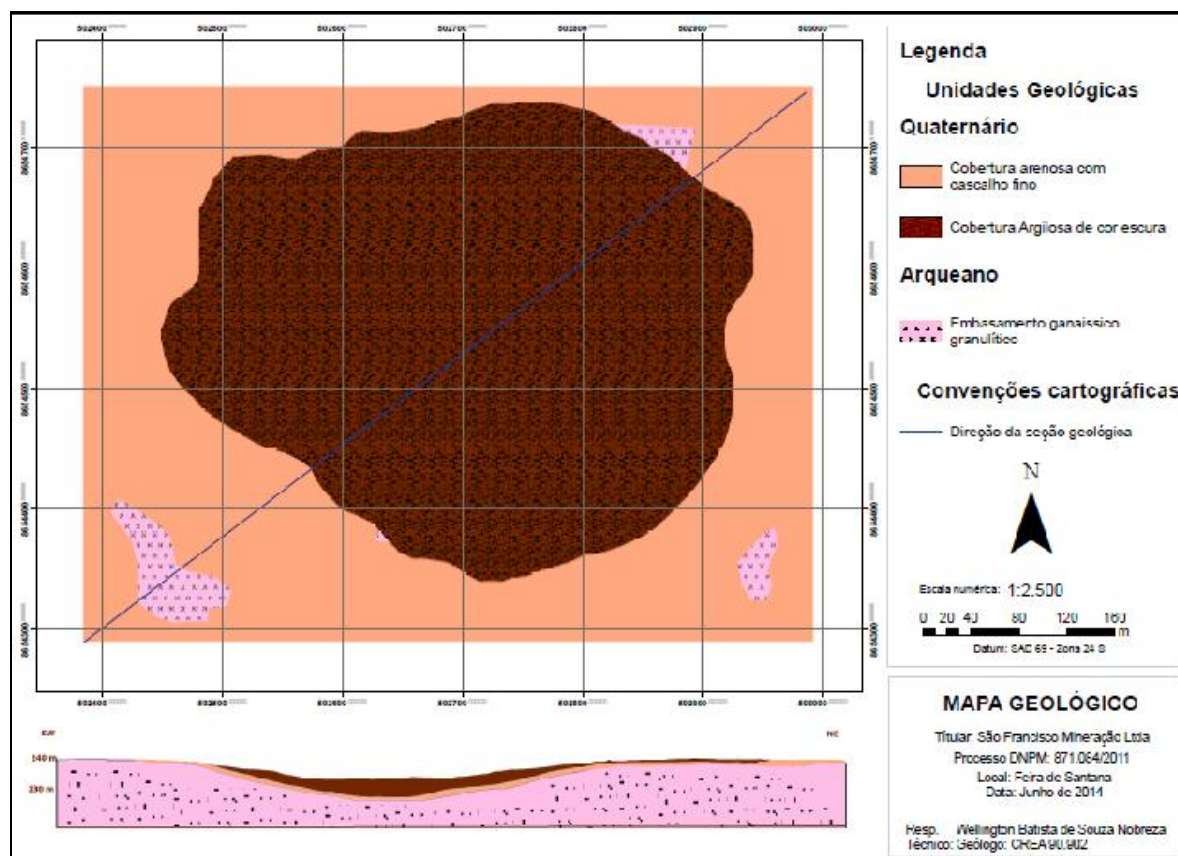
A Figura 1 representa a visão aérea da empresa São Francisco Mineração, no município de Feira de Santana, Bahia. A imagem apresenta a cava na mina, o processo de britagem realizado e demais instalações de apoio aos funcionários e clientes (S.F.M., 2016).

O acesso a mineradora é realizado a partir da cidade de Feira de Santana através da rodovia BR-116. Em seguida por um percurso de 7 km partindo-se do Anel Contorno, logo após, entra-se em uma estrada à esquerda e depois de percorrer aproximadamente 01 Km chega-se ao Distrito de Maria Quitéria, local de extração. Latitude do ponto de amarração: $-12^{\circ}10'06''184$; Longitude do ponto de amarração: $-38^{\circ}58'16''301$ (NOBREZA. 2014).

A geologia local, possui embasamento formado por: gnaisse granulítico, cobertura argilosa de cor escurecida e cobertura sedimentar (Tércio-Quaternário) com formação de areias de granulometrias fina a média. O embasamento gnáissico granulítico, apresenta coloração alaranjada a avermelhada, abrangendo também ortognaisse de coloração cinza escuro, de granulometria variada " com bandas

leucocráticas constituídas de quartzo, plagioclásio e k-feldspato e bandas máficas constituídas de piroxênio, biotita, magnetita.” (NOBREZA, 2014).

Figura 2 – Mapa Geológico Local



Fonte: NOBREZA (2014).

A Figura 2, diz respeito ao mapa geológico local da área de extração, o mapa relata a formação geológica local, com cobertura argilosa de cor escura e arenosa com cascalhos finos, datadas no período Arqueano. O material extraído é o granulito, utilizado como brita na construção civil. A construção civil necessita de insumos primários como recursos minerais para a expansão do seu setor (PEREIRA; FRANCA; NOLASCO, 2003).

Figura 3 – Gnaiss de coloração alaranjada constituídos por quartzo, feldspato e k-feldspato, do local de extração e exposta no relatório final de pesquisa



Fonte: NOBREZA (2014).

A Figura 3, apresenta uma amostra em campo do gnaiss granulítico da região local da empresa São Francisco Mineração, município de Feira de Santana, Bahia. Indica moderada densidade de fraturamentos e lineamento com direção principal E-W (NOBREZA, 2014).

2.2 Desmorte

Viabiliza-se um desmorte de rocha, quando se visa extração de uma substância útil existente na mesma. Esse desmorte constitui-se na fragmentação do maciço rochoso existente e ocorre através de tensões superiores às tensões de ruptura do material. O desmorte com uso de explosivos é o mais eficiente, porém é o método que mais causa impactos durante e após sua realização. Para tentar ajustar esses impactos, são necessários estudos das condicionantes, com o objetivo de regular as variáveis (GOMES, 2016).

2.2.1 Perfuração

A técnica de perfuração é fundamentada na execução de furos na rocha, onde esses furos serão preenchidos com explosivos posteriormente, e assim será transmitida energia para a explosão, gerando uma fragmentação da massa rochosa. Esse processo vem evoluído ao longo dos anos, por meio de novas tecnologias, que buscam eficiência e fatores externos (economia, preservação ambiental, etc), sendo os métodos de perfuração mais utilizados os de percussão e rotação. Existe uma forte ligação entre perfuração e detonação, ou seja, “uma boa perfuração permite boa detonação, e perfurações precárias garante explosões ruins” (ALONSO, GÓMEZ, & HERBERT, 2013).

2.2.1.1 *Perfuratrizes*

De acordo com Geraldi (2011), as perfuratrizes tiveram um grande avanço tecnológico a partir do século XIX, que possibilitou chegar-se no estágio atual. É possível classificar as perfuratrizes em três grupos, não importando quão sofisticada ela seja. São elas:

- Perfuratrizes percussivas.
- Perfuratrizes rotopercussivas.
- Perfuratrizes rotativas.

2.2.1.2 *Compressores*

Os compressores podem ser portáteis ou estacionários. Os portáteis, geralmente são os acionados por motores a diesel, são montados em chassis sobre pneus, possibilitando assim, sua locomoção. Já os compressores estacionários, tem uma posição fixa, denominado como estação ou central de ar comprimido, podem também ser acionados por motores a diesel, em locais de acessos privados de energia elétrica. A classificação dos compressores estacionários e portáteis é realizada de acordo com o sistema mecânico empregado na compressão do ar. Denominados (GERALDI, 2011):

- Compressores de pistão.

- Compressores de palheta.
- Compressores de parafuso.

2.2.1.3 Ferramentas de perfuração

As ferramentas de perfuração tiveram uma evolução lenta, passaram-se aproximadamente setenta anos para que houvessem modificações, como as pontas perfurantes das perfuratrizes revestidas com inserts, pastilhas ou botões compostos por carboneto de tungstênio. Essas ferramentas variam de acordo com o equipamento de perfuração. São utilizados em martelotes e perfuratrizes manuais mais leves, as brocas integrais, utilizadas em furos com menores profundidades e diâmetros. Para o desempenho de furos mais profundos e com diâmetro maior, são empregados os equipamentos seccionados (GERALDI, 2011).

De acordo com o diâmetro da perfuração, podemos controlar a fragmentação da rocha e limitar os níveis de vibrações causadas na detonação. Esse diâmetro é definido pelo tipo de trabalho e condições específicas da rocha. Após a escolha do diâmetro do furo, a seleção de quais equipamentos serem utilizados vai depender do tipo de rocha, e deve-se levar em consideração outros aspectos, como comprimento do furo e possíveis desvios de perfuração (ALONSO, GÓMEZ, & HERBERT, 2013).

2.2.2 Explosivos e acessórios de detonação

Na escolha de qual explosivo e acessório de detonação se utilizar, vários parâmetros devem ser levados em consideração, assim como o preço, sendo elemento de melhoria da produtividade. Além do preço, é necessário o estudo das propriedades desses explosivos e acessórios, tendo em vista o resultado que se deseja. Portanto, é importante uma análise de eficiência energéticas dos explosivos e seu custo (REIS, 2016).

2.2.2.1 Propriedades dos explosivos

Para a seleção adequada dos explosivos a serem utilizados é necessário avaliar as suas propriedades. Cada explosivo possui características diferentes, o que

os diferem para cada situação. As seguir, as principais propriedades dos explosivos (RICARDO & CATALANI, 1990):

- Força;
- Resistencia à água;
- Densidade;
- Velocidade de detonação;
- Gases e
- Sensibilidade.

2.2.2.2 *Explosivos*

Os explosivos possuem elevada potência mecânica, no qual se destina a várias aplicações em benefício a humanidade, como na criação de gigantescas obras civis. Podemos dividir em três fases a evolução dos explosivos, denominadas: Pólvora negra, dinamite e agentes de detonação. Especificamente, explosivos são materiais que reagem em regime de detonação, utilizados para a fragmentação de rochas (SANCHIDRIÁN; MUÑIZ, 2000).

- ANFO (Ammonium Nitrate and Fuel Oil)

ANFO é uma mistura de nitrato de amônia (94,5%) com óleo diesel (5,5%). Possui baixa sensibilidade, necessitando de uma escorva para detonar, ou seja, de um reforçador, para estabelecer o processo. Apresentam baixas densidades, e muitas das vezes, são indicados para o uso em preenchimento da carga de coluna. Sua velocidade de detonação pode atingir de 2.500 a 5.000 m/s, conforme o diâmetro dos furos (GERALDI, 2011).

Figura 4 – Explosivo granulado. ANFO



Fonte: MAXAM (2016).

A Figura 4, corresponde ao explosivo granulado tipo ANFO, possui baixa densidade, de fácil manipulação e seguro. Sua utilização é realizada por granel, o que facilita o manuseio. Sensível a escorvas e encartuchados e não sensíveis a detonadores (MAXAM, 2016).

- Emulsões explosivas

São a última geração dos explosivos, sua composição inclui água e NA, e solução combustível de óleos e emulsificantes. Sua cadeia molecular, contém óleo e não água, ganhando assim, grande energia total final. Possui 100% do acoplamento dos furos, segurança nas etapas de transporte, manuseio, aplicação, flexibilidade, elevada energia, baixo custo e densidade flexível. Podem ser encontrados em forma de cartuchos ou bombeados diretamente nos furos, por caminhões apropriados (BRITANITE, 2004).

Figura 5 – Emulsão encartuchada



Fonte: Pirobrás (2017).

A Figura 5, ilustra um explosivo, emulsão encartuchada, possui resistência à água e manuseio seguro, devido sua baixa sensibilidade ao choque. Existe em múltiplos formatos, de acordo com a condição do cliente (PIROBRÁS, 2017).

- Hidrogel explosivo

Classificado como explosivo aquoso devido levar em sua composição água. Seu funcionamento consiste em uma dispersão de redução e oxidação transformando-se em uma solução saturada grossa (gelatinosa), que permite um melhor preenchimento dos furos. Em sua composição, há nitrato de amônia e nitrato de sódio como oxidante, nitrato de monometilamina empregada como combustível, espessantes para aumentar a viscosidade e a fuga de bolhas de gás, de água como meio de dispersão e, por fim, a gaseificação que pode ser química ou física (ALVARADO, 2013).

2.2.2.3 Acessórios para detonação

É importante que a detonação inicie corretamente, para isso, é indispensável conhecer os métodos para iniciar a reação de detonação, iniciação dos explosivos e levar em consideração as amarrações da malha, na qual a detonação dos furos ocorrerá em uma ordem específica. Um explosivo, ao não se iniciar corretamente,

gera uma velocidade inferior ao da detonação, causando assim uma deflagração ou até mesmo a interrupção da reação, nesses casos, a eficiência do explosivo será menor do que a projetada (ALONSO, GÓMEZ, & HERBERT, 2013).

- Estopim

Estopim é basicamente um filamento de pólvora revestido por um fio que pode ser ou não alcatroado (com algodão), recoberto por revestimento plástico. Possui queima com velocidade uniforme e conhecida, produzindo na extremidade oposta uma chama na qual provocará a detonação da espoleta. Seu tempo de queima deve ser de 100 a 140 segundos por metro e deve suportar a 1 hora submerso em água (BRITANITE, 2004).

- Espoleta Elétrica

São detonados por uma corrente elétrica, e necessita de uma intensidade mínima para ser acionadas e provocar a detonação. Existe dois tipos de espoletas: instantânea e de retardo. A espoleta elétrica de retardo, é formada por uma cápsula de alumínio com uma ponte elétrica, carga de iniciação e elementos do retardo, que ao ser conectada aos fios condutores, inicia os elementos de retardo de acordo com o tempo de sequência da espoleta (MENDES).

- Espoleta Não Elétrica

Espoleta não elétrica é constituído por um tubo de choque com um detonador em uma extremidade e conector em outra. É de fácil manuseio e bom desempenho em baixas temperaturas. O conector pode ser projetado para acionar oito tubos (MAXAM, 2016).

- Espoleta Eletrônica

Oferce mais flexibilidade operacional, desempenho e fácil manuseio. É a mais nova geração de detonadores, possuem conexão sem fio em software e programas

automatizados em design de detonação. É formado por uma capsula de resina resistente a resistências a choques dinâmicos. (MAXAM, 2016)

- Cordel detonante

É o acessório mais utilizado para a iniciação de explosivos, especialmente em escavações de rocha a céu aberto em grandes volumes. É seguro e de fácil manuseio, possui uma alta velocidade de detonação (7.000 m/s). O cordel detonante consiste em um núcleo de alto explosivo (nitropenta). A classificação internacional do cordel e sua comercialização varia entre: NP-3, NP-5, NP-10, NP-40 e NP-60, que corresponde a quantidade de explosivos por metro em seu núcleo, exposta em g/m (GERALDI, 2011).

Figura 6 – Cordel detonante



Fonte: CURSO DE DESMONTE DE ROCHAS POR EXPLOSIVOS - FORMAÇÃO DE BLASTER

A figura 6, expõe rolos de cordel detonante, seu revestimento depende do uso a que se destina. Sua iniciação pode ser realizada por espoleta simples ou elétrica,

na aplicação de espoletas elétricas, são também fabricados retardos de cordel, que são produzidos em unidades de 5/10/20/30/50/100 m/s (GERALDI, 2011).

- Reforçadores

Os iniciadores devem ter energia suficiente para iniciar a reação de detonação na carga principal, e sustenta-lo até que o explosivo com iniciador produza energia para suportar a reação de detonação, por si só. Em geral, os iniciadores possuem uma velocidade de detonação de 7,5 km/s, densidade de 1,6 g/cm³, pressão de detonação de 200 kbars e resistência de 1,8 em relação ao peso do ANFO. Apresenta uma boa eficiência, transferindo altos níveis de energia em pequenos tempos, o que remete grande potência explosiva (HUSTRULID, 1999).

Figura 7 – Boosters



Fonte: CAVADAS (2012).

A Figura 7, corresponde a um booster, conectores que permitem iniciar o desmonte de rocha. Este modelo apresenta densidade de 1,65 g/cm³, velocidade de 7.300 m/s e pressão de detonação de 220 Kbars (CAVADAS, 2012).

2.2.3 Topografia da bancada

Na mineração a céu aberto, a topografia tem papel de orientar na estabilidade de taludes, para garantir que as dimensões estabelecidas pela litologia da área sejam respeitadas, apoio na construção de rampas de acesso, demarcações dos depósitos, atualização das bancadas e locações para perfurações (LOPES. 2014).

Figura 8 – Estação Total



Fonte: CPE Tecnologia

Na Figura 8, está ilustrada uma estação total, equipamento utilizado na topografia, e tem como função medir ângulos e distâncias. Para a coleta dos dados, é necessário a padronização de uma direção comum a todos, para melhor entendimento das informações obtidas, originando-se então o Norte Cartográfico. É necessário a cotação dos furos da bancada, que servem como referência no distanciamento da malha, essa cotação é realizada por meio de obtenção das coordenadas planimétricas ou horizontais (X, Y) e as coordenadas altimétricas (Z) dos furos. O objetivo dessa medição é mapeamento da área, dos pontos (furos) demarcados no terreno, para o desenho das curvas de níveis (VERAS, et al., 2012).

2.2.4 Parâmetros não Controláveis no Plano de Fogo

Parâmetros não controláveis, são elementos de grande importância na execução do desmonte, porém, são fatores que não podemos modificar. A presença de água, a geologia local e o mecanismo de ruptura da rocha, são de fato parâmetros fixos. É habitual que a empresa que fornece os explosivos para os desmontes não seja a mesma responsável pela perfuração, tornando o diâmetro do furo e a altura da bancada, que são parâmetros de importância no planejamento do plano de fogo, sejam considerados parâmetros não controláveis. Entre os fatores não controláveis no plano de fogo, encontra-se os seguintes (REIS, 2016):

- Densidade da rocha;
- Resistencia (dureza da rocha)
- Velocidade sísmica do maciço rochoso

2.2.5 Parâmetros Controláveis no Plano de Fogo

A forma geométrica é um fator de fundamental importância, através dela podemos escolher os métodos de operações a serem utilizados, esses são considerados parâmetros controláveis, podendo ser definidos de acordo com os resultados desejados. Dentro desses fatores, podemos controlar (ALONSO, GÓMEZ, & HERBERT, 2013):

- Diâmetro do furo
- Altura da bancada
- Inclinação do furo
- Número de furos
- Distribuição dos furos

2.2.6 Plano de fogo

A elaboração do plano de fogo tem como objetivo adequar os parâmetros necessários para o desmonte com explosivo, levando em consideração a melhor relação entre preço/eficiência de forma a retirar o minério desejado. Plano de fogo é

o projeto que deve ser realizado para o desmonte de rocha com explosivos, onde serão definidos alguns parâmetros previamente. Como a maioria dos projetos executados, o mesmo pode sofrer alterações no decorrer da sua realização (GERALDI, 2011).

- Diâmetro do furo

O diâmetro do furo é determinado de acordo com o equipamento de perfuração, tendo em vista um bom rendimento em relação a rocha que será perfurada. Esse diâmetro está ligado direto e indiretamente com os outros parâmetros do plano de fogo, como por exemplo o material detonado, sendo assim, usa-se a seguinte regra: "o valor máximo do diâmetro da perfuração em polegadas é igual à capacidade da caçamba do equipamento de carga em jardas cúbicas." (RICARDO & CATALANI, 1990).

- Profundidade do furo

A profundidade do furo, corresponde à altura da bancada (H) com a subperfuração (S). Se por acaso a bancada for inclinada, o furo deverá ser medido levando também em consideração a inclinação (GERALDI, 2011).

- Afastamento

Afastamento refere-se a distância entre duas linhas de furos, seu valor está diretamente ligado ao diâmetro e pode-se dizer que o afastamento é igual a 45 vezes o diâmetro da perfuração em mm. É necessário obter um afastamento teórico e um afastamento prático, no qual garanta, apesar dos possíveis desvios, um afastamento adequado no pé da bancada, o que causa um efeito no explosivo de grande importância. A fórmula para calcular o afastamento é a seguinte (RICARDO & CATALANI, 1990):

$$A = 0,0123[2x[pe/pr]+1,5]Xde \text{ (em metros)}$$

Onde:

ρ_e = densidade do explosivo (g/cm^3)

ρ_r = densidade da rocha (g/cm^3)

DE= diametro do explosivo para explosivos encartuchados (mm)

DE= diametro do furo para explosivos a granel e bombeados (mm)

- Espaçamento

Espaçamento refere-se a distância longitudinal entre os furos de uma mesma linha, tendo relação direta com o afastamento. A malha de perfuração é a distância entre os furos, (afastamento X espaçamento). A fórmula na qual é dada a sua relação é a seguinte (GERALDI, 2011):

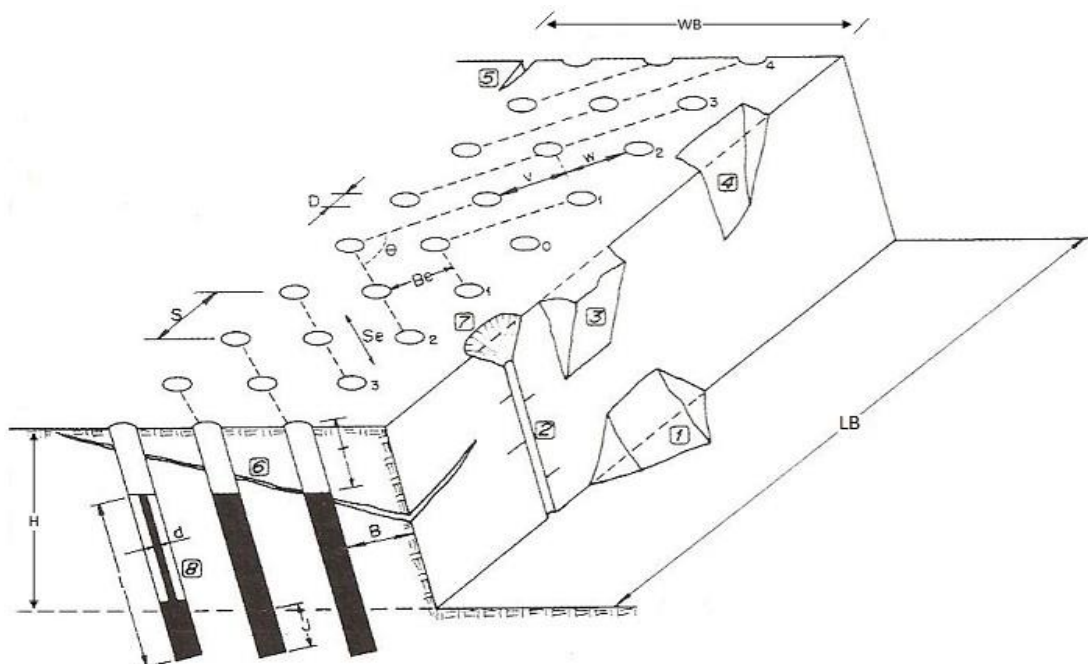
$$E=1,3 \times A$$

Onde:

E= Espaçamento

A= Afastamento

Figura 9 – Malha de perfuração. (Afastamento X Espaçamento).



Fonte: adaptado López, Jimeno - Manual de Perforación y Voladuras de Rocas.

A Figura 9, corresponde a uma malha de detonação, que leva em consideração o afastamento e o espaçamento, o que tem ligação direta com outros parâmetros, como diâmetro do furo, subperfuração, altura da bancada e comprimento dos furos. São considerados aspectos controláveis do plano de fogo (CAVADAS, 2012).

- Inclinação do furo

Os furos em mina a céu aberto, geralmente são em vertical ou com uma pequena inclinação, afim de conservar a estabilidade do talude após a detonação. O furo com uma inclinação maior, possibilita um arranque de rocha mais eficiente, contribuindo para a redução da formação de repés (GERALDI, 2011).

- Subperfuração

Subperfuração é a distância perfurada abaixo do nível que se projeta executar o desmonte, com o objetivo de um desmonte eficaz. A fórmula universal para o cálculo da subperfuração é dada a seguir, em alguns casos o valor referido pode chegar até 0,5, podendo então variar de 0,3 a 0,5. (GOMES, 2016):

$$S= 0,3 \times A$$

Onde:

S= Subperfuração

A=Afastamento

- Carga de fundo

Local onde deve haver a maior concentração de explosivo, utiliza-se a seguinte regra para o preenchimento da carga de fundo: “A extensão da carga de fundo em metros é igual ao afastamento teórico multiplicado por um fator igual a

1,3". A concentração de carga é dada por kg/m, e é conhecida também por razão linear de carregamento, é encontrada por (RICARDO & CATALANI, 1990):

$$HCF = (PF - T) \times 30\% \text{ (em metros)}$$

Onde:

HCC = Altura da carga de fundo

PF = Profundidade do furo

T = Tampão

$$CF = HCF \times RLC \text{ (tabela)}$$

Onde:

CF = Carga de fundo

HCF = Altura da carga de fundo

RLC = Razão linear da carga

- Tampão

O objetivo do tampão é evitar o escape de gases gerados pelos explosivos para a atmosfera, sendo assim, que se propagem nas fraturas para auxiliar no processo de fragmentação da rocha. O tampão é constituído por material com granulometria fina, para que forneça fricção nas paredes do furo, gerando uma força contrária a detonação. A fórmula utilizada para o cálculo do tampão é (GOMES, 2016):

$$0,7 \times A < T < 1A$$

Onde:

A = Afastamento

T = Tampão

- Carga de coluna

Sua concentração varia entre 40-50% da carga de fundo, em alguns casos é necessário a utilização de espaçadores, para se chegar a extensão da carga de coluna. A formula denominada para determinar o valor da carga de coluna é (RICARDO & CATALANI, 1990):

$$HCC = PF - HCF - T$$

Onde:

HCC= Altura da carga de coluna

PF = Profundidade do furo

HCF = Altura da carga de fundo

T = Tampão

$$CC = HCC \times RLC$$

Onde:

CC = Carga de coluna

HCC = Altura da carga de coluna

RLC = Razão linear de carga

- Volumes de escavação (VF e VT)

VF representa o volume desmontado de rocha por furo e pode ser encontrado usando-se a seguinte forma (GERALDI, 2011):

$$VF = E \times A \times HB \text{ (em m}^3\text{)}$$

VF x Densidade da rocha (resultado em tonelada)

Onde:

E= Espaçamento

A= Afastamento

HB= Altura da bancada

VF= volume por furo

Já o valor total a ser produzido pela detonação, será calculado pela formula:

$$VF \times n^{\circ} \text{ de furos} = VT \text{ (em m}^3\text{)}$$

Onde:

VF=Volume por furo

VT=Volume total

- Razão de carregamento

Razão de carga é denominada quantidade de explosivo a ser utilizado no furo, independente de qual explosivo for utilizado, em gramas que será necessária para fragmentar a rocha desejada. A razão de cargas é um importante parâmetro no plano de fogo. Seu valor, irá depender da dureza da rocha que será desmontada, é encontra pela seguinte fórmula (GERALDI, 2011):

$$RC = CT/V \text{ (kg/m}^3\text{)}$$

Onde:

RC = Razão de carregamento

CT = Carga total

V = Volume

- Carga explosiva por fogo

Corresponde ao volume total de rocha multiplicado pela razão de carga. Dentro deste parâmetro também está contido a denominada carga de explosivo por retardo, que é um parâmetro muito importante, principalmente em casos em que se

deseja controlar as vibrações causadas pelo desmonte, como próximo de edificações (GERALDI, 2011).

2.2.7 Carregamento dos furos

Além dos cuidados necessários para o manuseio dos explosivos, é necessário também medidas apropriadas no que diz respeito a limpeza e carregamento dos furos. Sendo necessário também a limpeza da frente de detonação, como forma de prevenção de lançamento de rochas soltas no momento do desmonte. O processo de carregamento dos furos com explosivos deve ser feito de forma cuidadosa e eficiente, afim de evitar vazios, contaminação dos explosivos e/ou acidentes. Em casos de rochas muito fraturadas, alguns cuidados devem ser tomados na hora do carregamento, em certos casos é necessário revestir o furo com uma “camisa”, feita de filme de polietileno, impedindo assim o fluxo dos explosivos pelas fraturas, o que também pode ocasionar acidentes (GERALDI, 2011).

Figura 10 – Carregamento de furo com emulsão



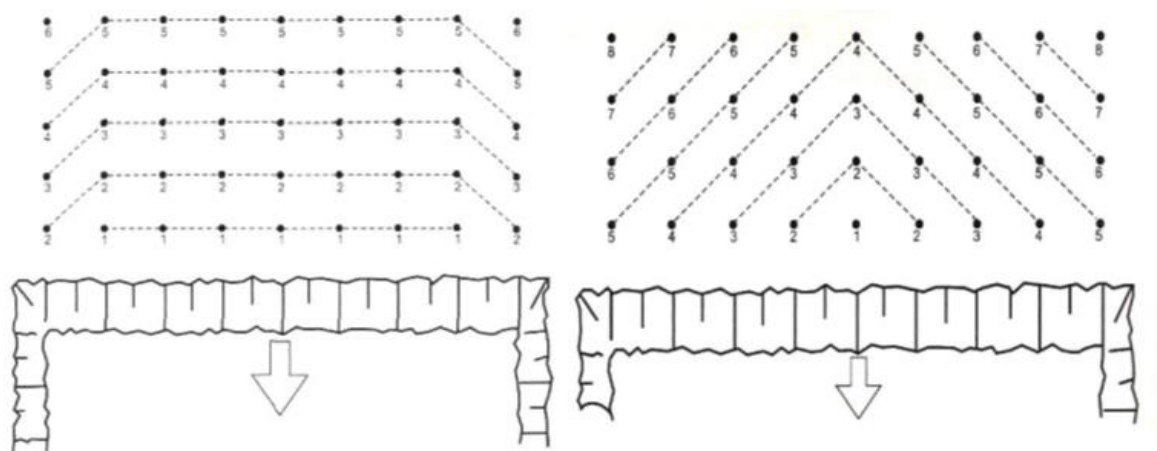
Fonte: MAXAM (2016)

A Figura 10, demonstra um carregamento de furo com explosivo tipo emulsão bombeada, que é realizada com caminhões apropriados e apresentam inúmeras vantagens no que diz respeito a manuseio e segurança. Antes do carregamento é essencial a limpeza dos furos e tampa-los, afim de evitarem o acumulo de novos fragmentos (CAVADAS, 2012).

2.2.8 Amarração dos furos

A amarração é responsável pela conexão dos furos, sequência de detonação dos mesmos e definindo da direção do desmonte, sendo assim um fator que interfere no controle da fragmentação. Essa amarração pode ser realizada por conectores elétricos ou não elétricos (MENDES).

Figura 11 – Tipos de amarrações de malha de perfuração



Fonte: CURSO DE DESMONTE DE ROCHAS POR EXPLOSIVOS - FORMAÇÃO DE BLASTER

A Figura 11, demonstra dois tipos de amarrações, em linha e em V, o tipo de amarração interfere diretamente no desempenho do desmonte, visando melhores condições para formação de pilha e fragmentação. Uma combinação dos dois métodos pode gerar melhores resultados, dependendo do material de interesse (MENDES).

2.2.9 Avaliação do Desmonte

O grau de fragmentação de uma rocha desmontada por meio do uso de explosivos, é o fator mais relevante dos resultados do desmonte. Mesmo que a fragmentação obtida após a realização do desmonte venha a ser alterada por um processo de britagem subsequente, a granulometria após o desmonte tem consequências no custo, produtividade e eficiência de todo o processo. O desmonte almeja um material com características de granulometria que melhor favorecerão os processos de beneficiamento, diminuição significativa de gasto e segurança operacional (REIS, 2016).

2.3 Fragmentação

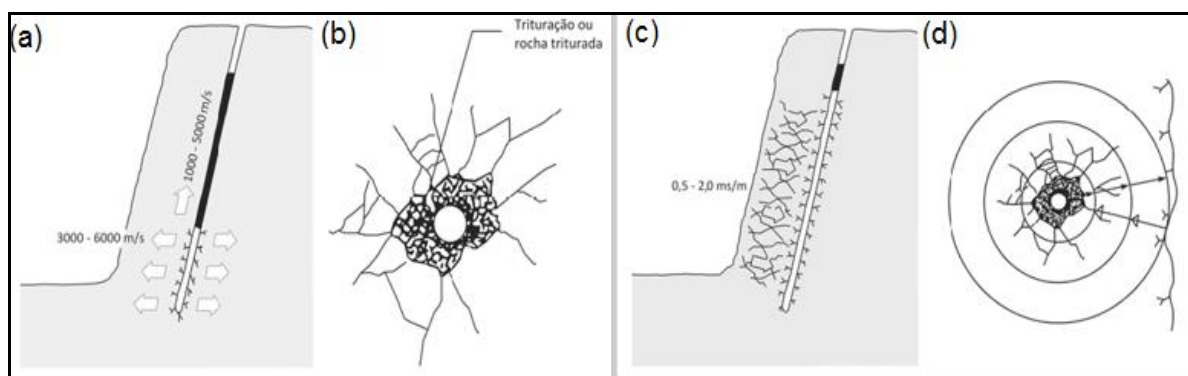
O objetivo da detonação é desmontar a rocha e obter uma adequada fragmentação. Com a necessidade da redução de custos, vários estudos foram realizados, para prever e controlar ou, mais preciso, conduzir os processos de perfuração e detonação. Atualmente o modelo mais utilizado é Kuz-Ram. O estudo desse parâmetro possui grande importância nos processos de beneficiamento, é necessário, antes de tudo, entender os mecanismos de ruptura da rocha para empregar os modelos de previsão, o que depende de alguns fatores, como (LEITE, 2013):

- Quantidade de explosivos
- Distribuição dos explosivos na rocha
- Características da rocha a ser desmontada (face livre, falhas, resistência, fraturação)

2.3.1 Mecanismo de Fratura de Rocha

Em relação ao mecanismo de ruptura da rocha, diversos fatores, influenciam diretamente na fraturação do maciço rochoso, podendo distinguir diversos efeitos. Entre esses efeitos, englobam os fatores da própria rocha e os dos explosivos a serem utilizados. Entretanto, não é possível modificar os fatores do maciço rochoso, o que para garantir o melhor resultado, será necessário a escolha correta dos explosivos para cada tipo de rocha (ALONSO, GÓMEZ, & HERBERT, 2013).

Figura 12 – Fases de ruptura do furo

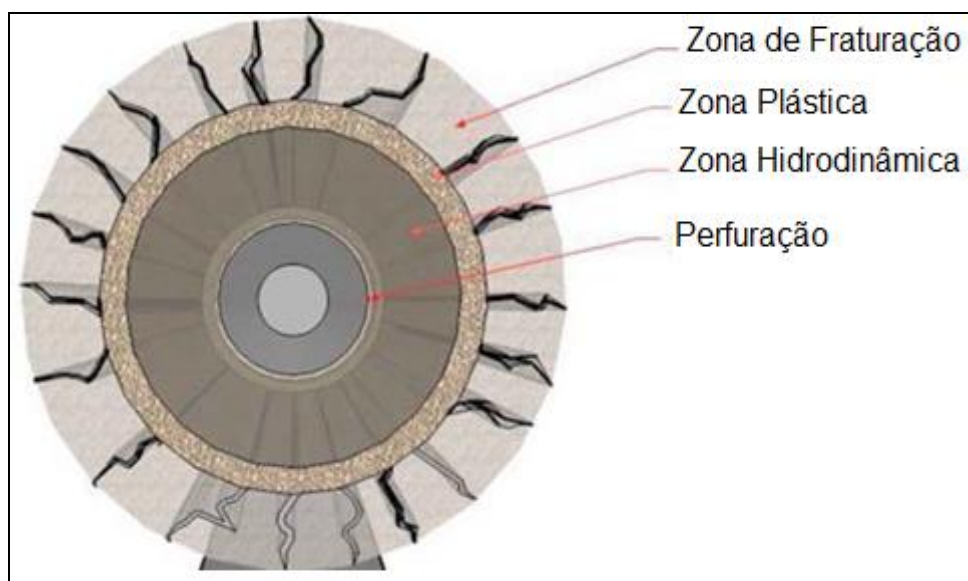


Fonte: Manual do Operador de Produtos Explosivos (2011)

A Figura 12 ilustra as fases de ruptura do furo. A figura (a): ocorre a transformação da coluna do explosivo em uma coluna de gás com velocidade e pressões elevadas; Figura (b): geração de uma onda de choque com a parede do furo, causando uma destruição da estrutura da rocha; Figura (c): a onda gerada se propaga pela rocha; Figura (d): atinge a frente superior da bancada e assim, o material se fragmenta. Para que haja a ruptura da rocha, é necessário que uma pressão seja exercida, através de uma força com intensidade elevada, e assim, seja instalada um estado de tensão ao redor do furo. A fragmentação dependerá da energia aplicada e da resistência apresentada pela rocha (GALIZA, GOMES, BERNARDO, CHAMINÉ, & VIEIRA, 2011).

No processo de detonação, identifica-se próximo dos furos três zonas: Zona hidrodinâmica, zona plástica e zona elástica (GOMES, 2016).

Figura 13 – Zonas resultantes de um furo de desmorte



Fonte: LEITE (2013)

A Figura 13, mostra as zonas existente em um furo de desmorte. A zona de fraturação corresponde o local de fraturas existentes ao redor do furo realizado, zona plástica, onde houve transformação da estrutura da rocha devido a perfuração e zona dinâmica, local onde gerou-se uma maior movimentação na estrutura da rocha e a perfuração que é o furo da malha do desmorte de rochas com explosivos. O comportamento da rocha vai depender das eventualidades dessas três zonas, o que resultará em impactos ambientais e de segurança. Alguns riscos são gerados, como a instabilidade do maciço, projeção de fragmentos, formação de poeiras e gases, ondas aéreas e vibrações (LEITE, 2013).

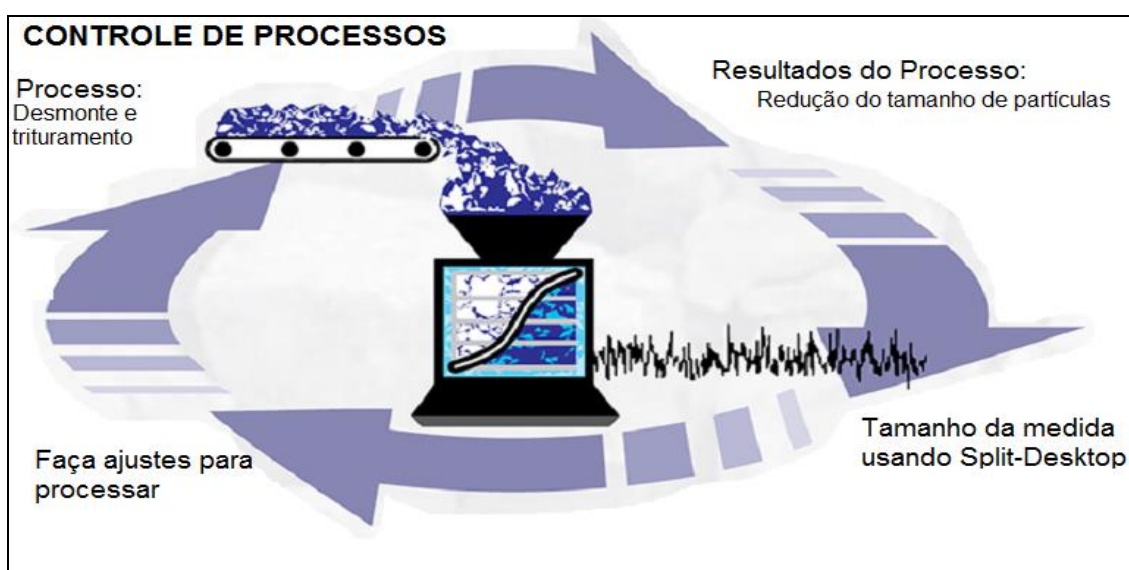
2.3.2 Modelos de Avaliação

Por meios de modelos empíricos, é possível se obter a fragmentação desejada de acordo com as propriedades do maciço rochoso, dos explosivos e do próprio plano de fogo, por meio de softwares que auxiliam na previsão de fragmentação (GOMES, 2016).

2.3.2.1 Software Split-Desktop

O software Split-Desktop é um programa utilizado em processamento de imagens para determinação do tamanho de fragmentação de rochas. Seu funcionamento consiste na análise de imagens digitais coletadas em campo e conta com ferramentas que permitem redimensionamento e edição manual para melhor precisão (SPLIT-DESKTOP, 2017).

Figura 14 – Etapas do controle de processo no software Split-Desktop



Fonte: SPLIT-DESKTOP (2017).

A Figura 14 diz respeito as etapas do processamento de imagens no software Split-Desktop, sendo as seguinte (a imagem não pode exceder 1600 px X 1400 px), (ALVORADO, 2013):

1º fase: Nessa fase é necessário a edição dos limites da imagem, sendo necessário que apenas fragmentos permaneçam na mesma.

2º fase: A imagem é gerada em tons de cinza, onde se delimitará a referência dos tamanhos. Uma vez indicado a referencia, uma imagem de particulas diferentes é gerada e produzirá uma nova imagem preto e branco.

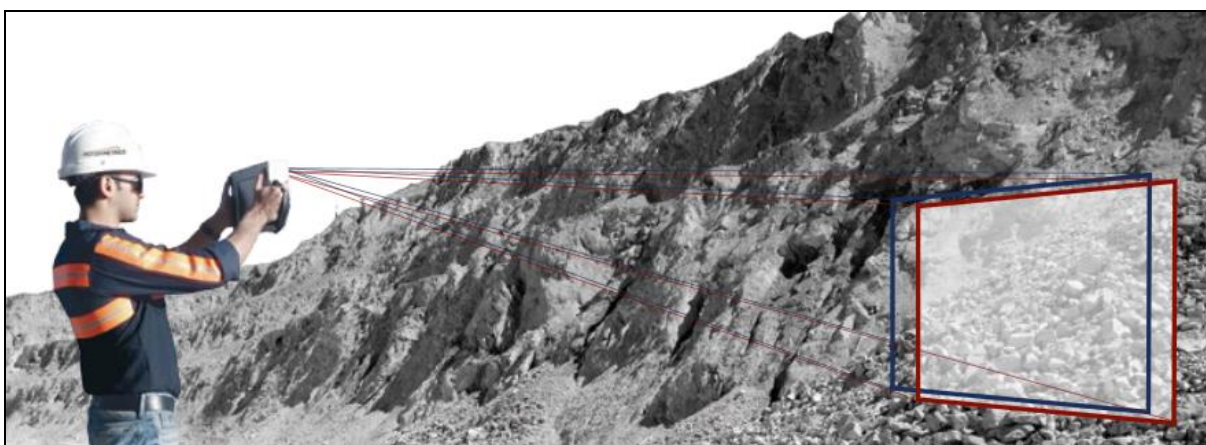
3º fase: Na imagem preto e branco poderá ser alterada manualmente os tamanhos dos fragmentos, considerando que o programa não identifica certas fraturas que dividem a fragmentação.

4º fase: Por fim, é gerado um gráfico com a curva granulométrica e tabela, com seus respectivos tamanhos por meio de porcentagens.

2.3.2.2 Sistema Operacional Motion metrics

Motion Metrics é um sistema que possui diversas opções em seguimentos de soluções de otimização no setor da mineração. Dentre eles, o Porta Metrics, um sistema patenteado, sendo um tablete com câmera automática que permite análises de fragmentação, não havendo necessidade de objetos para escala de referências (METRICS, 2017).

Figura 15 – Porta Metrics



Fonte: Motion Metrics (2017)

A Figura 15 ilustra como é realizado o uso do Porta Metrics. Sistema fácil de manusear, conta com três câmeras integradas de alta resolução e é capaz de capturar e processar imagens em qualquer espaço da mineração, inclui recursos de correção manual para ajustar imagens, se necessário. Em quesito segurança, é um equipamento que não requer maior aproximação do banco ou pilha na qual será executada a análise (METRICS, 2017).

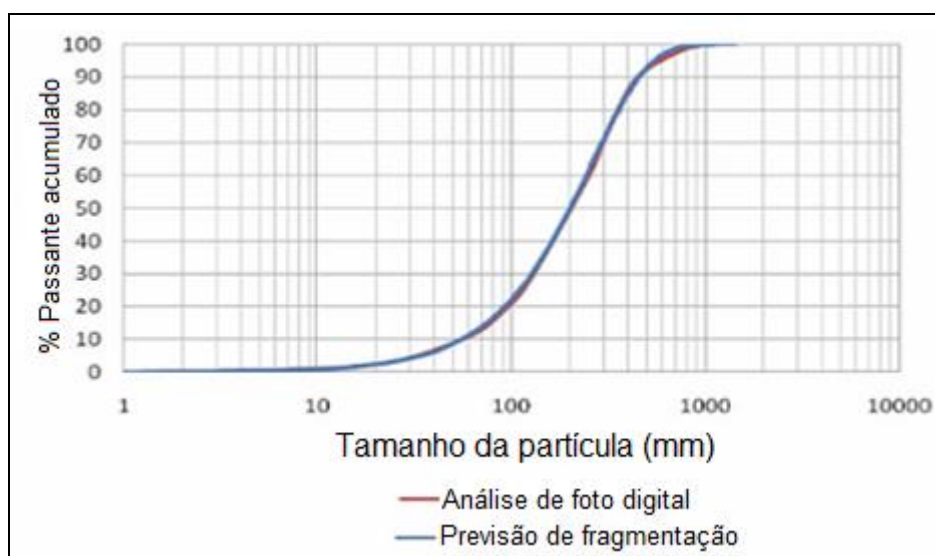
As análises de fragmentação são concluídas rapidamente, por meio do dispositivo portátil, capaz de gerar relatórios com gráficos de distribuição de tamanhos de rochas, intervalos dos tamanhos, medições de declive, entre outros. Dispõe de GPS integrado, permitindo associação da imagem ao local do desmonte,

e conectividade que permite compartilhamento dos resultados das análises de fragmentação (METRICS, 2017).

2.3.3 Previsão de Fragmentação

O grau de fragmentação obtido no desmonte com utilização de explosivos, é o parâmetro mais significativo na detonação. Por meio de modelos conhecidos e empregados, é possível a elaboração de gráficos com ajustes de curvas granulométricas reais, realizadas por softwares de análises de imagens digitais e as previstas por modelos de previsão, como o modelo de Kuz Ram (REIS, 2016).

Figura 16 – Comparação da curva granulométrica prevista pelo modelo Kuz-Ram com a Análise Granulométrica por Imagem



Fonte: REIS (2016).

A Figura 16 demonstra as curvas granulométrica comparativas entre análises de imagens digitais em campo e com o modelo de previsão de fragmentação Kuz-Ram. A previsão de fragmentação almeja resultados satisfatórios, entretanto, em casos de falhas no processo de fragmentação, pode ocorrer a inviabilidade de um projeto de extração (GOMES, 2016).

2.3.3.1 Modelo Kuz-Ram

Modelo de previsão de fragmentação Kuz-Ram, apresentam boa aplicação, devido sua flexibilidade e correlaciona a utilização de três equações, sendo elas: equação de Kuznetsov, equação de Rosin-Rammler e a equação de uniformidade. Os modelos tentam prever a fragmentação da rocha levando em consideração alguns fatores que são abordados em dois grandes grupos, sendo eles (CUNNINGHAM, 2005):

- Modelagem empírica, o que implica uma maior fragmentação de maior consumo de energia e
- Modelagem mecanicista, que acompanha a física da detonação e o processo de transferência de energia em rochas bem definidas, derivando todos os resultados do desmonte com explosivos.

Equação de Kuznetsov adaptada

$$X_m = AK^{-0.8}Q^{\frac{1}{6}}\left(\frac{115}{RWS}\right)^{\frac{19}{20}}$$

Onde: (1)

X_m = Tamanho médio de partícula com passagem de 50% do material, em cm; A = Fator de rocha [variando entre 0,8 e 22, este parâmetro é calculado através da classificação de Lilly e é dada pela equação ($A = 0,06 (RMD + RDI + HF)$); K = Fator de pó (razão de carga), kg de explosivo por metro cúbico de rocha; Q = Massa de explosivo por furo, kg;

RWS = "*Relative Weight Strength*", Peso força relativa à ANFO, encontrado pela equação:

$$RWS = \frac{AWS_x}{AWS_{ANFO}} \times 100$$

(2)

A equação de Rosin-Rammler adaptada

$$Rx = \exp\left(-0.693 \frac{x}{X_c}\right)^n$$

Onde: (3)

X= Malha do peneiro; N= Índice de uniformidade que descreve o declive da curva;

Xc= É possível calcular através da equação:

$$Xc = \frac{Xm}{\sqrt[n]{0.693}}$$

Sendo X_m obtido pela equação de Kuznetsov (4)

A equação de uniformidade

$$n = \left(2.2 - \frac{14B}{d}\right) \sqrt{\left(\frac{1 + \frac{S}{B}}{2}\right) \left(1 - \frac{W}{B}\right) \text{abs}\left(BCL - \frac{CCL}{L}\right) + 0.1}^{0.1} \frac{L}{H} \quad (5)$$

Onde:

B = afastamento, m; S = espaçamento, m; d = Diâmetro do furo, mm; W = desvio do furo, m; L = comprimento da carga total (comprimento do furo), m; BCL = Comprimento da carga de fundo, m; CCL = Comprimento da carga de coluna, m; H = altura do banco, m.

2.3.3.2 Fator de Rocha

O fator de rocha é calculado por meio dos componentes geomêcanicos da rocha, acarretando o estudo das descontinuidades. Esse fator de rocha pode ser definido através do BI – Blastability Index que se encontra por meio da classificação de Lilly. A seguir, as equações utilizadas para a obtenção dos valores de BI – Blastability Index e A – Rock Factor (REIS, 2016).

$$BI = 0,5 \times (RMD + JF + RDI + HF) \quad (6)$$

$$A = 0,12 \times BI \quad (7)$$

A Tabela de Lilly ilustrada na Tabela 1, é utilizada para determinação do fator de rocha, leva em consideração os parâmetros do maciço rochoso, como, direção e mergulho das descontinuidades em relação a frente livre. Esse fator de rocha é empregado para o ajuste médio da fragmentação e encontrado por meio da equação 7 (MORAIS; GRIPP, 2004).

Tabela 1 – Classificação de Lilly

Símb.	Descrição	Classificação	Índice
RMD	Maciço rochoso	Friável	10
		Fraturado	JF
		Maciço	50
JF	Maciço fraturado	JPS + JPA	
JPS	Espaçamento das descontinuidades (m)	< 0,10 m	10
		0,10 a MS	20
		MS a DP	50
MS	Overize da britagem primária (m)		
DP	Parâmetros da malha de perfuração (m)		
JPA	Direção e mergulho com relação à face livre	Horizontal	10
		Mergulhando para fora da face livre	20
		Direção perpendicular à face livre	30
		Mergulhando para dentro da face	40
RDI	Influência da densidade (densidade da rocha intacta, g/cm ³)	RDI = 25d - 50	
HF	se E < 50 GPa	HF = E/3	
	se E > 50 GPa	HF = UCS/5	
E	Módulo de Young (GPa)		
UCS	Resistência à compressão uniaxial (MPa)		

Fonte: REIS (2016).

2.3.3.3 Modelo TCM

O modelo de fragmentação TCM foi elaborado para assegurar uma melhor precisão na previsão de fragmentação, especialmente para os finos. Neste modelo, são considerados dois componentes de fragmentação no furo. Representa um modelo de fragmentação no qual nos proporciona uma maior compreensão em relação aos mecanismos de fragmentação da rocha, e na formação de finos, considerando a fragmentação adequada como um fator dos parâmetros de otimização de desmonte de rochas (MORAIS; GRIPP, 2004).

Figura 17 – Componentes do furo de acordo com o Modelo de Fragmentação TCM



Fonte: (Djordjevic, 1999).

A Figura 17 informa as duas componentes do furo de acordo com o Modelo de fragmentação TCM. O primeiro conjunto deriva da rocha acerca do furo, contendo ruptura compressiva-cisalhante, sendo que a estrutura do maciço rochoso não influencia muito nos resultados. O segundo conjunto possui fragmentação mais grossa, resultando da distância superior que a do primeiro conjunto, essa fragmentação é gerada por rupturas de tração, abrangendo uma maior área (MORAIS; GRIPP, 2004).

2.4 Otimização

A otimização no sentido geral, tem em vista um processo com objetivos satisfatórios, como útil, efetivo ou perfeito. No contexto matemático, condiz com algo referente a obtenção de valor ótimo de determinada função, encontrados através de um conjunto de variáveis de decisão. Contudo, a otimização em um empreendimento, no caso, empreendimento mineiro, relaciona-se em minimizar o custo e maximizar o lucro (SILVA NETO, 2013).

2.4.1 KPI's

Os KPI's - Key Performance Indicators ou traduzido do inglês "*Indicadores-chave de desempenho*", é uma ferramenta importantíssima de gestão utilizada para medir o desempenho e avanço de uma empresa. Essa ferramenta proporciona entender o funcionamento e identificar os pontos positivos e negativos e com isso gerar parâmetros para modificações, auxiliando na concretização do objetivo desejado por meio de mapas de acompanhamento dos alvos estratégicos (BRASIL, 2015).

2.4.1.1 *Limitações Impostas*

Limitações impostas são parâmetros definidos, como no caso de uma mina, o número de filas, altura da bancada, pit final da cava e de acordo com o diâmetro do furo, um possível desvio de perfuração. Esses são alguns fatores que consideramos negativos, devido à dificuldade ou impossibilidade de modificações (REIS, 2016).

2.4.1.2 *Restrições Impostas*

As restrições impostas são as relações de limitar algo, como as propriedades do plano de fogo e o controle das condicionantes granulométricas e volumétricas necessárias no desmonte. As restrições também nos permitem projetar uma possível fragmentação e vibração de acordo com as propriedades da rocha, baseando-se em tipos de infraestrutura e de acordo com sua proximidade, sendo possível a verificação das restrições realizadas (REIS,2016).

2.4.1.2.1. *Restrições do Plano de Fogo e Granulométrica*

Para a verificação das restrições do plano de fogo, é necessário um estudo de alguns parâmetros que desejam ser alcançados no desmonte e as possíveis modificações para atingir o estágio satisfatório. As restrições granulométricas têm como objetivo gerar uma granulometria que favorecerá os processos de beneficiamento, com valores baseados no "*Índice de Uniformidade n*", variando entre os valores de 0,7 a 2,2 do mesmo modo que referido por Jimeno et al. (2003).

Tabela 2 – Tabela de restrições

PROBLEMAS MAIS FREQUENTES		PARÂMETROS DE PROJETO A SEREM MODIFICADOS
PÉS E PISO IRREGULAR		Aumentar subperfuração.
DEPARTAMENTOS ENVOLVIDOS	PERFURAÇÃO	Reduzir a malha de perfuração.
	DESMONTE	Aumentar a carga de fundo.
		Aumentar o tempo de retardo entre filas.
		Inclinar os furos.
ULTRALANÇAMENTO		Controlar o afastamento na primeira fila.
DEPARTAMENTOS ENVOLVIDOS	PERFURAÇÃO	Controlar a existencia de cavidades.
	DESMONTE	Controlar a desviação dos furos.
		Ajustar o tempo de retardo.
		Aumentar o tampão.
MATACOS		Aumentar a carga dos furos
DEPARTAMENTOS ENVOLVIDOS	PLANEJAMENTO	Reduzir a malha de perfuração
	PERFURAÇÃO	Utilizar explosivo com maior energia de quebra.
	DESMONTE	Ajuste o tempo de retardo entre furos

Fonte: adaptado López, Jimeno (2003).

Tabela 3 – Tabela de Restrições

PROBLEMAS MAIS FREQUENTES		PARÂMETROS DE PROJETO A SEREM MODIFICADOS
Finos		<p>Reduzir a carga dos furos</p> <p>Aumentar a malha de perfuração.</p> <p>Aumentar o tampão.</p> <p>Utilizar explosivos de baixa densidade.</p> <p>Utilizar carga desaclopada (decking).</p>
DEPARTAMENTOS ENVOLVIDOS	PLANEJAMENTO DESMONTE	
Falha do Fogo		<p>Ajustar tempos de retardo.</p> <p>verificar conexoes (ligações).</p> <p>Controle das descontinuidades geológicas.</p>
DEPARTAMENTOS ENVOLVIDOS	PLANEJAMENTO DESMONTE	
Fissuras na Nova Frente de Lavra		<p>Reduzir a carga em furos da última fila.</p> <p>Reduzir numero de linhas.</p> <p>Reduzir afastamento.</p> <p>Aumente o tempo de retardo entre fileiras</p>
DEPARTAMENTOS ENVOLVIDOS	PLANEJAMENTO PERFURAÇÃO DESMONTE	
VIBRAÇÃO		<p>Reduzir a quantidade de explosivo por furo.</p> <p>Reduzir o número de furos detonados simultâneamente (MIC).</p> <p>Ajustar tempos de retardo e seção de migração.</p> <p>Controlar os parametros geometricos do desmonte.</p> <p>Fazer "free-faces" com grandes áreas livres.</p>
DEPARTAMENTOS ENVOLVIDOS	PLANEJAMENTO DESMONTE	
ONDA ÁREA		<p>Aumentar tampão.</p> <p>Fazer cobertura do cordao detonante.</p> <p>Diminuir a carga operante por furo.</p> <p>Ajustar tempos de retardo.</p>
DEPARTAMENTOS ENVOLVIDOS	PLANEJAMENTO DESMONTE	
DESLOCAMENTO E ALTURA DA PILHA DE MATERIAL REDUZIDOS		<p>Aumento razao de carga.</p> <p>Reduzir afastamento na primeira fila.</p> <p>Ajustar tempos de retardo entre filas.</p> <p>INCLINE FUROS</p>
DEPARTAMENTOS ENVOLVIDOS	PLANEJAMENTO PERFURAÇÃO DESMONTE	

Fonte: adaptado Lopéz, Jimeno (2003).

A tabela 2 e 3 são complementares e relata alguns dos problemas mais frequentes em desmonte de rochas, seus respectivos departamentos e suas possíveis modificações, baseando-se em materiais didáticos e estudos de casos. Essas possíveis falhas podem ser geradas devido o mal dimensionamento do plano de fogo, sendo fundadas pela ligação intrínsecas existentes entre carga do explosivo por furo, escolha do explosivo e geometria do plano de fogo (REIS, 2016).

As tabelas nos proporciona um melhor entendimento em relação ao funcionamento do software, mais especificadamente, em como são gerados os novos parâmetros geométricos baseado nas restrições impostas. Ao modificarmos os parâmetros geométricos, podemos diminuir ou extinguir alguns dos problemas mais frequentes em relação ao desmonte (JIMENO, 2003).

2.4.2 Ferramentas de Otimização

O contexto de otimização envolve gerar solução ótima, através de diferentes maneiras, interpretando o mesmo problema de diversas formas, com a finalidade de apresentar matematicamente uma adversidade identificada na natureza. Um modelo matemático é uma ferramenta de otimização que abrange sobretudo três elementos: Variáveis de decisão; parâmetros de decisão e restrições e função objetivo (MIRANDA, 2016).

2.4.2.1 *Excel Solver*

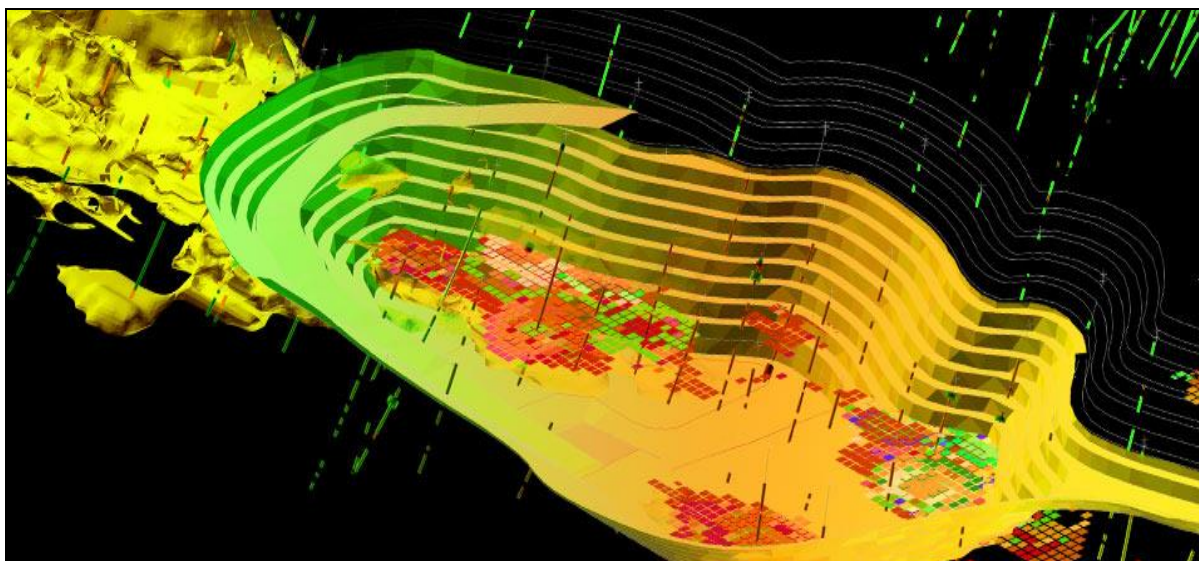
O Solver é uma ferramenta do Microsoft Excel, utilizada para encontrar valores máximos e mínimos de determinada célula. O funcionamento do Solver baseia-se em um grupo de células, denominadas variáveis de decisão, que fazem parte do cálculo das fórmulas nas células de restrição e de objetivo. Os valores das células de decisão são ajustados para atender aos limites a respeito das células de restrição e gerar o resultado desejado para a célula objetivo (MICROSOLFT, 2010).

2.4.2.2 *Vulcan*

O Vulcan é um software de solução em mineração 3D, que possui variadas funções que permite otimizar diversos processos na mineração, desde os processos

de exploração e modelagem geológica até o fechamento da mina. Suas performances contem algoritmos sofisticados e processamento ágil, que possibilitam validação instantânea dos dados para formação e manutenção de modelos atualizados de depósitos (VULCAN, 2017).

Figura 18 – Software Vulcan



Fonte: Maptek (2011).

A figura 18, refere-se ao Software de mineração Vulcan, desenvolvido pela empresa de tecnologia de mineração *Maptek*, sendo apresentado pela mesma como primeiro software de mineração 3D do mundo. O Vulcan apresenta soluções em: planejamento de mina, geologia e agendamento de mina. Conta também com diversas ferramentas que intervêm nas soluções de problemas variados (SILVA et al., 2011).

2.4.2.3 *Rioblast*

Rioblast é um software para design de desmonte e simulação produzido pela TAP - Technical Application Department da MAXAM. O software proporciona simulação de desmonte em superfície e também subaquáticos, sendo sua projeção em 3D. Possibilita ao cliente adicionar ferramentas e módulos de acordo com suas necessidades (TAP, 2013).

2.4.2.4 GAMS

O General Algebraic Modeling System – GAMS, corresponde ao Sistema Geral de Modelagem Algébrico, de programação e otimização matemática de alto nível. Foi projetado exclusivamente para modelar problemas de otimização de números inteiros lineares, não lineares e mistos. Possui uma linguagem semelhante as linguagens de programação comum, facilitando seu manuseio (GAMS, 2017).

2.4.2.5 O-Pitblast

O-Pitblast é um software que permite soluções focadas para design e otimização do desmonte de rocha para empresas de mineração. Conta com serviços técnicos de qualidade, fácil manuseio e preço mais acessível, comparando com os concorrentes. Possui ferramentas que permitem importar e editar informações sobre topografia, perfuração, previsão de fragmentação, vibração e cronometragem de sequência de desmonte com histograma de tempo e direção da explosão, otimizando os processos de lavra, com ajustes dos parâmetros geométricos dos desmontes, possibilitando diminuição dos custos (O-PITBLAST, 2017).

2.4.3 Tecnologia

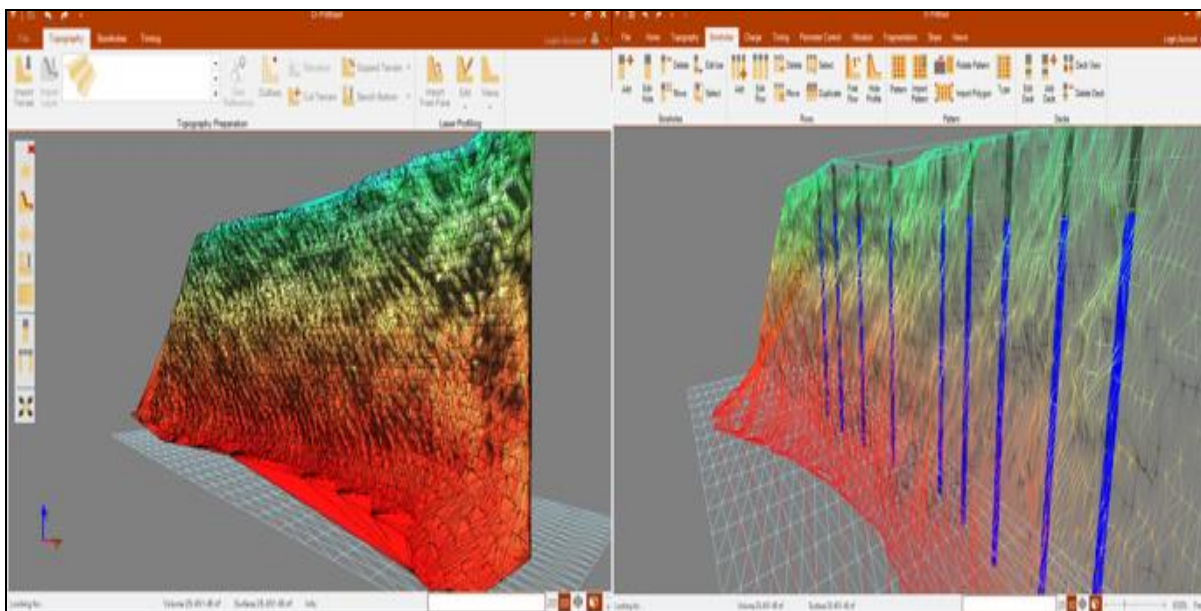
As atualizações dos diversos componentes da tecnologia e a velocidade em que ocorre essas atualizações, tem incentivado o interesse de cursos de Engenharia, promovendo eventos que contribuam para formação de profissionais mais qualificados. As áreas de maior interesse são as de informática e modelos matemáticos, as quais proporcionam aprimoramento e criação de novas tecnologias para otimizar e solucionar problemas em diferentes setores das engenharias (MIRANDA, 2010).

2.5 Software O-Pitblast

O-Pitblast é um software de mineração, que chegou ao Brasil a pouco tempo, e tem por finalidade otimizar desmontes de rochas. É uma empresa que já atua em diversas regiões do mundo como, Europa, África e América do Sul. Conta com uma equipe multidisciplinar, com experiência em engenharia de minas, estatística e

matemática aplicada à engenharia de minas e é referência em design de otimização de desmonte de rochas com explosivos (O-PITBLAST, 2016).

Figura 19 – Simulação de bancada e furos no software O-Pitblast



Fonte: O-Pitblast (2016)

A Figura 19, demonstra a simulação de uma bancada no software O-Pitblast, e a mesma com perfuração para carregamento dos furos e simulação da detonação. Os dados podem ser inseridos por meio de equipamentos que auxiliem na plotagem do terreno real ou feito manualmente através de topografias existentes no próprio software, as demais operações como malhas de perfuração e amarração são realizadas por meio das ferramentas contidas no mesmo. O software conta com serviços de controle de stock de explosivos e acessórios, planejamento de operações para desmonte de rochas, armazenamento das operações e relatórios com os indicativos das atividades da empresa (O-PITBLAST, 2016).

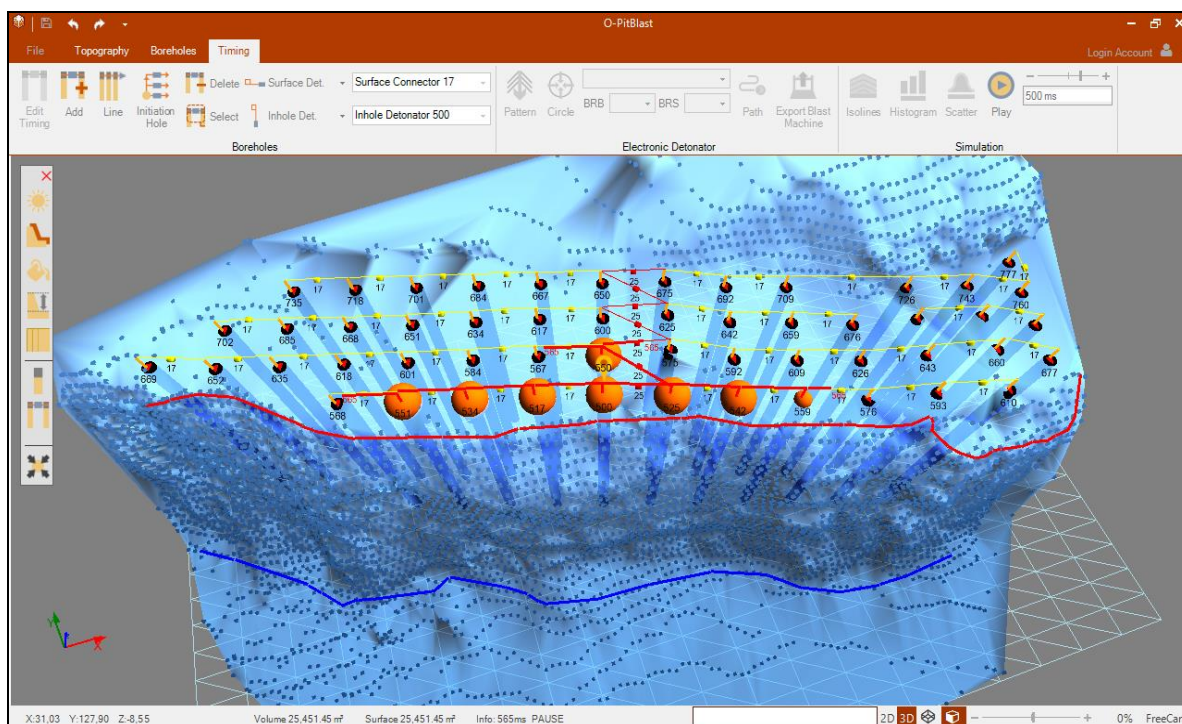
E tem como objetivos:

- Controlar as operações de desmonte
- Otimização do processo global
- Redução do custo das operações

- Adaptação às normativas legais de gestão de explosivos
- Acesso aos serviços técnicos necessários para otimizar a produção através de uma plataforma digital única e inovadora
- Acompanhamento de KPI's on-line (Key Performance Indicators - Indicadores chave de performance)
- Comunicação total com dispositivos móveis
- Comunicação direta com Engenheiros/Técnicos especializados
- Controlo de rastreabilidade de explosivos/acessórios

O O-Pitblast conta com serviços de medições e análises de fragmentações e vibrações, controle de diluição, controle de qualidade dos explosivos, controle de desvio da perfuração e modelação de frente livre e cálculo dos afastamentos críticos (O-PITBLAST, 2016).

Figura 20 – Simulação de furos no software O-Pitblast



Fonte: O-Pitblast (2016).

A Figura 20, corresponde a uma simulação de furos em uma bancada, com a realização das amarrações, carga dos furos e início da detonação. Contribui para prevê os mecanismos do desmonte antes da sua realização, ter um controle sobre a quantidade de explosivos que devem ser utilizados e os melhores métodos de malha de perfuração e amarração. Com o auxílio de outros equipamentos, como o boretrak, há uma maior exatidão nos resultados obtidos pela simulação do software, já que fatores como a inclinação dos furos, pode afetar no resultado real (O-PITBLAST, 2016).

3 METODOLOGIA

O caráter dessa pesquisa tem como finalidade metodológica, pesquisa pura, na qual buscou-se uma atualização dos conhecimentos já existente sobre otimização de desmonte de rochas, utilizando uma nova ferramenta para atingir o objetivo esperado. Possui natureza quantitativa, pois busca uma validação das hipóteses propostas, através de análises estatísticas por meio de quantificação do dado obtido.

Para elaboração desse trabalho foram empregados variados recursos bibliográficos, acompanhamento de operações referente a desmonte de rochas, suas principais funções e objetivos, afim de estudar as falhas e gerar um novo plano de fogo que auxilie no melhoramento e aperfeiçoamento das técnicas de desmonte de rochas já existentes, por meio do software O-Pitblast.

3.1 Desenho de Estudo

Apresenta, uma pesquisa bibliográfica referente a desmonte de rochas, otimização e propriedades geológicas para a elaboração de parâmetros e argumentos que gerem uma otimização de desmonte de rochas visando uma diminuição de custos por meio da elaboração de um novo plano de fogo.

No que diz respeito aos procedimentos técnicos, esse projeto de pesquisa utilizou-se de pesquisa bibliográfica, documental e experimental sendo o último como sugestão a trabalhos futuros.

3.2 Objetivo do Estudo

O objetivo do trabalho fundamenta-se em otimizar o desmonte de rochas, visando o uso de adequados parâmetros, como explosivos e malhas mais apropriados, por meio do auxílio do software O-Pitblast, com a finalidade de possibilitar uma diminuição no custo unitário final de produção por meio de uma melhor fragmentação, favorecendo nos processos de beneficiamento do minério e com total segurança operacional.

3.3 Local e Período da Realização da Pesquisa

O projeto de pesquisa foi dividido em duas partes, sendo a primeira pesquisa bibliográfica e documental, iniciando-se no segundo semestre de 2016. A segunda parte, iniciou-se no primeiro semestre de 2017, em 05 de abril teve início das atividades de estudos de caso na empresa São Francisco Mineração, município de Feira de Santana – BA, com observação e acompanhamento em campo

3.4 Apresentação das Técnicas

Além de ser uma pesquisa exploratória, o estudo de caso se fez necessário para uma melhor compressão dos procedimentos que englobam o desmonte de rochas e suas variáveis. Para a realização de um novo plano de fogo no software O-Pitblast foi indispensável o acompanhamento da elaboração de um plano de fogo da empresa São Francisco Mineração e sua execução.

No trabalho são apresentados os procedimentos de acompanhamento dos processos envolvendo o desmonte da empresa e a elaboração no software O-Pitblast de um novo plano de fogo, modificando os parâmetros que possam diminuir o custo do desmonte e beneficiamento sem alterar na qualidade do produto e segurança da operação. Visto que, somente foi realizado um experimento sugestivo, não sendo aplicado o novo plano de fogo.

3.5 Análise e Apresentação dos Dados

Os dados aqui apresentados, fundamenta-se na importância do desmonte de rochas na mineração, sua importância nos custos finais de todo o processo extrativo e industrial do minério. Desse modo, foram realizadas pesquisas em bibliografias relacionadas a geologia local e acompanhamento da elaboração e execução de determinado plano de fogo na empresa São Francisco Mineração, com análise de fatores que auxiliem em uma otimização dos parâmetros agregados, afim de, aprimorar um novo plano de fogo que alcance resultados satisfatórios.

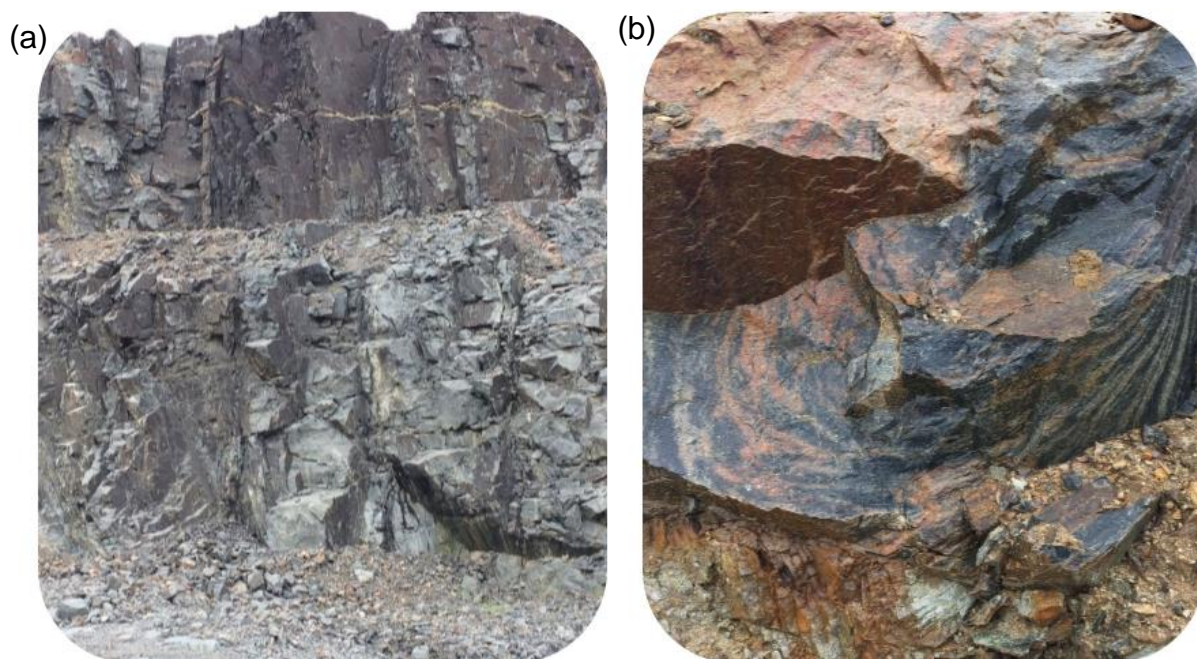
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados todos os procedimentos utilizados para a execução do projeto proposto: otimização de desmonte de rocha com auxílio do software O-Pitblast. Foram necessários estudos mais detalhados da geologia local, acompanhamento da elaboração do plano de fogo da empresa, inspeção da marcação e perfuração dos furos do plano de fogo elaborado pela empresa, coleta dos dados da bancada antes do desmonte, verificação do dimensionamento do desmonte, análise do desmonte elaborado e executado pela empresa e seu custo e elaboração e sugestão de um diagrama de fogo com auxílio do software O-Pitblast.

4.1 Estudo Geológico Local

Realizou-se um estudo dos dados geológicos já existentes sobre a área de extração, com observação em campo da geologia local e coleta de material, fotos para análises da área, estudo mineralógico do minério e geometria da cava da mina pertencente a empresa São Francisco Mineração Ltda, com o objetivo de analisar os parâmetros físicos, químicos e estruturais do maciço rochoso local, para melhor compreensão dos mecanismos de ruptura da rocha. Visto que, a geologia é um parâmetro de importante relevância para o desmonte, sendo classificada como parâmetros não controláveis.

Figura 21 – Geologia Local



Fonte: Arquivo pessoal (2017).

A figura 21, ilustra a geologia da mina pertencente a empresa São Francisco Mineração Ltda, (a): ortognaisses de coloração cinza escuro; (b): gnaiss de coloração alaranjada a avermelhada. Suas formações litológicas são identificadas como granulíticos do tipo enderbitos, charnoenderbitos e charnokitos (Ach), mapeadas de forma indiferenciada e datadas no período Arqueano. A cobertura sedimentar é do período terciário-quaternário, composta por areias e argilas, de natureza coluvionar e aluvionar. A seguir, na tabela 4, a classificação das formações litológicas dos elementos encontrados no local de extração:

Tabela 4 – Rochas Graníticas

FORMAÇÃO LITOLOGICA	DESCRIÇÃO
ENDERBITO	<p>Charnockito rico em plagioclásio, apresentando composição de hiperstênio tonalito</p> <p>Composição:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Quartzo, 42,5% - Plagioclásio (antipertitas), 53,0% - Hiperstênio, 3,0% - Magnetita, 1,5%
CHARNO-ENDERBITO	<p>Rocha granular, cinza clara, apresentando cristais tabulares de plagioclásio, piroxênio (hiperstênio e diopsídio) e biotita. Quartzo intersticial; trata-se, aproximadamente, de um granodiorito com hiperstênio. Quimismo: quartzo monzonítico.</p>
CHARNOCKITO	<p>Termo aplicado para hiperstênio granito. Os charnockitos são rochas muitas vezes de granulação grosseira e com feldspatos escuros. Ocorrem como corpos de dimensões variadas, desde decimétricas até quilométricas, podendo mostrar contatos desde intrusivos até transicionais, anatéticos ou migmáticos, com as encaixantes geralmente granulíticas nos terrenos granulíticos a migmatíticos.</p>

Fonte: CPRM

Para melhor compreensão dos condicionantes da rocha local, foi necessária pesquisa bibliográfica devido à pouca informação existente. A rocha trata-se de um granulito e suas propriedades são as seguintes (UNESP):

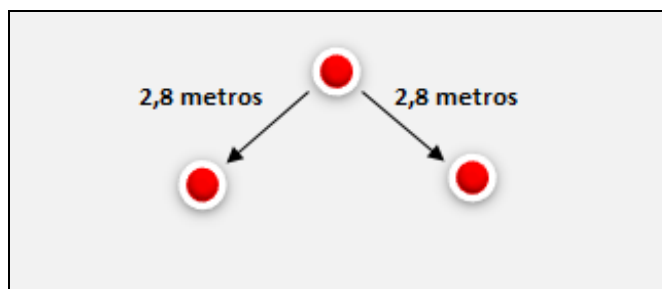
- Composição mineralógica principal: feldspato potássico, plagioclásio e quartzo
- Constituintes menores: ortopiroxênio (hiperstênio), clinopiroxênio (diopsídio), biotita, granada, hornblenda, apatita, zircão, magnetita, etc
- Composição Química: normalmente de natureza cálcio-alcalina
- Estrutura: foliada, maciça
- Texturas: granoblástica, porfiroblástica
- Tipo de metamorfismo: metamorfismo regional

4.2 Acompanhamento da elaboração do plano de fogo da empresa

Nesta etapa, foi realizado o acompanhamento da elaboração do plano de fogo realizado pelo engenheiro de minas João Henrique Aguiar, funcionário da empresa São Francisco Mineração. Após escolha da bancada para o desmonte, foi elaborado diagrama de fogo. O número de furos é baseado no tamanho da bancada, sendo adotado uma malha fixa de 2 metros de afastamento por 4 metros de espaçamento. A escolha da bancada está diretamente ligada a necessidade de produção, havendo uma maior necessidade de britas no tamanho 5/8 e pó de brita.

A malha utilizada é a estagiaria, mais conhecida como “malha pé de galinha” pelo seu formato irregular, possibilitando furos alternados. Para a cotação dos furos, foi necessária realização de cálculos, sendo eles por meio da fórmula de *Pitágoras*, onde a distância de um ponto da primeira linha para a segunda teve o valor de 2,8 metros, em um ângulo de aproximadamente 90° entre os três pontos. A seguir, desenho demonstrativo dos pontos:

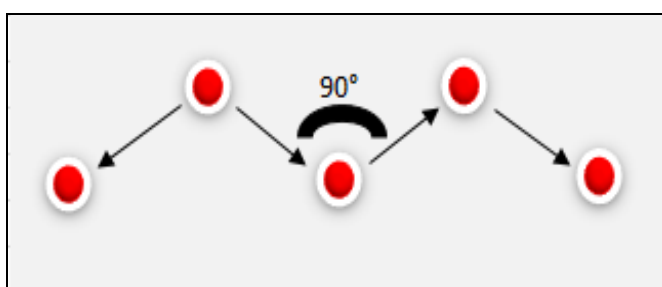
Figura 22 – Distanciamento de 3 pontos na malha de perfuração



Fonte: O Autor (2017).

A figura 22 representa o distanciamento dos três pontos, com os valores obtidos através da fórmula de *Pitágoras* e citado anteriormente. O distanciamento entre os furos de uma mesma linha tem parâmetro fixo, não citados na figura, sendo especificado como espaçamento e tem o valor de quatro metros.

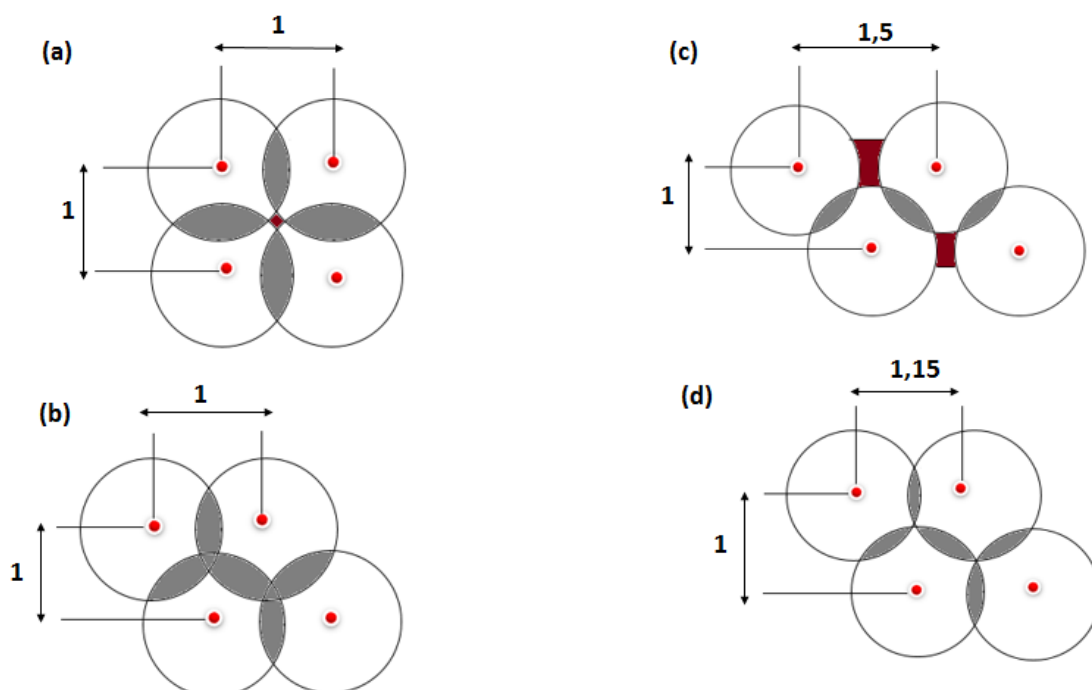
Figura 23 – Posicionamento dos furos em relação ao ângulo



Fonte: O Autor (2017).

A figura 23 ilustra o posicionamento dos furos na malha de perfuração com angulação de 90° , sendo furos alternados. O desenho esquematiza a explicação citada acima, sobre o ângulo formado. A falta de equipamento topográfico, pode levar a alterações no alinhamento dos mesmos.

Figura 24 – Malhas de perfuração



Fonte: adaptado Blast Design

A figura 24 ilustra os tipos de perfuração, malhas com padrões ligeiramente retangulares e escalonados que fornecem a melhor distribuição de energia dos explosivos. A figura (a): Padrão quadrado, com afastamento e espaçamento de iguais comprimentos; Figura (b): Padrão escalonado quadrado, com afastamento e espaçamento de iguais comprimentos; Figura (c): Escalonado com distribuição de energia justa e espaçamento = afastamento \times 1,5; Figura (d): Escalonado ligeiramente retangular distribuição de energia muito boa e espaçamento = afastamento \times 1,15.

O número de furos é encontrado após a marcação dos mesmos na bancada, usando a malha padrão da empresa, de 2X4. Após encontrar o número de furos, é realizado o cálculo de explosivos. A razão linear de carga é de 5,24 kg/m³, sendo encontrada em tabela, de acordo com o diâmetro do furo, cada furo possui 14,50 metros de profundidade. Desse comprimento subtrai o tampão, que tem valor fixo de 1,70 metros, totalizando 12,80 metros de emulsão por furo. O valor em kg de emulsão por furo é encontrado pela seguinte fórmula:

kg emulsão por furo = (Profundidade do furo – tampão) × razão linear

$$kg \text{ emulsão por furo} = (14,50 - 1,70) \times 5,24 = 67,072 \text{ kg}$$

Após obter o valor necessário de emulsão no desmonte, multiplicasse pelo número de furos, expresso a seguir:

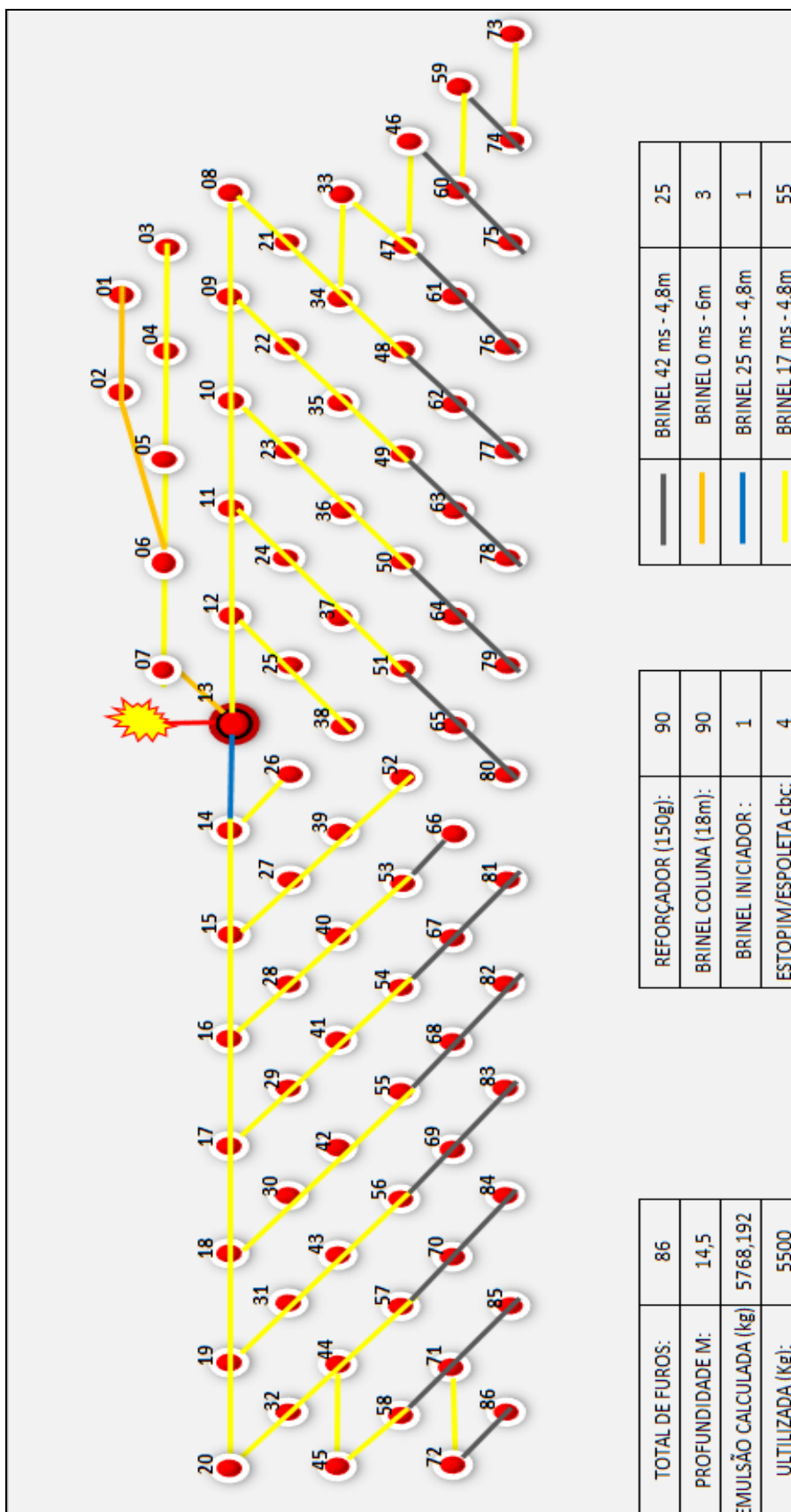
$$kg \text{ de emulsão necessário no desmonte} = 67,072 \times 86 = 5.768,192 \text{ kg}$$

Nem sempre o valor projetado para o desmonte corresponde o necessário. Vários fatores interferem no carregamento dos furos, desde a densidade do explosivo, profundidade e inclinação dos furos, falhas no maciço rochoso, entre outros.

O cálculo dos acessórios é realizado de forma mais simples, onde usa-se um booster em cada furo, e mais quatro de reserva, totalizando 90 unidades, o mesmo valor para o Brinel de coluna, sendo ele escorvado no booster, possuindo 18 metros de comprimento. Um Brinel iniciador, utilizado para iniciação instantânea a distância, 4 estopins, 25 Brineis de 42 ms, 3 Brineis instantâneos, um de 25 ms e 55 de 17 ms. Esses Brineis são sistema de iniciação não elétrico, empregados para ligações em sequências padronizadas e para retardo de cordel detonante em desmontes de linhas principais ou secundárias, com maior eficiência na conexão.

Em casos de rochas muito fraturadas, é apropriado o uso de emulsão encartuchada, as caixas têm peso de 25 kg, e o tamanho da banana depende do seu comprimento em polegadas. Deve ser elaborado também o mapa de estocagem para o Exército, havendo todas as informações de explosivos e acessórios utilizados (valor de entrada e valor de saída, sendo obrigatório o consumo total, pois a empresa não possui paiol).

Figura 25 – Croqui Plano de Fogo



Fonte: S.F.M (2017).

A figura 25 representa o croqui do plano de fogo referente ao mês de abril de dois mil e dezessete, elaborado pelo engenheiro de minas da empresa, no software Excel. No próprio croqui estão as informações sobre o plano de fogo, como o número de furos, quantidade de explosivos, acessório de detonação e malha de amarração com temporização.

4.3 Inspeção da marcação e perfuração dos furos do plano de fogo elaborado pela empresa

A marcação dos furos foi realizada por meio de medição com trena, onde foi acompanhado e verificado todo o processo, após a marcação da malha, foi realizado a perfuração, sendo efetuada por uma perfuratriz modelo: FÊNIX 70 mini AIR SERVICE, com diâmetro de 3 polegadas. O equipamento possui capacidade de perfuração de 25 m/horas. A perfuração durou um período de sete dias úteis, onde o equipamento perfurou um total de 1.247 metros, trabalhando com disponibilidade de equipamento de 90% referente a 8 horas de trabalho por dia. Os furos contêm inclinação de 10°.

Figura 26 – Marcação dos furos da malha de perfuração



Fonte: Arquivo Pessoal (2017).

Na figura 26, é exposta a inspeção realizada da malha de perfuração, com distanciamento de 2 metros de afastamento e 4 metros de espaçamento, em malha estagiária (pé de galinha). A ferramenta utilizada para marcar e aferir os pontos, é a trena de pedreiro.

Devido a geometria da cava e da frente livre, houve problemas referentes a furos confinados (na primeira linha), o que gera dificuldade na perfuração e a necessidade de alívio do furo ou evitar a perfuração no local, para que assim, não haja ultralançamentos. A rocha local apresenta boa quebra, porém, em alguns locais, dependendo da bancada, há rocha muito fraturada, o que pode afetar o desempenho dos explosivos.

Figura 27 – Perfuratriz FÊNIX 70 mini AIR Service



Fonte: Arquivo Pessoal (2017).

A figura 27 mostra a perfuratriz operada pela empresa São Francisco Mineração Ltda, modelo FÊNIX 70 mini AIR SERVICE. É um equipamento nacional,

no qual o fabricante cita como um equipamento de alta produtividade e baixa manutenção, sendo sua relação de perfuração e consumo de combustível inferior que as demais da mesma categoria. São acionadas a motor a diesel cummins turbo de 234 cv, sendo ela uma perfuratriz rotopercussiva.

4.4 Coleta dos dados da bancada antes do desmonte

Após a inspeção em campo da marcação e perfuração dos furos do plano de fogo, foi realizado a coleta de todos os dados para verificação dos mesmos. Essa etapa deu-se de forma mais simples que as demais, auxiliando no processo de inspeção para comprovação do resultado do desmonte real com o plano de fogo elaborado. A seguir os resultados dos dados coletados:

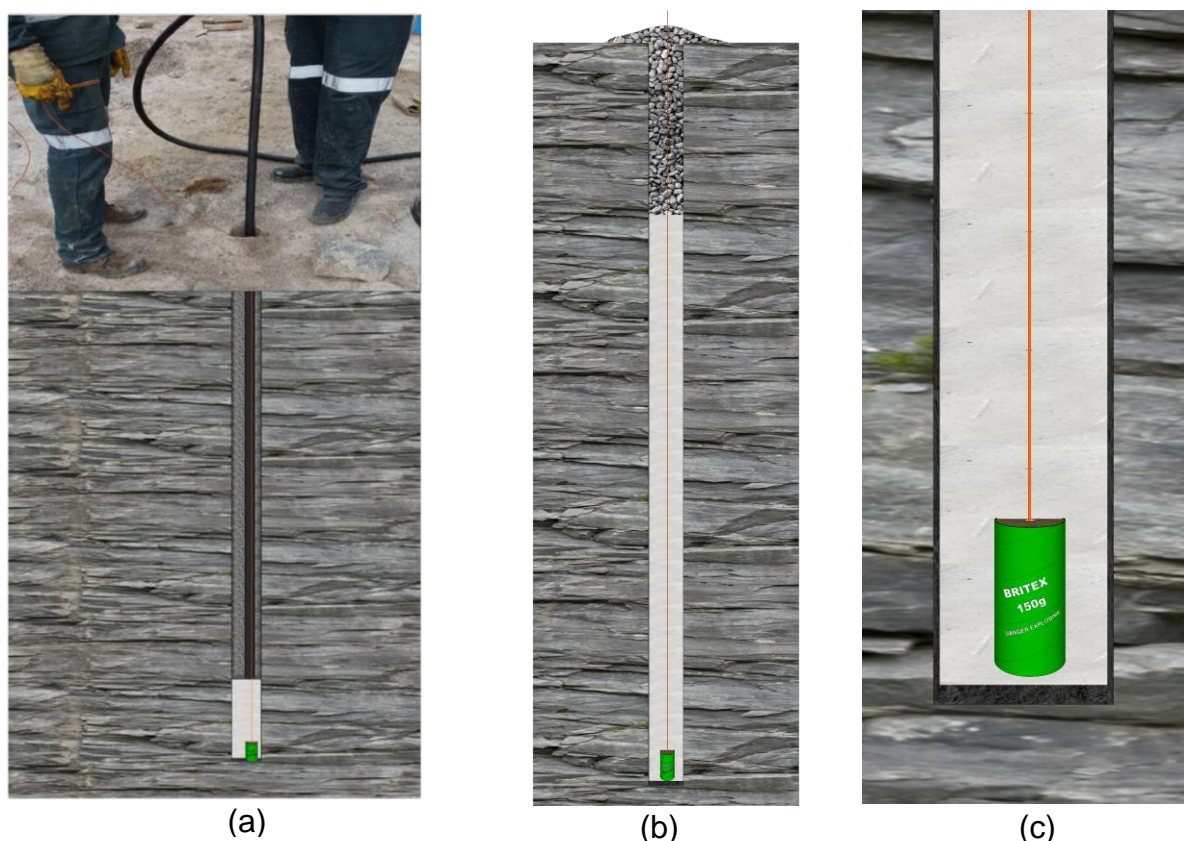
- Diâmetro do furo: 3 polegadas (de acordo com o equipamento de perfuração)
- Profundidade do furo: 14,50 metros
- Afastamento: 2 metros
- Espaçamento: 4 metros
- Inclinação do furo: 10°
- Subperfuração: 0,6 metros
- Densidade da rocha: 2,7
- Altura da carga de fundo: 3,84 metros
- Carga de fundo: 20,12 kg
- Tampão fixo de 1,70 metros
- Altura da carga de coluna: 8,96 metros
- Carga de coluna: 46,95 kg
- Carga total: 67,07 kg
- Volume de escavação por furo: 116 m³
- Volume de escavação total: 9.976 m³ ou 26.935,2 ton.

- Razão linear de carga: 5,24 kg/m³

4.5 Verificação do dimensionamento do desmorte

A primeira etapa do processo de carregamento é a escorva nos furos, conectando o booster ao brinel de coluna, em seguida o carregamento dos furos com emulsão bombeada, que foi realizado pela empresa de explosivo ENAEX – Britanite, a emulsão tem expansão de aproximadamente 12% do total preenchido. São utilizados na carga de fundo e de coluna o mesmo tipo explosivo, emulsão bombeada. Após o carregamento dos furos com emulsão, realizou-se a conferência da profundidade referente ao tampão, tendo valor fixo de 1,70 metros. Em casos que a emulsão ultrapassou a profundidade da carga de coluna, foi necessário a retirada da mesma com um equipamento chamado denominado de “seringa”.

Figura 28 – Carregamento dos furos com emulsão bombeada (a), perfil de um furo já carregado e tamponado (b) detalhe da escorva mostrando um booster de 150g já imerso em emulsão (c).



Fonte: Arquivo Pessoal (2017)

A figura 28 refere-se ao carregamento dos furos com emulsão bombeada. Durante o carregamento é necessário a pesagem da emulsão, são realizadas três pesagens, como parâmetro de qualidade, sendo que a densidade ideal do explosivo tem valores entre 1,34 a 1,15. Os melhores valores são os mais próximos de 1,15.

Figura 29 – Aferimento da profundidade do tampão



Fonte: Arquivo Pessoal (2017).

Na figura 29, expõe-se como é realizado a conferência da profundidade do tampão. Todos os furos passam por esse processo, sendo que alguns tem a necessidade de retirada de emulsão, por meio da *seringa*, que corresponde a um equipamento feito de cano que suga o excesso de emulsão do furo. Após o preenchimento dos furos e conferência da profundidade dos tampões, são realizados o preenchimento do tampão, com brita 3/8.

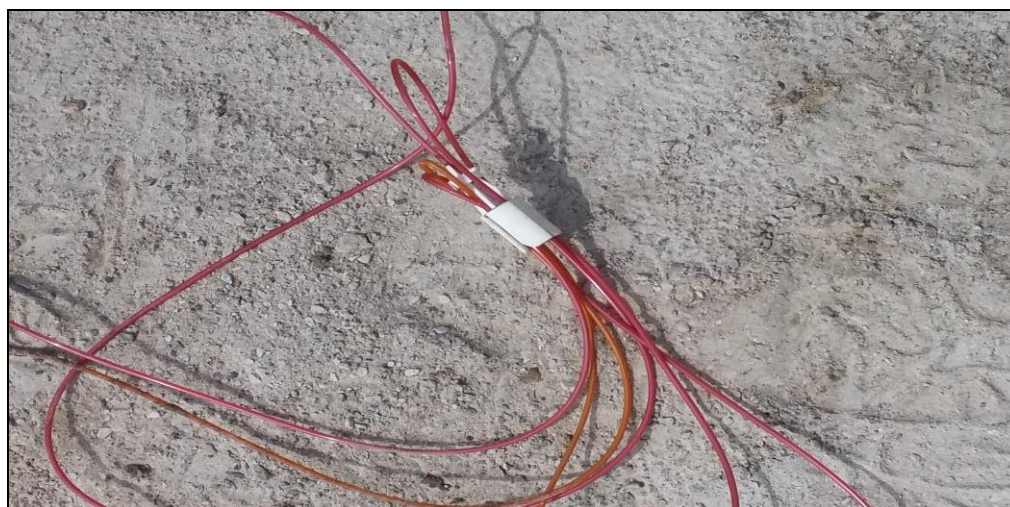
Figura 30 – Tamponamento dos furos



Fonte: Arquivo Pessoal (2017).

A figura 30 ilustra o tampão dos furos, o primeiro ainda com espaço para o preenchimento e o segundo, o furo já tamponado. Em seguida, é realizado a amarração dos furos, onde são conectando entre si pelos brineis de coluna existente em cada um dos furos, com o brineis de ligação, que tem função de conectores e retardos.

Figura 31 – Conexão de Brineis na Amarração



Fonte: Arquivo Pessoal (2017).

Na figura 31, ilustra conexão de brineis, que é realizado na amarração da malha. Devido aos diversos fatores, denominados parâmetros não controláveis, a malha de detonação definida para utilização é a malha em V, o desmorte tem sentido de dentro para fora, o que permite que o material se deposite em pilhas.

Após o dimensionamento dos parâmetros do plano de fogo, houve espera pelo horário previsto para a detonação, sendo que, todos os moradores da vizinhança foram avisados. O desmorte ocorreu de forma prevista e a alerta sonora teve início 15 minutos antes, para evacuação da área.

Além do plano de fogo, outro fator de suma importância, é o custo dos explosivos, acessórios e outros custos envolvidos no desmorte. A elaboração correta do plano de fogo pode acarretar em uma grande diminuição no custo final de produção, conseqüentemente, na geração de lucro para a empresa. A seguir, tabela de informações do desmorte com preços dos explosivos, acessórios e outros custos, referente ao mês de abril:

Tabela 5 – Informação do desmorte. Mês: Abril

INFORMAÇÕES DO DESMORTE			
BANCADA: 01	Nº DE FUROS: 86	ALTURA: 14,5 metros	PREÇO DESMORTE: R\$ 33.260,33
ESPAÇAMENTO: 4 metros	AFASTAMENTO: 2 metros	SUBPERFURAÇÃO: 0,6	
TAMPÃO: 1,7 metros	DIAMETRO DO FURO: 3 Polegadas		INCLINAÇÃO: 10°
DENSIDADE DA ROCHA: 2,7	RAZÃO LINEAR APLICADA: 5,24 g/cm ³		VOLUME: 9.976 m ³ ou 26.935,2 ton.
TEMPO DE PERFURAÇÃO DA BANCADA: 7 DIAS ÚTEIS			
TEMPO DE CARREGAMENTO DOS FUROS COM EXPLOSIVOS: 4 HORAS			
TABELA DE PREÇOS DE EXPLOSIVOS E ACESSÓRIOS PARA DETONAÇÃO			
NOME	PREÇO	QUANTIDADE	PREÇO TOTAL
REFORÇADOR BRITEX CL150	R\$ 9,22	90 (150g)	R\$ 829,80
BRINEL 18 M N.10250 MS	R\$ 12,91	90	R\$ 1.161,90
BRINEL INICIADOR 500M	R\$ 234,75	1	R\$ 234,75
ESTOPIM/ESPOLETA 1,8 M	R\$ 12,00	4	R\$ 48,00
BRINEL LIG. 6M N.91 42MS	R\$ 10,18	25	R\$ 254,50
BRINEL LIG. 6M N.00 0MS	R\$ 10,18	3	R\$ 30,54
BRINEL LIG. 4,8M N.01 25MS	R\$ 8,14	1	R\$ 8,14
BRINEL LIG. 4,8M N.90 17MS	R\$ 8,14	55	R\$ 447,70
EMULSÃO BOMBEADA (Kg)	R\$ 4,81	5768,192	R\$ 27.745,00
CUSTO ADICIONAL DE SUPORTE TECNICO BRITANITE			R\$ 2.500,00
VALOR TOTAL			R\$ 33.260,33

Fonte: Dados concedidos pela empresa São Francisco Mineração com autorização da empresa de explosivos ENAEX – Britanite.

Na tabela 5, expõe as informações do desmonte, com parâmetros estabelecidos na bancada, densidade da rocha, volume desmontado, informações do plano de fogo e preço dos explosivos, acessórios e outros custo envolvidos. O volume desmontado, foi projetado para atender a demanda de mais um mês, havendo somente um fogo no mês de abril. Os valores dos explosivos e acessórios são referentes a empresa ENAEX – Britanite e são repassados apenas a empresas cadastradas no sistema, nesse caso, os preços informados, foram por meio do engenheiro de minas responsável da empresa São Francisco Mineração.

Os gasto e serviços de perfuração são da responsabilidade da própria empresa, havendo um custo com óleo combustível (diesel), óleos lubrificantes, manutenção da perfuratriz, desgaste das hastes e operador. O valor referente a perfuração não passa por controle de gastos e não havendo as informações necessárias para o cálculo, o valor será estimado, sendo compatível com o valor de mercado.

Para estimativa do preço em perfuração por metro, foi realizado uma pesquisa em uma empresa que terceiriza o processo, sendo o valor cobrado de R\$ 25,00 o metro perfurado. Levando em consideração que a própria empresa São Francisco Mineração possui os equipamentos de perfuração e o deslocamento que a empresa que fornece os serviços deveria realizar, foi estipulado um valor de R\$ 10,00 por metro perfurado.

Valor estimado de perfuração por metro: R\$ 10,00

Metros perfurados: 1247 metros

$$\text{Valor estimado em perfuração} = 1247 \times \text{R\$ } 10,00 = \text{R\$ } 12.470,00$$

4.6 Análise do desmonte elaborado e executado pela empresa e seu custo

Após a detonação da bancada, houve a inspeção do resultado obtido, levando em consideração como parâmetro de eficiência a fragmentação. Devido a demanda

de material com granulometria mais fina, a fragmentação do desmonte tem como objetivo alcançar uma granulometria que se adapte entre esses tamanhos: 5/8, 3/8, 3/4 e pó de brita.

A demanda de material mais fino, se dar, pelo fato de haver uma carência em areia de boa qualidade na região, sendo assim, utiliza-se uma proporção de 3:1 de pó de brita na mistura para obtenção do concreto. As demais granulometrias são utilizadas também no concreto, porém, como agregados.

Figura 32 – Fragmentação do desmonte



Fonte: Arquivo Pessoal (2017).

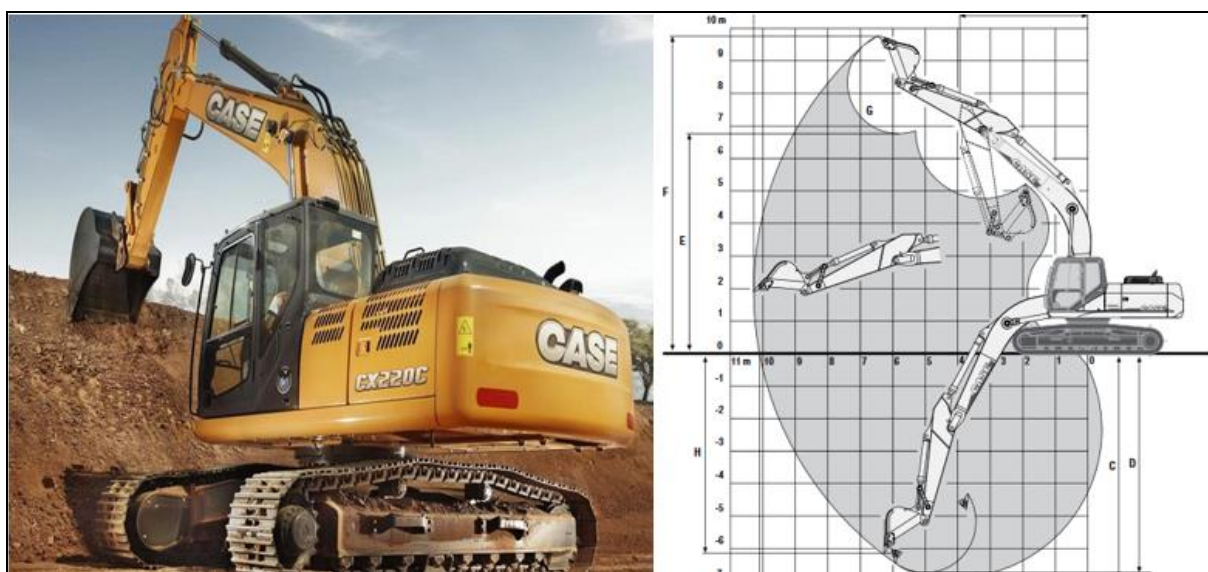
A figura 32, comprova o resultado obtido no desmonte elaborado e executado pela empresa São Francisco Mineração. O objetivo foi alcançado, através de uma boa fragmentação da rocha desmontada, porém, ainda assim, houve a necessidade da utilização do rompedor hidráulico, devido a ocorrência 6% de alguns matacos gerados, sendo esse valor aceitável dentro dos parâmetros estabelecidos.

A estimativa do valor de matacos formados no desmonte, é baseado no volume total desmontado e quantidade do material depositado no britador primário de acordo com a produção. Após todo o material passante ser depositado no britador, é realizado um comparativo com o volume total, sendo que o volume total desmontado foi de 9.976 m³ e o volume produzido no britador primário foi de 9.377

m³, havendo uma diferença de 599 m³, sendo esse valor referente a 6%, e considerado o volume de matados gerados no desmonte.

A geração desses matacos causa um custo a mais no desmonte, pelo fato de haver a necessidade do uso do rompedor, esse uso motiva gastos como combustível para o rompedor, desgaste dos equipamento e horas trabalhadas do operador. Esses custos, são referenciados como custos do desmonte, sendo adicionado no controle de gastos.

Figura 33 – Escavadeira Case CX220C



Fonte: Case Construction (2017).

A figura 33 corresponde a escavadeira utilizada pela empresa com adaptação do martelo para romper os matacos formados. Possui capacidade de 22 toneladas, potência de 145 HP (108 KW), sistema hidráulico, altura de alcance total de 9.567 mm com raio de giro mínimo de 3.464 mm e motor a diesel.

- Gastos com o rompedor:

MÁQUINA

Combustível: Diesel (consumo médio de 0,15 litros por HP/hora)

Potência: 145 HP (108KW)

Intensidade do uso do equipamento: 55% (média)

Consumo horário de combustível = Potencia x Combustível x Intensidade do uso

$$\text{Consumo horário de combustível} = 145 \times 0,15 \times 0,55 = 11,96 \text{ Litros/Hora}$$

Preço do óleo diesel: R\$ 2,80

Horas trabalhadas a mais: 40 horas (5 dias)

Preço por hora trabalhada do rompedor = Preço óleo diesel x Consumo horário

$$\text{Preço por hora trabalhada do rompedor} = \text{R\$ } 2,80 \times 11,96 \text{ l/h} = \text{R\$ } 33,48$$

Preço do uso do rompedor = Preço por hora trabalhada x Horas trabalhadas

$$\text{Preço do uso do rompedor} = \text{R\$ } 33,48 \times 40 \text{ horas} = \text{R\$ } 1.339,20$$

OPERADOR

Preço da hora trabalhada: R\$ 16,47

Horas trabalhadas a mais: 40 horas (5 dias)

Custo operador = Preço da hora x Horas trabalhadas

$$\text{Custo operador} = \text{R\$ } 16,47 \times 40 = \text{R\$ } 658,80$$

HASTE

Preço da haste: R\$ 3.500,00

Duração: Um mês (30 dias)

Dias que foram utilizadas: 5 dias

Preço da utilização da haste por dia: R\$ 116,66

Preço do desgaste da haste = Preço da utilização x Dias utilizadas

$$\text{Preço do desgaste da haste} = R\$ 116,66 \times 5 = R\$ 583,33$$

CUSTOS ADICIONAIS TOTAIS

$$\text{Custos adicionais totais} = \text{Gasto máquina} + \text{Gasto operador} + \text{Gasto haste}$$

$$\text{Custos adicionais totais} = R\$ 1.339,20 + 658,80 + 583,33 = R\$ 2.581,33$$

O preço total do desmonte envolve todos os custos, desde a perfuração até desmonte secundários ou uso de rompedor. A otimização engloba uma fragmentação 100% eficiente, descartando o uso de desmonte secundário e/ou uso do rompedor. A seguir, os custos incluídos no desmonte:

Custo em explosivo e acessórios: R\$ 30.760,33

Custo de serviços técnicos: R\$ 2.500,00

Custos adicionais com rompedor: R\$ 2.581,33

Custo estimado da perfuração: R\$ 12.470,00

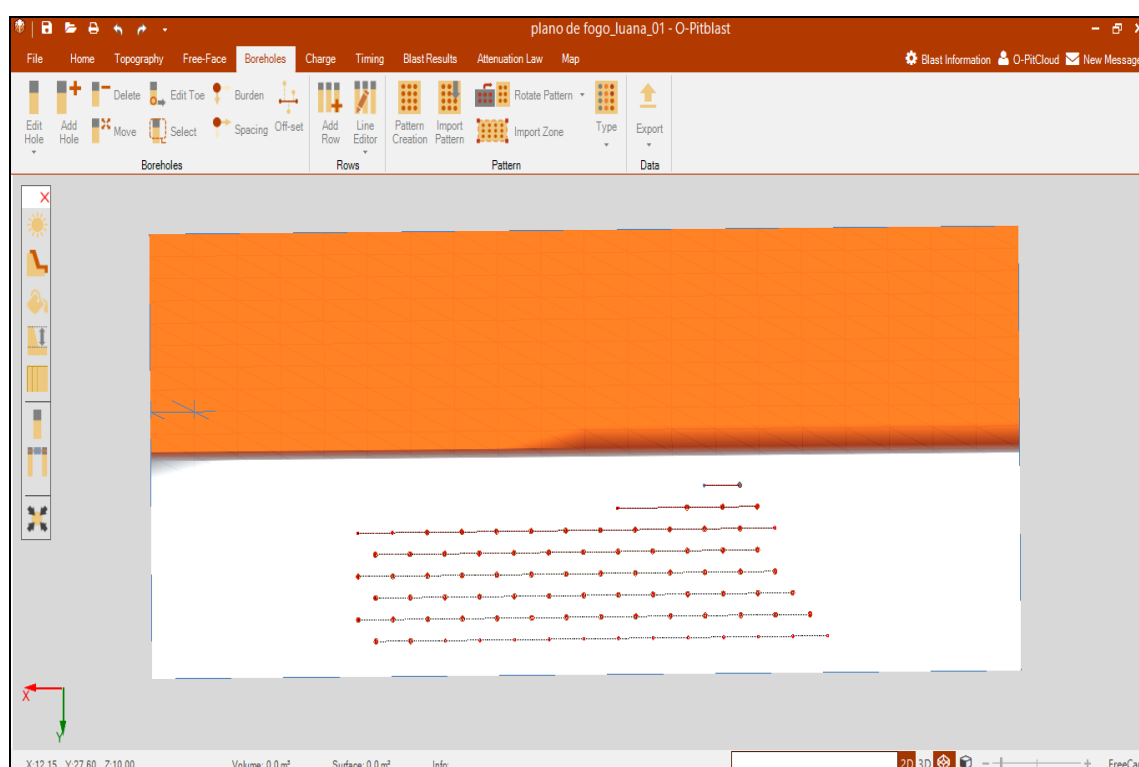
Variados fatores interferem no resultado final do desmonte, desde os parâmetros não controláveis até o mal dimensionamento dos parâmetros controláveis. A otimização tem o papel de identificar os fatores responsáveis pela falha ocorrida, e assim, elaborar meios que possam gerar uma maior diminuição de gasto com resultados de fragmentação satisfatórios.

Desta forma, através dos KPI's, por meio das restrições impostas, podemos sugerir alterações nos parâmetros do plano de fogo que gere significativas mudanças no resultado final do desmonte, como por exemplo: alteração na malha de perfuração, amarração, profundidade do tampão e/ou subperfuração, entre outros. O software age de forma prática, modificando esses parâmetros de acordo com as necessidades encontradas por ele.

4.7 Elaboração e sugestão de um diagrama de fogo com auxílio do software O-Pitblast

A parte inicial é assimilar o terreno que mais se pareça com o real, devido a falta de equipamentos que auxiliem e facilitem esse processo. Para a escolha do terreno levamos em consideração o que possui somente uma face livre, sendo necessários alterações no número de furos por linha. Os parâmetros utilizados foram os mesmos do desmonte elaborado e executado pelo engenheiro de minas responsável da empresa São Francisco Mineração.

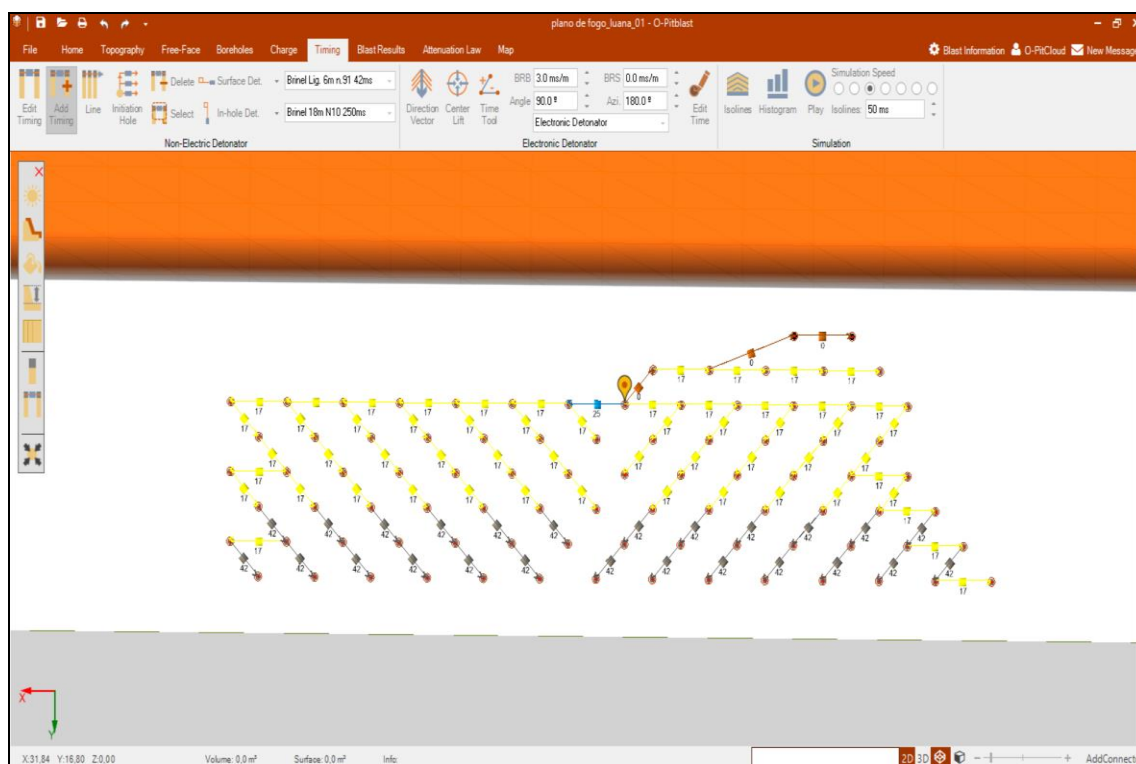
Figura 34 – Malha de perfuração no O-Pitblast



Fonte: Arquivo Pessoal (2017).

A figura 34, corresponde a malha de perfuração utilizada no desmonte realizado pela empresa São Francisco Mineração com valor de 2 metros de afastamento e 4 metros de espaçamento. As modificações realizadas foram baseadas nos parâmetros geométricos já utilizados, em vista de um melhoramento nos processos de desmonte e operações posteriores.

Figura 35 – Malha de amarração



Fonte: Arquivo Pessoal (2017).

Na figura 35, ilustra a malha de amarração do desmonte elaborado e executado pela empresa, o terreno que mais se enquadrava corresponde a um terreno nivelado com apenas uma face livre. Após a simulação da malha no software, foram realizados os procedimentos para a otimização do desmonte.

Dados do desmonte executado:

- Altura do furo: 14,50 metros
- Tampão: 1,70 metros
- Subperfuração: 0,6
- Afastamento: 2,00 metros
- Espaçamento: 4,00 metros
- Número de furos: 86
- Número de filas: 8

- Volume desmontado: 9.976 m³
- Diâmetro do furo: 76 mm (3 polegadas)

Foi necessário, para o processo de otimização, encontrar o valor referente ao fator de rocha da geologia local, porém, para a realização dos cálculos envolvidos, além de um estudo de observação em campo do comportamento geológico e seu mergulho, seria necessário também, o módulo de elasticidade da rocha, sendo que, a empresa não possui esse dado. O valor utilizado na otimização referente ao fator de rocha, é um valor tabelado, sendo adotado o mesmo valor do granito. A seguir, tabela de fator de pó e fator de rocha de alguns minerais:

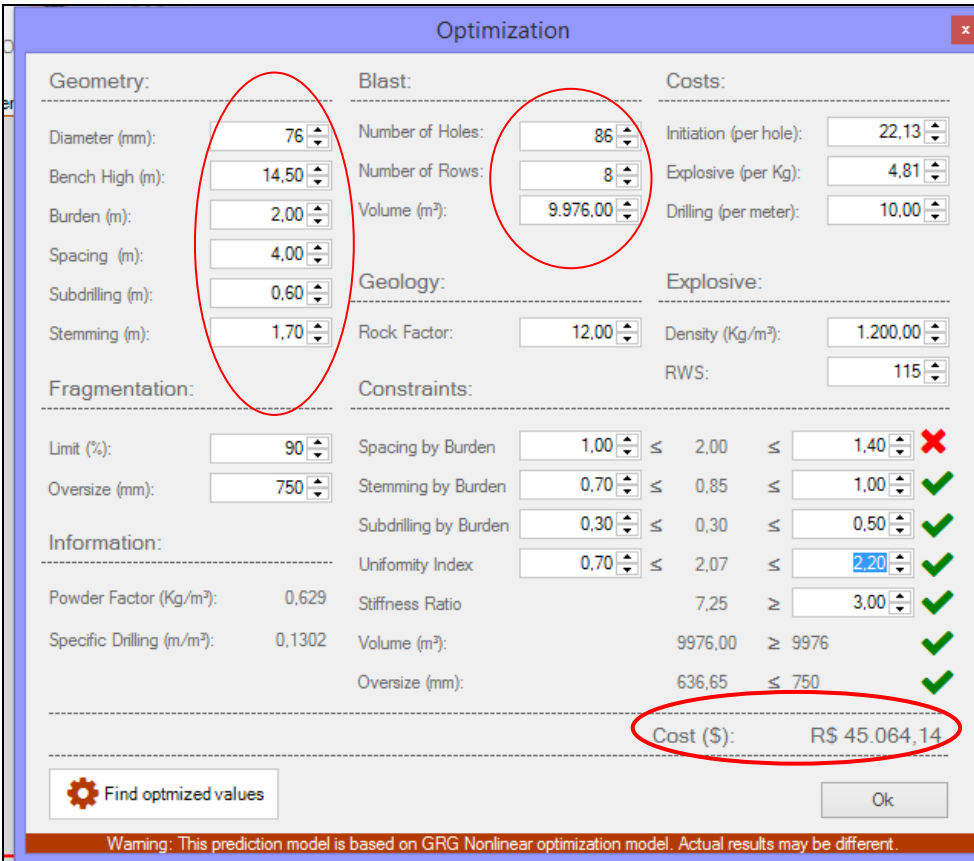
Tabela 6 – Guia para fator de pó e rocha para vários tipos de rocha

Categoria geral	Tipo de rocha	Fator de pó (kg/m ³)	Fator de rocha A
Difícil (+200)	Andesita Granito Minério de Ferro Entre outros	0,70	12 – 14
Médio (100 – 200)	Dolomita Quartzo Xisto Entre outros	0,45	10 – 11
Suave (50 – 100)	Arenito Calcário Argila xistosa Entre outros	0,30	8 – 9
Muito macio (-50)	Carvão	0,15 – 0,25	6

Fonte: Adaptado BLASTING IN SURFACE EXCAVATION

A tabela 6 corresponde a um guia de valores de fator de pó e fator de rocha de alguns minérios. Essa tabela foi suporte para o processo de otimização, sendo de suma importância o fator de rocha, no qual, esse valor tem influência na quantidade de energia do explosivo necessária para desmontar a rocha local.

Figura 36 – Informação do plano de fogo antes da otimização



Section	Parameter	Value	Unit
Geometry:	Diameter (mm)	76	mm
	Bench High (m)	14,50	m
	Burden (m)	2,00	m
	Spacing (m)	4,00	m
	Subdrilling (m)	0,60	m
	Stemming (m)	1,70	m
Blast:	Number of Holes	86	
	Number of Rows	8	
	Volume (m³)	9.976,00	m³
Costs:	Initiation (per hole)	22,13	
	Explosive (per Kg)	4,81	
	Drilling (per meter)	10,00	
Geology:	Rock Factor	12,00	
	RWS	115	
Explosive:	Density (Kg/m³)	1.200,00	Kg/m³
	RWS	115	
Fragmentation:	Limit (%)	90	%
	Oversize (mm)	750	mm
Constraints:	Spacing by Burden	1,00 ≤ 2,00 ≤ 1,40	✗
	Stemming by Burden	0,70 ≤ 0,85 ≤ 1,00	✓
	Subdrilling by Burden	0,30 ≤ 0,30 ≤ 0,50	✓
	Uniformity Index	0,70 ≤ 2,07 ≤ 2,20	✓
	Stiffness Ratio	7,25 ≥ 3,00	✓
	Volume (m³)	9976,00 ≥ 9976	✓
	Oversize (mm)	636,65 ≤ 750	✓
Information:	Powder Factor (Kg/m³)	0,629	
	Specific Drilling (m/m³)	0,1302	
Cost (\$)		R\$ 45.064,14	

Fonte: Arquivo Pessoal (2017).

A figura 36, ilustra as informações do desmonte antes do processo de otimização. No custo do desmonte, o preço para iniciar cada furo se dá em média R\$ 22,13, cada booster tem valor de R\$ 9,22 e cada brinel de coluna com 18 metros custa R\$ 12,91, o valor da emulsão por kg é de R\$ 4,81 e o metro gasto em perfuração foi estimado em R\$ 10,00.

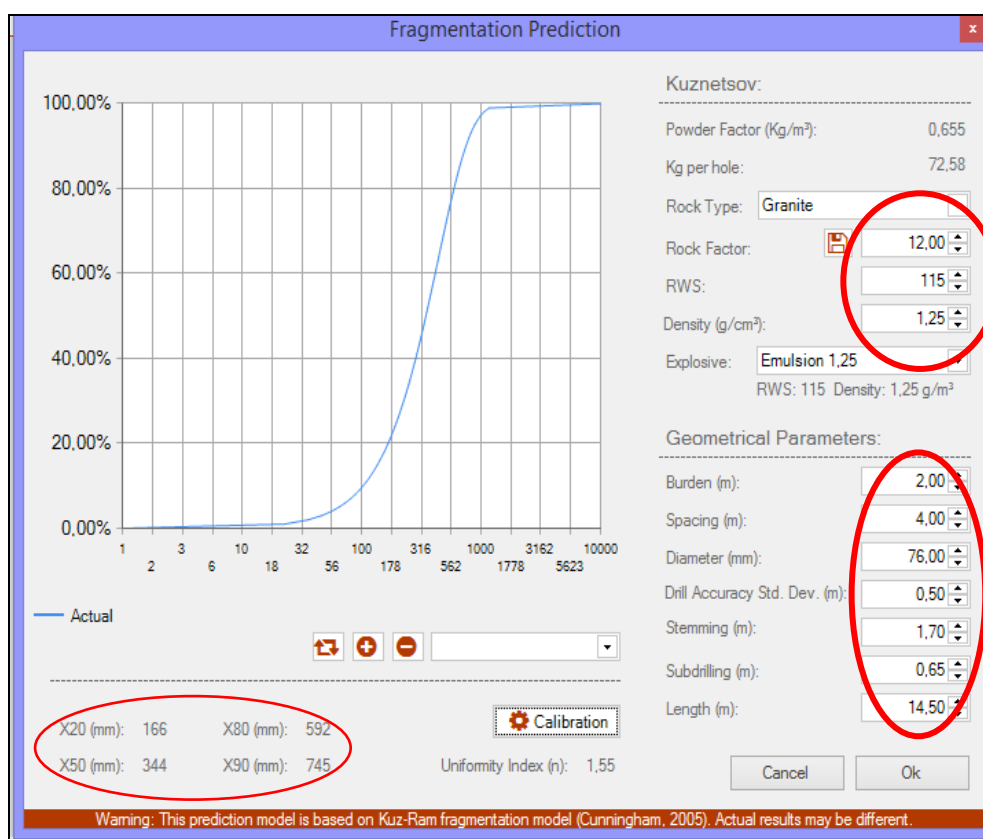
O fator de rocha utilizado no parâmetro da geologia, é baseado nos princípios da tabela de Lilly citado no capítulo de fragmentação, sendo adotado o valor de 12, referente ao valor do granito. O valor de RWS, também referenciado no capítulo de

fragmentação, sendo empregado um valor de 115, esse valor varia de acordo com o fabricante e a emulsão, o valor adotado é considerado o de maior potência, a densidade do explosivo é um item recomendado a não ser alterado.

No parâmetro fragmentação, foi alterado o valor do Oversize, prevendo uma fragmentação média de até 750 mm em 90% do material desmontado, já que, a abertura do alimentador é de 120x80 cm, com o objetivo de minimizar a quantidade de maticos. A otimização é realizada por meio de alterações nas restrições que o próprio software atua, sendo que, podemos modificar o intervalo desejado.

O custo do desmorte presumido pelo software O-Pitblast, levando em consideração os explosivos e a perfuração foi de R\$ 45.064,14. A ferramenta de otimização leva em consideração o volume de rocha que se deseja desmontar e os valores apropriados dos parâmetros geométricos de acordo com os intervalos propostos nas restrições.

Gráfico 1 – Previsão de Fragmentação



Fonte: Arquivo Pessoal (2017).

O gráfico 1 diz respeito, a previsão de fragmentação concedida pelo software. Essa previsão de fragmentação fornecida se dá por meio do modelo de Kuz-Ram pela fórmula de Kuznetsov. Para a criação dessa curva é necessário preencher com os dados geométricos e com informações encontradas anteriormente sobre a geologia e densidade do explosivo.

Os dados sobre a previsão de fragmentação obtida foram os seguintes: 20% do material é passante em 166 mm; 50 % do material é passante com 344 mm; 80% do material é passante em 592 mm; 90% do material é passante em 745 mm. Esse valor se altera de acordo com a curva de fragmentação gerada pelos novos parâmetros geométricos simulados.

Foram elaboradas dez otimizações, nas quais, foram escolhidas somente três. As otimizações aqui expostas trazem valores e parâmetros diferentes, sendo os parâmetros de acordo com a restrições desejadas. É realizado uma análise, onde deve-se levar em consideração, não somente os valores finais, mas também no desempenho que poderá gerar no plano de fogo, por meio das alterações propostas.

Figura 37 – Otimização 01

Geometry:		Blast:		Costs:	
Diameter (mm):	76	Number of Holes:	77	Initiation (per hole):	22,13
Bench High (m):	14,50	Number of Rows:	8	Explosive (per Kg):	4,81
Burden (m):	2,21	Volume (m³):	9.976,00	Drilling (per meter):	10,00
Spacing (m):	4,05	Geology:		Explosive:	
Subdrilling (m):	0,44	Rock Factor:	12,00	Density (Kg/m³):	1.200,00
Stemming (m):	2,05	Constraints:		RWS:	115
Fragmentation:		Spacing by Burden	1,20 ≤ 1,84 ≤ 2,30 ✓		
Limit (%):	90	Stemming by Burden	0,90 ≤ 0,93 ≤ 1,50 ✓		
Override (mm):	750	Subdrilling by Burden	0,20 ≤ 0,20 ≤ 0,60 ✓		
Information:		Uniformity Index	0,90 ≤ 1,90 ≤ 1,90 ✓		
Powder Factor (Kg/m³):	0,542	Stiffness Ratio	6,57 ≥ 3,00 ✓		
Specific Drilling (m/m³):	0,1153	Volume (m³):	9976,00 ≥ 9976 ✓		
		Override (mm):	750,00 < 750 ✓		
		Cost (\$):		R\$ 39.208,10	

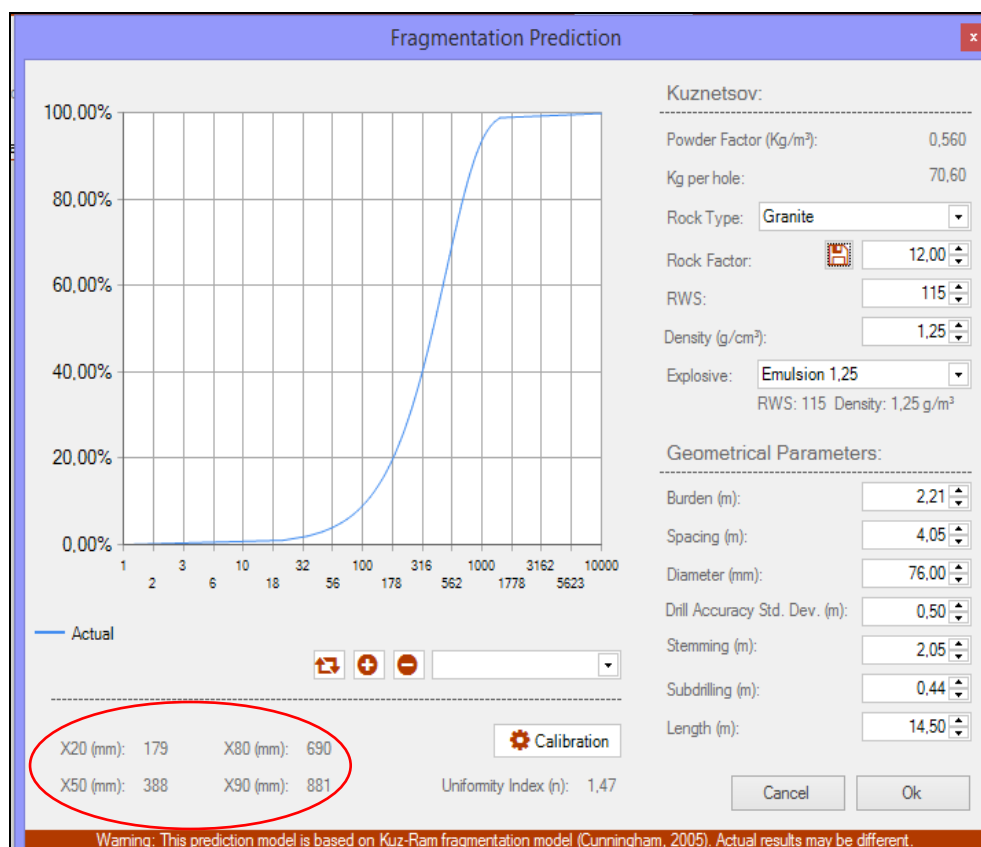
Find optimized values [Ok]

Warning: This prediction model is based on GRG Nonlinear optimization model. Actual results may be different.

A figura 37, refere-se ao primeiro cenário de otimização, onde foram atendidas todas as restrições impostas e a fragmentação desejada, diminuindo os custos em R\$ 5.856,04. No processo de otimização, houve uma pequena abertura da malha, o afastamento de 2 metros passou para 2,21, o espaçamento de 4 metros, foi para 4,05, o que possibilitou numa redução de 9 furos. Um aumento no tamanho do tampão ocasionou uma diminuição no valor de emulsão por furo, a subperfuração teve uma leve diminuição, porém o tamanho do tampão acarretou em menos explosivos.

As restrições impostas nessa situação, foram as seguintes: Valor entre afastamento e espaçamento devem estar entre 1,20 – 2,30; Valor do tampão em relação ao afastamento, entre 0,90 – 1,50; Valor da subperfuração em relação ao afastamento, 0,20 – 0,60; Índice de uniformidade entre 0,90 – 1,90; Relação de rigidez entre 3,00 – 6,57.

Gráfico 2 – Previsão de Fragmentação da Otimização 01



Fonte: Arquivo Pessoal (2017).

O gráfico 2 mostra a curva de previsão de fragmentação gerada na otimização 01, e apresenta os seguintes resultados: 20% do material é passante em 179 mm; 50% do material é passante em 388 mm; 80% do material é passante em 690 mm; 90% é passante em 881 mm.

Figura 38 – Otimização 02

Geometry:			Blast:			Costs:		
Diameter (mm):	76		Number of Holes:	73		Initiation (per hole):	22,13	
Bench High (m):	14,50		Number of Rows:	8		Explosive (per Kg):	4,81	
Burden (m):	2,15		Volume (m³):	9.976,00		Drilling (per meter):	10,00	
Spacing (m):	4,38		Geology:			Explosive:		
Subdrilling (m):	0,65		Rock Factor:	12,00		Density (Kg/m³):	1.200,00	
Stemming (m):	2,03		Constraints:			RWS:	115	
Fragmentation:			Spacing by Burden	1,20	≤ 2,04	≤	2,60	✓
Limit (%):	90		Stemming by Burden	0,90	≤ 0,94	≤	1,30	✓
Oversize (mm):	750		Subdrilling by Burden	0,30	≤ 0,30	≤	0,50	✓
Information:			Uniformity Index	0,90	≤ 2,00	≤	2,00	✓
Powder Factor (Kg/m³):	0,522		Stiffness Ratio		6,74	≥	3,00	✓
Specific Drilling (m/m³):	0,1108		Volume (m³):	9976,00	≥ 9976			✓
			Oversize (mm):	750,00	≤ 750			✓
			Cost (\$):			R\$ 37.740,45		

Find optimized values [Ok]

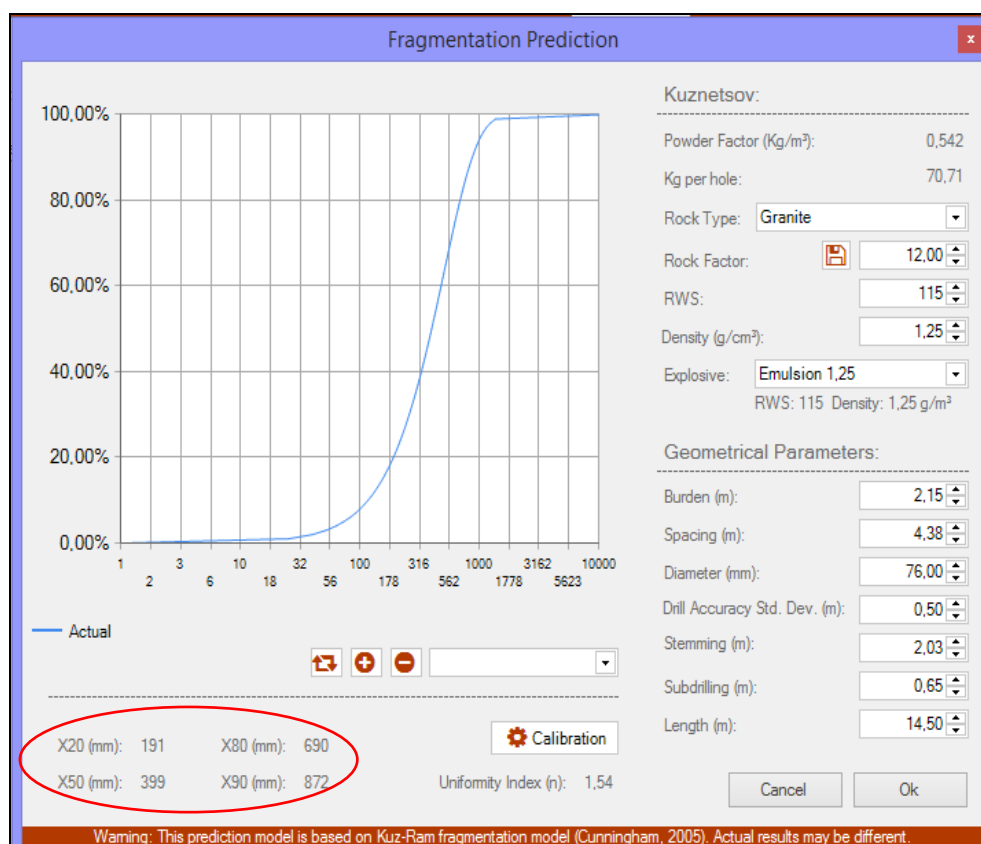
Warning: This prediction model is based on GRG Nonlinear optimization model. Actual results may be different.

Fonte: Arquivo Pessoal (2017).

A figura 38, corresponde a segunda otimização, onde houve uma redução de R\$ 7.323,69, também atendeu todos os parâmetros de restrições e volume. Houve uma maior abertura da malha, em relação a primeira otimização, substituindo os valores de afastamento de 2 metros para 2,15, espaçamento de 4 metros para 4,38, o que proporcionou uma redução de 13 furos, diminuindo R\$ 1.885,00 em relação somente a perfuração. Ocorreu um pequeno acréscimo no comprimento do tampão e subperfuração, que conseqüentemente, reduziu-se a quantidade de emulsão por furo.

As restrições impostas nesse caso, foram as seguintes: Valor entre afastamento e espaçamento devem estar entre 1,20 – 2,60; Valor do tampão em relação ao afastamento, entre 0,90 – 1,30; Valor da subperfuração em relação ao afastamento, 0,30 – 0,50; Índice de uniformidade entre 0,90 – 2,00; Relação de rigidez entre 3,00 – 6,74. Os valores obtidos no índice de parâmetros geométricos, são calculados de forma que almeje os melhores resultados.

Gráfico 3 – Previsão de Fragmentação da Otimização 02



Fonte: Arquivo Pessoal (2017).

O gráfico 3 ilustra a curva de fragmentação da otimização 02, os dados gerados a partir da nova malha foram: 20% do material é passante em 191 mm; 50% do material é passante em 399 mm; 80% do material é passante em 690 mm; 90% do material é passante em 872 mm.

Figura 39 – Otimização 03

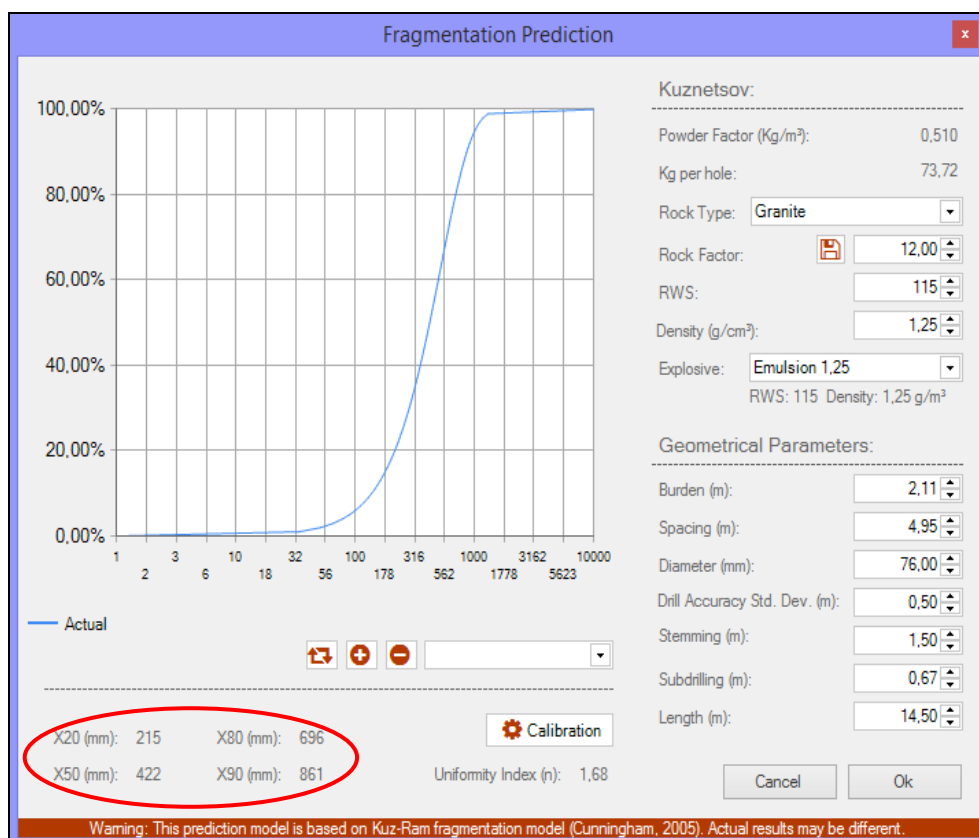
Optimization		
Geometry:	Blast:	Costs:
Diameter (mm): 76	Number of Holes: 66	Initiation (per hole): 22,13
Bench High (m): 14,50	Number of Rows: 8	Explosive (per Kg): 4,81
Burden (m): 2,11	Volume (m ³): 9.976,00	Drilling (per meter): 10,00
Spacing (m): 4,95	Geology:	Explosive:
Subdrilling (m): 0,67	Rock Factor: 12,00	Density (Kg/m ³): 1.200,00
Stemming (m): 1,50	Constraints:	RWS: 115
Fragmentation:	Spacing by Burden: 1,00 ≤ 2,35 ≤ 3,00 ✓	
Limit (%): 90	Stemming by Burden: 0,70 ≤ 0,71 ≤ 1,20 ✓	
Oversize (mm): 750	Subdrilling by Burden: 0,30 ≤ 0,32 ≤ 0,60 ✓	
Information:	Uniformity Index: 1,00 ≤ 2,20 ≤ 2,20 ✓	
Powder Factor (Kg/m ³): 0,492	Stiffness Ratio: 6,89 ≥ 3,00 ✓	
Specific Drilling (m/m ³): 0,1003	Volume (m ³): 9976,00 ≥ 9976 ✓	
	Oversize (mm): 750,00 ≤ 750 ✓	
	Cost (\$): R\$ 35.088,76	
<input type="button" value="Find optimized values"/> <input type="button" value="Ok"/>		
Warning: This prediction model is based on GRG Nonlinear optimization model. Actual results may be different.		

Fonte: Arquivo Pessoal (2017).

A figura 39, representa a terceira e última otimização exposta, ocorreu uma diminuição maior nos custos finais, em relação as demais hipóteses. Foram reduzidos R\$ 9.975,38, também acarretando em uma abertura da malha, sendo essa abertura com maior valor no espaçamento. Os valores de afastamento de 2 metros foram para 2,11, espaçamento de 4 metros para 4,95, diminuindo 20 furos. O tampão houve uma pequena redução de 1,70 para 1,50 metros e a subperfuração de 0,60 foi para 0,67 metros, para compensar a abertura da malha, foi diminuído o tampão, para que assim, haja uma maior quantidade de emulsão por furo.

As restrições da terceira otimização são: Valor entre afastamento e espaçamento devem estar entre 1,00 – 3,00; Valor do tampão em relação ao afastamento, entre 0,70 – 1,20; Valor da subperfuração em relação ao afastamento, 0,30 – 0,60; Índice de uniformidade entre 1,00 – 2,20; Relação de rigidez entre 3,00 – 6,89.

Gráfico 4 – Previsão de Fragmentação da Otimização 03



Fonte: Arquivo Pessoal (2017).

O gráfico 4 corresponde a curva de previsão de fragmentação da otimização 03, na qual obteve as seguintes informações: 20% do material é passante em 215 mm; 50% é passante em 422 mm; 80% é passante em 696 mm; 90% é passante em 861 mm.

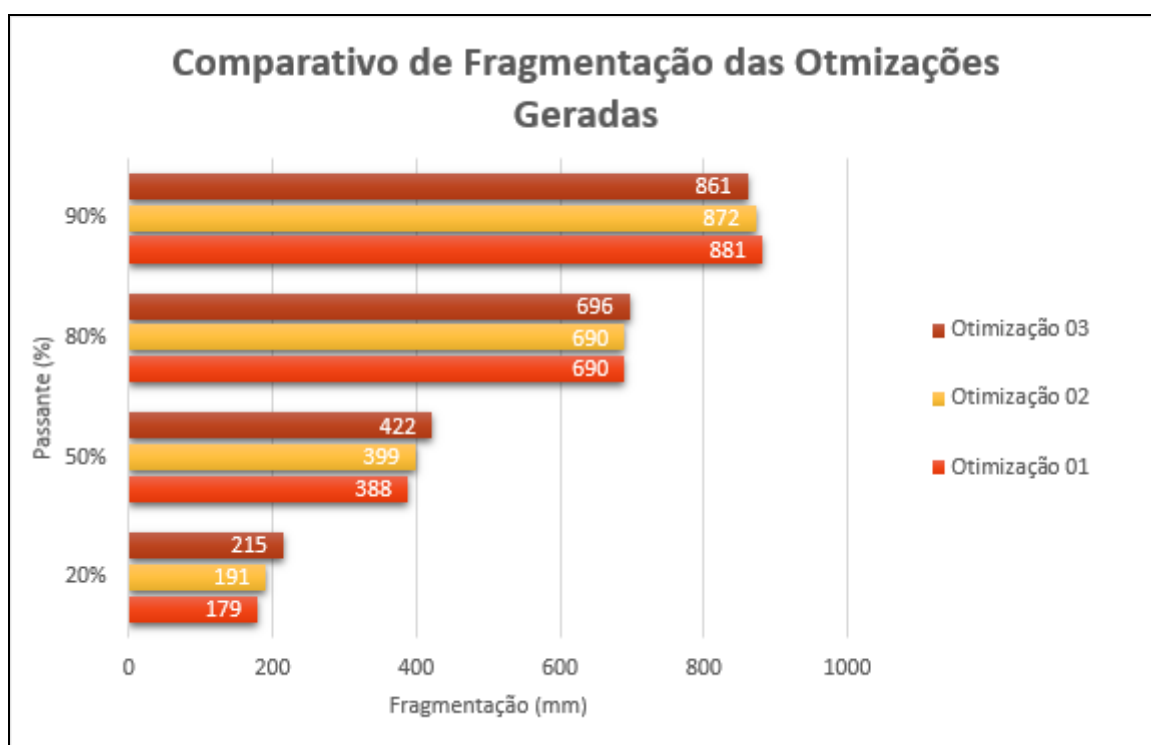
Tabela 7 – Comparativo de Fragmentação das Otimizações Geradas

COMPARATIVO DE FRAGMENTAÇÃO DAS OTIMIZAÇÕES GERADAS			
Valor passante (%)	Otimização 01	Otimização 02	Otimização 03
20%	179	191	215
50%	388	399	422
80%	690	690	696
90%	881	872	861

Fonte: Arquivo Pessoal (2017).

A tabela 7 apresenta o comparativo das informações geradas na previsão de fragmentação das otimizações elaboradas no software O-Pitblast. Os valores correspondem as supostas fragmentações em 20%, 50%, 80% e 90% passantes do material desmontado. Através da tabela elaborada, foi criado um gráfico para melhor visualização dos dados.

Gráfico 5 – Comparativo de Fragmentação das Otimizações Geradas



Fonte: Arquivo Pessoal (2017).

O gráfico 5 ilustra o comparativo da fragmentação das otimizações geradas, de acordo com os valores sugeridos no software. Esses valores são suposições, não havendo comprovação dos dados, devido isso, a análise é baseada em parâmetros que deem segurança em relação aos novos elementos do plano de fogo.

Nos três casos ocorreu uma diminuição dos custos através da abertura da malha, conseqüentemente, diminuindo a quantidade furos, houve variações nos tamanhos do tampão e subperfuração. É necessário, uma análise, para a verificação da melhor otimização, o melhor custo benefício, e os riscos existentes em cada situação.

Tabela 8 – Análise dos Processos de Otimizações

ANÁLISE DOS FATORES ENVOLVIDOS NO PROCESSO DE OTIMIZAÇÃO			
Parâmetros	Otimização 01	Otimização 02	Otimização 03
Redução de custo	R\$ 5.856,04	R\$ 7.323,69	R\$ 9.975,38
Redução de número de furos	9	13	20
Previsão de Fragmentação Passante em 20%	179 mm	191 mm	215 mm
Previsão de Fragmentação Passante em 50%	388 mm	399 mm	422 mm
Previsão de Fragmentação Passante em 80%	690 mm	690 mm	696 mm
Previsão de Fragmentação Passante em 90%	881 mm	872 mm	861 mm
Fator de Segurança	Alto	Médio	Baixo

Fonte: Arquivo Pessoal (2017).

A tabela 8 apresenta os dados nos quais foram realizadas as análises do melhor plano de fogo considerando os melhores parâmetros geométricos e que tenha um adequado fato de segurança operacional. Em análise, apesar das três situações gerarem teoricamente resultados satisfatórios, devemos levar em consideração parâmetros do afastamento e espaçamentos, o desempenho dos explosivos diante dessas malhas expostas, não esquecendo da geologia local, onde em determinados locais, possui alto grau de fragmentação.

Ao abriremos muito a malha, diminuimos os custos, porém aumentamos as chances de formação de matacos, nessa situação, ilustrada pela terceira otimização. O desempenho dos explosivos também podem sofrer alterações. O fator de pó para essa condição, é de 0,492, sendo considerado bom para pedreiras, o valor entre 0,50 e 0,70.

Na primeira e segunda otimização, tiveram parâmetros bem semelhantes, em ambos os casos ocorreu aumento da malha, com maior variação no espaçamento,

porém no primeiro caso houve uma redução do tamanho da subperfuração, e no segundo caso, um leve aumento, levando em consideração a profundidade do furo, o aumento da subperfuração geraria um melhor desempenho, evitando a formação de repés.

Levando em consideração, o fato relevante sendo a subperfuração e o custo final, a segunda otimização, seria a melhor escolha, visando desempenho e custo benefício. Conseguiu eliminar 13 furos, fazendo com que, haja uma diminuição significativa em perfuração, não alterando muito os parâmetros pré-estabelecidos e possui fator de pó de 0,522.

Após a escolha da melhor otimização, é realizado no software o relatório com todas informações e parâmetros referentes ao novo plano de fogo elaborado. Servirá para trabalhos futuros, por meio da validação dos dados encontrados.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

De fato, todos os custos existentes em um empreendimento mineiro estão diretamente ligados aos processos de lavra. Um mal dimensionamento nos parâmetros do plano de fogo, pode gerar um elevado custo e uma má fragmentação, o que afetará nos processos de beneficiamento. Para que o beneficiamento siga em fluxo contínuo, é necessário que haja uma boa fragmentação do minério, gerando assim, uma diminuição em relação aos gastos com manutenção e quebra de equipamentos. O estudo geológico serve como um norte em relação aos parâmetros necessários para as atividades de lavra, como a escolha mais adequadas dos equipamentos, explosivos, comportamento de ruptura, entre outros fatores.

Para alcançar resultados satisfatórios em relação ao desmonte de rocha, no caso, uma otimização, é indispensável, um estudo detalhado de todas as variáveis envolvidas no processo, desde a geologia, equipamentos, malha de perfuração até a presença de água na rocha.

A otimização tem o objetivo de melhorar algo, tornando-o o mais próximo do satisfatório. No que diz respeito a desmonte de rochas com explosivos, a otimização se reflete em alcançar os melhores métodos de malha de perfuração e amarração e diminuir gastos em explosivos e acessórios, evitando o uso de detonações secundárias e fogachos.

O software O-Pitblast é uma ferramenta de otimização, que permite por meio de simulação, atingir os melhores métodos para a elaboração do plano de fogo. Por meio do uso do software foram atingidos os objetivos aqui propostos. As restrições impostas proporcionaram diversos resultados, sendo eles analisados e levados em consideração os melhores parâmetros.

O estudo aqui aprofundado, proporcionou um melhor entendimento em relação aos condicionantes envolvidos no processo de desmonte de rocha, não sendo apenas, o plano de fogo em si. Os critérios de otimização, serviram como um leque de oportunidades de melhoria de fatores no meio da engenharia de minas, sendo ela parte do avanço tecnológico.

O trabalho proposto conseguiu alcançar os objetivos teoricamente, não sendo possível a execução desse novo plano de fogo. Porém, serve como preceitos para estudos futuros sobre o tema.

6 REFERÊNCIAS

ALONSO, José Bernaola; GOMÉZ, Jorge Castilla; HERBERT, Juan Herrera. **Perforación y Voladura de Rocas em Minería**.2013. 264 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Minas, Departamento de Explotación de Recursos Minerales y Obras Subterráneas, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, 2013

BRITANITE. **Manual Básico de Utilização de Explosivos**. 2004.

CASSAL, Sergio Barum. **Topografia**. Pelotas: Universidade Federal de Pelotas, 99 p

CATERPILLAR. **Nova Equipamentos - PERFURATRIZES**. 2016. Disponível em: <http://www.cat.com/pt_BR/products/new/equipment/drills.html>. Acesso em: 04 set. 2016.

CAVADAS, Pedro Miguel Martins. **OPTIMIZAÇÃO DO DESMONTE NUMA MINA A CÉU ABERTO COM APLICAÇÃO DE AIR DECKS**. 2012. 204 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Minas, Departamento de Engenharia de Minas, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto-Portugal, 2012.

DNPM, Departamento Nacional de Produção Mineral -. **DNPM**. 2016. Disponível em: <<http://www.dnpm.gov.br/>>. Acesso em: 5 out. 2016.

GALIZA, Antônio Carlos et al. **MANUAL DO OPERADOR DE PRODUTOS EXPLOSIVOS: Um Guia de Apoio para a Formação**. Porto: Associação Portuguesa de Estudos e Engenharia de Explosivos, Ap3e, 2011.

GERALDI, José Lúcio Pinheiro. **O ABC das escavações de rocha**.Rio de Janeiro: Interciência, 2011. 266 p.

GOMES, José Pedro Moreira Andrade. **METODOLOGIA PARA ANÁLISE DE VIBRAÇÕES PROVOCADAS POR DESMONTES COM RECURSO A EXPLOSIVOS**. 2016. 89 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Minas, Departamento de Engenharia de Minas, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2016.

HUSTRULID, William. **Blasting Principles for Open Pit Mining**. 2. ed. Colorado: CRC Press, 1999.

IMBEL, Industria de Material Bélico do Brasil -. **Curso de explosivos civis**. São Paulo: Ministério da Defesa, 1975.

SENA, Francisco Leite. **DESARROLO DE UNA HERRAMIENTA DE DISEÑO DE VOLADURAS EN TÚNELES**. 2013. 124 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Minas, Departamento de Engenharia de Minas, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2013.

QUARESMA, Luiz Felipe. **PRODUTO 22, AGREGADOS PARA A CONSTRUÇÃO CIVIL: Relatório Técnico 30, Perfil de Brita Para Construção Civil.** Brasília: Ministério de Minas e Energia – MME, 2009. 20 p. PROJETO DE ASSISTÊNCIA TÉCNICA AO SETOR DE ENERGIA.

PERFORMANCE, Maxam Beyond. **MAXAM.** 2016. Disponível em: <http://www.maxam.net/es/civil_explosivos/buscador_productos>. Acesso em: 10 set. 2016.

MENDES, Marcelo Lopes. **Curso de Desmonte de Rochas com Explosivos: Formação de Blaster.** Consultoria e Serviços de Mineração e Meio Ambiente. Disponível em: <www.riograndeminas.com.br>. Acesso em: 20 set. 2016.

O-PITBLAST. **Planeamento e Otimização de desmonte.** 2016. Disponível em: <<http://www.o-pitblast.com/pt/Inicio>>. Acesso em: 29 ago. 2016

RICARDO, Hélio de Souza; CATALANI, Guilherme. **Manual Prático de Escavação.** 2. ed. São Paulo: Pini, 1990. 668 p.

SEPLAN. **Secretaria do Planejamento e Orçamento.** 2016. Disponível em: <<http://seplan.to.gov.br/>>. Acesso em: 15 out. 2016.

VERAS, Diego Gusmão da Silva et al. **Relatório do Trabalho Realizado em Minas do Camaquã.** Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2012. 31 p.

BRASIL, Cidade. **Município de Feira de Santana.** Disponível em: <<http://www.cidade-brasil.com.br/municipio-feira-de-santana.html>>. Acesso em: 16 mar. 2017.

NOBREZA, Wellington Batista de Souza. **RELATÓRIO FINAL POSITIVO DE PESQUISA DO PROCESSO 871.084/2011.** Feira de Santana: São Francisco Mineração Ltda, 2014. 37 p.

PEREIRA, Eduardo da Silva; FRANCA-ROCHA, Washington; NOLASCO, Marjorie C.. **AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE JAZIDAS DE MATERIAIS PARA CONSTRUÇÃO EM FEIRA DE SANTANA – BA.** Feira de Santana: Enecs - Encontro Nacional Sobre Edificações e Comunidades Sustentáveis, 2003. 15 p.

REIS, Pedro Alcides Santos. **Otimização de Parâmetros Geométricos em Diagramas de Fogo para Desmonte a Céu Aberto.** 2016. 85 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mineral, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2016.

SILVA NETO, Hyrck Raphael da. **OTIMIZAÇÃO DA BLENDAGEM DE CALCÁRIO DA VOTORANTIM CIMENTOS EM XAMBIOÁ-TO.** 2013. 46 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Minas, Ceulp - Ulbra, Palmas, 2013.

SANCHIDRIÁN, J.a.; MUÑIZ, E.. **Curso de Tecnología de Explosivos**. Madrid: Fundacion Gomez Pardo, 2000. 556 p.

ALVARADO, Paulo César Fernández. **Estudio de Modelos de Fragmentación y su Medida Mediante Análisis Digital de Imágenes para Voladuras Superficiales**. 2013. 93 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Minas, Escola Técnica Superior de Ingenieros de Minas, Espanha, 2013.

ENGINEERING, Split. **Split-Desktop Software**. 2017. Disponível em: <<https://www.spliteng.com/>>. Acesso em: 20 mar. 2017

CUNNINGHAM, C.v.b.. **The Kuz-Ram fragmentation model – 20 years on**. European Federation Of Explosives Engineers, South Africa, v. -, n. -, p.201-210, nov. 2005.

MORAIS, Juarez Lopes de; GRIPP, Maria de Fátima Andrade. **Fundamentos para simulação dos desmontes de rocha por explosivos**. Rem - Revista Escola de Minas, Ouro Preto, v. 4, n. 57, p.241-248, dez. 2004.

METRICS, Motion. **Motion Metrics International: Extending Machine Senses**. 2017. Disponível em: <<http://www.motionmetrics.com/>>. Acesso em: 20 mar. 2017.

MIRANDA, Vinicius Gouveia de. **VALIDAÇÃO DE MODELOS LINEARES: Uma análise residual**. 2016. 43 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Minas e Geo-ambiente, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2016.

MICROSOLFT. **Solver**. 2010. Disponível em: <<https://support.office.com/pt-br/article/Definir-e-resolver-um-problema-usando-o-Solver-9ed03c9f-7caf-4d99-bb6d-078f96d1652c>>. Acesso em: 01 abr. 2017.

BRASIL, Endeavor. **KPI: como medir o que importa no seu negócio**. 2015. Disponível em: <<https://endeavor.org.br/kpi/>>. Acesso em: 11 abr. 2017

TAP, Maxam - Serviços de Aplicações Técnicas. **RIOBLAST Blast Design e Simulation: Soluções em Desmonte**. Madrid: Maxam, 2013. 34 p.

NEVES, Andreia. **O USO DE INDICADORES CHAVE DE DESEMPENHO PARA AVALIAR A EFICIÊNCIA DOS SISTEMAS DE GESTÃO**. 2012. 198 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Gestão Integrada da Qualidade, Ambiente e Segurança, Instituto Superior de Engenharia e Ciências, Portugal, 2012

PIROBRÁS. **Explosivo tipo Emulsão Pirofort.** 2017. Disponível em: <<http://www.pirobras.ind.br/produtos-pirofort.html>>. Acesso em: 26 abr. 2017.

MIRANDA, Vinicius Gouveia de. **SOFTWARE MONITORA: DESENVOLVIMENTO E APLICAÇÕES NA OTIMIZAÇÃO DE DESMONTES.** 2010. 33 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Minas, Univesidade Federal de Pernambuco, Recife, 2010

SILVA, Marco Antonio Delinardo da et al. **GE902 – Softwares de Mineração: Vulcan.** 2011. Disponível em: <<https://ge902software.wordpress.com/vulcan/>>. Acesso em: 17 maio 2017.

GAMS, Software. **GAMS.** 2017. Disponível em: <<https://www.gams.com/>>. Acesso em: 20 maio 2017.

UNESP. **Granulito.** -. Disponível em: <<http://www.rc.unesp.br/museudpm/rochas/metamorficas/granulito.html>>. Acesso em: 18 maio 2017.

CPRM. **GLOSSÁRIO DE ROCHAS GRANULÍTIICAS.** -. Disponível em: <<http://sigep.cprm.gov.br/glossario/textos/met1/granu.htm>>. Acesso em: 17 maio 2017.

ANEXOS