UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS

WILLAMS BERNARDO DE LIMA SOUZA

ANÁLISE DO DESMONTE DE ROCHAS REALIZADO NA PEDREIRA ESPERANÇA – VITÓRIA DE SANTO ANTÃO-PE

RECIFE
2016

WILLAMS BERNARDO DE LIMA SOUZA

ANÁLISE DO DESMONTE DE ROCHAS REALIZADO NA PEDREIRA ESPERANÇA – VITÓRIA DE SANTO ANTÃO-PE

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Engenharia de Minas do Centro de Tecnologia e Geociências (CTG) da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), como requisito da disciplina Projeto de Graduação.

Área de concentração: Desmonte de rochas

Orientador: Márcio Luiz Siqueira Campos Barros

Recife

2016

Catalogação na fonte
Bibliotecária Valdicéa Alves, CRB-4 / 1260

S729a Souza, Willams Bernardo de Lima.
Análise do desmonte de rochas realizado na Pedreira Esperança – Vitória de Santo Antão-PE. / Willams Bernardo de Lima Souza, 2016.
62 folhas, il. e Tabs.

Orientador: Prof. Drº. Márcio Luiz de Siqueira Campos Barros.

TCC (Graduação) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Departamento de Engenharia de Minas, 2016.
Inclui Referências e Anexos.

1. Engenharia de Minas. 2. Desmonte de rochas. 3. Distribuição granulométrica. 4. Otimização. I. Barros, Márcio Luiz de Siqueira Campos. (Orientador). II. Título.

UFPE

623.26CDD (22. ed.) BCTG/2017-40

Trabalho de conclusão de curso apresentado como requisito parcial para obtenção do diploma de Bacharel em Engenharia de Minas.

_____

WILLAMS BERNARDO DE LIMA SOUZA

Trabalho de conclusão de curso apresentado em ___/___/_____

_____

Orientador: Dr. Marcio Luiz de Siqueira Campos Barros

_____

Examinador: Msc. Marinésio Pinheiro de Lima

_____

Examinador: Mestrando Jorge Luiz Valença Mariz

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Maria do Socorro de Lima Burgos e Wilson Bernardo de Souza, que sempre me apoiaram e me motivaram em todos os momentos da minha vida;

A minha namorada, Dayanne Bezerra da Silva Dias, por toda força, amor, carinho, conforto e motivação para que eu sempre pudesse seguir em frente;

Ao engenheiro de minas, Jorge Valença, e todos os demais funcionários da Pedreira Esperança, que me permitiram ampliar meu conhecimento prático durante o estágio e realizar as análises para realização do presente trabalho;

Ao professor orientador, Márcio Luiz Siqueira Campos Barros, pelo auxílio na realização deste trabalho;

Aos demais professores da UFPE que contribuíram para o meu aprendizado;

A todos os amigos da UFPE, entre outras pessoas não citadas que puderam contribuir de qualquer forma.

RESUMO

As operações unitárias realizadas em pedreiras, como: desmonte, carregamento, transporte e britagem exigem um acompanhamento contínuo, afim de garantir uma melhor produção e evitar o desgaste excessivo dos equipamentos em operação, tais como: caminhões, escavadeiras, britadores. Uma forma de evitar o desgaste excessivo de equipamentos de carregamento, transporte e britagem é otimizar a granulometria dos fragmentos gerados pelo desmonte, de acordo com o porte dos equipamentos utilizados para realizar as etapas posteriores ao desmonte. Atualmente, existem alguns softwares de mineração capazes de calcular: a distribuição da granulometria dos fragmentos gerados pelo desmonte, o tamanho médio dos fragmentos, o tamanho do maior fragmento, entre outros parâmetros importantes. E com base nestes parâmetros, pode-se realizar ajustes nos parâmetros do plano de fogo de desmontes posteriores, otimizando a produção da pedreira e evitando desgastes excessivos dos equipamentos.

Palavras-chave: Desmonte de rochas. Distribuição granulométrica. Otimização.

ABSTRACT

The unit operations made in quarries, such as: blasting, loading, hauling and crushing) require continuous monitoring in order to ensure a better production and avoid excessive wear and tear of the equipment in operation, such as: trucks, excavators, crushers. One way to avoid excessive wear of loading, hauling and crushing equipment is to optimize the particle size of the fragments generated by the blasting, according to the size of the equipment used to carry out the subsequent steps. Currently, there are some mining software capable of calculating: the particle size distribution of the fragments generated by the blasting, the mean size of the fragments, the size of the largest fragment, among other important parameters. And based on these parameters, adjustments can be made in the blasting parameters of next blasting, optimizing the quarry production and avoiding excessive wear of the equipment.

Keywords: Blasting. Particle size distribution. Optimization.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 9
2. OBJETIVOS 10
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 11
3.1. Explosivos 11
3.1.1. Tipos de reações dos explosivos 12
3.1.2. Principais explosivos 12
3.1.2.1. ANFO 13
3.1.2.2. Emulsão 15
3.1.2.3. ANFO pesado (heavy ANFO) 17
3.1.3. Principais propriedades dos explosivos 18
3.1.3.1. Densidade 19
3.1.3.2. Energia de um explosivo 19
3.1.3.3. Balanço de oxigênio 20
3.1.3.4. Velocidade e pressão de detonação 20
3.2. Parâmetros do plano de fogo 21
3.2.1. Diâmetro do furo 21
3.2.2. Profundidade do furo 22
3.2.3. Subfuração 22
3.2.4. Inclinação do furo 23
3.2.5. Afastamento 24
3.2.6. Espaçamento 24
3.2.7. Afastamento e espaçamento efetivos 25
3.2.8. Tampão 26
3.2.9. Razão de carga 27
3.3. Mecanismos de ruptura da rocha pelos explosivos 27
3.4. Modelos atuais de interação explosivo-rocha 28
4. METODOLOGIA 31
4.1. Levantamento de dados 31

4.2. Análise da granulometria através do software de fotoanálise 32
4.2.1. Formas corretas de adquirir as imagens 32
4.2.2. Abrindo imagem pelo Split-Desktop 33
4.2.3. Determinação das escalas 33
4.2.4. Delineação 34
4.2.5. Conclusão da edição 37
4.2.6. Calculando tamanhos e exibindo resultados..... 37
4.2.7. Análise Conjunta das imagens 39
4.2.8. Erros e limitações do programa 39
5. RESULTADO E DISCUSSÕES 39
5.1. Resultados das análises pelo software Split-Desktop 40
5.2. Sugestões de novos parâmetros do plano de fogo 46
6. CONCLUSÃO 48
REFERÊNCIAS 48
ANEXOS 50

1. INTRODUÇÃO

A brita, por ser uma matéria-prima de valor agregado muito baixo, normalmente as pedreiras têm de se instalar em locais relativamente próximos a um centro consumidor, afim de reduzir gastos com o transporte do material. Um outro fator importante para as pedreiras, além da distância do centro consumidor, é preferir lavrar de pontos mais elevados da superfície (montes), apresentando grande vantagem econômica, pois o transporte é descendente, geralmente os volumes de decapeamento são pequenos e possui drenagem natural.

A região metropolitana do Recife, assim como outras grandes regiões metropolitanas, é um grande polo de consumo de brita, importante matéria-prima da construção civil para construção de moradias, viadutos, estradas, entre outros. O local do presente estudo está situado na Zona da Mata de Pernambuco e possui um grande potencial por possuir grande reserva, estar próximo ao grande mercado consumidor e pela qualidade da rocha explorada.

Atualmente, no Brasil, diversos setores vêm sendo afetados negativamente devido à grande desaceleração de investimentos por conta da situação econômica em que o país se encontra, além das altas nos custos de produção. O presente estudo além de ser importante para acompanhamento da distribuição granulométrica dos fragmentos gerados pelo desmonte, ainda se faz mais interessante, principalmente nesta época onde é de grande importância a redução de custos.

Neste estudo, foi realizado a aquisição, o processamento e análise de diversas imagens da pilha gerada de um desmonte de rochas realizado pela empresa Opex, no dia 05/11/2016, durante o estágio supervisionado na Pedreira Esperança, no município de Vitória de Santo Antão, a fim de conhecer a granulometria do material gerado e saber se o desmonte realizado na pedreira é eficiente para as seguintes operações unitárias da produção. E assim, contribuir para melhoria dessas etapas.

2. OBJETIVO

Este trabalho tem como objetivo conhecer a distribuição granulométrica do desmonte realizado pela empresa Opex, no dia 05/11/2016, e averiguar se o desmonte realizado na Pedreira Esperança, localizada no município de Vitória de Santo Antão, é eficiente através de um software de fotoanálise. Otimizando não somente o desmonte, mas também o carregamento, o transporte e a britagem.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Explosivos

A descoberta da pólvora, foi um marco na evolução das escavações de rocha. Em busca por um elixir da imortalidade, alquimistas chineses descobriram um trio explosivo por acidente, misturando carvão vegetal, enxofre e nitrato de potássio. Os primeiros relatos referentes à pólvora surgiram como alertas em textos de alquimia, para evitar tal mistura. Mais tarde, o homem aprendeu a controlar a pólvora, passando a utilizar para fins militares, pirotécnicos e para fragmentação de blocos de rocha. A partir da descoberta do TNT (trinitrotolueno), no fim do século XIX, Alfred Nobel começou a desenvolver e fabricar os primeiros explosivos industriais. Dando um grande incentivo para a indústria mineral e em grandes obras civis, era o início da era moderna da escavação de rochas. Ao longo dos anos, as inovações dos explosivos contribuíram enormemente para o progresso e bem-estar da humanidade, permitindo construções de rodovias, ferrovias, túneis, construções de hidrelétricas, exploração de petróleo, entre outros.

Os explosivos são utilizados em diversos tipos de mineração e com diversas finalidades, seja na fragmentação do granito para produção de brita, seja no destacamento de grandes pranchas e blocos no ramo da rocha ornamental, seja na demolição rápida e controlada de grandes construções, ou até mesmo em desmontes subaquáticos para navegação de navios, etc. Em pedreiras, os explosivos possuem total importância, pela necessidade de fragmentação da rocha e possibilitar o trabalho de carregamento, transporte e britagem para dar origem ao produto final.

Os explosivos são substâncias ou mistura de substâncias com um grau de instabilidade nas ligações atômicas de suas moléculas que quando excitadas por algum agente externo, propicia uma rápida reação de dissociação e novo reagrupamento dos átomos em formas mais estáveis. Esta reação, do tipo oxirredução é conhecida como detonação e origina gases a altas pressões e temperaturas, que por sua vez geram uma onda de compressão que se desloca ao redor. Esta reação pode ser provocada por agentes mecânicos (atrito, pressão, impacto, vibração, etc.) ou por um outro explosivo.

3.1.1. Tipos de reação dos explosivos

Explosivos industriais quando iniciados corretamente, resultam numa reação cuja característica principal é a sua velocidade. A energia liberada pela reação, na forma de onda de pressão e alta temperatura, provoca a dissociação moléculas adjacentes sucessivas, de modo que a reação se espalha para todas as partículas. A velocidade com que se efetua esta propagação é diferente em cada tipo de explosivo. Assim, a reação pode ser dividida em três tipos de reação, dependendo da velocidade que ocorre: combustão, deflagração e detonação.

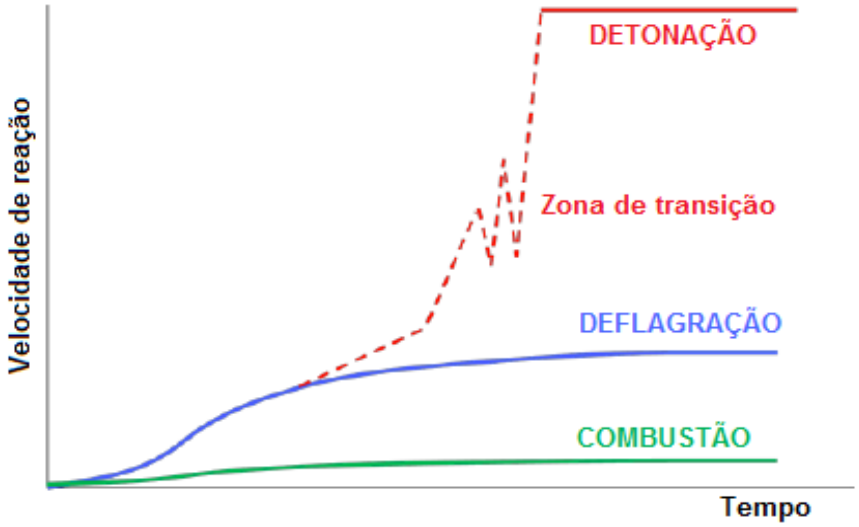

Figura 1 - Tipo de reação em função da cinética química. Fonte: Alonso, J. B., Gómez, J.C., Herbert, J.H., 2013.

- Combustão: a velocidade da reação é inferior a 1 m/s e pode ser observada a olho nu, em forma de chama.
- Deflagração: a reação que produz uma deflagração é igual a de uma combustão, mas a velocidade da reação é maior, mas é menor que a velocidade do som na substância. A onda de pressão gerada é da ondem de 10^3 atm. Um exemplo disto é a pólvora.
- Detonação: gera uma onda de choque, gerando altos gradientes de pressão e temperatura. A reação química acontece instantaneamente com velocidade de reação entre 1500 e 9000 m/s e onda de pressão na ordem de 10^5 atm.

3.1.2. Principais explosivos

Atualmente, existem diversos explosivos, com diferentes composições químicas. Os mais utilizados em minerações, são: ANFO, emulsões e blendados.

3.1.2.1. ANFO

Em 1947, depois da grande catástrofe ocorrida na cidade de Texas nos EUA, onde dois navios carregados com várias toneladas de nitrato de amônia (produto largamente utilizado para a produção de fertilizantes) explodiram. Os fabricantes de explosivos centraram no potencial energético do nitrato de amônia e de sua possibilidade como explosivo, dado seu baixo custo. Qualquer combustível pode ser misturado com nitrato de amônio para produzir um explosivo. No fim da década de 50, nos EUA, se utilizada carvão, mas depois passou a ser substituído por combustíveis líquidos, conseguindo melhores misturas com o nitrato de amônio. O combustível mais utilizado para essa mistura com o nitrato de amônio é o óleo diesel. O nitrato de amônio pode ser produzido de três maneiras:

- Nitrato de amônio granulado – alta área superficial, usado somente em dinamites.
- Prills porosos – com estreita faixa de tamanho (80% entre 3,35 mm e 1,18) e com agentes “anti-caking”, que evitam a agregação do nitrato. Este é o mais utilizado para produção do ANFO.
- Prills de alta densidade – são prills densos e duros, utilizados apenas na agricultura.

As maiores vantagens do ANFO: ocupar o volume total do firo, grande insensibilidade aos choques, poucos gases tóxicos e baixo preço global. E como desvantagens: não possui resistência à água, baixa densidade (0,85 g/cm^3) e necessidade de um iniciador especial.

Figura 2 – ANFO. Fonte: Maxam.

Energia produzida

O nitrato de amônio é um agente oxidante e pode liberar um átomo de oxigênio de cada molécula na reação e este átomo liberado combina com o óleo, formando os

produtos da reação de combustão. Dependendo da quantia de óleo presente, a reação será mais ou menos completa. Reações completas produzem mais energia. Após a detonação, os produtos gasosos dependerão da proporção dos reagentes, da constante de equilíbrio e da temperatura. As principais reações:

$2C + O_2 \Rightarrow 2CO$

$C + O_2 \Rightarrow CO_2$

$O + CO \Rightarrow CO_2$

$CO + H_2O \Rightarrow CO_2 + H_2$

$2CO + 2H_2 \Rightarrow CH_4 + CO_2$

$N_2 + 3H_2 \Rightarrow 2NH_3$

$H + O_2 \Rightarrow H_2O$

A energia produzida é igual ao calor de formação dos gases gerados menos o calor de formação dos ingredientes da mistura. A energia produzida é diferente para diferentes proporções de óleo e nitrato amônio. A energia máxima ocorre o balanço zero de oxigênio, ou seja, quando todo oxigênio é utilizado para produzir CO_2, H_2O e N_2. A energia produzida por uma reação com balanço zero pode ser calculada pela equação balanceada, abaixo:

$3NH_4NO_3 + CH_2 \Rightarrow 3N_2 + 7H_2O + CO_2$

O peso atômico de uma molécula de nitrato de amônio é 80 e 14 é o peso atômico da molécula do hidrocarboneto. Logo, 3 moles de nitrato de amônio e uma molécula do hidrocarboneto dá um peso atômico de 254. Logo, o percentual de óleo combustível, em massa, para um balanço zero de oxigênio é:

$$\frac{14}{254} \times 100 = 5{,}51\% \text{ de óleo combustível.}$$

Considerando uma mistura perfeita, o ANFO produz aproximadamente 900 cal/g de energia. A tabela 1 resume o efeito da variação da proporção de óleo combustível.

Tabela 1 - Efeito da variação da proporção de óleo na mistura com nitrato de amônio.

% de óleo por massa	Energia (cal/g)	H_2O (moles/kg)	CO_2 (moles/kg)	N_2 (moles/kg)	CO (moles/kg)	H_2 (moles/kg)	CH_4 (moles/kg)	NH_3 (moles/kg)
2	552	25,9	1,4	12,2	---	---	---	---
4	751	26,8	2,9	12,0	---	---	---	---
5	851	27,3	3,6	11,9	---	---	---	---
6	883	27,2	3,8	11,7	0,5	0,6	---	---
7	849	26,4	3,6	11,6	1,3	1,5	0,1	0,1
8	840	26,5	3,3	11,4	1,3	1,7	0,2	0,1
10	829	27,2	2,7	11,2	1,1	1,9	0,2	0,1
15	799	28,6	1,3	10,5	0,6	2,4	0,3	0,02
25	717	27,9	0,1	9,1	0,1	4,1	1,8	0,06

3.1.2.2. Emulsão

No começo dos anos 60, foi quando surgiu o interesse nesses produtos. Esses explosivos são do tipo “água-em-óleo” (water-in-oil). Consistem de microgotículas de solução oxidante supersaturada dentro de uma matriz de óleo. Com a finalidade de aumentar o rendimento energético do explosivo e minimizar os custos com produção e preço de venda, o agente oxidante dentro das microgotículas consiste principalmente de nitrato de amônio. Dentro do ponto de vista químico, um explosivo em emulsão se define com uma dispersão estável de um líquido imiscível em outro, o qual se consegue mediante agentes que favorecem este processo (agentes emulsificantes) e uma forte agitação mecânica. A tabela 2 apresenta a composição básica de um explosivo em emulsão.

Tabela 2 - composição básica das emulsões

Ingrediente	Porcentagem em massa (%)
Nitrato de amônio	77,3
Água	16,7
Óleo diesel	4,9
Agente emulsificante: oleato de sódio ou monoleato de ezorbitol	1,1

Figura 3 - Emulsão encartuchada. Fonte: Maxam.

Um problema comum das emulsões é o fenômeno de cristalização. Quando submetidas a baixas temperaturas, a estrutura que cria as propriedades atrativas da emulsão pode cristalizar. Com isso, a estrutura das emulsões é perdida de forma irreversível.

Energia produzida

A energia das emulsões pode ser intensificada com a adição de alumínio na formulação. Porém, o custo é elevado. Pode-se também adicionar nitrato de amônio na emulsão para reduzir o porcentual de água e aumentar a energia do explosivo, com custos menores do que se utilizasse o alumínio. A tabela 3 apresenta valores teóricos da energia produzida pelas emulsões com diferentes porcentagens de alumínio. Os valores são baseados na suposição que os explosivos reagem completamente e que toda energia é liberada na onda de detonação.

Tabela 3 - Energia produzida por diferentes porcentagens de Alumínio.

Composição	Densidade (g/cm^3)	Velocidade da onda de detonação (m/s)	Energia total (cal/g)
Emulsão + 0% Al	1,20	6440	684
Emulsão + 5% Al	1,32	6560	862
Emulsão + 7% Al	1,33	6600	948
Emulsão + 10% Al	1,34	6600	1016
Emulsão + 14% Al	1,35	6500	1150

Devido ao grande perigo e dificuldades das minerações implantarem um sistema seguro de rastrear destino, uso e armazenamento em paiós, o uso de

explosivos convencionais deste tipo estão ficando cada vez mais restrito ao passar do tempo.

Uma solução para reduzir o custo operacional e a aumentar a segurança nas detonações é utilizar a emulsão bombeada, em um processo a granel feito por unidades móveis de bombeamento, mas conhecidas como UMB.

Isto oferece vantagens em relação ao uso da emulsão encartuchada e permite o aumento da malha, reduzindo significativamente o custo com perfuração, além de obter um desmonte mais fragmentado. Um dos maiores benefícios desse sistema bombeado é a segurança nas operações de transporte e carregamento de fogo, dispensando o uso de paióis nas minas. Dessa maneira, os riscos são minimizados.

A ativação da emulsão que está nas unidades móveis de bombeamento ocorre apenas durante o ato de bombeamento nos furos, com dosagens precisas e seguras, controladas eletronicamente. O equipamento é dotado de um sistema eletrônico protegido por senhas de acesso, em que só operadores habilitados da fábrica podem manusear o conjunto.

Figura 4 - Unidade móvel de bombeamento. Fonte: Minérios & Minerales.

3.1.2.3. ANFO pesado (heavy ANFO)

Também chamado de ANFO blendado, o ANFO pesado nada mais é que a adição de percentuais de emulsão ao ANFO comum, aumentando assim a energia absoluta do explosivo.

O ANFO comum apresenta cerca de 50% de volume de vazios. Destes, aproximadamente 30% está localizado nos próprios “prills” e 70% entre os grãos. Se os espaços entre os prills são preenchidos por um produto mais denso e resistente à água, então toda essa mistura será também mais densa e mais resistente à água que o ANFO, com um baixo custo adicional. O princípio do ANFO blendado é preencher o volume de vazios entre os grãos com emulsão.

O ANFO pesado é resistente a água, quando a porcentagem de emulsão na mistura é superior a 50% do total do explosivo.

Energia do ANFO pesado

A tabela 4 apresenta os diferentes valores de energia por volume, energia termoquímica, velocidade e composição, para diferentes percentuais de emulsão na composição do ANFO pesado.

Tabela 4 - Valores teóricos para diferentes percentuais de emulsão na mistura do ANFO pesado.

Ingredientes	15% emulsão	20% emulsão	25% emulsão	30% emulsão	35% emulsão	40% emulsão	45% emulsão
Nitrato de cálcio	4,50	6,00	7,50	9,00	10,50	12,00	13,50
Nitrato de amônio	87,60	84,58	82,10	79,62	77,14	74,56	72,28
Água	2,82	3,76	4,70	5,64	6,58	7,52	8,46
Óleo combustível	5,32	5,26	5,20	5,14	5,08	5,12	4,86
Emulsificante	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90
Velocidade teórica (m/s)	5296	5438	5623	5860	6070	6365	6536
Energia termoquímica (cal/g)	849	832	815	797	780	778	745
Energia por volume (cal/cm^3)	824	844	888	925	952	1004	1006
Densidade (g/cm^3)	0,98	1,03	1,09	1,16	1,22	1,29	1,35
Energia relativa por volume (RBS do ANFO =1)	1,11	1,14	1,2	1,24	1,28	1,35	1,35

3.1.3. Principais propriedades dos explosivos

As diferentes propriedades dos explosivos são importantes para avaliar e escolher o tipo de explosivo a ser utilizado, neste tópico será abordado as principais propriedades dos explosivos.

3.1.3.1. Densidade

Relação entre massa e o volume, medida em g/cm^3, normalmente. A densidade dos explosivos comerciais varia entre 0,6 a 1,45 g/cm^3. A densidade é um fator muito importante. Explosivos com densidade menores ou igual a 1 g/cm^3, não devem ser utilizadas em furo com água, já que a densidade da água é aproximadamente 1 g/cm^3. Para difíceis detonações e que se almeja uma fragmentação fina, é recomendado utilizados explosivos mais densos. Já para rochas mais fragmentadas “in situ”, onde não é requerida muita fragmentação, deve-se utilizar explosivos menos densos.

3.1.3.2. Energia de um explosivo

A energia liberada pelo explosivo em um furo é utilizada para:

- criação de novas fraturas;
- extensão de fraturas existentes;
- deslocamento da massa rochosa e movimento do centro de gravidade;
- efeitos indesejáveis como ultralançamentos, vibração do solo, sobrepressão atmosférica, ruídos e calor.

A divisão da energia nestas diferentes categorias depende:

- do explosivo;
- das propriedades do maciço rochoso;
- da geometria do desmonte.

Para medir a energia de um explosivo no passado, media-se em função da porcentagem de nitroglicerina contida no mesmo. Como nos explosivos modernos não se utiliza mais nitroglicerina, houve a necessidade de estabelecer um novo padrão de comparação. Atualmente, utiliza-se os conceitos:

- **RWS – Relative Weight Strength (Energia relativa por massa)** – é a energia disponível por massa de um explosivo “x”, comparada com a energia disponível por igual massa de um explosivo tomado como padrão. O ANFO é tomado como explosivo padrão, normalmente. O cálculo do RWS é feito através da equação a seguir.

$$\mathrm{RWS} = \frac{\mathrm{ETx}}{\mathrm{ETp}},$$

Onde: ETx e ETp são as energias termoquímicas do explosivo “x” e padrão, respectivamente.

- **RBS – Relative Bulk Strength (Energia relativa por volume)** – é a energia disponível por volume de um explosivo “x”, comparada com a energia disponível por igual volume de um explosivo tomado como padrão. Isto é:

$$\mathrm{RBS} = \frac{\mathrm{ETx}}{\mathrm{ETp}} \times \frac{\rho x}{\rho p} = \mathrm{RWS} \times \frac{\rho x}{\rho p}$$

3.1.3.3. Balanço de oxigênio

Para misturas explosivas, ocorre a maior liberação de energia quando o balanço de oxigênio é zero. Quando o balanço do oxigênio é zero significa que a mistura tem oxigênio suficiente para oxidar completamente todos os combustíveis presentes na reação. O excesso de oxigênio na reação permite reação com o nitrogênio, e forma NO e NO_2 e a falta oxigênio possibilita a geração de CO. A geração desses gases, além de altamente tóxicos para o ser humano, reduzem a temperatura da reação e, consequentemente, abaixa o potencial energético e eficiência do explosivo. Teoricamente, no balanço de oxigênio zero, produzem apenas CO_2, H_2O e N_2, mas na realidade produzem pequenas quantidades de NO, CO, NH_2, CH_4 e outros gases.

3.1.3.4. Velocidade e pressão de detonação

A velocidade de detonação (VOD) é o índice mais importante do desempenho de um explosivo, desde que a pressão de detonação de um explosivo é diretamente proporcional ao quadrado da velocidade de detonação, conforme a expressão a seguir. Uma maneira para avaliar o desempenho de um explosivo é pela comparação da pressão produzida no furo durante a detonação. Se a pressão produzida no furo durante a detonação for menor que a resistência dinâmica da rocha, esta não será fragmentada, e a energia que não foi utilizada para fragmentar e deslocar a rocha se propagará no terreno sob a forma de vibração.

O pico da pressão exercida pela expansão dos gases depende primariamente da densidade e velocidade da detonação. As pressões podem ser calculadas por:

$$\mathrm{PF} = \rho \frac{\mathrm{VOD}^2}{4} \times 10^{-6}$$

Onde: PF é a pressão produzida no furo, quando o explosivo está completamente acoplado ao furo (GPa); ρ é a densidade do explosivo (g/cm^3); VOD é a velocidade de detonação de um explosivo confinado (m/s).

Os objetivos da medição da VOD são:

- determinar a VOD do explosivo e a partir disto, calcular a pressão produzida no furo durante a detonação;
- comparar o desempenho do explosivo quando iniciado com diferentes escorvas, acessórios e diferentes materiais utilizados para o confinamento do tampão;
- e verificar se os explosivos e acessórios estão detonando de acordo com o valor que o fabricante promete.

3.2. Parâmetros do plano de fogo

O plano de fogo é o projeto executivo para o desmonte de rochas com o uso sistemático de explosivos, onde serão definidos e apresentados preliminarmente: o plano de perfuração, a qualificação e quantificação dos explosivos e os esquemas de ligação e iniciação entre os furos que serão detonados.

Conforme se observa no campo, após as primeiras detonações, o plano de fogo pode sofrer ajustes, adaptações e correções, afim de alcançar melhores resultados. Os principais parâmetros que devem constar em um plano de fogo são: diâmetro do furo, profundidade do furo, subfuração, inclinação do furo, afastamento, espaçamento, tampão e razão de carregamento.

3.2.1. Diâmetro do furo

O diâmetro do furo depende, normalmente, do modelo de perfuratriz escolhido e da malha de perfuração. Grandes diâmetros dos furos, permitem uma maior área de

malha de perfuração, resultando em menores quantidades de furos a ser executados por metro cúbico de rocha a ser escavada. Logo, projetos em que se almeja uma grande produção, devem ser utilizados furos com diâmetros grandes.

Em grandes minerações a céu aberto com furos de grandes diâmetros, além de reduzir os custos com perfuração, economizam também nos acessórios de detonação (escorvas, iniciadores e retardos) e em mão-de-obra para carregamento do fogo. Porém, normalmente, requerem maiores razões de carga para conseguir o mesmo grau de fragmentação, especialmente em rochas resistentes e com grande espaçamento entre as descontinuidades. Já quando a rocha em questão, tem difícil fragmentação, furos de menores diâmetros distribuem melhor a energia do explosivo em todo o maciço a ser detonado. Além disso, furos de diâmetros menores oferecem uma melhor fragmentação do topo da bancada, uma vez que exigem menores tampões.

3.2.2. Profundidade do furo

É a altura da bancada somada a subfuração. Se o furo for inclinado, a profundidade do furo deverá ser medida de acordo com esta inclinação (será um pouco maior que a soma entre a altura da bancada e a subfuração.

3.2.3. Subfuração

É o comprimento perfurado abaixo do nível da praça da bancada. As rochas do pé da bancada por estarem muito engastadas, geralmente necessitam da subfuração. Logo, uma boa fragmentação do pé da bancada é muito influenciada pelo comprimento utilizado na subfuração. O comprimento da subfuração varia com:

- as propriedades do maciço rochoso;
- tipo de carga de fundo e, mais particularmente, a energia gerada por metro de furo;
- diâmetro e inclinação do furo;
- e a localização das escorvas na carga explosiva.

Quando uma subfuração é insuficiente, resulta na criação de repé, que é uma porção de rocha que deveria ter sido destacada do pé da bancada e não foi. Uma subfuração satisfatória para maciços resistentes, normalmente, é de oito vezes o diâmetro do furo.

3.2.4. Inclinação do furo

Em minerações a céu aberto, normalmente os furos são realizados verticalmente, pelos seguintes motivos:

- são mais fáceis realizar furos verticais;
- algumas perfuratrizes não são capazes de executar furos inclinados;
- e a acurácia na perfuração é maior em furos verticais.

Mas, furos inclinados oferecem melhor distribuição do explosivo no maciço, aumenta a fragmentação do pé da bancada e reduz o “back-breack” (quebra para trás). Além de resultar em melhor deslocamento e liberação das pilhas.

Principais vantagens dos furos inclinados:

- melhor fragmentação;
- diminuição dos problemas de repé;
- maior lançamento da pilha;
- permite maior malha de perfuração e, consequentemente, menor razão de carga;
- maior estabilidade da face da bancada.

Principais desvantagens:

- reduz a produtividade da perfuratriz;
- maior desgaste de peças da perfuratriz;
- maior custo de perfuração;
- maior comprimento do furo;
- maior risco de ultralançamentos;
- maior desvio de perfuração.

3.2.5. Afastamento

É a distância entre a frente da bancada e a primeira linha a detonar, expressa em metros, normalmente. Quando o plano de fogo possui duas ou mais linhas de furos a detonar em um mesmo evento, o mesmo afastamento deverá ser mantido entre as linhas do plano de fogo.

Quando o afastamento é muito maior que seu valor ótimo, a detonação apresentará uma fragmentação mais grosseira, pilha de fragmentos mais coesa, escavação mais lenta, aumento no back-break, nas vibrações do terreno e na instabilidade dos taludes do “pit” final. Quando o espaçamento é muito menor do que o valor ótimo, os fragmentos são lançados a distâncias consideráveis da face. Uma fórmula empírica para cálculo do afastamento é:

$$B = 0{,}0123 \times \left[2 \times \left(\frac{\rho_e}{\rho_r}\right) + 1{,}5\right] \times D_e$$

Onde: B é o afastamento (m); ρ_e e ρ_r são as densidades do explosivo e da rocha (g/cm^3), respectivamente; e D_e é o diâmetro do explosivo (mm).

3.2.6. Espaçamento

É definido como a distância entre dois furos de uma mesma linha, expressa em metros. Para bancadas baixas (onde a relação entre altura da bancada e afastamento é menor que 4), dois casos são observados:

- Quando os furos de uma mesma linha são iniciados instantaneamente, a seguinte expressão pode ser usada:

$$S = 0{,}33(H + 2B)$$

- Quando os furos são detonados com retardos, a seguinte expressão pode ser usada:

$$S = \frac{(H + 7B)}{8}$$

E para bancadas altas (onde a relação entre altura da bancada e afastamento é maior que 4), também dois casos devem ser observados:

- Quando os furos de uma mesma linha são iniciados instantaneamente, a seguinte expressão pode ser usada:

$$S = 2 \times B$$

- Quando os furos são detonados com retardos, a seguinte expressão pode ser usada:

$$S = 1{,}4 \times B$$

Onde: S é o espaçamento e H é a altura da bancada.

Obs.: O espaçamento nunca deverá ser menor que o afastamento, caso contrário, gerará muitos matacões.

3.2.7. Afastamento e espaçamento efetivos

Dependem da geometria dos furos e da sequência de iniciação do fogo. A figura 5 mostra uma mesma malha quadrada sendo iniciada de duas maneiras. A primeira é detonada linha por linha, a partir da face livre, sendo assim o afastamento e espaçamento efetivo é igual ao afastamento e espaçamento entre linhas sucessivas. De outra maneira, a mesma malha pode ser iniciada de maneira igual a uma malha estagiada, resultando em afastamentos e espaçamentos específicos diferentes.

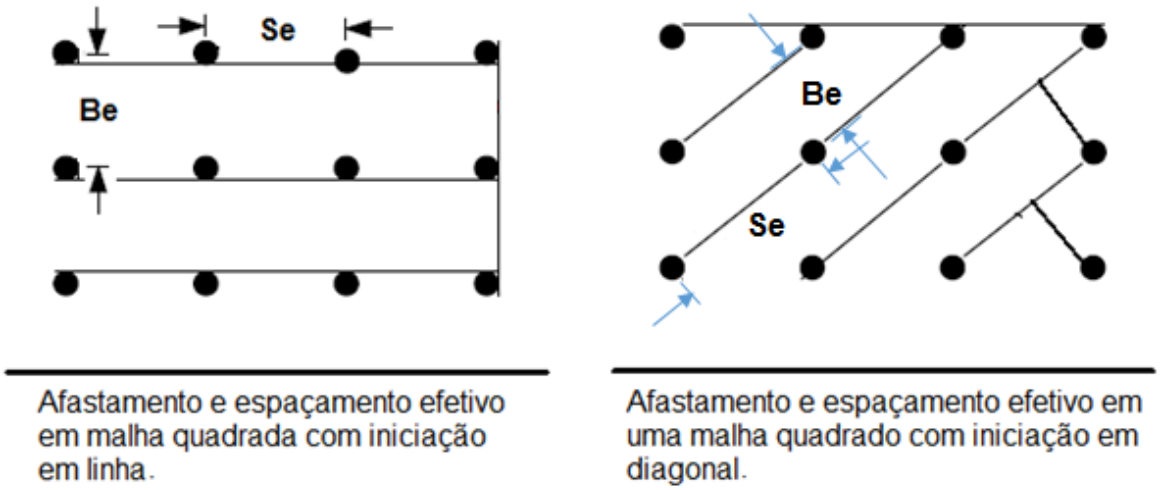

Figura 5 - Afastamento e espaçamento efetivos de uma malha quadrada. Fonte: Cameron & Hagan, 1996.

Experiências feita vêm mostrando que a fragmentação e operações de carregamento são mais produtivas quando são utilizadas malhas estagiadas do que

as malhas retangulares ou quadradas. Em rochas maciças e resistentes, as malhas melhores malhas são baseadas em redes de triângulo equilátero. Pois proporciona ótima distribuição da energia dos explosivos no maciço rochoso. Para a malha em triângulo equilátero, utiliza-se, de forma aproximada, o espaçamento entre os furos igual a 1,16 vezes o afastamento.

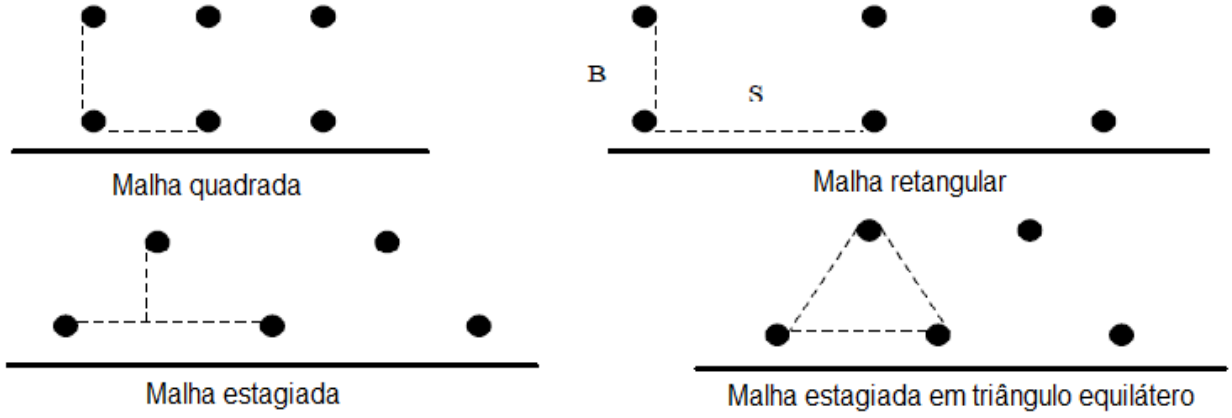

Figura 6 - Principais tipos de malhas de perfuração. Fonte: Atlas Powder Company, 1987.

3.2.8. Tampão

Consiste na parte superior do furo que não é carregada com explosivos, mas sim com algum material inerte, como: terra, areia, brita entre outros materiais bem socado a fim de confinar os gases dos explosivos. O ideal é que o material utilizado no tampão seja angular, pois funcionam mais adequadamente. Não se devem utilizar pó de perfuração, pois estes não seguram os gases dos explosivos.

Este confinamento dos gases é muito importante para que a carga do explosivo funcione de forma adequada e emita a máxima energia possível e controlar a sobrepressão atmosférica e ultralançamentos dos fragmentos rochosos. Além disso, o tampão é muito importante, pois este simula uma superfície no topo da bancada. Uma fórmula simples para cálculo do tampão é:

$$T = 0{,}7 \times B$$

Quando o tampão é maior do que o seu valor ótimo, mais trabalho efetivo é realizado na rocha ao longo da carga explosivo, porém a fragmentação do topo fica mais grosseira. O comprimento do tampão ótimo torna-se menor para:

- furos de diâmetro menores;

- rochas mais resistentes e maciças;
- material de tamponamento cuja resistência a ejeção é maior;
- explosivo com menor energia por unidade de volume;
- e bancadas baixas.

3.2.9. Razão de carga

Consiste na quantidade de explosivo a ser utilizado por metro cúbico (ou tonelada de rocha a ser desmontada em uma detonação. Teoricamente, quanto maior for a razão da carga a ser utilizada, maior será a fragmentação da rocha, caso a malha tenha sido projetada corretamente. Esta relação também se aplica à projeção da pilha de rocha detonada que se formará na frente da bancada. Quanto maior a razão de carga, maior será a projeção da rocha detonada.

A razão de carga pode ser calculada a partir das expressões:

$$Rc = \frac{1000 \times Qe}{B \times S \times H}, em\ g/m^3 \text{ ou } Rc = \frac{1000 \times Qe}{B \times S \times H \times d}, em\ g/t$$

Onde: Rc é a razão de carga; Qe é a massa de explosivo por furo (g); B é o afastamento (m); S é o espaçamento (m); H é a altura da bancada (m) e; d é a densidade da rocha (t/m^3).

3.3. Mecanismos de ruptura da rocha pelos explosivos

Segundo Langefors (1973), alguns centésimos de segundos depois de iniciar a detonação de um furo, desencadeia-se uma série de fenômenos: liberação da energia química dos explosivos e transformação deste sólido em um gás com alta temperatura e enorme pressão, que pode ultrapassar 10 GPa. A energia desenvolvida por unidade de tempo em furo perfurado com uma máquina manual é da ordem de 25.000 MW. Isto se deve ao fato de a energia latente de um explosivo ser extremamente grande devido à rapidez da reação (2500 – 6000 m/s). O que caracteriza um explosivo como uma ferramenta para a ruptura de rochas é sua capacidade de fornecer uma potência concentrada em uma zona limitada (Morais, 2004).

Existem quatro etapas nas quais ocorrem a quebra e o deslocamento do material durante o processo de detonação de uma carga confinada de explosivo (Atlas Powder Company, 1987):

T1: detonação

T2: propagação da onda de choque

T3: expansão dos gases

T4: movimento de massa de material

3.4. Modelos atuais de interação explosivo–rocha

Lownds (1986) e Udy e Lownds (1990) desenvolveram um modelo e descreveram a interação explosivo-maciço rochoso usando as curvas pressão x volume para a explosão dos gases durante a detonação. Sarma (1994) desenvolveu um modelo similar para estimar a energia liberada por um explosivo em situação de campo. Este modelo considera a interação explosivo – maciço rochoso, o desempenho do explosivo e o confinamento fornecido pelo plano de fogo (Scott et. al., 1996).

A interação explosiva – maciço rochoso durante a detonação é representada pela curva da pressão x volume dos gases do estado inicial da explosão até as seguintes condições terminais:

- o gás alcança a face livre;
- a pressão dos gases cai abaixo da pressão atmosférica;
- a temperatura dos gases cai abaixo da temperatura ambiente.

A área da figura 7 sob a curva pressão – volume representa a energia liberada durante a detonação e é subdividida nas seguintes componentes ou fases:

- fase de detonação (zona 1);
- fase de propagação (zonas 2 e 3);
- fase da expansão dos gases (zonas 4 e 5);
- fase de movimento do maciço rochoso (zonas 6 e 7).

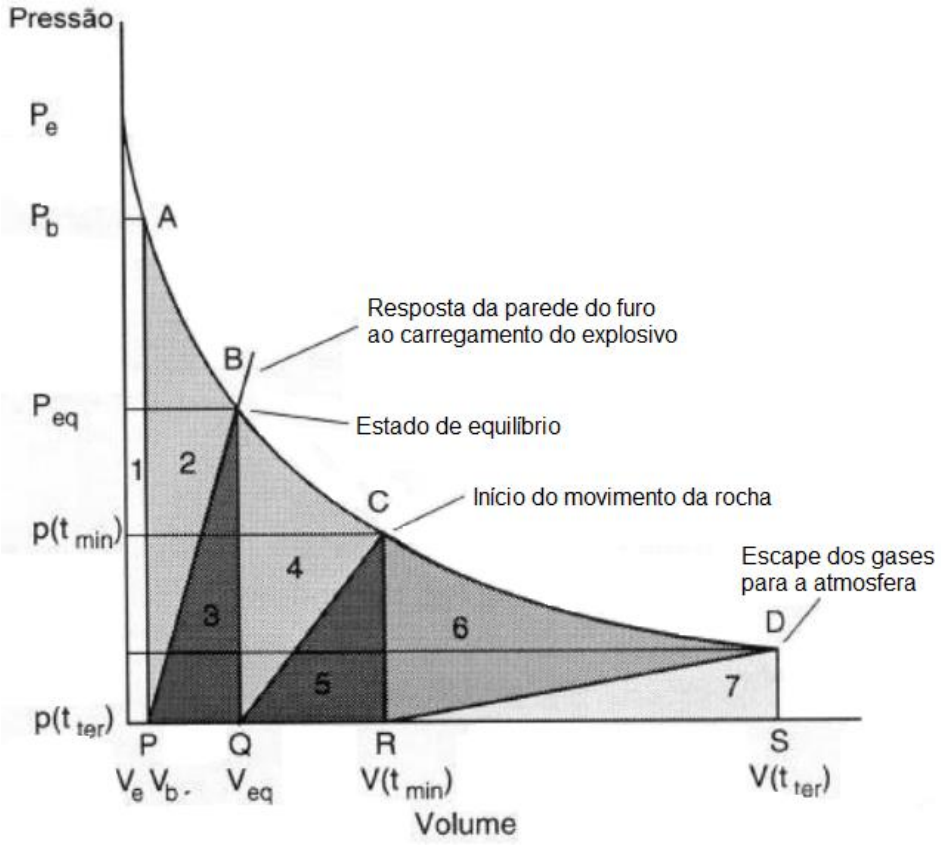

Figura 7 - Energia explosiva liberada durante diferentes fases do desmonte de rochas. Fonte: Scott et. AL., 1996.

De acordo com o modelo de Sarma (1994), quando um explosivo detona, os ingredientes são rapidamente convertidos em produtos gasosos a altíssima pressões e temperaturas. Os gases impactam a parede do furo e transmitem uma onda de choque para a rocha vizinha, conforme a figura 8. A tensão resultante da onda de choque comprime e pulveriza a rocha em torno do furo. O volume do furo é expandido até alcançar um novo estado de equilíbrio quase estático, onde a pressão de gás da explosão é igualada pela resistência da parede do furo (Morais, 2004).

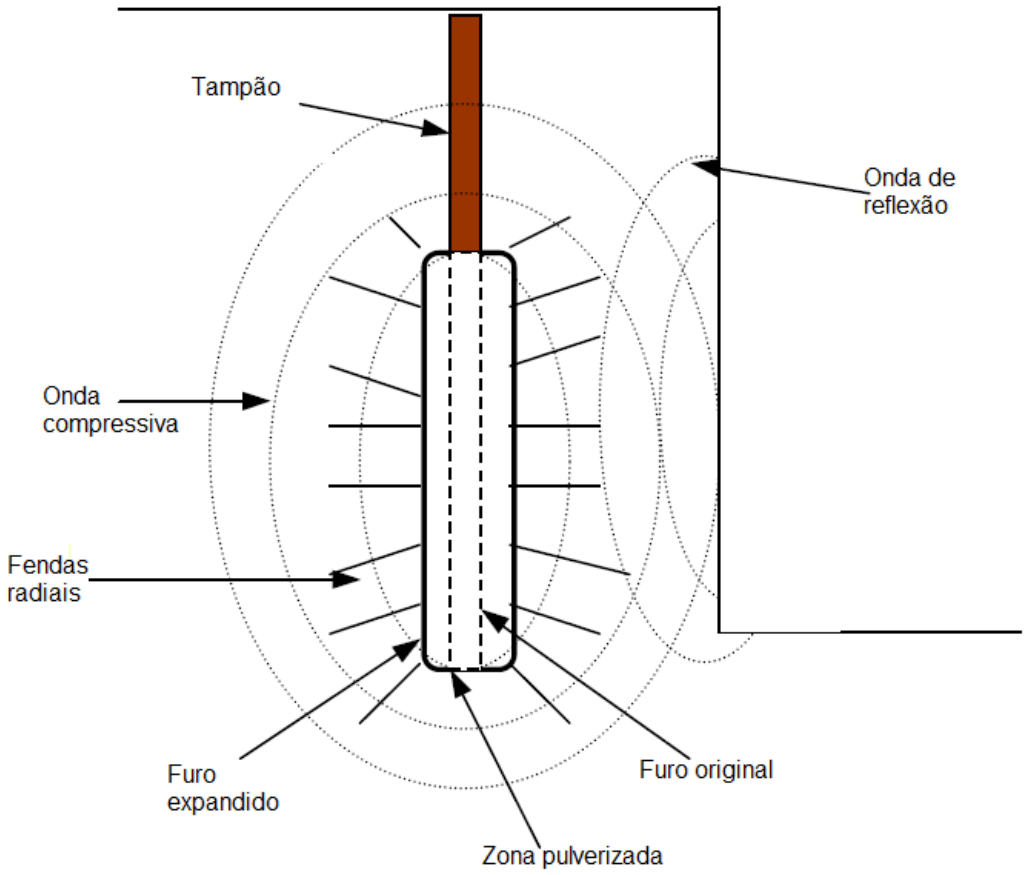

Figura 8 - Efeitos da onda de choque no maciço rochoso. Fonte: Sarma, 1994.

Este modelo identifica várias importantes propriedades do maciço rochoso no desempenho do desmonte. Estas incluem:

- Rigidez da rocha: controla a distorção/deformação da parede do furo e, consequentemente, a pressão desenvolvida no furo e a partição da energia da explosão em choque e deslocamento.
- Resistência à compressão dinâmica: controla a pulverização que ocorre na parede do furo.
- Parâmetros de atenuação do maciço rochoso: controla a que distância a onda de tensão viaja antes de sua energia cair abaixo do nível que causa quebra primária.
- Resistência à tração dinâmica da rocha: define a extensão da geração de novas fraturas em ambas as fases de quebra: choque e gás.
- Caráter, orientação e frequência das descontinuidades no maciço rochoso: definem a distribuição de tamanho dos blocos e influenciam a atenuação da onda de choque e a migração dos gases da explosão.
- Densidade da rocha: afeta o movimento do maciço rochoso em resposta às forças aplicadas durante a detonação.

O uso de projetos padrões sem levar em consideração as variações nas propriedades de cada maciço rochoso, levará a uma má fragmentação em regiões do maciço, geração de finos e danos ao maciço rochoso adjacente. Se os resultados dos desmontes não saem como o desejado, é importante levar em consideração propriedades mais relevantes do maciço nos próximos projetos de desmonte. O resultado do desmonte é determinado pela interação do explosivo e maciço rochoso confinado. O engenheiro responsável pelo desmonte deve determinar quais propriedades que mais influenciam o resultado do desmonte em cada situação e escolher as melhores alterações do projeto para as diferentes condições do maciço. Mudanças significativas do maciço requerem alterações no projeto de desmonte. Todos os parâmetros de um plano de fogo devem ser determinados de forma a obter o melhor resultado planejado.

4. METODOLOGIA

Durante a realização do estágio supervisionado, na Pedreira Esperança, foram coletados os dados para realização deste trabalho, levantamento bibliográfico com os assuntos abordados e análise dos dados com o objetivo de examinar detalhadamente o resultado do desmonte de rochas e com base nos resultados, permitir, talvez, futuras otimizações do plano de fogo.

4.1. Levantamentos de dados

Primeiramente, foram obtidos os parâmetros do plano do fogo. Todas as informações referentes aos parâmetros do plano de fogo foram obtidas pelo engenheiro de minas da Pedreira Esperança, Jorge Valença. Após, foram acompanhados os escorvamentos, carregamentos e amarrações dos furos para execução do desmonte de rochas.

Realizado o desmonte em questão, nos dias posteriores foram coletadas diversas fotografias tanto da superfície da pilha gerada, quanto dos perfis da mesma à medida que o material da pilha era consumido, com a intenção de garantir a representatividade de toda pilha, minimizar erros no software de fotoanálise e realizar

comparações entre a distribuição granulométrica da superfície e do perfil da pilha, já que todo o material abaixo da camada superficial da pilha não poderia ser visto e nem analisado somente por fotografias superficiais.

4.2. Análise da granulometria através do software de fotoanálise

Para análise de todas as imagens coletadas, foi utilizada a versão 2.0 do software Split-Desktop. Com este programa é possível calcular a distribuição granulométrica gerada pelo desmonte de rochas, além de obter outros parâmetros muito importantes, como: diâmetro médio dos fragmentos, o diâmetro do maior fragmento gerado, abertura da malha onde 80% dos fragmentos são passantes.

4.2.1. Formas corretas de adquirir as imagens

As imagens devem ser adquiridas de forma que as referentes escalas estejam presentes e bem localizadas. De preferência, as escalas devem ser cilíndricas regulares (têm de estarem paralelos entre si) ou esféricas (são mais fáceis de se posicionar, pois, desde que bem posicionadas, os diâmetros sempre estarão em posições corretas). As escalas devem ser colocadas parte superior e inferior das imagens. As figuras 9 e 10 mostram uma forma incorreta e correta de posicionamento da escala na pilha, respectivamente.

Figura 9 - Fragmentos interceptando o diâmetro da escala. Fonte: autor.

Figura 10 – Escalas posicionadas de forma correta. Fonte: autor.

De posse das fotografias a serem analisadas pelo software Split-Desktop versão 2.0, foram seguidas as seguintes etapas:

- Abrir imagem pelo Split-Desktop;
- Determinar as escalas;
- Delinear automaticamente e/ou manualmente;
- Concluir edição;
- Calcular tamanhos e exibir resultados e gráficos.

4.2.2. Abrindo imagem pelo Split-Desktop

A primeira etapa que deve ser realizada para analisar as fotos no Split-Desktop versão 2.0 é simplesmente abrir a imagem. A figura 11 mostra como é realizado essa etapa.

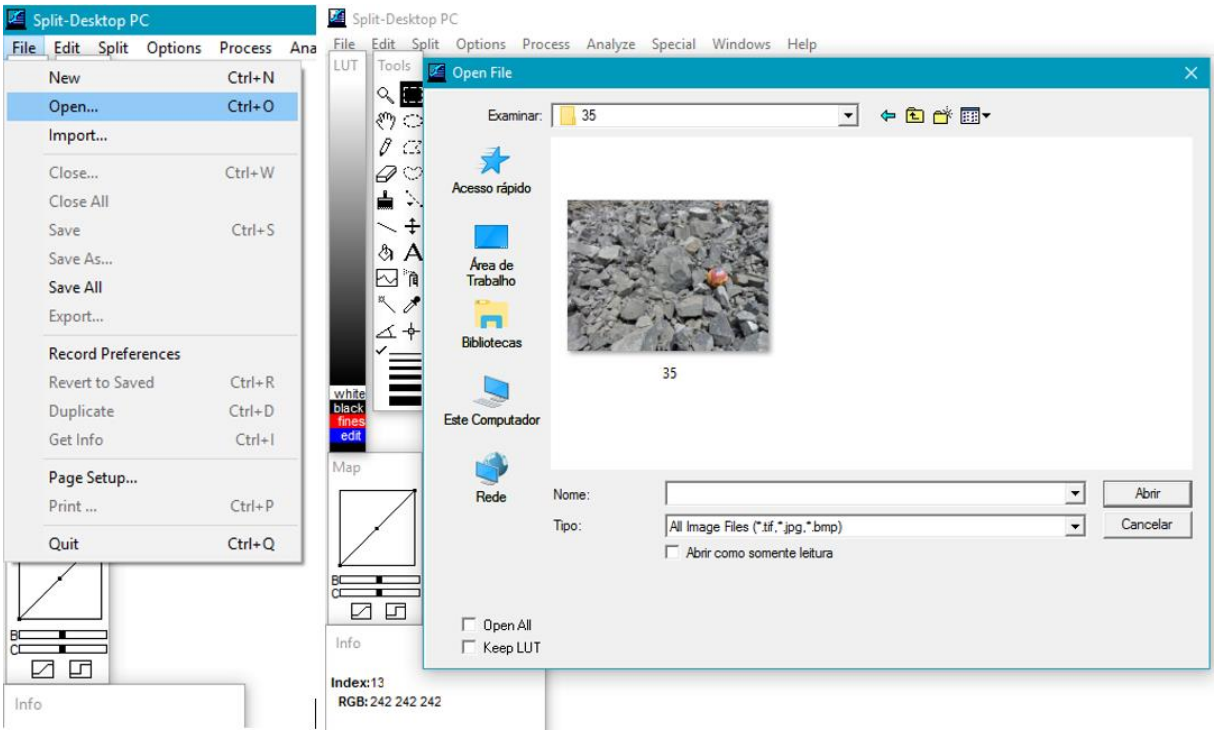

Figura 11 - Abrindo imagem no Split-Desktop. Fonte: autor.

É importante enfatizar que nesta etapa para esta versão as imagens a serem abertas não deverão ultrapassar 2240 pixels.

4.2.3. Determinação das escalas

Para determinar as escalas, deve-se selecionar a opção “Scale image” no menu “Split”. Após, deve-se selecionar se está utilizando um ou dois objetos de escala, adicionar o tamanho do diâmetro conhecido da escala e com a ferramenta para demarcação da escala na aba tools, marcar a linha de diâmetro de cada escala e então clicar em “Get Scale for Lower Object” para obter escala inferior e em “Get Scale for Higher Object” para obter a superior. A figura 12 apresenta um resumo para melhor compreensão de como determinar as escalas de uma imagem pelo software.

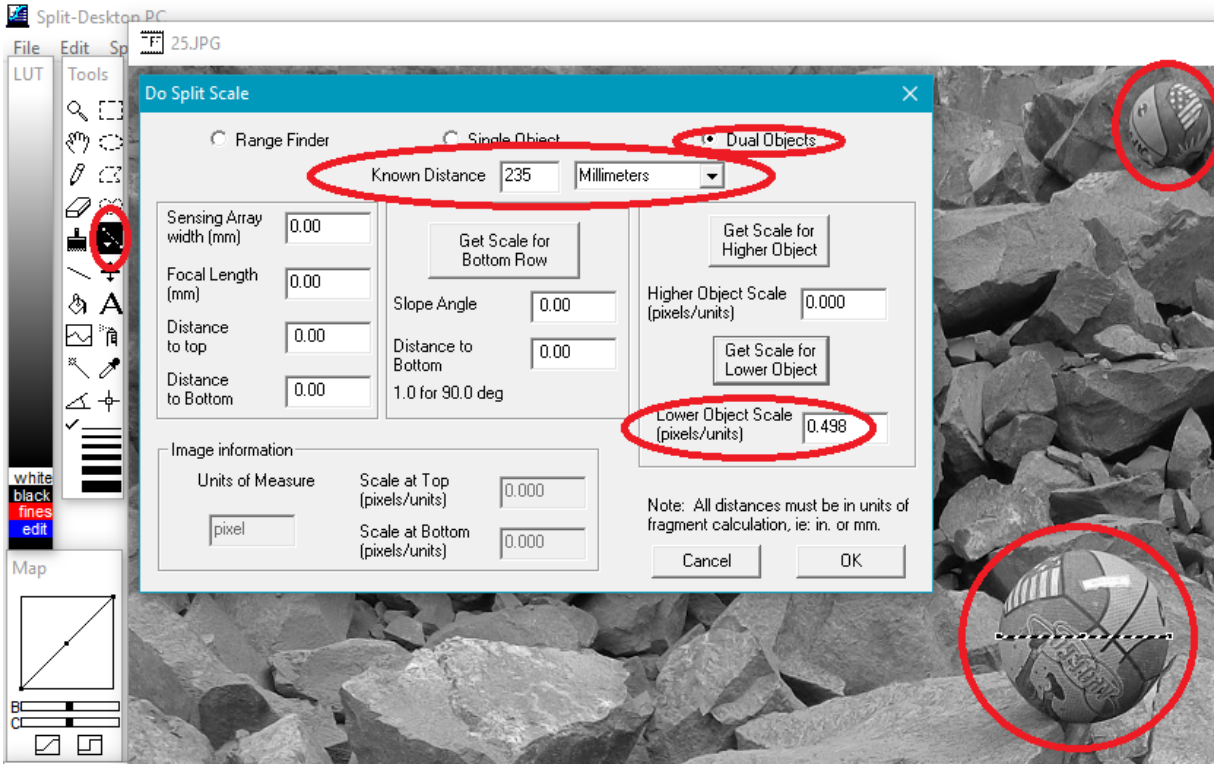

Figura 12 - Determinando as escalas. Fonte: autor.

4.2.4. Delineação

As imagens podem ser delineadas pelo software de forma automática e/ou manual. Para minimizar o tempo gasto realizando uma delineação manual, o programa oferece a delineação automática e esta pode ser editada manualmente pelo usuário afim de minimizar erros como subdivisões inexistentes dos fragmentos delineados. Para minimizar o erro ao máximo, foi somente utilizada a delineação manual para analisar todas as imagens deste trabalho.

Para realizar a delineação, deve-se selecionar a opção “Find particles” no menu “Split”. Se desejar optar pela delineação automática deve-se deixar a opção de

delineação manual desmarcada, mas para utilizar somente pela delineação manual deve-se marcar esta opção. As figuras 13 e 14, mostram um exemplo de delineação automática e manual, respectivamente. Percebe-se, claramente, que o uso somente da delineação manual é extremamente mais preciso e minimiza muito os erros da delineação automática. A figura 15 mostra como escolher o tipo de delineação. Encontram-se anexadas na seção 8, todas as fotos analisadas nesta pesquisa e as fotos da bancada antes e depois do desmonte.

Obs.: Nesta versão do Split-Desktop, para realização desta etapa a imagem deve possuir um tamanho inferior a 1680 x 1480 pixels.

Figura 13 - Delineação automática. Fonte: autor.

Figura 14 - Delineação manual. Fonte: autor.

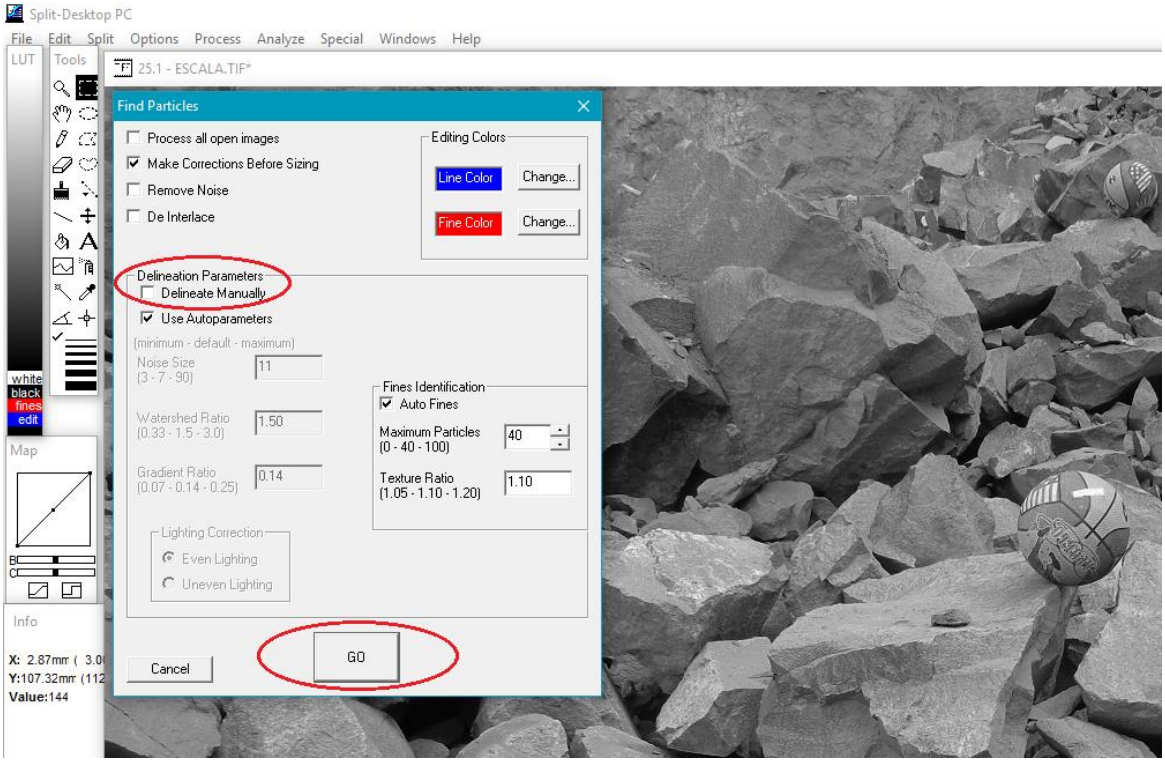

Figura 15 - Escolhendo o tipo de delineação. Fonte: autor.

4.2.5. Conclusão da Edição

Após concluída a delineação, deve-se ir no menu “Split” e escolher a opção “Done editing”. A imagem resultante apresenta apenas com os contornos das delineações em preto. Então a edição já está pronta para ser computada no próximo passo. A figura 16 mostra um exemplo de conclusão da edição de uma imagem.

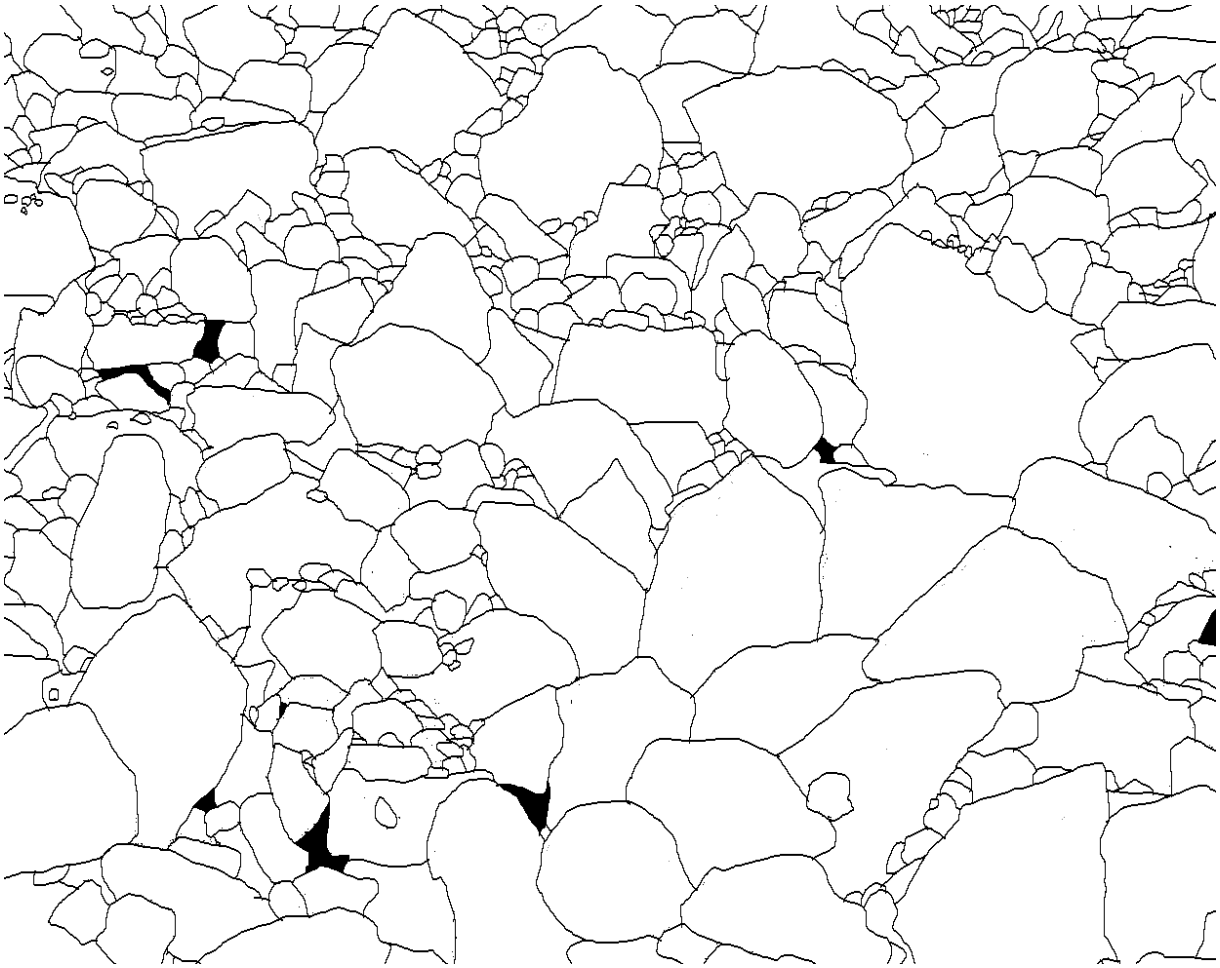

Figura 16 - Imagem com edição concluída. Fonte: autor.

4.2.6. Calculando tamanhos e exibindo resultados

Após a conclusão da edição, deve-se calcular os tamanhos dos fragmentos na opção “Compute sizes” no menu “Split”. E nesta etapa, permite que adicione ou não uma porcentagem de ajuste de finos, seguindo uma curva padrão. E, enfim, para exibir a análise granulométrica e outros parâmetros, deve-se clicar na opção “Graphs and outputs” no mesmo menu. Esta etapa permite fazer algumas alterações nos tipos de eixos e escalas do gráfico, adicionar ou remover pontos do gráfico, entre outros. A

figura 17 e 18 apresenta a etapa de cálculo dos fragmentos e resultados, respectivamente.

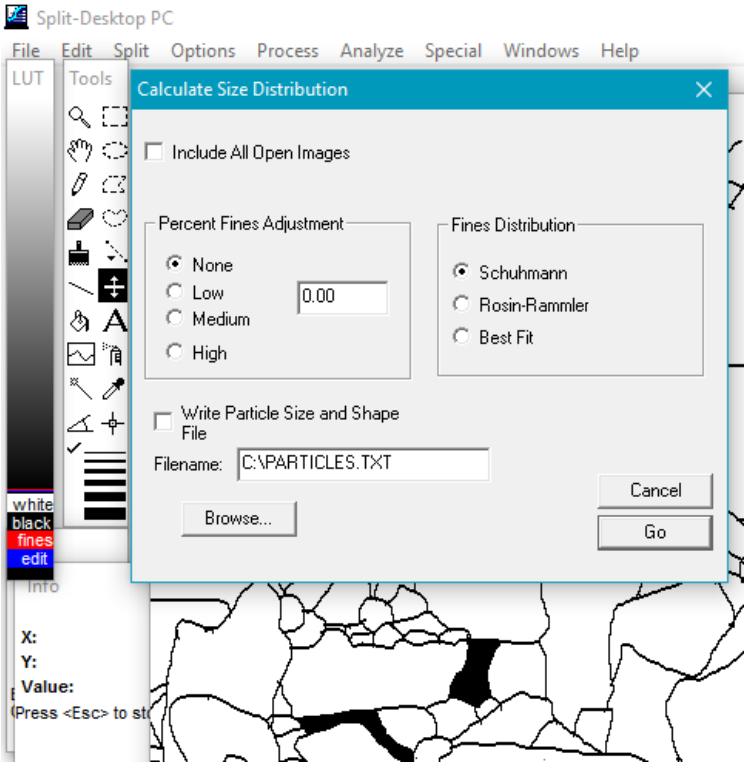

Figura 17 - Etapa de cálculo dos fragmentos. Fonte: autor.

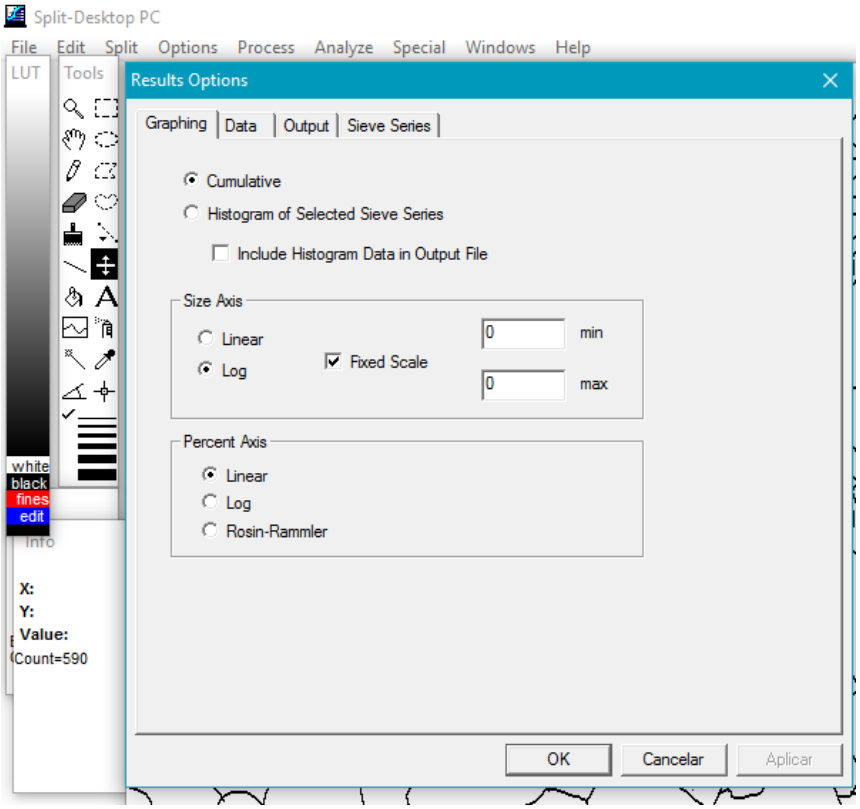

Figura 18 - Etapa dos resultados. Fonte: autor.

4.2.7. Análise Conjunta das imagens

O programa permite realizar a análise de várias imagens em conjunto e gerar apenas um gráfico. O mais ideal é realizar a etapa de delineação separadamente, já que o ideal é utilizar a delineação manual e então salvar as imagens depois de concluir esta etapa. Então para realizar a análise conjunta, deve-se abrir as imagens já delineadas concluir todas edições e marcar a opção de calcular os fragmentos de todas as imagens abertas marcando a devida opção nesta etapa, é possível ver esta opção na figura 16. Fazendo a análise conjunta é obtido apenas um gráfico representando os fragmentos de todas as imagens em vez de um gráfico para cada imagem analisada.

4.2.8. Erros e limitações do programa

De acordo com o software utilizado e com Segarra et al. (2006), o tamanho da malha dos fragmentos corresponde à raiz quadrada do produto dos eixos da elipse de melhor ajuste da área da partícula delineada:

Tamanho da malha = $\sqrt{\text{eixo maior x eixo menor}}$

A malha do fragmento obtido na equação acima fornece uma estimativa da terceira dimensão da partícula. Logo, o volume das partículas delineadas será o produto dessa malha com a área do fragmento (Segarra et al. 2006).

Em pequenas áreas de algumas fotos, finos cobriam alguns fragmentos, tornando difícil a visualização de alguns contornos dos fragmentos. Na etapa de delineação é necessário que as partículas estejam totalmente contornadas pela linha de delineação, caso haja qualquer interrupção da linha, o software entenderá que se trata de uma única partícula. Durante a delineação pode haver partículas sobrepostas às outras, assim alguns fragmentos são diminuídos ou divididos. Haverá sempre um limite de tamanho de partículas até onde será possível visualizá-las com nitidez, pois devido a resolução da imagem não será mais possível visualizar partículas muito finas. De acordo com o usuário, os finos poderão ou não ser estimados pelo programa.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. Resultados das análises pelo software Split-Desktop

Após realizada toda a delineação de todas as imagens da superfície e do perfil da pilha, seguindo os passos das seções 4.2.2, 4.2.3 e 4.2.4, foi realizado o cálculo de todas as imagens delineadas da superfície da pilha e, de modo análogo, foram calculadas todas imagens delineadas do perfil da pilha, seguindo os passos descritos nas seções 4.2.5, 4.2.6 e 4.2.7. Imagens da bancada antes e após o desmonte encontram-se anexadas na seção 8.

Distribuição granulométrica da superfície da pilha

Foram analisadas 20 imagens de toda a superfície da pilha, visando obter resultados muito próximos da realidade. Na etapa de cálculo dos fragmentos foi utilizado uma porcentagem de 5% para ajuste dos finos. A figura 19 apresenta a curva granulométrica obtida com a análise conjunta das 20 imagens da superfície da pilha do desmonte. As fotos analisadas também se encontram anexadas na seção 8.

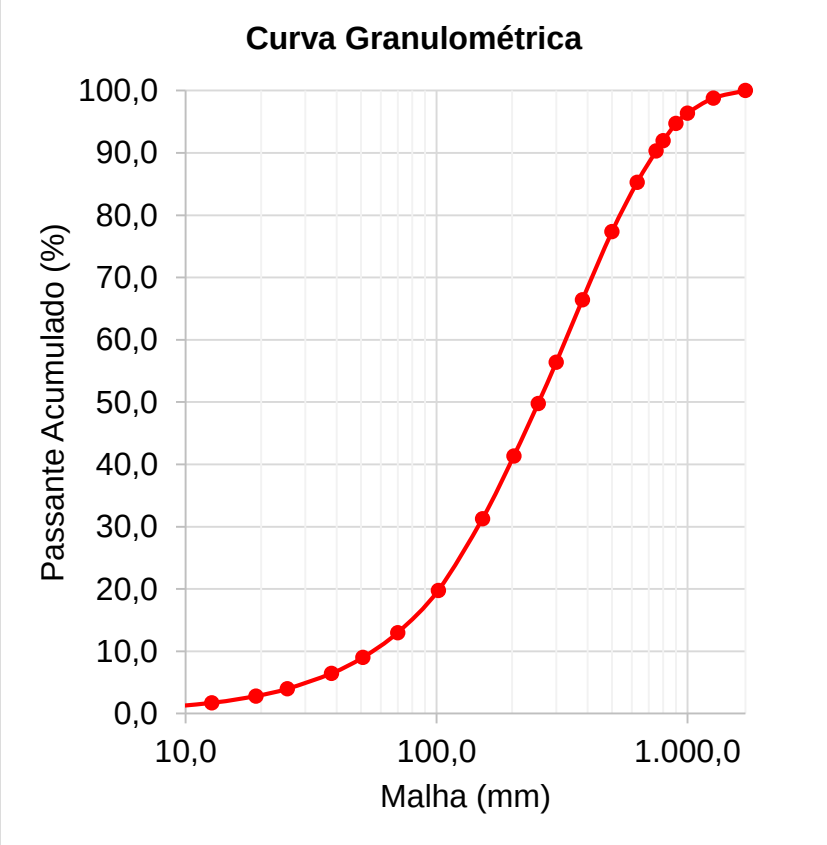

Figura 19 - Curva granulométrica da superfície da pilha. Fonte: autor.

A tabela 5 apresenta um resumo da curva granulométrica da figura 19 e alguns parâmetros importantes desta curva.

Tabela 5 - Parâmetros e dados da curva granulométrica da superfície.

Malha (mm)	Passante Acumulado (%)
1700,0	100,0
1270,0	98,8
1000,0	96,4
900,0	94,7
800,0	92,0
750,0	90,3
630,0	85,3
500,0	77,4
381,0	66,4
300,0	56,4
254,0	49,8
203,2	41,4
152,4	31,3
101,6	19,8
70,0	13,0
50,8	9,0
38,1	6,4
25,4	4,0
19,1	2,8
12,7	1,7
6,4	0,7
2,0	0,2

P_{20}	102,57 mm
P_{50}	255,35 mm
P_{80}	537,59 mm
Top size	1425,00 mm

Distribuição granulométrica do perfil da pilha

As imagens do perfil da pilha, possuíam mais fragmentos finos do que as imagens da superfície, levando muito mais tempos para serem delineadas manualmente do que as fotos da superfície da pilha. Foram analisadas 10 imagens do perfil de toda pilha, visando obter uma boa amostragem de toda pilha para minimizar ao máximo os erros e fazer com que os resultados obtidos estejam muito próximos da realidade. Também foi utilizado uma porcentagem de 5%, na etapa do cálculo dos fragmentos, para que o software realizasse um ajuste dos finos. A figura 20 apresenta a curva granulométrica obtida realizando a análise conjunta das 10 imagens do perfil da pilha. Todas as fotos analisadas nesta pesquisa, encontram-se anexadas na seção 8.

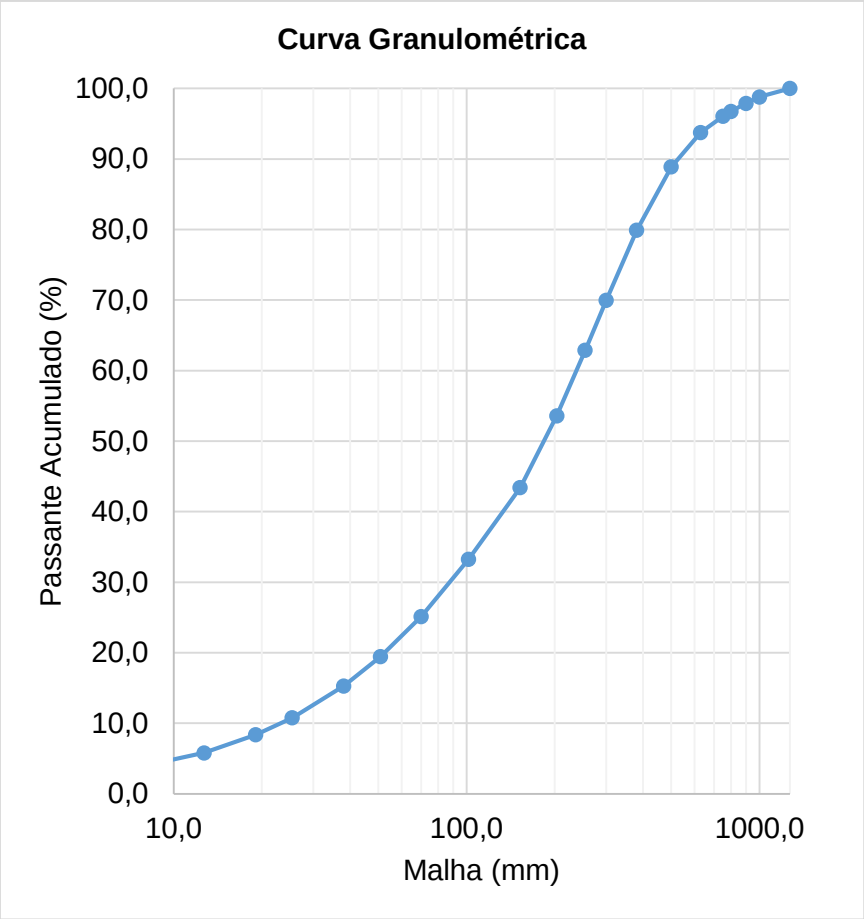

Figura 20 - Curva granulométrica do perfil da pilha. Fonte: autor.

A tabela 6 apresenta os parâmetros mais importantes e um resumo da curva granulométrica da figura 20.

Tabela 6 - Parâmetros e resumo da curva granulométrica do perfil da pilha.

Malha (mm)	Passante Acumulado (%)
1270,0	100,0
1000,0	98,8
900,0	97,9
800,0	96,8
750,0	96,1
630,0	93,8
500,0	88,9
381,0	79,9
300,0	70,0
254,0	62,9
203,2	53,6
152,4	43,4
101,6	33,3
70,0	25,1
50,8	19,4
38,1	15,3

25,4	10,8
19,1	8,4
12,7	5,8
6,4	3,1
2,0	1,0

P_{20}	52,60 mm
P_{50}	185,06 mm
P_{80}	381,98 mm
Top size	1089,22 mm

Comparação entre as curvas da superfície e do perfil da pilha

Após realizada as análises de todas as fotos, foi realizada uma comparação das duas curvas granulométricas obtidas. A figura 21 apresenta essa comparação entre as duas curvas granulométricas das figuras 19 e 20. Comparando os parâmetros das duas curvas (P_{20}, P_{50}, P_{80} e top size), resulta em uma diferença por volta de 32%.

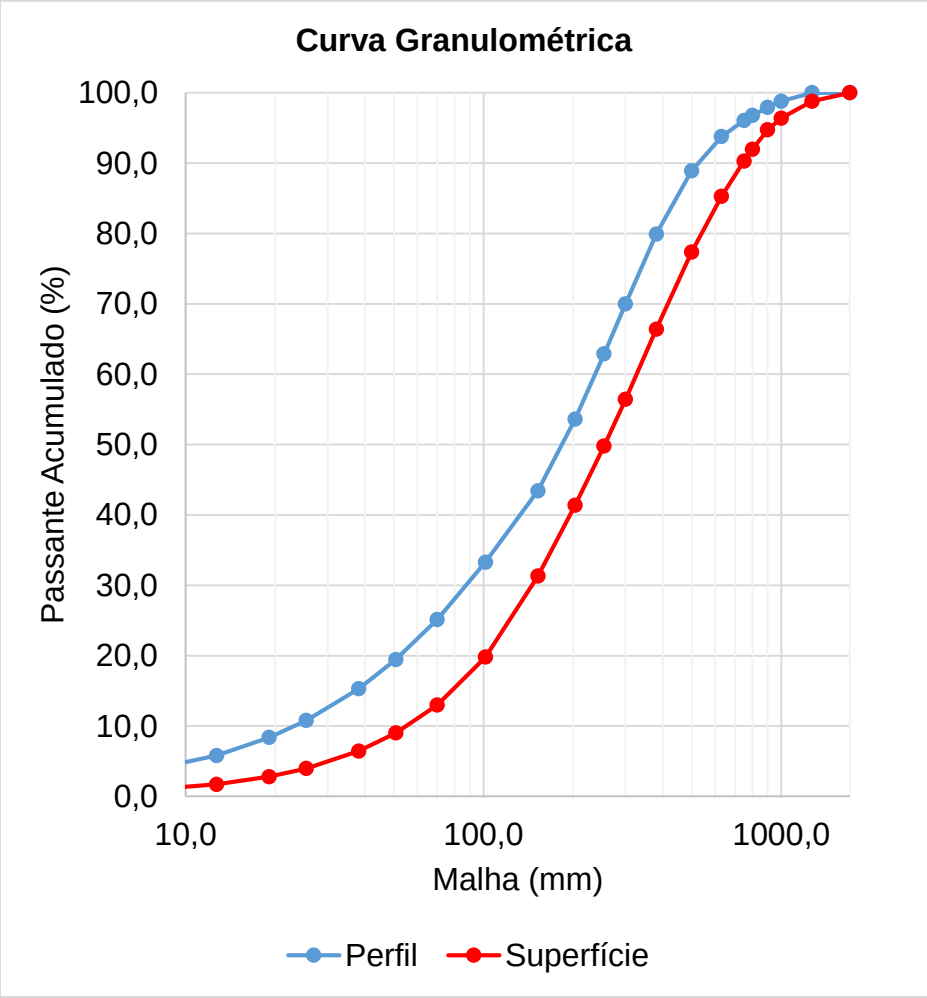

Figura 21 - Comparação entre as curvas granulométricas do perfil e da superfície da pilha. Fonte: autor.

Além destes resultados, o programa Split-Desktop ainda gera alguns arquivos de relatórios extremamente importantes, como o detalhamento de todas as partículas analisadas, porcentagem do passante acumulado em cada imagem, entre outros.

O britador primário utilizado na Pedreira Esperança, é um Zenith PE modelo 750 x 1060 mm, onde o tamanho máximo de partícula (top size) suportado é 630 mm, segundo o fabricante. Porém, a pedido do engenheiro Jorge Valença, o britador é alimentado com blocos de até 750 mm.

Com base na informação do top size do britador primário e nos relatórios gerados pelo software (tabelas 7 e 8), podemos perceber grandes diferenças quando comparamos o passante acumulado das imagens do perfil e da superfície da pilha. A tabela 7 e 8 mostram o passante acumulado em cada imagem analisada do perfil e da superfície da pilha, respectivamente.

Tabela 7 - Passante Acumulado em todas as imagens do perfil da pilha.

Malha (mm)	Img1 (%)	Img2 (%)	Img3 (%)	Img4 (%)	Img5 (%)	Img6 (%)	Img7 (%)	Img8 (%)	Img9 (%)	Img10 (%)	Todas (%)
1.700,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	**100,0**
1.270,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	**100,0**
1.000,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	94,2	100,0	100,0	**98,8**
900,0	100,0	100,0	100,0	100,0	99,3	100,0	100,0	89,9	100,0	100,0	**97,9**
800,0	100,0	100,0	100,0	100,0	97,7	100,0	100,0	84,6	99,8	100,0	**96,8**
750,0	**100,0**	**100,0**	**100,0**	**100,0**	**96,8**	**100,0**	**100,0**	**81,4**	**99,3**	**100,0**	**96,1**
630,0	**99,5**	**99,8**	**100,0**	**98,6**	**93,1**	**100,0**	**98,1**	**73,1**	**96,9**	**99,7**	**93,8**
500,0	94,3	94,9	98,3	94,1	85,5	99,1	92,9	64,2	90,7	96,4	**88,9**
381,0	82,6	86,1	90,4	87,8	74,9	91,8	81,4	56,2	78,6	89,5	**79,9**
300,0	70,1	74,6	77,5	80,1	65,8	82,1	71,1	49,8	67,0	79,7	**70,0**
254,0	60,8	65,5	68,0	73,7	60,0	74,6	64,7	45,3	59,6	72,1	**62,9**
203,2	48,5	53,8	56,3	63,7	53,6	64,2	57,2	38,8	51,0	62,7	**53,6**
152,4	36,0	41,8	44,6	51,9	46,0	52,4	49,1	31,6	41,7	52,6	**43,4**
101,6	22,7	27,7	30,5	39,6	35,8	40,0	37,8	23,8	29,9	38,4	**33,3**
70,0	14,2	18,3	20,8	29,9	27,9	29,9	29,1	18,0	21,5	27,9	**25,1**
50,8	9,3	12,7	14,7	23,2	22,3	22,9	22,9	14,0	15,9	20,7	**19,4**
38,1	6,4	9,0	10,6	18,2	18,1	17,8	18,3	11,1	12,1	15,7	**15,3**
25,4	3,7	5,5	6,7	12,8	13,4	12,4	13,3	8,0	8,1	10,5	**10,8**
19,1	2,5	3,9	4,8	10,0	10,7	9,5	10,5	6,3	6,1	7,9	**8,4**
12,7	1,4	2,4	3,0	6,9	7,8	6,5	7,5	4,5	4,1	5,2	**5,8**
6,4	0,6	1,0	1,3	3,7	4,6	3,4	4,2	2,6	2,0	2,5	**3,1**
2,0	0,1	0,2	0,3	1,2	1,7	1,1	1,5	0,9	0,6	0,8	**1,0**

Tabela 8 - Passante Acumulado em todas as imagens da superfície da pilha.

Malha (mm)	Img1 (%)	Img2 (%)	Img3 (%)	Img4 (%)	Img5 (%)	Img6 (%)	Img7 (%)	Img8 (%)	Img9 (%)	Img10 (%)	Img11 (%)	Img12 (%)	Img13 (%)	Img14 (%)	Img15 (%)	Img16 (%)	Img17 (%)	Img18 (%)	Img19 (%)	Img20 (%)	Todas (%)
1700,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	**100,0**
1270,0	100,0	100,0	100,0	100,0	98,5	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	91,7	100,0	100,0	100,0	100,0	96,5	100,0	100,0	**98,8**
1000,0	96,0	100,0	100,0	100,0	92,4	100,0	99,0	100,0	100,0	100,0	92,4	98,0	83,2	100,0	97,9	100,0	100,0	88,6	100,0	100,0	**96,4**
900,0	93,2	100,0	99,5	99,3	88,6	100,0	97,3	99,5	100,0	100,0	89,0	94,5	78,8	99,0	95,9	100,0	100,0	85,5	100,0	100,0	**94,7**
800,0	88,6	100,0	97,5	97,5	83,1	99,8	94,7	97,4	98,9	100,0	84,4	89,1	73,8	95,9	92,9	100,0	100,0	82,5	100,0	100,0	**92,0**
750,0	**86,2**	**99,6**	**95,9**	**96,5**	**80,0**	**98,8**	**93,2**	**95,7**	**98,3**	**100,0**	**81,7**	**85,6**	**71,3**	**93,8**	**91,1**	**100,0**	**100,0**	**81,3**	**100,0**	**100,0**	**90,3**
630,0	**79,3**	**96,5**	**88,2**	**93,7**	**72,0**	**95,2**	**89,2**	**90,5**	**94,8**	**99,4**	**74,4**	**75,7**	**65,8**	**87,1**	**84,1**	**99,0**	**100,0**	**77,9**	**100,0**	**100,0**	**85,3**
500,0	67,8	88,9	75,9	87,4	61,8	88,2	82,1	80,7	87,6	92,1	65,4	62,5	58,3	72,3	72,0	95,9	96,0	73,1	100,0	99,0	**77,4**
381,0	55,2	76,1	62,5	74,6	51,0	77,0	71,3	66,6	75,1	81,1	55,2	51,0	48,1	52,5	56,8	83,8	85,0	64,1	98,7	91,9	**66,4**
300,0	45,0	64,6	51,5	63,3	42,6	63,8	60,9	54,5	62,7	68,9	46,5	42,8	40,2	39,2	45,2	70,4	73,7	54,7	89,9	82,5	**56,4**
254,0	38,9	57,1	44,5	56,3	37,6	55,1	54,4	47,0	54,3	59,5	40,8	37,2	35,8	31,9	38,1	60,6	65,8	48,2	81,9	74,8	**49,8**
203,2	32,0	47,4	36,8	47,9	32,2	44,7	47,2	38,7	44,3	47,1	33,5	30,2	30,9	23,3	30,2	47,9	55,4	40,6	69,6	63,0	**41,4**
152,4	25,0	36,9	28,9	39,2	25,7	34,4	38,5	30,3	34,0	34,1	25,8	23,0	24,8	15,2	22,4	34,6	42,6	32,9	52,8	47,0	**31,3**
101,6	17,0	25,5	19,8	28,1	18,4	22,3	28,0	20,5	22,2	20,5	17,8	15,7	17,9	8,1	14,2	21,2	27,8	23,9	33,2	29,4	**19,8**
70,0	11,8	17,5	13,7	20,2	13,4	14,6	20,4	14,0	14,6	12,3	12,4	10,8	13,1	4,5	9,1	12,9	18,6	17,4	21,2	18,7	**13,0**
50,8	8,5	12,5	9,9	15,0	10,1	10,0	15,4	10,0	10,1	7,8	9,0	7,8	9,9	2,7	6,2	8,3	12,9	13,1	13,8	12,4	**9,0**
38,1	6,4	9,2	7,4	11,5	7,8	7,1	11,9	7,4	7,2	5,2	6,7	5,8	7,7	1,7	4,4	5,5	9,2	10,1	9,3	8,5	**6,4**
25,4	4,2	5,9	4,8	7,8	5,4	4,3	8,2	4,8	4,4	2,9	4,4	3,8	5,4	0,9	2,7	3,1	5,7	7,0	5,3	4,9	**4,0**
19,1	3,1	4,3	3,6	5,9	4,2	3,0	6,3	3,5	3,1	1,9	3,3	2,8	4,2	0,6	1,9	2,1	4,0	5,4	3,5	3,3	**2,8**
12,7	2,0	2,7	2,3	3,9	2,9	1,8	4,3	2,2	1,9	1,1	2,2	1,8	2,9	0,3	1,1	1,2	2,5	3,7	2,0	1,9	**1,7**
6,4	1,0	1,3	1,1	2,0	1,5	0,8	2,2	1,0	0,8	0,4	1,0	0,9	1,6	0,1	0,5	0,4	1,0	1,9	0,7	0,7	**0,7**
2,0	0,3	0,4	0,3	0,6	0,5	0,2	0,7	0,3	0,2	0,1	0,3	0,3	0,5	0,0	0,1	0,1	0,3	0,6	0,2	0,2	**0,2**

A linha destacada em vermelho nas tabelas 7 e 8, mostra o passante acumulado de cada imagem para uma malha de 630 mm, ou seja, o mesmo tamanho do top size do britador primário da Pedreira Esperança. Aproximadamente 94% do material do interior da pilha é passante em 630 mm, já o material da superfície, 85,3% é passante. Já a linha destacada em azul mostra o passante acumulado para uma malha de 750 mm, ou seja, equivalente ao tamanho máximo que o britador é alimentado na pedreira. Das 10 imagens do interior da pilha, somente 3 possuem partículas acima de 750 mm e com top size de 1089 mm. E das 20 imagens da superfície, 15 possuem partículas acima de 750 mm e com top size de 1425 mm. Observa-se, que a superfície da pilha possui fragmentos significativamente mais grosseiros que o interior da pilha.

Grande maioria dos fragmentos da área dos tampões da bancada ficam empilhados na superfície da pilha. Logo, podemos afirmar que provavelmente este material mais grosseiro na superfície da pilha, conforme mostrado nas análises, provém da zona dos tampões da bancada. Outra observação é que 90,3% do material da superfície é passante em uma malha de 750 mm e 96,1% do material do interior da pilha é passante para este mesmo tamanho de malha. A pilha obtida é bastante fragmentada e pode-se fazer algumas otimizações nos parâmetros do plano de fogo.

5.2. Sugestões de novos parâmetros do plano de fogo

Antes de propor mudanças nos parâmetros do plano de fogo, foi analisado os parâmetros do plano de fogo utilizado na realização do desmonte estudado. A tabela 9 apresenta os parâmetros do plano de fogo do desmonte.

Tabela 9 – Alguns parâmetros do plano de fogo utilizado para o desmonte estudado.

Espaçamento	3,2 m
Afastamento	1,6 m
Diâmetro do furo	3 polegadas
Quantidade de furos	137
Altura média dos furos	17,59 m
Altura média dos tampões	1,57 m
Carga média por furo	88,11 kg
Volume de rocha a ser desmontada (in situ)	12338,33 m^3
Área superficial de rocha por furo	5,12 m^2
Volume de rocha por furo	90,06 m^3

Razão de carga média	0,98 kg/m³

Obs.: A última linha, possui tamponamento de 2 metros e as demais 1,5 metros.

Segundo as análises realizadas, pode-se fazer algumas sugestões para otimizações dos próximos desmontes a serem realizados na pedreira esperança. Estas sugestões mudarão a malha de perfuração e o tamanho do tamponamento dos furos. Realizando essas mudanças e mantendo o volume de rocha a ser desmontado e a altura do furo, algumas economias serão feitas automaticamente. A proposta seria aumentar o espaçamento e afastamento em 20 cm. E o tamponamento poderia ser calculado pela fórmula descrita na seção 3.2.8, o novo tamponamento seria cerca de 25 cm menor em cada furo. A altura do tamponamento deve ser observada em campo através de filmagens, pois este deve assegurar o confinamento dos gases.

A tabela 10 mostra os novos valores dos parâmetros do plano de fogo com algumas das principais economias realizada.

Espaçamento	3,4 m
Afastamento	1,8 m
Diâmetro do furo	3 polegadas
Quantidade de furos	115
Altura média dos furos	17,59 m
Altura média dos tampões	1,32 m
Carga média por furo	89,48 kg
Volume de rocha a ser desmontada (in situ)	12379,75 m³
Área superficial de rocha por furo	6,12 m²
Volume de rocha por furo	107,65 m³
Razão de carga média	0,83 kg/m³

Obs.: Volume de rocha a ser desmontada é diferente, pois necessitaria de “114,62 furos” para desmontar o mesmo volume de rocha. Por isto, foi utilizado “115 furos”.

Fazendo estas alterações no espaçamento, afastamento e tamponamento, as principais economias obtidas, são:

- no plano de fogo utilizado para o desmonte foram realizados aproximadamente 2410 metros em perfuração e com os novos parâmetros deverão ser realizados aproximadamente 2023 metros (redução de 387 metros ou 16,06%);
- foram utilizados aproximadamente 12070 kg de emulsão bombeada, com os novos parâmetros deverão ser utilizados 10290 kg (redução de 1.780 kg ou 14,75%);

6. CONCLUSÃO

A operação de desmonte de rochas é de suma importância para as etapas posteriores, pois o desmonte de rocha visa adequar os tamanhos dos fragmentos para possibilitar as etapas de carregamento, transporte e britagem. Sendo assim, é importante o acompanhamento dos resultados obtidos pelo desmonte.

A análise do desmonte realizado na Pedreira Esperança, no dia 05 de novembro de 2016, através do programa Split-Desktop foi realizada com sucesso. O software, é uma ferramenta muito importante e confiável, apesar de alguns erros e limitações, para fazer uma análise da granulometria do desmonte, conhecer importantes parâmetros da curva granulométrica e com isto, realizar diversos aprimoramentos no desmonte de rochas.

Com a avaliação dos resultados obtidos, foi proposto algumas mudanças nos parâmetros para o plano de fogo atual. As mudanças propostas neste trabalho além de contribuir com a otimização do desmonte de rochas e auxiliar nas etapas subsequentes, contribui também na redução de gastos principalmente com explosivos e na quantidade de metros perfurados.

Este presente trabalho pode incentivar novos alunos e até profissionais da área, a conhecer e analisar melhor o resultado de desmontes de rochas, afim de obter informações detalhadas que possam contribuir para o aprimoramento do desmonte, e assim, obter sempre os melhores resultados, de forma conjunta, para todas as operações unitárias nas minerações.

REFERÊNCIAS

JIMENO, C. L. *Manual de perforación y voladura de rocas*. Instituto Tecnológico Geominero de España, 2ª edição, Espanha, 1994. 541p.

ALONSO, J. B., GÓMEZ, J.C., HERBERT, J.H. *Perforación y voladura de rocas em minería*. Universidad Politécniva de Madrid, Espanha, 2013. 256p.

SILVA, Valdir C. *Curso de desmonte de rochas por explosivos*. Treinamento de desmonte de desmonte de rocha por explosivos. AEMIRN. Natal – RN, 2015.

GERALDI, J. L. P., *O ABC das escavações de rocha.* Editora Interciência. Rio de Janeiro, 2011. 266p.

MORAIS, Juarez Lopes. *Simulação da fragmentação dos desmontes de rocha por explosivos*. 2004. Tese (Doutorado em engenharia metalúrgica e de minas). Escola de engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais.

SILVA, Andrêvhity C. *Simulação e análise da fragmentação do desmonte de rochas na pedreira Herval – Barreiros – PE*. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia mineral). Centro de tecnologia e geociências. Universidade Federal de Pernambuco. Pernambuco.

SEGARRA, P. et. al. Análisis digital de la fragmentación por voladura en la mina de Sossego (CVRD, Brasil). Universidad Politécnica de Madrid. Escola Técnica Superior de Ingenieros de Minas. Madrid, Espanha. 2006.

Split Engineering, Arquivo executável do tutorial do software Split-Desktop 2.0 <https://www.spliteng.com/download/2102/> Acesso em: 09 de outubro de 2016.

Revista Militar de Ciência e Tecnologia, Um pouco da história dos explosivos através de seus descobridores. Disponível em: <http://rmct.ime.eb.br/arquivos/RMCT_1_quad_2001/hist_explo_descobrid.pdf> Acesso em: 15 de dezembro de 2016.

Minérios & Minerales, Encartuchado ou bombeado? Disponível em: <http://www.minerios.com.br/EdicoesInt/1356/32/Encartuchado_ou_bombeado.aspx > Acesso em: 19 de dezembro de 2016.

MINEROPAR – Serviço Geológico do Paraná, Planejamento na mineração. Disponível em: <http://www.mineropar.pr.gov.br/arquivos/File/publicacoes/plano_diretor/relatorio/capitulo4.pdf> Acesso em: 21 de dezembro de 2016.

Zenith, PE Series Jaw Crusher. Disponível em: <http://www.zenith-mineral.com/products/crushing/pe-series-jaw-crusher.html?campaignid=246213486&DEV=c&PLC=&target=&keyword=zenith%20crusher&AD=88042850766&feeditem=&gclid=CMu_gt3Cl9ECFYWAkQod8hEK4A> Acesso em: 28 de dezembro de 2016.

ANEXOS

Figura 22 - Imagem 1 da superfície da pilha. Fonte: autor.

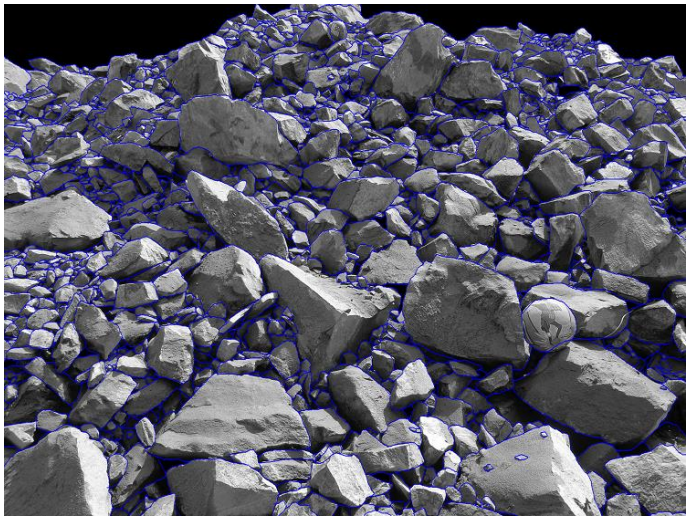

Figura 23 - Imagem 2 da superfície da pilha. Fonte: autor.

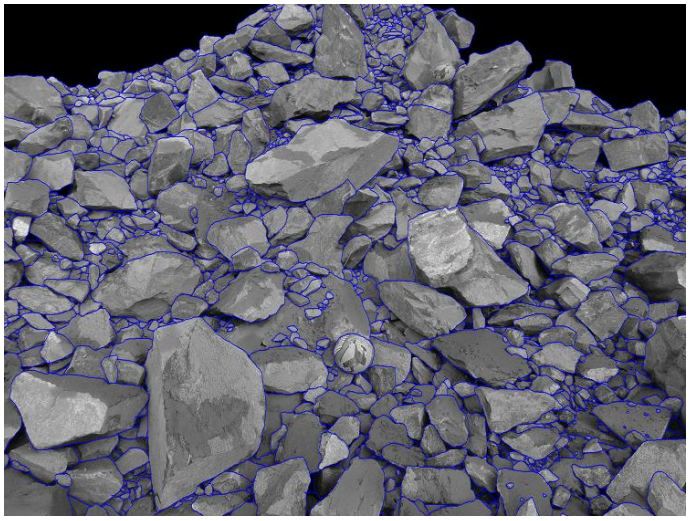

Figura 24 - Imagem 3 da superfície da pilha. Fonte: autor.

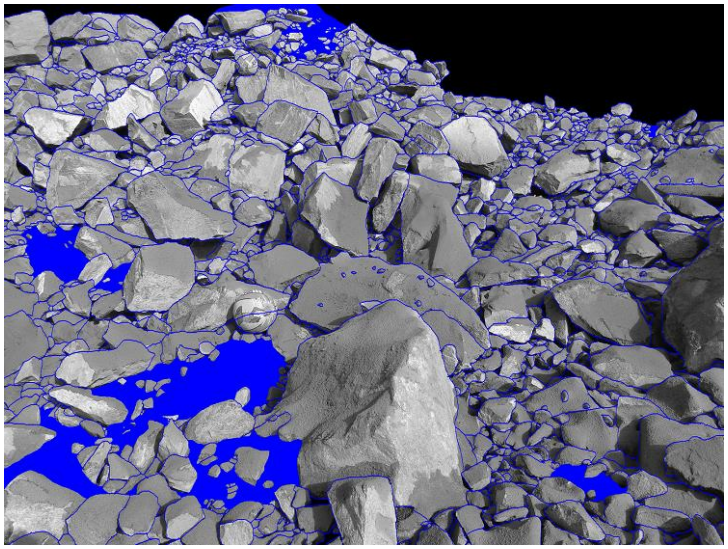

Figura 25 - Imagem 4 da superfície da pilha. Fonte: autor.

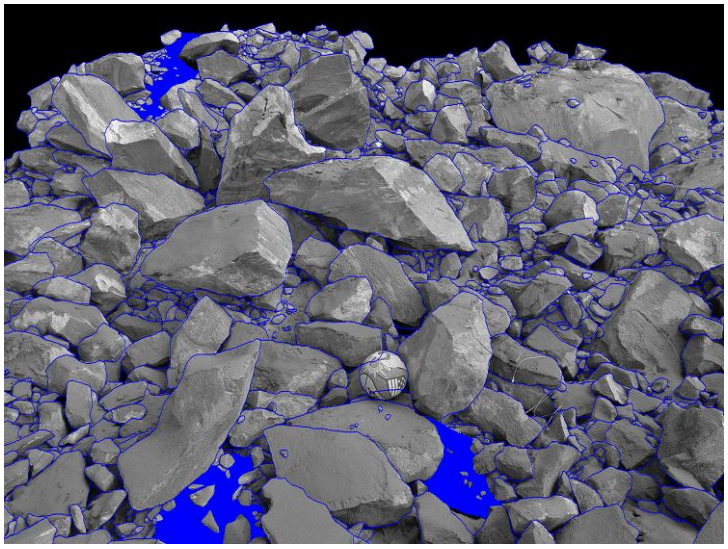

Figura 26 - Imagem 5 da superfície da pilha. Fonte: autor.

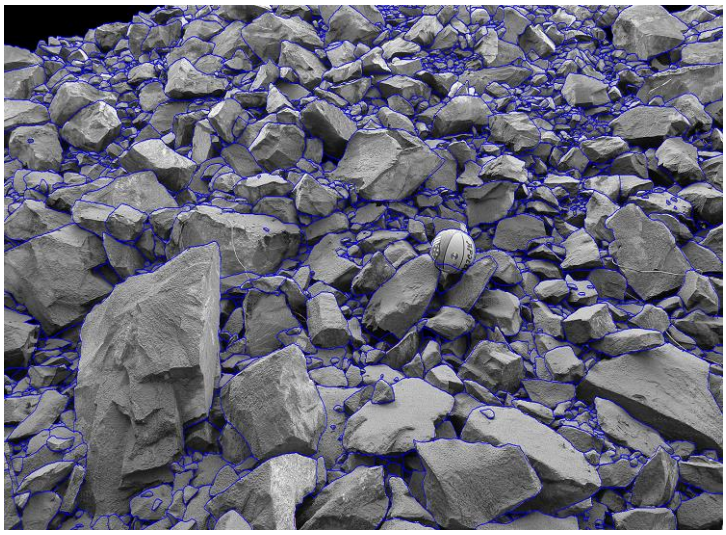

Figura 27 - Imagem 6 da superfície da pilha. Fonte: autor.

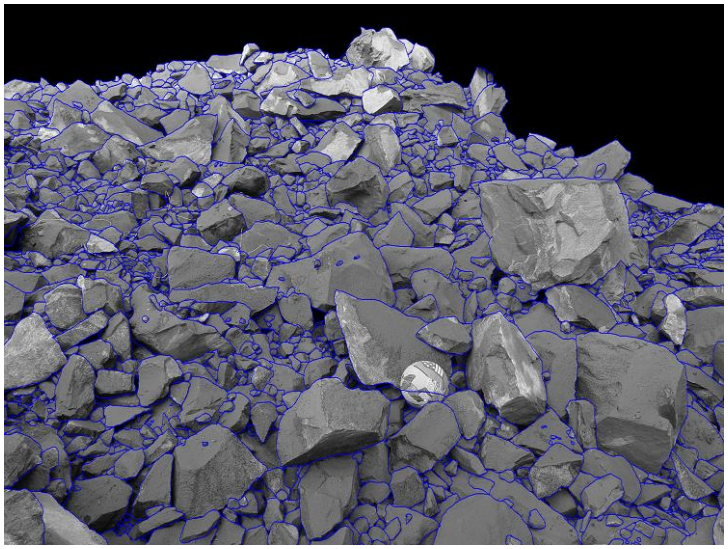

Figura 28 - Imagem 7 da superfície da pilha. Fonte: autor.

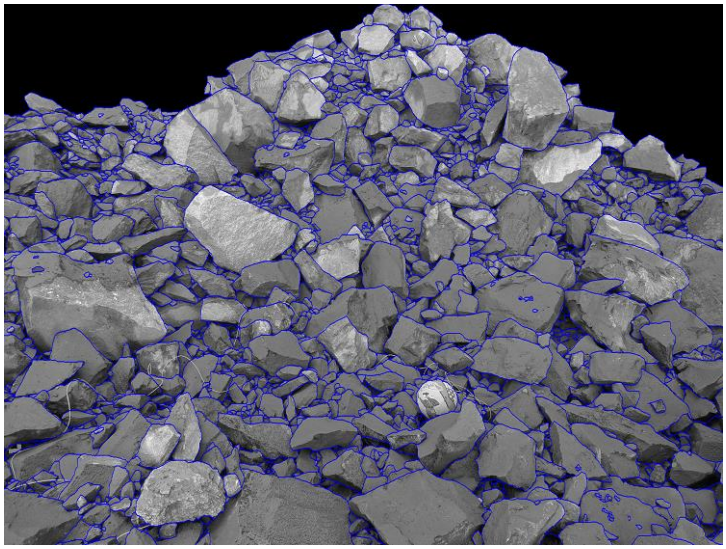

Figura 29 - Imagem 8 da superfície da pilha. Fonte: autor.

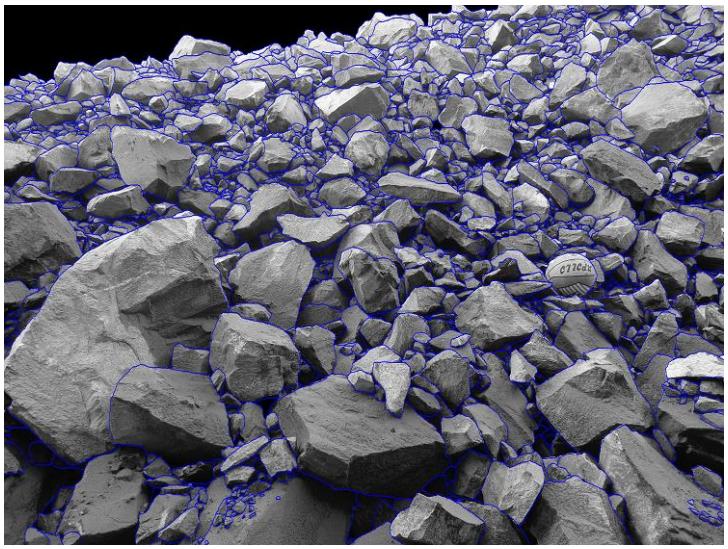

Figura 30 - Imagem 9 da superfície da pilha. Fonte: autor.

Figura 31 - Imagem 10 da superfície da pilha. Fonte: autor.

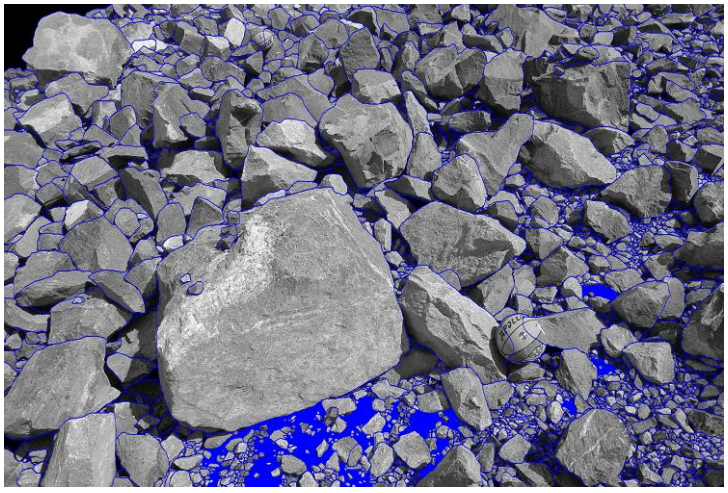

Figura 32 - Imagem 11 da superfície da pilha. Fonte: autor.

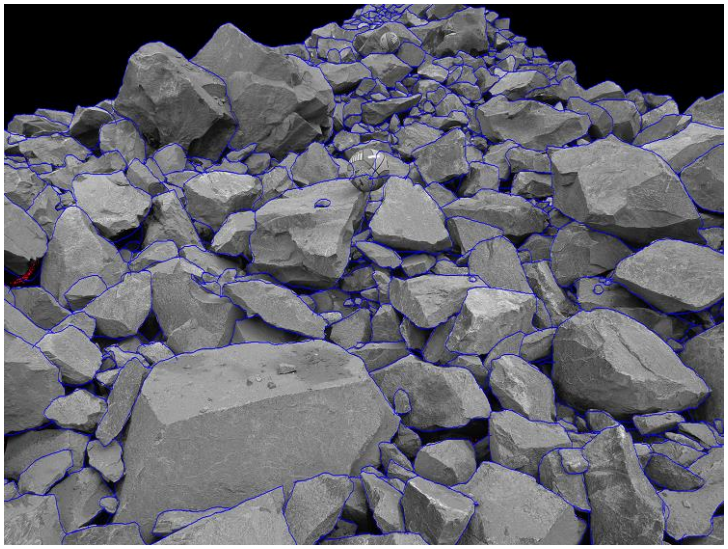

Figura 33 - Imagem 12 da superfície da pilha. Fonte: autor.

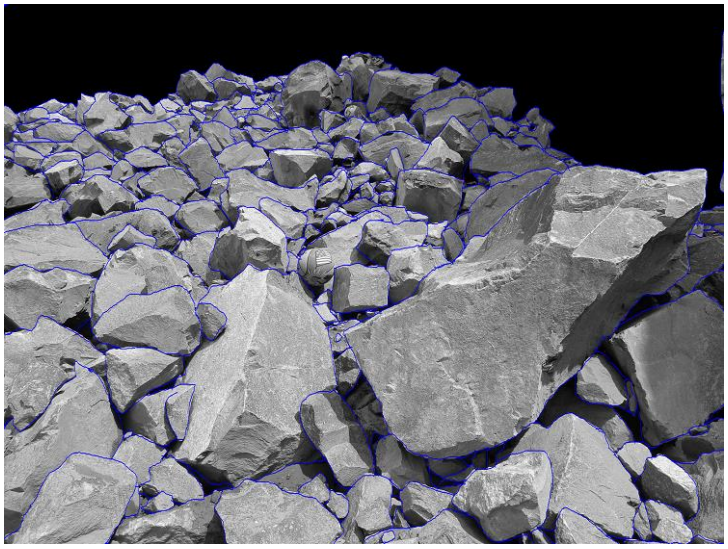

Figura 34 - Imagem 13 da superfície da pilha. Fonte: autor.

Figura 35 - Imagem 14 da superfície da pilha. Fonte: autor.

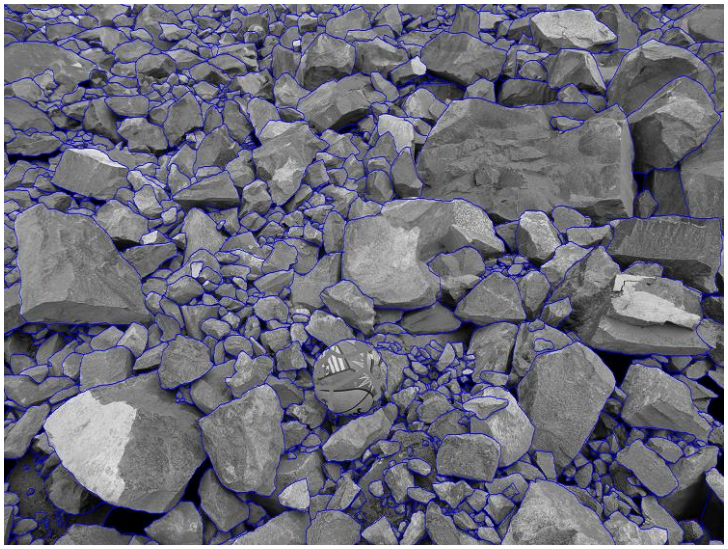

Figura 36 - Imagem 15 da superfície da pilha. Fonte: autor.

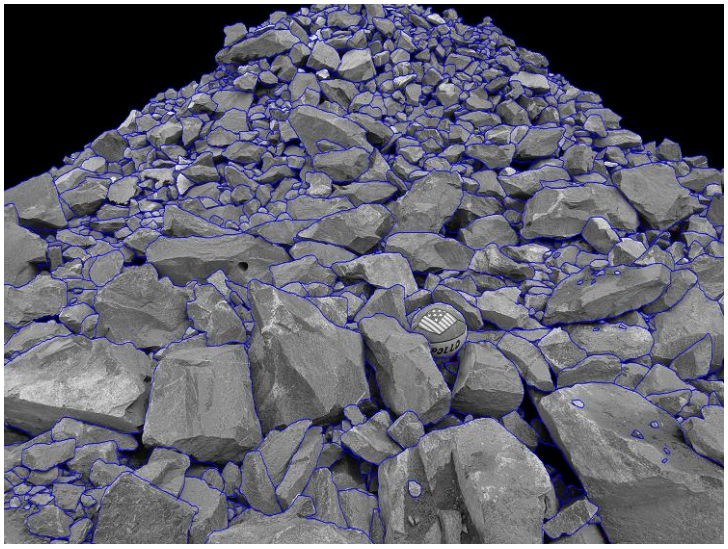

Figura 37 - Imagem 16 da superfície da pilha. Fonte: autor.

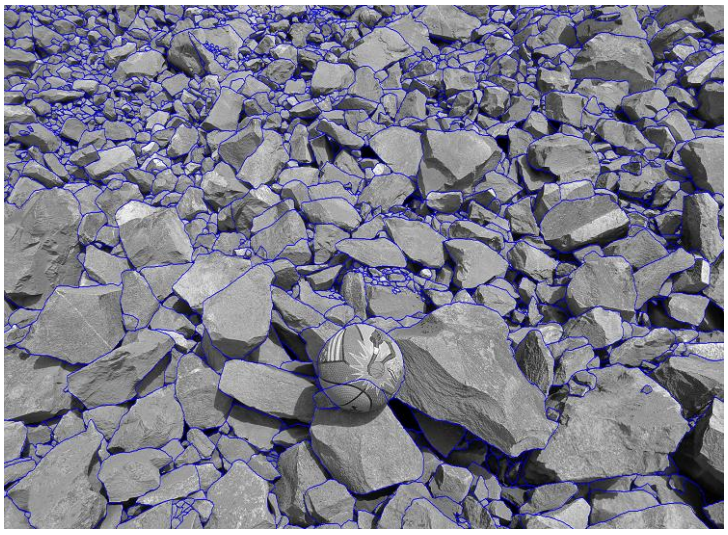

Figura 38 - Imagem 17 da superfície da pilha. Fonte: autor.

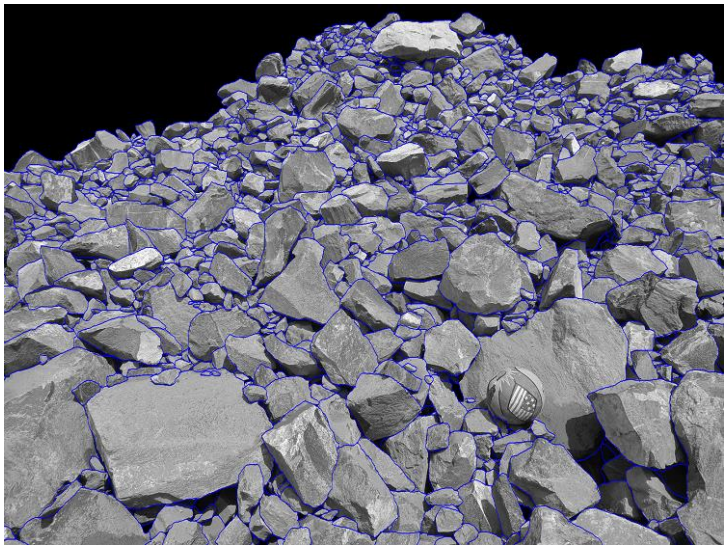

Figura 39 - Imagem 18 da superfície da pilha. Fonte: autor.

Figura 40 - Imagem 19 da superfície da pilha. Fonte: autor.

Figura 41 - Imagem 20 da superfície da pilha. Fonte: autor.

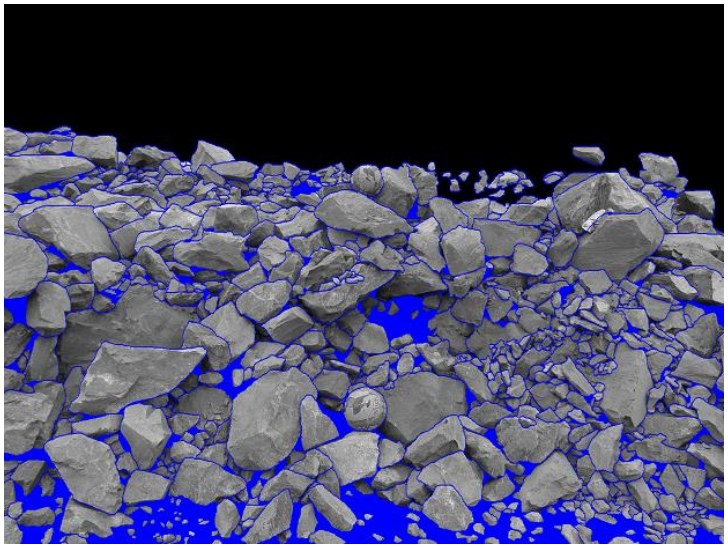

Figura 42 - Imagem 1 do interior da pilha. Fonte: discente José Jairo, editado pelo autor.

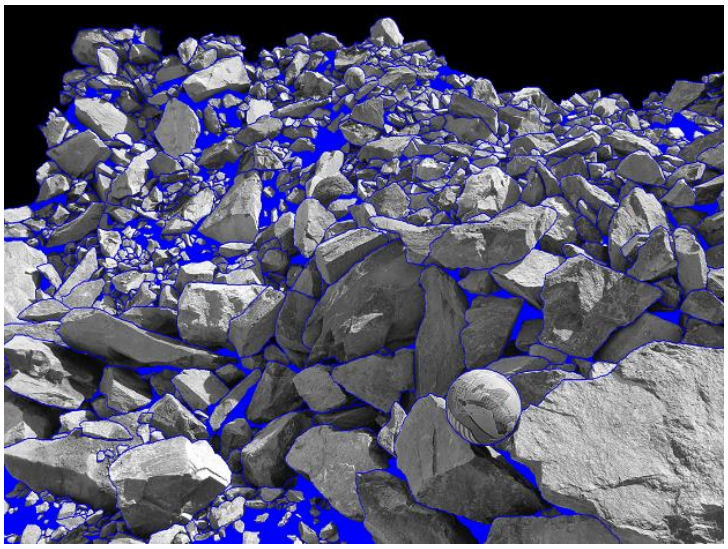

Figura 43 - Imagem 2 do interior da pilha. Fonte: discente José Jairo, editado pelo autor.

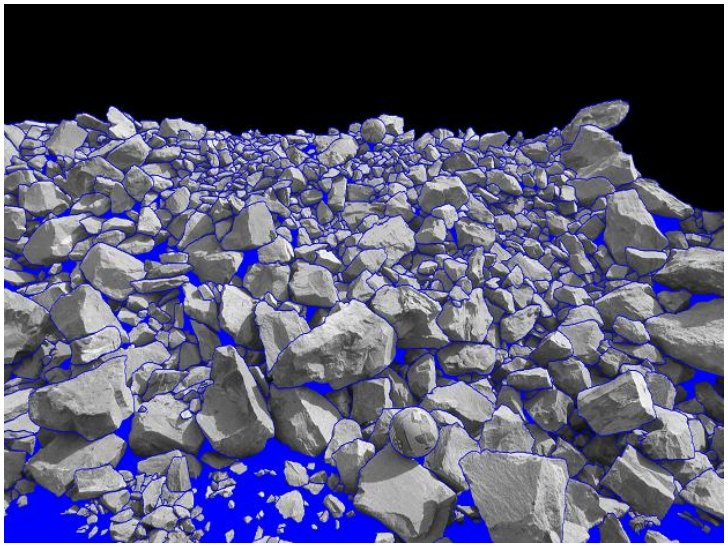

Figura 44 - Imagem 3 do interior da pilha. Fonte: discente José Jairo, editado pelo autor.

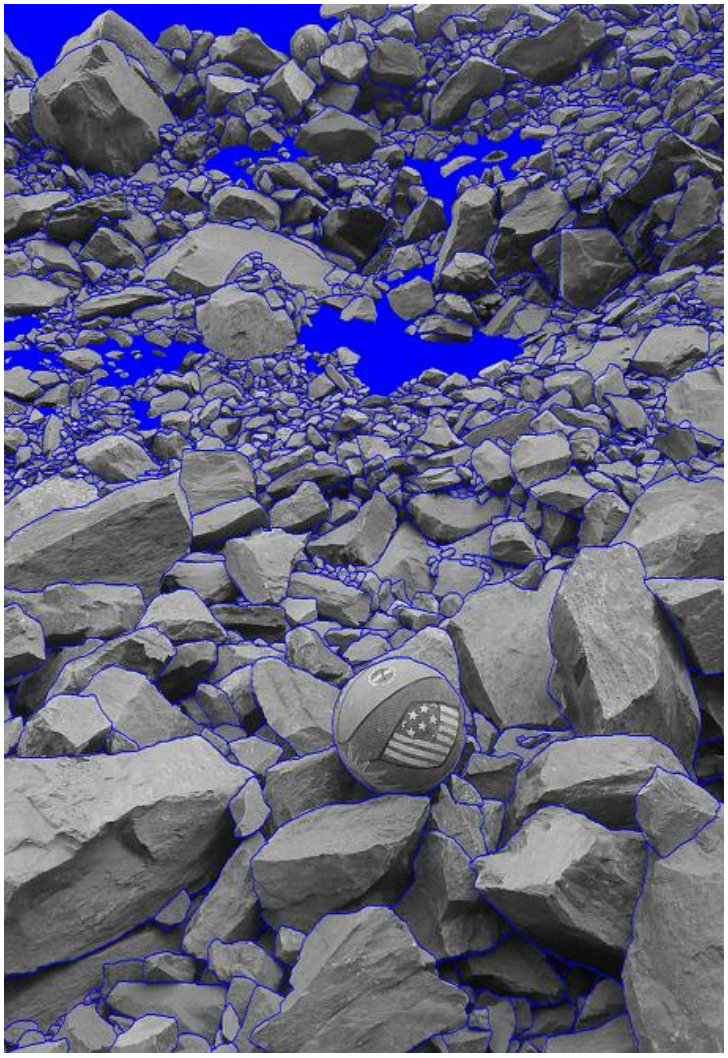

Figura 45 - Imagem 4 do interior da pilha. Fonte: autor.

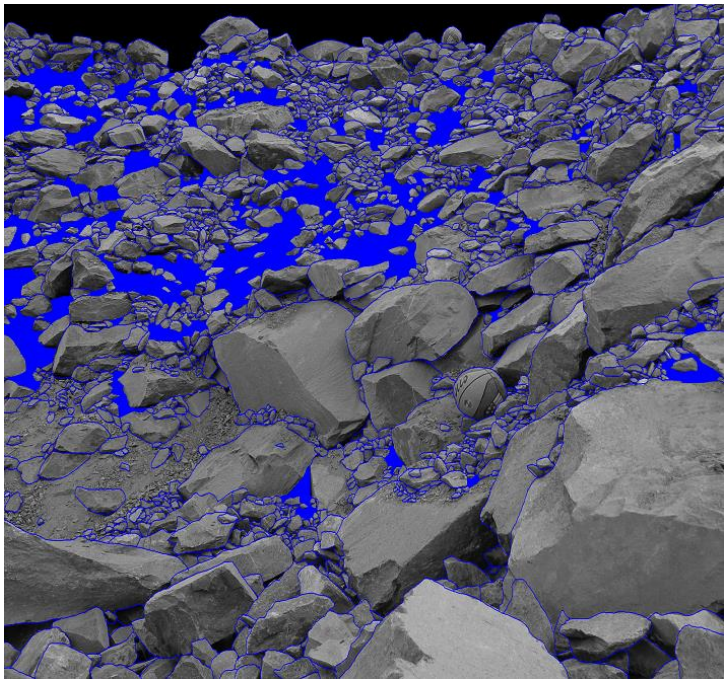

Figura 46 - Imagem 5 do interior da pilha. Fonte: autor.

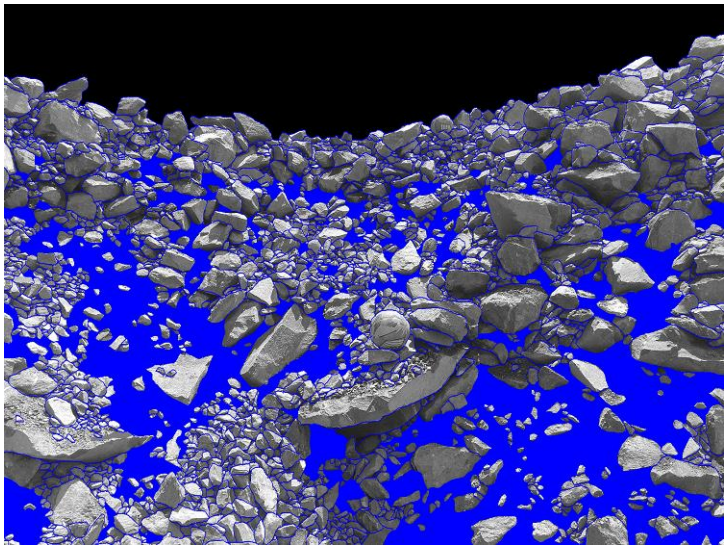

Figura 47 - Imagem 6 do interior da pilha. Fonte: autor.

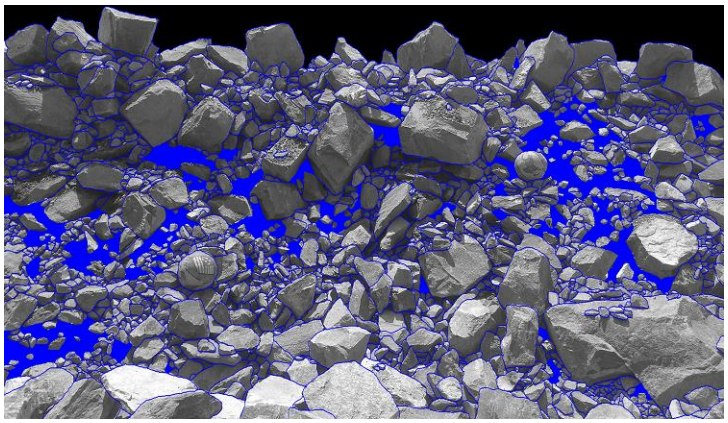

Figura 48 - Imagem 7 do interior da pilha. Fonte: autor.

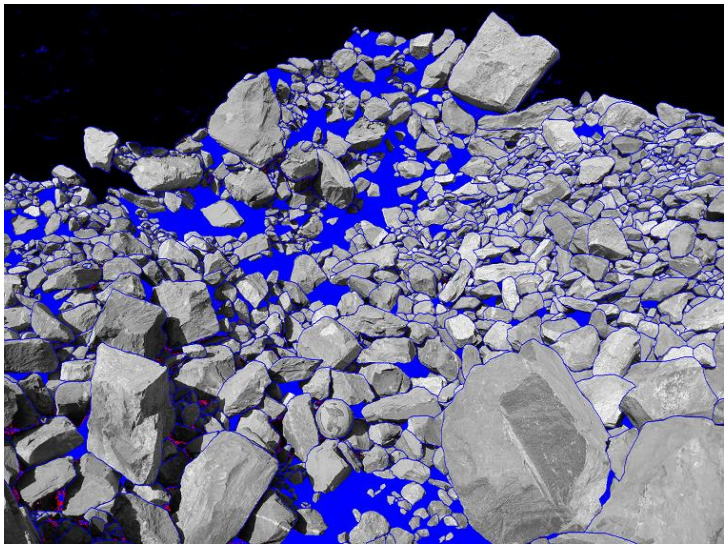

Figura 49 - Imagem 8 do interior da pilha. Fonte: autor.

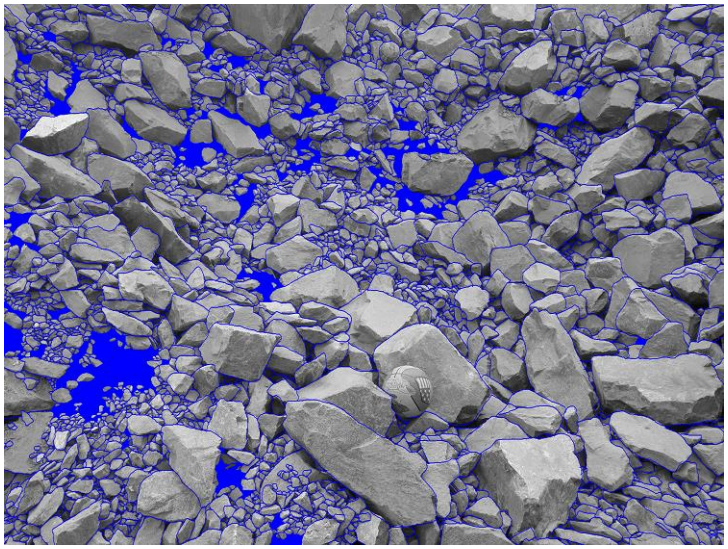

Figura 50 - Imagem 9 do interior da pilha. Fonte: autor.

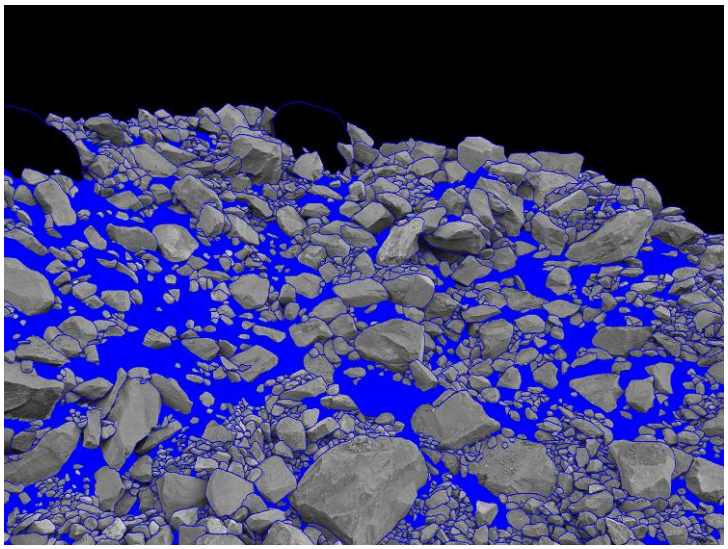

Figura 51 - Imagem 10 do interior da pilha. Fonte: autor.

Figura 52 - Funcionários da Opex e Pedreira Esperança carregando os furos. Fonte: autor.

Figura 53 - Funcionário da Opex operando a unidade móvel de bombeamento. Fonte: autor.

Figura 54 - Vista da bancada prestes a ser detonada. Fonte: autor.

Figura 55 - Vista da pilha gerada pelo desmonte. Fonte: autor.