



INSTITUTO SUPERIOR POLITÉCNICO DE TETE

DIVISÃO DE ENGENHARIA

CURSO DE ENGENHARIA DE MINAS

**OPTIMIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DO PLANO DE FOGO NO DESMONTE DA
ROCHA GNAISSE COM AUXÍLIO DO SOFTWARE *O-PITBLAST* NA PEDREIRA
DE MAFILIPA - TETE**

TETE, 2021

ARTUR VALTER CARLOS MACHOE

**OPTIMIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DO PLANO DE FOGO NO DESMONTE DA
ROCHA GNAISSE COM AUXÍLIO DO SOFTWARE *O-PITBLAST* NA PEDREIRA
DE MAFILIPA - TETE**

Trabalho de Monografia apresentado a Divisão
de Engenharia do Instituto Superior
Politécnico de Tete, como requisito para
obtenção do grau de Licenciatura em
Engenharia de Minas.

Supervisor: MSc. Rodrigues Mário

TETE, 2021



INSTITUTO SUPERIOR POLITÉCNICO DE TETE

DIVISÃO DE ENGENHARIA

DIRECÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA DE MINAS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS

Acta de Avaliação Final

Nome do Estudante: ARTUR VALTER CARLOS MACHOE
Tema: OPTIMIZAÇÃO DOS PARÂMETROS AO PLANO DE FOGO NO DESMONTE DA ROCHA
GNAISE COM AUXÍLIO DO SOFTWARE D-PITBLAST NA SINTRAPEL NOVA ERA, PEDREIRA
MAFILIPA-TETE.
Observações: CORRIGIR ALGUNS ERROS ORTOGRÁFICOS, CONEXÕES FRÁGILAS,
CONFORME AS RECOMENDAÇÕES DO Oponente

Nota atribuída ao Relatório DOZE E MEIO (12,5 VALORES)
Nota atribuída à Apresentação Oral CATORZE (14,0 VALORES)
Nota atribuída à Defesa CATORZE (14,0 VALORES)
Nota final atribuída ao Trabalho de Licenciatura TREZE VALORES (13,0 VALORES)

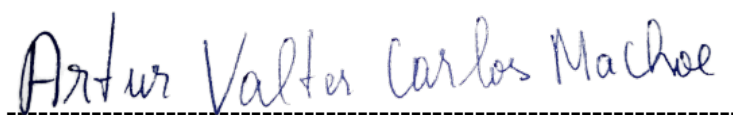
O JÚRI

Presidente: MPOYI JACQUES RANDA
Supervisor: Rodrigues Maimo
Oponente: Smuel Mopandi

Tete; aos 09 de Novembro de 20 21

DECLARAÇÃO DE HONRA

Eu Artur Valter Carlos Machoe declaro que esta monografia é resultado da sua investigação e das orientações do seu supervisor MSc. Rodrigues Mário, no qual o seu conteúdo é original e todas fontes consultadas estão devidamente mencionadas no texto, nas notas e na bibliografia final. Declara ainda que esta monografia não foi apresentada em nenhuma outra instituição para obtenção de qualquer grau académico.



(Artur Valter Carlos Machoe)

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradecer a Deus todo-poderoso pela protecção e vida que me proporcionou durante o meu percurso académico;

Aos meus pais Fidélia Arão Matusse Machava e Domingos Alexandre Machava pelo suporte emocional e financeiro durante o meu percurso académico;

Aos meus irmãos Fleura, Lavínia, Luan e todos meus familiares pelo suporte;

Ao meu supervisor MSc. Rodrigues Mário pela paciência, acompanhamento técnico e orientações metodológicas que tonaram possível o compilar este trabalho;

Aos meus amigos Adérito, Belton, Constâncio, Ivan, e Reginaldo pela ajuda à distância, por sempre tarem ao meu lado e apoiando desde o início do curso;

Aos meus colegas Adonias, Adelson, Anoklim, Artur Penicela, Adolfina, Aldo, Bernice, Eduardo, Elton, Fenias, Francisco, Idalmisse, Kelvin, Maria Clara, Mércia, Ocácio, Ussene, Santos, Venâncio, Wilson e Zindânio pela grande família que criamos graças ao nosso atrevimento na escolha do curso e o apoio financeiro e emocional;

Ao Instituto Superior Politécnico de Tete e seu corpo docente pelo conhecimento e aprendizagem transmitido;

A pedreira de Mafilipa e seus colaboradores pelo contributo e o tempo dispensado para atender algumas dúvidas e os questionários;

E a *O-Pitblast* por ter fornecido o *software* e as respectivas licenças a instituição para que fosse possível a realização das simulações.

DEDICATÓRIA

Aos meus pais: Fidélia Arão Matusse Machava e Domingos Alexandre Machava com muito amor.

EPÍGRAFE

"Nenhum saber é saber completo".

(Galileu Galilei, 1619)

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Mapa de localização geográfica da área de estudo	5
Figura 2: Principais variáveis do plano de fogo	13
Figura 3: Gráfico da curva granulométrica prevista pelo modelo Kuz-Ram	22
Figura 4: Perfuratriz pneumática D35	26
Figura 5: Tipo de malha e o tampão após a perfuração	27
Figura 6: Conector, Detonador e Booster	28
Figura 7: Tampão com brita	28
Figura 8: Imagem do material	30
Figura 9: Análise do material	31
Figura 10: Análise da selecção	31
Figura 11: Gráfico da curva de fragmentação do desmonte I.....	32
Figura 12: Gráfico da curva de fragmentação do desmonte II	34
Figura 13: Gráfico comparativo dos resultados da fragmentação do desmonte I e desmonte II	35
Figura 14: Plano de perfuração e sequenciamento de fogo da primeira optimização do desmonte I	36
Figura 15: Gráfico da curva de fragmentação da primeira optimização do desmonte I.....	37
Figura 16: Plano de perfuração e sequenciamento de fogo da segunda optimização do desmonte I	38
Figura 17: Gráfico da curva de fragmentação da segunda optimização do desmonte I.....	38
Figura 18: Gráfico comparativo dos resultados da fragmentação do desmonte I	39
Figura 20: Plano de perfuração e sequenciamento de fogo da primeira optimização do desmonte II	40
Figura 21: Gráfico da curva de fragmentação da primeira optimização do desmonte II	41
Figura 22: Plano de perfuração e sequenciamento de fogo da primeira optimização do desmonte II	42
Figura 23: Gráfico da curva de fragmentação da segunda optimização do desmonte II.....	42
Figura 24: Gráfico comparativo dos resultados da fragmentação do desmonte II	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Coordenadas da área de estudo.....	5
Tabela 2: Diâmetro de perfuração dos equipamentos	16
Tabela 3: Classificação geomecânica para obtenção do factor de rocha.....	20
Tabela 4: Tamanho da malha e percentual de material passante.....	21
Tabela 5: Parâmetros do plano de fogo utilizado do primeiro desmonte	29
Tabela 6: Parâmetro do plano de fogo utilizado do segundo desmonte	33

LISTA DE SIGLAS ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

"	Polegadas;
%	Porcentos;
ρ_e	Densidade do explosivo;
ρ_r	Densidade da rocha;
°C	Graus Celcius;
A	Afastamento;
ANFO	<i>Ammonium Nitrate and Fuel Oil</i> ;
Cc	Carga coluna;
CE	Carga explosiva;
Cf	Carga de fundo;
CFM	Caminhos de Ferro de Moçambique;
CTE	Total de carga explosiva;
DF	Diâmetro do furo;
E	Espaçamento;
ha	Hectares;
Hb	Altura da bancada;
Hc	Altura da carga;
Hcc	Altura da carga de coluna;
Hcf	Altura da carga do fundo;
Hf	Comprimento de furo;
W	Desvio do furo em metros;
Er	Energia relativa por massa efectiva do explosivo;
RWS	Energia relativa por massa comparada ao ANFO;
FEM	Fabrica de explosivo de Moçambique;
INE	Instituto Nacional de Estatísticas;

K	Quantidade de explosivos utilizado para desmontar um metro cúbico de rocha;
Kg	Quilogramas;
Kg/m ³	Quilogramas por metros cúbicos;
Kg/m	Quilogramas por metro;
Lda	Limitada;
Q	Massa de explosivos utilizados em cada furo;
X ₅₀	Média de tamanho da partícula;
m	Metros;
m ³	Metros cúbicos;
m/m ³	Metros por metros cúbicos;
mm	Milímetros;
MP	Malha de perfuração;
PE	Perfuração específica;
Rc	Razão de carga;
RL	Razão linear de carregamento;
P	Resultado e percentagem de material passante na peneira de tamanho;
RF	<i>Rock Factor</i> ;
S	Subfuração;
T	Tampão;
X	Tamanho da malha da peneira;
t	Toneladas;
t/m ³	Toneladas por metros Cúbicos;
VOD	Velocidade de detonação efectiva do explosivo (aferida em campo);
VODn	Velocidade de detonação nominal do explosivo;
V	Volume.

RESUMO

A integração mina – usina deve apresentar uma abordagem sistemática do processo e procedimentos do desmonte de rocha, aliada as novas ferramentas tecnológicas que visam otimizar a operação de desmonte de rocha com explosivo é uma das principais linhas de pesquisa da engenharia de minas. Nesse contexto o presente trabalho tem por objectivo apresentar uma optimização dos parâmetros variáveis do plano de fogo com uso do *software O-Pitblast* para uma possível melhoria, quer seja na fragmentação de rocha e na eficiência das operações subsequentes ao desmonte de rocha, carga, transporte e processamento do material. O alto índice de blocos maiores após o desmonte afecta negativamente a eficiência das operações de carregamento, transporte e processamento do material, motivou o autor a realizar um estudo aprofundado, pelo que, o estudo dessa temática é bastante relevante para pedreira nos seguintes aspectos: redução do engaiolamento no britador primário, menor consumo de energia nas etapas de processamento, melhor fragmentação e minimização dos impactos ambientais (vibrações, ruído e ultralancamentos) causados pelo desmonte de rocha com explosivo o que é de grande relevância a população que habita nas proximidades da pedreira de Mafilipa. Partindo de uma metodologia quantitativa e qualitativa aplicou-se *software O-Pitblast* e *software WipFrag* para o alcance dos resultados. O estudo foi realizado na pedreira de Mafilipa localizada na unidade de Mafilipa que se dedica a extracção da rocha gneisse para produção de agregados para construção civil. Nesse trabalho foram estudados dois desmontes e que posteriormente foram elaboradas duas propostas para optimização dos parâmetros variáveis do plano de fogo para cada desmonte. Os resultados das optimizações dos parâmetros variáveis do plano de fogo revelaram uma melhoria significativa na ordem dos 20% para o desmonte I e 27% para o desmonte II na qualidade da fragmentação. Conclui-se que a pedreira deve redimensionar os parâmetros variáveis do plano de fogo e por fim sugeriu-se aplicação do *software O-Pitblast* e *WipFrag* para o alcance de melhores resultados na fragmentação.

Palavras-chaves: Optimização, parâmetros variáveis, fragmentação.

ABSTRACT

The mine -plant integration must present a systematic approach to the rock blasting process and procedures, combined with new technological tools that aim to optimize the rock blast operation is one of the main lines of research at mining engineering. In this context, this work aims to present an optimization of the variable parameters of the fire plan for a possible improvement, either in rock fragmentation, or in the efficiency of operations subsequent to rock blasting and in reducing the costs of fragmentation, loading, transport and processing of the material. The high index of larger blocks after blasting, subsequently affect the efficiency of the material loading, transport and processing operations, motivated the author to carry out an in-depth study, so the study of this theme is very relevant for the company in the following aspects: reduction of caging in the primary crusher,, reduction of energy consumption in the processing stages, will improve fragmentation, will minimize environmental impacts (vibrations, noise and ultra-releases) caused by rock blasting with explosives, which is of great relevance to the population living in the vicinity of the Mafilipa Quarry . Starting from a quantitative methodology and qualitative applied the software O-Pitblast, software WipFrag and a demonstration to achieve the results. The study was carried out at the company Sintrapel Nova Era Lda Mafilipa Quarry located in the Mafilipa unit, south of the city of Tete, which is dedicated to extracting gneiss for the production of aggregates for civil construction. In this work, two blasts were studied and two proposals were subsequently elaborated to optimize the variable parameters of the fire plan for each blast. The optimization results revealed that a significant improvement in the order of 20% on blast one and 27% on blast two in the fragmentation quality. It is concluded that the company must resize the variable parameters of the fire plane plan and, finally, the application of O-Pitblast and WipFrag software was suggested to achieve better results in fragmentation

Keywords: Optimization, variable parameters, fragmentation.

SUMÁRIO

DECLARAÇÃO DE HONRA	i
AGRADECIMENTOS	ii
DEDICATÓRIA.....	iii
EPÍGRAFE	iv
LISTA DE FIGURAS	v
LISTA DE TABELAS	vi
LISTA DE SIGLAS ABREVIATURAS E SÍMBOLOS.....	vii
RESUMO	ix
<i>ABSTRACT</i>	x
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Formulação do Problema.....	2
1.2. Justificativa.....	2
1.3. Objectivos.....	3
1.3.1. Geral	3
1.3.2. Específicos.....	3
1.4. Hipóteses	4
1.5. Caracterização físico-geográfica da área de estudo.....	4
1.6. Enquadramento geológico	5
1.6.1. Geologia local.....	6
1.6.2. Estratigrafia	6
1.6.3. Tectónica	7
1.6.4. Situação mineira	7
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	8
2.1. Desmonte de rocha com explosivo.....	8
2.2. Explosivos	8

2.2.1. Propriedades dos explosivos.....	8
2.3. Acessórios de detonação.....	10
2.3.1. Detonadores não-eléctricos	10
2.3.2. Cordel detonante.....	10
2.3.3. Reforçadores (“Boosters”).....	11
2.3.4. Retardos.....	11
2.4. Plano de fogo.....	11
2.5. Parâmetros não Controláveis no Plano de Fogo.....	12
2.6. Parâmetros controláveis do plano de fogo.....	12
2.6.1. Afastamento (A)	13
2.6.2. Espaçamento (E).....	13
2.6.3. Malha de Perfuração (MP)	14
2.6.4. Inclinação dos furos (α).....	14
2.6.5. Altura da bancada (Hb)	14
2.6.6. Subperfuração (S).....	14
2.6.7. Profundidade do furo (Hf)	15
2.6.8. Tampão (T).....	15
2.6.9. Diâmetro de perfuração (DF)	15
2.6.10. Volumes de Escavação (VF e VT)	16
2.6.11. Razão linear de carregamento	16
2.6.12. Carga de fundo (Cf).....	16
2.6.13. Carga de coluna (Cc).....	17
2.6.14. Razão de Carregamento (RC).....	17
2.6.15. Perfuração específica (PE)	17
2.7. Fragmentação da rocha.....	17
2.7.1. Modelo de previsão de fragmentação Kuz-Ram	19
2.8. Optimização.....	22

2.8.1. <i>Softwares</i> de otimização do desmonte de rocha com explosivo.....	22
3. METODOLOGIA.....	24
3.1. Levantamento dos dados	24
4. APRESENTAÇÃO, ANÁLISE DOS DADOS E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	26
4.1. Apresentação de dados	26
4.1.1. Perfuração da rocha	26
4.1.2. Desmonte.....	27
4.1.3. Dados do desmonte I	29
4.1.4. Dados do desmonte II.....	33
4.2. Análise dos dados e Discussão dos Resultados.....	34
4.2.1. Análise dos dados	35
4.2.2. Otimização do desmonte I.....	36
4.2.3. Discussão dos Resultados das otimizações do desmonte I.....	39
4.2.4. Otimização do desmonte II.....	40
4.2.5. Discussão dos Resultados das otimizações do desmonte II	43
5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	45
5.1. Conclusões.....	45
5.2. Recomendações	46
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	47
APÊNDICES	I
ANEXOS.....	III

1. INTRODUÇÃO

O desmonte de rocha com explosivo é um método mundialmente utilizado pelas mineradoras para desagregar o minério e o estéril. Visando a obtenção duma fragmentação adequada para que as operações subsequentes ao desmonte ocorram sem sobressaltos. Torna-se essencial a elaboração de um plano de fogo com parâmetros que possam conciliar a fragmentação com as operações de carregamento e transporte e as limitações granulometrias na britagem primária.

Os parâmetros variáveis (geométricos, físicos-químicos e temporais) do plano do fogo influenciam directamente na fragmentação da rocha, podendo causar blocos muito grandes que para serem eficientemente escavados, transportados e processados, ou ser tratados com eficiência devem ser refragmentados por desmonte mecânico, ou por desmonte secundário.

Existem vários elementos nos parâmetros variáveis do plano de fogo, porém este trabalho vai forçar-se nos seguintes elementos das variáveis geométricas (afastamento, espaçamento, altura do tampão, altura da carga no furo e inclinação dos furos), físico-químicas (comprimento do explosivo, peso da carga total de explosivo no furo, carga específica e perfuração específica) e temporais (sequência de detonação) do desmonte de rocha com explosivo.

O estudo foi desenvolvido na pedreira de Mafilipa e se estendeu por um período de noventa dias, simulando possíveis cenários óptimos no *software O-Pitblast*, e com base nos resultados fornecidos pelo *software O-Pitblast* facilitaram as conclusões, recomendações e a tomada de decisões acertadas.

Quanto a organização desta monografia, no primeiro capítulo encontra-se a Introdução, definindo um contexto em torno do trabalho e apresentando seus objectivos, hipóteses, formulação do problema e sua justificativa. No segundo capítulo foi realizada uma revisão bibliográfica, reunindo todo conteúdo teórico que deve ser apresentar para um bom entendimento do tema em estudo. No terceiro capítulo foram apresentados aspectos metodológicos. No quarto capítulo comporta a questão da Apresentação e Análise dados, Interpretação e Discussão dos Resultados obtidos no estudo. No quinto capítulo, foram feitas as conclusões e as devidas recomendações com base nos estudos realizados e por fim, no sexto capítulo as Referências Bibliográficas.

1.1. Formulação do Problema

Após algumas observações e colecta de dados, verificou-se um alto índice de blocos maiores após o desmonte, que são causados pelos parâmetros do plano de fogo empregue pela pedreira que não são adequados para fragmentação adequada da rocha. O mau dimensionamento dos parâmetros variáveis do plano de fogo, geram matações e os mesmos condicionam a produtividade dos equipamentos envolvidos nas operações de carregamento, transporte e britagem primária causando elevados tempos ciclo, e/ou ociosidade dos mesmos, aumentam o consumo de energia nas etapas de processamento, aumento de vibrações e ruídos na vizinhança e insegurança e desgaste dos equipamentos no momento de manuseio do material grosseiro. Nesta perspectiva levanta-se a seguinte questão:

Como otimizar os parâmetros do plano de fogo com auxílio do software O-Pitblast no desmonte de rocha gnaisse para o melhoramento da qualidade de fragmentação na pedreira de Mafilipa?

1.2. Justificativa

A optimização dos parâmetros variáveis do plano de fogo deve receber uma especial atenção porque uma fragmentação de qualidade no desmonte de rocha com explosivo é dependente essencialmente da optimização dos parâmetros variáveis do plano de fogo. Com a geração de uma fragmentação de qualidade ocasionada ao correcto dimensionamento das variáveis do plano de fogo possibilita a pedreira a execução das operações de carga e transporte do material fragmentado ocorram sem sobressaltos causados pela fragmentação da rocha, evita o engaiolamento de blocos no britador primário, menor consumo de energia nas etapas de processamento, redução do tempo de manutenção dos equipamentos, aumento da produtividade dos equipamentos e da planta de processamento que consequentemente vai aumentar a produção da pedreira.

No concerne a população que habita a área circunvizinha a Pedreira de Mafilipa se beneficiará com minimização dos impactos ambientais gerados pelo desmonte de rocha com explosivo tais como: vibração, ruído e ultralancamentos.

Com o avanço da tecnologia e consequentemente das ferramentas de optimização das operações mineiras se torna de grande necessidade e relevância que as empresas mineiras e os seus profissionais deve ter conhecimento e domínio dos *softwares* de design e optimização do

desmante de rocha por meio de explosivo para tomada de decisões acertadas na operação de desmante.

O *O-Pitblast* é uma ferramenta bastante poderosa e permite soluções para design e optimização do desmante para pedreiras mineiras. Esse *software* permite aos profissionais que trabalham com desmante de rocha por meio de explosivo as seguintes vantagens: previsão da fragmentação com os parâmetros do plano de fogo empregues, adaptação as normas legais de gestão dos impactos ambientais, controlo de toda operação do desmante, optimização dos parâmetros variáveis do plano de fogo e comunicação directa com Engenheiros/Técnicos especializados. Nesse sentido autor propõe desenvolver a seguinte temática de como optimizar os parâmetros variáveis do plano de fogo no desmante com explosivo para obtenção dos melhores resultados na fragmentação de rocha.

Justifica-se ainda o compilar deste trabalho de conclusão do curso:

- i. A disponibilidade na literatura acerca da optimização da fragmentação no desmante de rocha por meio de explosivo (mais precisamente o uso do *software O-Pitblast*);
- ii. Dar a conhecer as vantagens do uso do *software O-Pitblast* no politécnico e nas pedreiras mineiras de pequeno e médio porte no país.

1.3. Objectivos

1.3.1. Geral

- ✓ Optimizar os parâmetros do plano de fogo com uso do *software O-Pitblast* no desmante da rocha gnaisse para o melhoramento da qualidade de fragmentação.

1.3.2. Específicos

- ✓ Identificar os factores que influenciam o mau dimensionamento dos parâmetros do plano de fogo empregues no desmante na pedreira de Mafilipa;
- ✓ Elaborar duas optimizações com uso do *software O-Pitblast* para os desmontes estudados;
- ✓ Analisar as curvas de fragmentação obtidas com os parâmetros do plano de fogo empregue na pedreira com os parâmetros do plano de fogo simulados no *software O-Pitblast*;
- ✓ Apresentar a optimização com parâmetros do plano de fogo que prevê melhor distribuição da fragmentação.

1.4. Hipóteses

A execução de um desmante otimizado requer que as operações envolvidas sejam analisadas, tendo como base os parâmetros técnicos, económicos e ambientais já padronizados na indústria mineira e pelos Estados. A ocorrência de blocos maiores após o desmante na pedreira está directamente ligada na deficiência na análise e avaliação técnica qualificada dos parâmetros controláveis no plano de fogo. Dessa maneira o trabalho levanta as seguintes hipóteses:

- ✓ Analisar o desempenho dos parâmetros do plano de fogo empregues na pedreira, visando otimizar a sua operacionalidade e o alcance das metas planeadas no desmante;
- ✓ Estabelecer variáveis (geométricas, físico-químicas e temporais) óptimas no desmante de rocha para uma fragmentação adequada;
- ✓ A aplicação das novas ferramentas tecnológicas para optimização dos parâmetros variáveis do plano de fogo tais como (o *software O-Pitblast*) podem ser grande valia para a obtenção de uma fragmentação adequada.

1.5. Caracterização físico-geográfica da área de estudo

Tete é uma província localizada na região central de Moçambique, a sua capital é a cidade do mesmo nome localizada a cerca de 1570 km a norte da cidade de Maputo, a capital do país. Com uma área de 98.417 km², esta província encontra-se dividida em 15 distritos nomeadamente: Angónia, Cahora Bassa, Changara, Chifunde, Chiuta, Dôa, Macanga, Magoé, Marara, Marávia, Moatize, Mutara, Tete Tsangano, Zumbo (Atlas Geografico Vol.1, 1980).

Desta forma a província de Tete situa-se no topo da região centro de Moçambique, sendo a única em contacto fronteiriço com 3 países: A nordeste com o Malawi; A noroeste com a Zâmbia; A sudoeste com o Zimbabwe. Por outro lado, a província faz ligação com outras províncias do país, entre as quais: Zambézia a este, Manica e Sofala a sul e entre as coordenadas de 14° 00' S e 17° 42' 01" S e 30° 13' E e 35° 20' 07" E (Atlas Geografico Vol.1, 1980).

A área em estudo, localiza-se no bairro Mpádué na unidade de Mafilipa a sul da cidade de Tete, cerca de 6-8 km ao longo da EN 7. A área do projecto ocupa uma extensão de 40 hectares e a mesma é delimitada por um rectângulo de vértices com as seguintes coordenadas geográficas (Atlas Geografico Vol.1, 1980).

Tabela 1: Coordenadas da área de estudo

VÉRTICES	LATITUDE	LONGITUDE	ÁREA
1	16°14'45''S	33°33'45''E	40 ha
2	16°14'45''S	33°34'00''E	
3	16°15'15''S	33°34'00''E	
04	16°15'15''S	33°33'45''E	

Fonte: (Sintrapel Nova Era Lda, 2021)

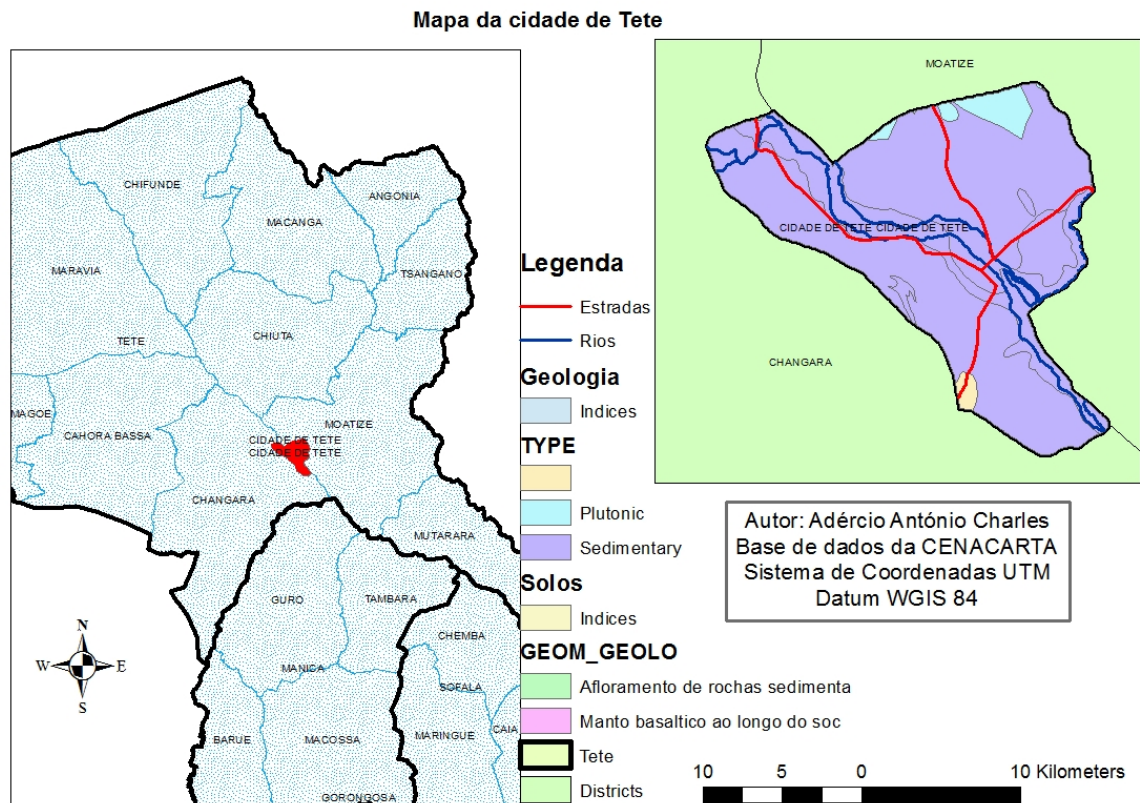


Figura 1: Mapa de localização geográfica da área de estudo

Fonte: Autor

1.6. Enquadramento geológico

A área de estudo foi acompanhada de muitos fenómenos geológicos, sendo que na primeira fase houve o metamorfismo, onde sedimentos pré-existentes foram metamorfizados e deram origem a gnaisses (pseu gneisses) no pré-câmbrico inferior. Após o metamorfismo a área foi abalada no final do pré-câmbrico inferior por intrusões e movimentos tectónicos que deram origem as fracturas que foram preenchidas por lavas básicas formando rochas do complexo gabro anortositico de Tete datadas desde o pré-câmbrico superior (GTK Consortium, 2006). A bacia de Tete separa-se da bacia de Moatize pelo monte M'pande geologicamente constituída por rochas do complexo gabro anortositico de Tete da idade pré-câmblica.

A região de estudo tem diferentes estruturas geológicas a saber: falhas, dobras, diques e em alguns casos as falhas são preenchidas por soluções quentes (magma) normalmente as rochas do Karoo localizam-se nas depressões e o complexo gabro anortositico de Tete (de idade Pré-câmbrico) nas regiões elevadas (GTK Consortium, 2006).

1.6.1. Geologia local

De acordo com (GTK Consortium, 2006), a área de ocorrem vários tipos genéticos de rochas, com idades que vão desde o Arcaico ao Quaternário. Estas rochas dividem-se entre um soco cristalino com idade arcaica-câmbrica e rochas com idade fanerozóica, geralmente sedimentos sub-horizontais continentais a marinhos e rochas sub-vulcânicas associadas, em geral depositadas posteriormente ao Ciclo Orogénico Pan-Africano. A cobertura fanerozóica divide-se em Supergrupo do Karoo e sequências depositadas durante o desenvolvimento do Sistema do Rifte da África Oriental.

Ainda (GTK Consortium, 2006) constituem o soco cristalino dos vários tipos de rochas, como paragneisses supracrustais metamorfizados, granulites e migmatitos, ortogneisses e rochas ígneas que, do ponto de vista geodinâmico, pertencem aos terrenos do Gondwana Este, terreno do Gondwana Oeste e Terreno do Gondwana Sul, que colidiram e se amalgamaram durante o Ciclo Orogénico Pan-Africano.

1.6.2. Estratigrafia

De acordo (GTK Consortium, 2006) comparando a divisão dos andares do sistema do Karoo de África do Sul, DWYCA, ECCA, BAUFORT e STORMBEG somente os dois primeiros é que constituem o Karoo Inferior de Graben da Cidade de Tete que se estende até a bacia de Moatize. Neste Graben que sobrepõe ao Complexo Gabro-Anortositico de Tete, quer por falhas, quer por simples discordâncias, aparecem as seguintes séries do Karoo Inferior:

- ✓ Serei Tilitica, é considerada como do Karoo composta por Tilitos e depósitos fluvio-glaciares;
- ✓ Série Produtiva possui camadas de Carvão intercaladas que apresentam depósitos de Xistos grossos e Carbonosos;
- ✓ Série Superior de Matinde é constituída por uma espessa camada de Grés onde intercalam pequenos leitos de Carvão.

Os estudos anteriores realizados por confirmaram que a Região de Estudo é pertencente a grande bacia do Zambeze, abrangem as rochas Pré-câmbricas pertencentes ao Complexo

Gabro-Anortositico de Tete, que geralmente se localizam nas zonas elevadas, e as rochas sedimentares do Karroo que se localizam nas zonas baixas (GTK Consortium, 2006).

1.6.3. Tectónica

O esboço Tectónico da região de Tete mostra que, durante um longo período de tempo ocorreram movimentos de diferentes magnitudes, tais como: movimentos tectónicos provocando o enrugamento orogénico e pelo levantamento epirogénico em direcção vertical com respectivos estratos de geocliniais; portanto, movimentos provocaram a configuração de vários acidentes estruturais formando assim os depósitos de karroo e nas rochas de complexo de base, vários sistemas de dobramento e falhamentos (falhas). Os fenómenos tectónicos que afectaram várias regiões de complexo de base e dos sedimentos do karroo na bacia do Zambeze resultaram em numerosas fracturações e instalações de rochas lávicas que caracterizam o final do Karroo (GTK Consortium, 2006) .

1.6.4. Situação mineira

A exploração da rocha gnaiesses em Mafilipa começou com a pedreira Thriveni Minerals Mozambique Lda. em 2008 que pertencia a um engenheiro de nacionalidade Italiana. Nesse momento esta pedreira prestava serviços de aluguer de maquinaria e venda de brita a outras pedreiras mineiras que têm necessidade do produto que é gerado a partir do material rochoso (Pó, balastro, brita), para a construção de obras na área civil e de grande empreendimento como, pontes, barragens, fabrico de cimento bem como betão armado, para edificação de casas e pavimentação das vias de acesso de modo a facilitar a circulação dos recursos materiais, humanos e também fornecia a sua brita a pedreiras como CFM para construção da linha feira e a partir de Dezembro de 2014, a pedreira vendeu todos os seus recursos à pedreira a Sintrapel Nova Era a qual permanece até hoje.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Desmonte de rocha com explosivo

Segundo (Hustrulid., Kuchta., & Martin, 2013) é maneira mais económica de fragmentar a rocha e, quando feita de maneira eficaz, causa uma maior redução de consumo de energia nas fases posteriores de fragmentação).

Importa embasar o salientado acima pois para além de ser mais rápido e mais produtivo quando bem dimensionado este tipo de desmonte garante uma pré fragmentação da rocha o que poupará esforços nas etapas unitárias de beneficiamento.

O desmonte com recursos de explosivos é utilizado para o rompimento da rocha a fim de se quebrar o minério ou estéril e ainda para se criar espaços vazios. Na mineração o objectivo é fazer com que a rocha se quebre a uma granulometria necessária para se extrair uma maior quantidade de bens minerais com o menor custo possível (Bhandari, 1997).

2.2. Explosivos

Define-se como um material que, mediante uma fonte de ignição, é capaz de produzir uma detonação, ou seja, uma libertação de energia de forma rápida, num intervalo de tempo limitado, provocando uma brusca expansão do volume da rocha. A detonação dá origem a vários fenómenos físicos, nomeadamente: geração de onda aérea, onda sonora, onda sísmica e projecção de material (Sanchidrian. & Muniz, 2000).

Os explosivos são associados de combustível e agentes de oxidação que quando são iniciados uma enorme onda de choque comungada de gases a alta temperatura e pressão é criada capaz de demolir detonar ou ainda deflagrar um dado sólido material.

De acordo com (Geraldi, 2011), explosivos são substâncias, ou mistura de substâncias químicas em qualquer estado físico, que tem a propriedade de, ao ser iniciado por um agente externo, sofrer transformações químicas violentas e rápidas, transformando-se total ou parcialmente em gases, que resultam na liberação de grandes quantidades de energia em reduzido espaço de tempo.

2.2.1. Propriedades dos explosivos

De acordo com o (Atlas Power Co, 1987), os explosivos possuem diferentes propriedades que são importantes para cada situação específica nos quais eles são utilizados. A boa

fragmentação da rocha é resultado de vários factores, porém o mais importante talvez seja o tipo de explosivo utilizado na detonação.

Segundo (Jimeno, 1987) as principais propriedades dos explosivos são:

- ✓ Força e Energia;
- ✓ Velocidade de detonação;
- ✓ Densidade;
- ✓ Pressão de detonação;
- ✓ Estabilidade;
- ✓ Resistência à água;
- ✓ Sensibilidade;
- ✓ Transmissão da detonação;
- ✓ Dessensibilização;
- ✓ Resistência a baixa temperaturas;
- ✓ Fumos.

2.2.2. Tipos de explosivos

Existem diferentes tipos de explosivo que se podem classificar quanto ao seu grau de fragmentação de materiais dos quais primário também chamados de iniciadores, secundários também chamados de altos e explosivos baixo.

2.2.2.1. ANFO

Segundo (Ricardo. & Catalani, 1977), revelam que o *ANFO* é a mistura entre nitrato de amónio e óleo mineral. Esse tipo de explosivo apresenta baixa resistência à água, baixa densidade e baixa velocidade de detonação. Pode ser utilizado para rochas brandas a médias e ainda pode ser melhor aproveitado como carga de coluna em furos que possuem outro tipo de explosivo na carga de fundo.

De acordo com (Silva, 2009) postula que as maiores vantagens do *ANFO* são:

- ✓ Ocupa inteiramente o volume do furo;
- ✓ Grande insensibilidade ao choque;
- ✓ Gera poucos gases tóxicos;
- ✓ Redução do preço global do explosivo.

2.2.2.2. Emulsão bombeável

São explosivos que preenchem totalmente o volume do furo, resultando em uma melhor distribuição e transmissão da energia para a rocha, eliminando os espaços anulares tomadores de energia. A facilidade na aplicação otimiza o ciclo de carregamento e reduz os custos com mão-de-obra. Sua aplicação é feita por unidades móveis de bombeamento, camiões especiais (Manual Britanite, 2010).

2.3. Acessórios de detonação

É importante que a detonação inicie correctamente, para isso, é indispensável conhecer os métodos para iniciar a reacção 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 correctamente, gera uma velocidade inferior ao da detonação, causando assim uma deflagração ou até mesmo a interrupção da reacção, nesses casos, a eficiência do explosivo será menor do que a projectada (Alonso., Gomez., & Herbert, 2013).

2.3.1. Detonadores não-eléctricos

O princípio de ignição destes detonadores baseia-se numa onda de choque com baixa velocidade de detonação que atravessa um tubo de transmissão. O tubo, feito de plástico, tem um diâmetro de 3mm e possui uma película de material reactivo (cerca de 15 gramas) na sua face interior, que quando iniciado, origina uma onda de detonação de baixa energia a uma velocidade de 2100 m/s (Ricardo. & Catalani, 2007).

Têm como grande vantagem, o facto de poderem ser utilizadas combinações de tempos ilimitadas, e podem ser utilizados com todo o tipo de explosivos, para além de que não apresentam risco de autodetonação na presença de fontes de energia eléctrica. Estes detonadores são ligados entre si através de conectores, alguns deles com soluções para incorporação do tubo de choque e até mesmo de cordão detonante.

2.3.2. 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).

2.3.3. Reforçadores (“Boosters”)

Os iniciadores devem ter energia suficiente para iniciar a reacção de detonação na carga principal, e sustenta-lo até que o explosivo com iniciador produza energia para suportar a reacção 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).

2.3.4. Retardos

De acordo com o (Atlas Power Co, 1987) explica que os retardos são peças que permitem a divisão da detonação total em partes menores, as quais são detonados em tempos específicos, de acordo com o tempo de retardo estabelecido. As vantagens de se dividir uma detonação em partes menores estão no aumento da fragmentação, redução das vibrações e do ultralancamentos.

2.4. Plano de fogo

Desde a década de 50, desenvolveu-se uma série de equações e métodos para determinação das variáveis geométricas do plano de fogo, tais como: afastamento, espaçamento, subfuração, altura da perfuração, tampão e etc. Essas equações utilizam um ou vários grupos de parâmetros: diâmetro da perfuração, características dos explosivos, características dos maciços rochosos entre outros (Silva, 2009).

Ainda de acordo com (Silva, 2009), em razão da grande heterogeneidade das rochas, o cálculo do plano de fogo deve-se pautar em um processo contínuo de ensaios e análises, constituindo o ajuste por tentativa.

Importa referir que as equações e métodos para determinação das variáveis geométricas do plano de fogo foram constantemente analisados com intuito de garantir a eficácia durante as actividades de desmonte por explosivos. Nisso, há sempre a necessidade de seres analisados evidenciados e considerados durante o plano de fogo pois o bom resultado da fragmentação depende taxativamente dessas variáveis.

Segundo (Silva, 2014) é necessário atender às características do maciço rochoso, do explosivo, do produto pretendido e aos parâmetros de perfuração, para dimensionar uma pega de fogo eficaz. Pretende-se evitar repés e grandes blocos, que obrigam a taqueio, facilitar a carga, o transporte, a britagem e promover o decréscimo dos custos específicos.

2.5. Parâmetros não Controláveis no Plano de Fogo

De acordo com (Reis, 2016) parâmetros não controláveis, são elementos de grande importância na execução do desmonte, porém, são factores que não podemos modificar. A presença de água, a geologia local e o mecanismo de ruptura da rocha, são de facto parâmetros fixos. É habitual que a pedreira 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 planeamento do plano de fogo, sejam considerados parâmetros não controláveis. Entre os factores não controláveis no plano de fogo, encontra-se os seguintes:

- ✓ Densidade da rocha;
- ✓ Resistência (dureza da rocha);
- ✓ Velocidade sísmica do maciço rochoso.

2.6. Parâmetros controláveis do plano de fogo

Segundo (Silva, 2014), as principais variáveis geométricas, conforme figura 2, em um plano de fogo são:

- ✓ Afastamento (A);
- ✓ Espaçamento (E);
- ✓ Malha de Perfuração (MP);
- ✓ Subperfuração (S);
- ✓ Profundidade do furo (Hf);
- ✓ Tampão (T);
- ✓ Ângulo de inclinação da bancada (α);
- ✓ Altura da bancada (Hb);
- ✓ Carga de Coluna (Cc);
- ✓ Carga de Fundo (Cf);
- ✓ Diâmetro do furo (DF);

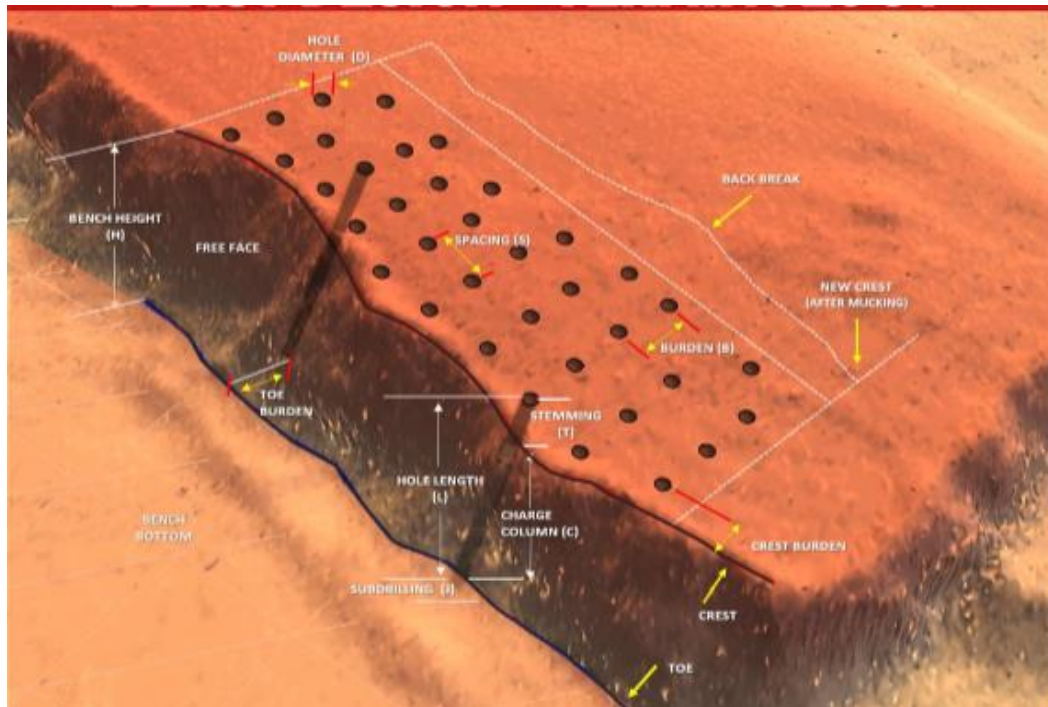


Figura 2: Principais variáveis do plano de fogo

Fonte: (O-Pitblast, 2017)

2.6.1. Afastamento (A)

O afastamento é a distância expressa em metros entre a frente da bancada (frente livre) e a primeira linha do fogo (linha de furos) a detonar. Quando está previsto duas ou mais linhas de furos a detonar no mesmo plano de fogo, o mesmo afastamento deverá ser mantido entre elas (Geraldi, 2011).

Para (Silva, 2009) o afastamento é a menor distância que vai do furo à face livre da bancada ou a menor distância de uma linha de furos a outra. De todas as dimensões do plano de fogo essa é a mais crítica. É aconselhável a utilização da Equação 1.

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

2.6.2. Espaçamento (E)

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

$$E = 1,3 \times A \quad (2)$$

2.6.3. Malha de Perfuração (MP)

Malha de perfuração leva em consideração o afastamento e o espaçamento, o que tem ligação directa 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).

Segundo (Silva, 2009), a geometria das malhas de perfuração pode ser quadrada, rectangular ou estagiada. Dentro da classificação de malha estagiada, existe ainda a malha triângulo equilátero e a malha alongada. O tipo de malha estagiada também é popularmente conhecido como “pé de galinha”.

2.6.4. Inclinação dos furos (α)

Normalmente os furos para o desmonte de rocha a céu aberto serão verticais ou inclinados, de forma a se conservar a estabilidade do talude rochoso remanescente após a detonação. Os furos mais inclinados contribuem para um melhor arranque da rocha, pois diminui o engastamento da mesma no pé da bancada, reduzindo a formação de repés.

Segundo (Geraldi, 2011), o ângulo da inclinação não deve exceder 20° em relação a vertical. Quanto maior a inclinação do furo, menor será a velocidade de perfuração e maiores os riscos de desvios e acidentes com ferramentas de perfuração.

2.6.5. Altura da bancada (H_b)

Segundo (Quaglio, 2003), bancadas muito altas devem ser evitadas devido a imprecisão da perfuração, à velocidade de perfuração efectiva que cai com o aumento da profundidade, há um aumento da altura da pilha de material e a um ligeiro aumento na razão de carga.

A altura da bancada está directamente relacionada ao número de bancadas, assim como à demanda de produção e aos equipamentos disponíveis envolvidos no processo de desmonte e carregamento.

2.6.6. Subperfuração (S)

Subperfuração é a distância perfurada abaixo do nível que se projecta executar o desmonte, com o objectivo 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).

$$S = 0,3 \times A \quad (3)$$

2.6.7. Profundidade do furo (Hf)

Segundo (Silva, 2009) profundidade do furo é o comprimento total perfurado que, devido a inclinação e a subperfuração (S), será maior que a altura da bancada. O comprimento do furo aumenta com a inclinação, entretanto, a subperfuração (S) diminui com esta. Para calcular (Hf) utiliza-se as seguintes expressões:

Bancadas inclinadas

$$H_f = \frac{H_b}{\cos \alpha} + \left(1 - \frac{\alpha}{100}\right) \times S \quad (4)$$

Bancadas verticais

$$H_f = H_b + S \quad (5)$$

2.6.8. Tampão (T)

Para (Silva, 2011) o tamponamento deve ser feito levando em consideração o afastamento sugerindo que se utilize um valor de 70% a 100% do afastamento para se considerar a altura do tampão, porém ele afirma que se acaso for utilizado um tamponamento menor que o afastamento aumenta o risco de ultra lançamento de materiais na superfície da área e se utilizar um tamponamento maior que o afastamento poderá gerar mais matacões, apesar de diminuir o risco de ultra lançamento, com isso é de se concluir que a melhor escolha seria de uma altura do tampão igual ou o mais próximo possível do tamanho utilizado no afastamento.

$$T = 0,7 \times A \quad (6)$$

2.6.9. Diâmetro de perfuração (DF)

Segundo (Ricardo. & Catalani, 1990), o diâmetro de perfuração é determinado em função do equipamento previsto para executar as perfurações. Esse equipamento, e o diâmetro do furo, devem estar coerentes com a altura da bancada e com os demais equipamentos de carregamento e beneficiamento da rocha detonada. Quanto maior o diâmetro do furo, maior é o consumo de material explosivo para preenchimento dos furos e menores são os fragmentos de rocha resultantes da detonação.

Tabela 2: Diâmetro de perfuração dos equipamentos

Tipo de equipamento	Profundidade / Altura bancada	Diâmetro de perfuração
Perfuratriz manual	Até 4 m	1 ¼"
Bencher	Até 6 m	1 ¼ "
Wagon-drill	3 - 9 m	1 ½" - 2 ½"
Perfuratriz sobre trator, coroa normal	6 - 18 m	2" - 5"
Perfuratriz sobre trator, furo-baixo	18 - 30 m	3 ½" - 7"
Conjunto de perfuração	30 - 60 m	4" - 10" (ou maior)

Fonte: (Ricardo e Catalani, 2007)

2.6.10. Volumes de Escavação (VF e VT)

O volume de rocha a ser desmontado por furo é determinado pela área da malha de perfuração (MP) multiplicada pela altura da bancada (Geraldi, 2011).

$$VF = MP \times H_b \quad (7)$$

O volume total de escavação será obtido multiplicando-se o valor de VF pelo número de furos desta detonação.

$$VT = VF \times n \text{ (número de furos)} \quad (8)$$

2.6.11. Razão linear de carregamento

Segundo (Silva, 2009), a razão linear de carregamento é calculada pela seguinte expressão:

$$RL = \frac{\pi \times DF^2}{4000} \times \rho_e \quad (9)$$

2.6.12. Carga de fundo (Cf)

A Carga de fundo trata-se de uma maior concentração de explosivo necessária na parte inferior da perfuração, onde a rocha é mais presa (Ricardo. & Catalani, 2007). Alguns autores sugerem que a altura da carga de fundo deve ser um valor entre 30 a 40 % da carga de explosivos, entretanto há uma tendência em reduzi-la, dependendo dos resultados dos desmontes, a fim de reduzir custos com explosivos (Silva, 2009).

$$H_{cf} = (H_f - T) \times 0,3 \quad (10)$$

$$C_f = H_{cf} \times RL \quad (11)$$

2.6.13. Carga de coluna (Cc)

A carga de coluna é a carga de explosivo situada imediatamente acima da carga de fundo, não necessita ser tão concentrada como a carga de fundo, uma vez que a rocha não é tão presa quanto à rocha no fundo da perfuração. A concentração da carga de coluna é de 40 à 50 % da concentração da carga de fundo (Silva, 2009).

$$H_{cc} = H_c - H_{cf} \quad (12)$$

$$C_c = H_{cc} \times RL \quad (13)$$

2.6.14. Razão de Carregamento (RC)

A razão de carregamento é a quantidade de explosivos necessária pra o desmonte de 1 m³ de rocha ou 1 tonelada de minério (Herrmann, 1968).

A princípio quanto maior for a razão de carga:

- ✓ Maior fragmentação;
- ✓ Maior projecção da pilha de rocha detonada que se formará na frente da bancada;
- ✓ Menores problemas de repés.

$$RC = \frac{C_f + C_c}{V} = \frac{CT}{V} \quad (14)$$

2.6.15. Perfuração específica (PE)

Segundo (Silva, 2014), a perfuração específica é a relação entre a quantidade de metros perfurados e o volume de rocha por furo.

$$PE = \frac{H_f}{V_F} \quad (15)$$

2.7. Fragmentação da rocha

Devido a preocupações com custos energéticos, uma maior atenção é dada a optimização do sistema de fragmentação mina-usina. No passado e ainda hoje, subsistemas de fragmentação muitas vezes são tratados separadamente, tendo como única semelhança a britagem primária. A energia é elemento fundamental em todos os aspectos da mineração, sobretudo com relação à fragmentação. A energia requerida para redução de tamanho é muito dependente do tamanho que se encontra a partícula. Já na década de 60, levantava-se a questão se a aplicação

de explosivo adicional no desmonte (energia química) poderia resultar em uma maior redução de energia nas fases posteriores de fragmentação (Hustrulid., Kuchta., & Martin, 2013).

Apesar dos custos com desmonte primário ser reduzido quando se gera uma fragmentação grosseira, em uma pobre fragmentação conduz para as seguintes situações (Clerici. & Mincini, 1974):

- a) Aumento do desmonte secundário;
- b) Diminuição da taxa de enchimento do balde de carga;
- c) Aumento da dificuldade no transporte;
- d) Aumento do consumo de energia na britagem e na moagem;
- e) Aumento de vibrações e ruídos na vizinhança;
- f) Situação de insegurança e desgaste dos equipamentos no momento de manuseio do material grosseiro;
- g) Baixas performances na britagem e na moagem;

Actualmente, as mineradoras estão dando maior atenção as possíveis compensações e considerações sobre o sistema de fragmentação mina-usina estão sendo incluídas nas avaliações de projecto básico de desmonte. Nesse contexto, tanto engenheiros de minas quanto pedreiras de mineração devem ter um sólido conhecimento da teoria e da prática dos desmontes, independentemente se o projecto e sua implementação é realizado pela mineradora ou por pedreira terceirizada (Hustrulid., Kuchta., & Martin, 2013).

O objectivo 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. Actualmente 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 factores, como (Leite, 2013):

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

É possível chegar a uma granulometria desejável através de cálculos empíricos, que ajustam o plano de fogo de acordo com o tamanho desejado do material. De acordo com (Reis, 2016) entram em consenso na utilização de um modelo, conhecido mundialmente por KuzRam. Foram estudos efectuados por Kuznetsov, que desenvolveu um relacionamento entre os

parâmetros do plano de fogo, tais com: a geometria, razão de carga, energia do explosivo, etc. com a granulometria gerada, resultando em uma estimativa da granulometria gerada após a execução do desmonte, Rosin-Rammler, que associa a distribuição granulometria de probabilidade continua pelo método de Weibull e a equação da uniformidade.

2.7.1. Modelo de previsão de fragmentação Kuz-Ram

Neste modelo as propriedades das rochas, as propriedades dos explosivos e as variáveis geométricas do plano de fogo são combinadas usando cinco equações que compõem o modelo de fragmentação Kuz-Ram (Lilly, 1998):

1. Teoria de quebra (Kuznetsov, 1973): a quantidade de quebra que ocorre com uma conhecida quantidade de energia de um explosivo que pode ser estimada usando a equação de Kuznetsov.

$$X_{50} = RF \times (K)^{-0,8} \times Q^{0,167} \times \left(\frac{115}{E_r}\right)^{\frac{19}{20}} \quad (16)$$

2. Teoria da distribuição do tamanho das partículas de Rosin-Rammler: a distribuição do tamanho das partículas da rocha fragmentada pode ser determinada a partir do tamanho médio, se o modelo de quebra é conhecido. É uma equação bastante utilizada na mineração, tanto no processamento de minério quanto na definição de peneiras. Utilizando o método de Weibull foi possível se chegar a uma fórmula que estipula a percentagem de material que passara em uma certa peneira.

$$P = 100 \times \left[1 - e^{-0,693 \times \left(\frac{x}{x_{50}}\right)^n} \right] \quad (17)$$

3. Teoria de detonação do explosivo (Tidman): a quantidade de energia liberada pelo explosivo é calculada usando a equação de Tidman. A equação a seguir foi desenvolvida por Tidman para se determinar a energia do explosivo:

$$E_r = \left(\frac{VOD_e}{VOD_n}\right)^2 \times RWS \quad (18)$$

5. O factor de rocha (Rock Factor) foi, primeiramente, desenvolvido por Lilly em 1986 e em 1987 modificada por Cunningham. (Teixeira, 2010), Morais e (Gripp. & Morais, 2004) dizem que esse factor é levantado através de condições geomecânicas, que consideram a direcção e mergulho das descontinuidades em relação a frente livre a ser desmontada e o tipo de rocha.

Esse factor é utilizado para o ajuste da média do tamanho dos fragmentos e é dada pela seguinte fórmula:

$$A = 0,06 \times (RMD + JF + RD + HF) \quad (19)$$

A tabela 3 apresenta a classificação dos parâmetros geomecânicos para a obtenção do factor de rocha, onde se deve seleccionar os aspectos do maciço para se obter os índices para o cálculo do referido factor.

Tabela 3: Classificação geomecânica para obtenção do factor de rocha

Símbolo	Descrição	Classificação	Índice
RDM	Descrição do maciço rochoso	Friável Fraturado Maciço	10 JF 50
JF	Maciço fraturado	JPS+JPA	
JPS	Espaçamento das descontinuidades (m)	<0,10m 0,10 a MS MS a DP	10 20 50
MS	Oversize da britagem primária (m)		
DP	Parâmetro de malha de perfuração (m)		
JPA	Direcção de mergulho em relação a face livre	Horizontal Mergulhando para fora da face livre Direcção perpendicular da face livre Mergulhando para dentro da face livre	10 20 30 40
RDI	Influência da densidade Densidade da rocha intacta (m ³)	RDI=25*δ-50	
HF	Se E <50 Gpa Se E > 50 Gpa	HF=E/3 HF=UCS/5	
E	Módulo de Young (Gpa)		
UCS	Resistência de compressão uniaxial (Mpa)		

Fonte: (Morais e Gripp, 2004)

5. Teoria da uniformidade foi elaborada através dos trabalhos de campo realizados por que correlacionou todos os parâmetros da geometria de um plano de fogo (Gripp. & Moraes, 2004).

De acordo com (Jimeno, 2003) o valor varia entre 0,8 e 2,2, onde valores elevados implicam em uma fragmentação mais uniforme e valores baixos indicando quantidade significativas de material grosseiro e finos. Chegando a seguinte equação:

$$n = \left[2,2 - 14 \times \left(\frac{A}{D} \right) \right] \times \left[\frac{(1+E/A)}{2} \right]^{0,5} \times \left\{ \left(1 - \frac{W}{E} \right) \times \left[abs \times \frac{(BCL-CCL)}{L} + 1 \right]^{0,1} \times \left(\frac{L}{H} \right) \right\} \quad (20)$$

Com o método Kuz-Ram é possível prever a distribuição de tamanho das partículas. A parte final do método e a geração da curva de distribuição passa pela equação (20), Rosin-Rammler. Os valores da malha requerida devem ser postos de maneira a abranger a maior quantidade de valores sem que tornasse redundante. A tabela 3, apresenta o tamanho das malhas propostas pelo autor e os respectivos percentuais passantes apenas a critério demonstrativo.

Tabela 4: Tamanho da malha e percentual de material passante

Tamanho da abertura (mm)	Percentual passante (%)
1	0,110054863
2	0,440125868
3	0,988389124
5	2,724318847
7	5,273403932
9	8,570503318
12	14,73344079
15	22,0544056
18	30,15734005
20	35,80305892
25	49,98485392
28	58,07587544
20	63,14114039
35	74,30632753
40	83,05870391
45	89,43434293
50	93,76739101
60	98,16487193
70	99,56758651
80	99,91846627
90	99,98769863
100	99,99851501
120	99,99998892
140	99,99999997
160	100

Fonte: (Melo Jairo, 2015)

A partir dos dados da tabela 4, é possível a confecção de um gráfico que mostre a distribuição das partículas de forma geral. A figura 3 representa a curva de distribuição correspondente a tabela 4.



Figura 3: Gráfico da curva granulométrica prevista pelo modelo Kuz-Ram

Fonte: (Reis, 2016)

2.8. Otimização

A otimização no sentido geral, tem em vista um processo com objectivos satisfatórios, como útil, efectivo ou perfeito. No contexto matemático, condiz com algo referente a obtenção de valor óptimo 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 N. , 2013).

2.8.1. Softwares de otimização do desmonte de rocha com explosivo

2.8.1.1. WipFrag

É um ¹software para análise granulométrica desenvolvida em 1986 na Universidade de Waterloo, Canadá, a *WipFrag* foi uma das primeiras ferramentas para se analisar o tamanho de partículas através de imagens. Essa ferramenta colabora para a otimização do desmonte, tendo em vista a análise mais rápida da fragmentação e o comparativo rápido com dados anteriores, tendo um maior controle das variações. Uma das melhorias do *software* foi a disponibilidade de execução da ferramenta em sistemas iOS, analisando de forma rápida as

¹ *Software*: programa de computador que permite ao usuário executar uma série de tarefas específicas em diversas áreas de actividade.

imagens tiradas através de iPad ou iPhone ou baixada de outro dispositivo fotográfico (WipWare, 2016).

2.8.1.2. O-Pitblast

É uma plataforma de design de plano de fogo, possuindo vastas ferramentas para melhor dimensiona-lo. Possui ferramentas que proporcionam a manipulação de informações topográficas, informações detalhadas sobre o furo, com possibilidade de editar, criar e gerenciar suas informações, controlo sobre a sequência de explosão, amarração, histograma e direcção do desmonte, previsão da fragmentação após o desmonte, dando a possibilidade de sua optimização, gerador de lei de atenuação, alertando sobre vibrações próximo de estruturas e zonas de desmontes críticos e o mais importante, optimização do plano de fogo, possibilitando a redução dos custos de desmonte, como previsões de expansão de padrões e aplicação de ajustes dos parâmetros geométricos do plano de fogo (O-Pitblast, 2017).

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 controlo de *stock* de explosivos e acessórios, planeamento de operações para desmonte de rochas, armazenamento das operações e relatórios com os indicativos das actividades da pedreira (O-Pitblast, 2017).

O *software* O-Pitblast tem como objectivos:

- ✓ Controlar as operações de desmonte;
- ✓ Optimização do processo global;
- ✓ Redução do custo das operações;
- ✓ Adaptação às normativas legais de gestão de explosivos;
- ✓ Acesso aos serviços técnicos necessários para optimizar a produção através de uma plataforma digital única e inovadora;
- ✓ Comunicação total com dispositivos;
- ✓ Comunicação directa com Engenheiros/Técnicos especializados;
- ✓ Controlo de rastreabilidade de explosivos/acessório.

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, 2017).

3. METODOLOGIA

Essa pesquisa tem como objectivo metodológico a realização de uma actualização dos conhecimentos e técnicas amplamente aplicados para optimização dos parâmetros do plano de fogo, aplicando uma nova ferramenta para alcançar os objectivos do trabalho. Esta pesquisa é de carácter quantitativo e qualitativo porque busca uma validação das hipóteses levantadas, com uma análise estatística por meio de quantificação dos dados obtidos.

A metodologia desse trabalho compreende quatro fases:

1. Na primeira fase de foi realizada uma pesquisa de campo na pedreira de Mafilipa situada no bairro Mpádué na unidade de Mafilipa a Sul da Cidade de Tete;
2. A segunda a colecta dos dados para a realização da pesquisa e um levantamento bibliográfico da temática em pesquisa;
3. Na terceira fase foi realizada uma análise da fragmentação obtida, através do *software WipFrag* para aferir a eficiência dos parâmetros do plano de fogo empregues na pedreira;
4. Na quarta fase foi utilizado o *software O-Pitblast* para o design e optimização dos parâmetros do plano de fogo e previsão da fragmentação através do modelo de fragmentação de Kuz-Ram.

3.1. Levantamento dos dados

Para a obtenção dos dados do desmonte na pedreira Mafilipa e da eficácia e/ou ineficácia dos parâmetros do plano fogo na fragmentação de rocha foram feitas visitas diárias por um período de noventa dias, para o acompanhamento das operações que antecedem e posteriores ao desmonte. As actividades realizadas na pedreira de Mafilipa para a colecta dos dados para a pesquisa foram:

- ✓ Reconhecimento das frentes de lavra;
- ✓ Interacção verbal com colaboradores da pedreira a nível gerência até operacional;
- ✓ Levantamento detalhado das variáveis geométricas, variáveis físico-químicas e variáveis temporais do plano de fogo;
- ✓ Registo da fragmentação, através de fotografias, gerada no desmonte tradicional aplicado pela pedreira;

Para a realização das actividades acima mencionadas foi utilizado os seguintes matérias para confecção da fragmentação, aferição das medidas da geometria do plano de fogo, fotográfico e anotações na frente de lavra:

- ✓ Um celular para captura de imagens;
- ✓ Uma fita métrica para medir os parâmetros geométricos do plano de fogo;
- ✓ Um caderno para o registo dos processos e operações na pedreira;
- ✓ Os *softwares WipFrag e O-Pitblast* para análise granulométrica do material desmontado, design e simulação dos parâmetros do plano de fogo a serem otimizados respectivamente.

4. APRESENTAÇÃO, ANÁLISE DOS DADOS E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Este capítulo faz a apresentação, análise dos dados colectados referentes as técnicas e procedimentos de extracção da rocha gnaiss na pedreira Mafilipa e discussão dos resultados obtidos nas optimizações realizadas.

4.1. Apresentação de dados

A pedreira Mafilipa é uma propriedade da empresa Sintrapel Nova Era Lda, que se dedica a extracção da rocha gnaiss para produção de agregados para construção civil em pequena escala no Bairro Mpádué na Unidade de Mafilipa a sul da Cidade de Tete, Província de Tete. Para exploração da rocha gnaiss a pedreira aplica o Modo a Céu Aberto e Método por Bancada, para o processamento do material a pedreira dispõe de uma planta que contemplam a britagem primária, peneiramento, britagem secundária e peneiramento respectivamente e opera num regime de um turno por dia com a duração de oito (8) horas em trezentos e doze (312) dias por ano.

4.1.1. Perfuração da rocha

Para execução da perfuração a pedreira de Mafilipa dispõe de uma perfuratriz sobre esteira da marca Atlas Copco modelo AirROC D35 com as seguintes especificações: método de perfuração martelo do fundo do furo (DTH Hummer), 115 mm de diâmetro e 29,4 m de profundidade máxima de perfuração. Sendo alimentada por um compressor da marca DOOSAN modelo HP45.



Figura 4: Perfuratriz pneumática D35

Fonte: (Contribuição do Autor)

O tipo da malha de perfuração empregue na pedreira é a estagiada, que consiste em furos distanciados de maneira estagiada, tal malha é conhecida popularmente como malha “pé de galinha”. Após feita a perfuração de um furo, é colocado um tampão de material plástico e pedras na boca de cada um para evitar que, com a acção das intempéries, ocorra a entrada de algum material indesejado nos mesmos.



Figura 5: Tipo de malha e o tampão após a perfuração

Fonte: (Contribuição do Autor)

4.1.2. Desmonte

Fabrica de Explosivo de Moçambique é uma empresa especializada na fabricação de explosivo e prestação de serviços na área de desmonte de rocha com explosivo. Fabrica de Explosivo de Moçambique é responsável pelo fornecimento do explosivo, acessórios de detonação e execução da operação do desmonte de rocha na pedreira de Mafilipa, os dados apresentados dos desmontes estudados foram fornecidos pela Fabrica de Explosivo de Moçambique me refiro (ao tipo e quantidade da carga explosiva para cada desmonte, aos tipos, quantidades dos acessórios de detonação e o comprimento de cada furo), o que concerne aos dados remanescentes (números de furos, diâmetro da perfuração, tipo de malha, afastamento, espaçamento, inclinação de furo e densidade da rocha) foram fornecidos pelo responsável pela actividade de perfuração e desmonte na pedreira de Mafilipa.

Fabrica de Explosivo de Moçambique para execução do desmonte na pedreira de Mafilipa utiliza os seguintes acessórios: detonador de coluna com um comprimento de 6 e 12 m de 500 ms, conectores de superfície para ligação dos detonadores de coluna de cada furo de 17 e 25 ms e Boosters de 150 Gms.



Figura 6: Conector, Detonador e Booster

Fonte: (Contribuição do Autor)

O tipo de amarração empregue no desmonte na pedreira Mafilipa pela FEM tipo nonél entre os furos carregados com o explosivo tipo emulsão bombeável. Antes do preenchimento dos furos com explosivo é necessário conferir novamente a profundidade de cada um e a presença de água em cada furo. O carregamento dos furos com explosivos é executado de maneira mecanizada com auxílio de um caminhão cisterna que armazena o explosivo do tipo emulsão bombeável, é conectado uma mangueira no tanque do caminhão para que seja realizada o carregamento dos furos, este processo é realizado por um operador que é responsável pelo preenchimento de cada furo com explosivo e registo da quantidade de explosivo carregado em cada furo. Após o preenchimento dos furos com explosivo é executado um tampão com brita, para garantir não haja perda de gases na fase de ignição e que a reacção explosiva ocorra apenas dentro do furo.



Figura 7: Tampão com brita

Fonte: (Contribuição do Autor)

Após o carregamento dos furos na sua totalidade e seu respectivo tamponamento, é executada em seguida a conexão entre os furos utilizando retardos e conectores. Os retardos serão os

responsáveis pela não detonação simultânea de toda a malha. Cada dispositivo desses produz um determinado tempo de retardo na explosão da linha adjacente e a sequência de fogo é realizada pelo método box cut que consiste em duas ou mais linhas de controlo posicionadas no centro da malha. Após o carregamento dos furos com explosivo e a amarração é realizada a evacuação dos funcionários da pedreira, são bloqueados os acessos a pedreiras e são realizadas rondas com supervisor da operação para certificar que nenhuma pessoa permaneceu na área de risco. Após as verificações de segurança é executado o desmonte. Os desmontes realizados pela pedreira o accionamento do fogo é feito de forma manual que são do tipo ignição não eléctrica.

4.1.3. Dados do desmonte I

A tabela 5 mostra os dados do plano de fogo padrão da pedreira de Mafilipa, com as especificações técnicas utilizadas pela pedreira no desmonte I.

Tabela 5: Parâmetros do plano de fogo utilizado do primeiro desmonte

Acessórios de Detonação	
Booster (u)	92
Detonador (u)	92
Conector 17ms	36
Conector 25ms	60

Calculo das cargas	
Quantidade do explosivo (Kg)	6852
Razão de carga (Kg/m ³)	1,55

Carga Explosiva	Densidade (t/m ³)	RLC (Kg/m)
Emulsão Bombeada	1,15	11,94

Material desmontado	
Volume por furo (m ³)	48,15
Volume total (m ³)	4429,8
Tonelagem desmontada (t)	12846,42

Parâmetros gerais	
Diâmetro do furo (mm)	115
Afastamento (m)	2
Espaçamento (m)	3
Inclinação dos furos (°)	5
Subfuração (m)	0,6
Tampão (m)	1,4
Profundidade média (m)	8,03
Número de furos	92
Metros perfurados (m)	738,3
Perfuração específica (m/m ³)	0,17
Densidade da Rocha (t/m ³)	2,9

Fonte : (Sintrapel Nova Era Lda, 2021)

4.1.3.1. Fragmentação

Para a realização da análise da fragmentação do primeiro desmonte foi utilizado o *software WipFrag*, onde, através de imagens capturadas da pilha do material é possível a qualificação e quantificação da fragmentação.

As imagens capturadas na pedreira após o desmonte foram analisadas e processadas para uma determinação da distribuição da granulometria da fragmentação, o *software WipFrag* define também o D20 (granulometria média dos finos), D50 (granulometria média do desmonte como um todo) e D80 (granulometria média dos grosseiros). O procedimento deste *software* fornece uma curva granulometrica do desmonte executado na pedreira.

Na primeira fase é capturada a imagem através ou aberta no *software*, aplica-se uma escala posicionada num ponto de referência melhor identificação e maior precisão granulometria do material fotografado.



Figura 8: Imagem do material

Fonte: (Contribuição do Autor)

Após referenciar o objecto que serve de escala, o *software* executa uma análise minuciosa dos fragmentos, mas o usuário tem a opção de seleccionar melhor o formato da rocha fragmentada e as que não foram identificadas pelo programa.

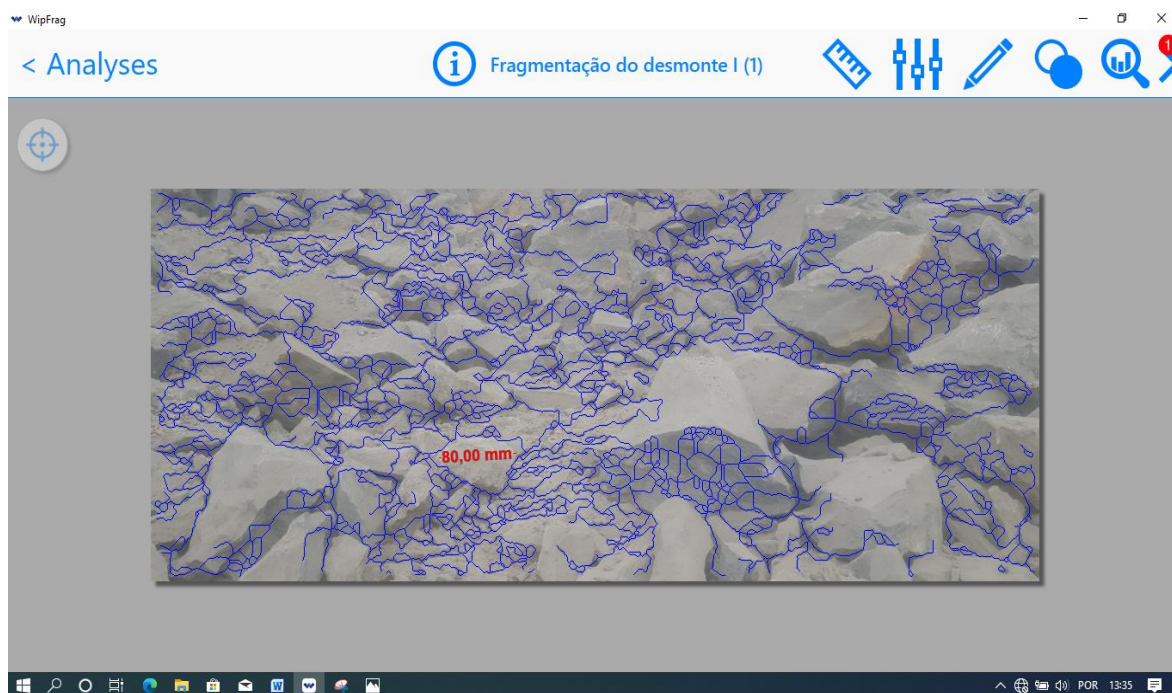


Figura 9: Análise do material

Fonte: (Contribuição do Autor)

Posteriormente a análise do material o programa gera um modelo com variação de cor, onde o azul representa os materiais mais fragmentados indo até o vermelho que são os materiais de maior granulometria, para que o usuário possa ter uma ideia melhor do material seleccionado, com isso fica fácil identificar os locais onde não teve material devidamente contornado.

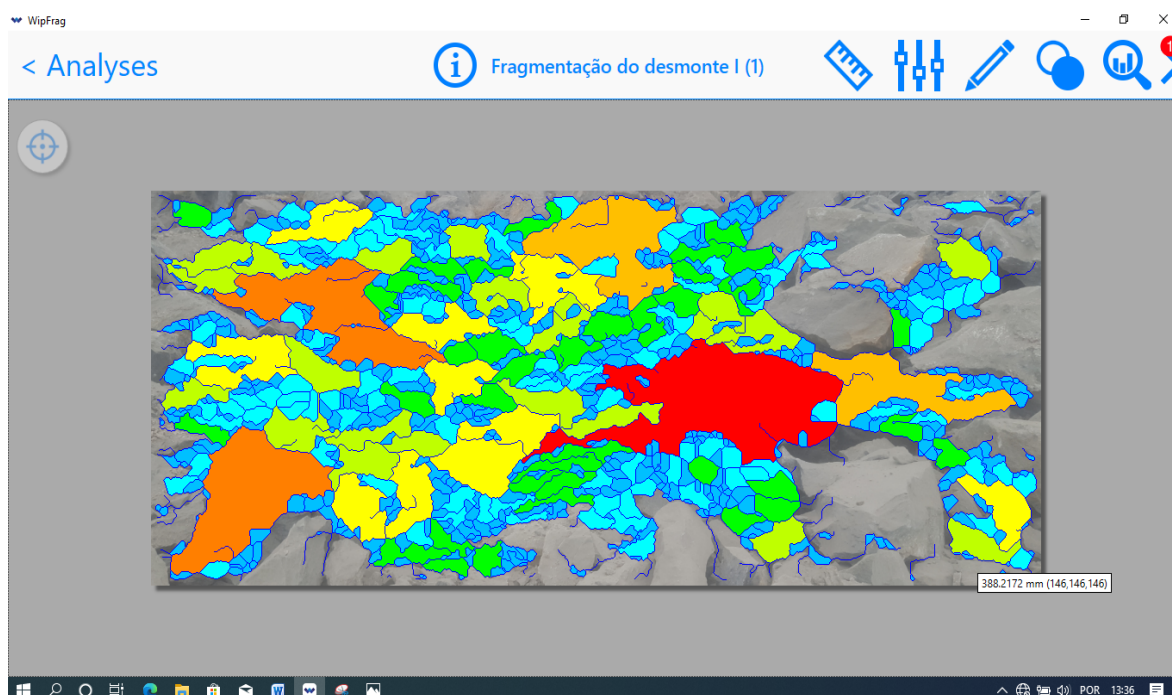


Figura 10: Análise da selecção

Fonte: (Contribuição do Autor)

Após a análise e selecção do material o *software* gera os resultados granulométricos através de gráficos do tipo histograma e da frequência acumulada. A granulometria do material passante é dada pelas seguintes percentagens: 10%, 20%, 50%, 75%, 80% e 90%.

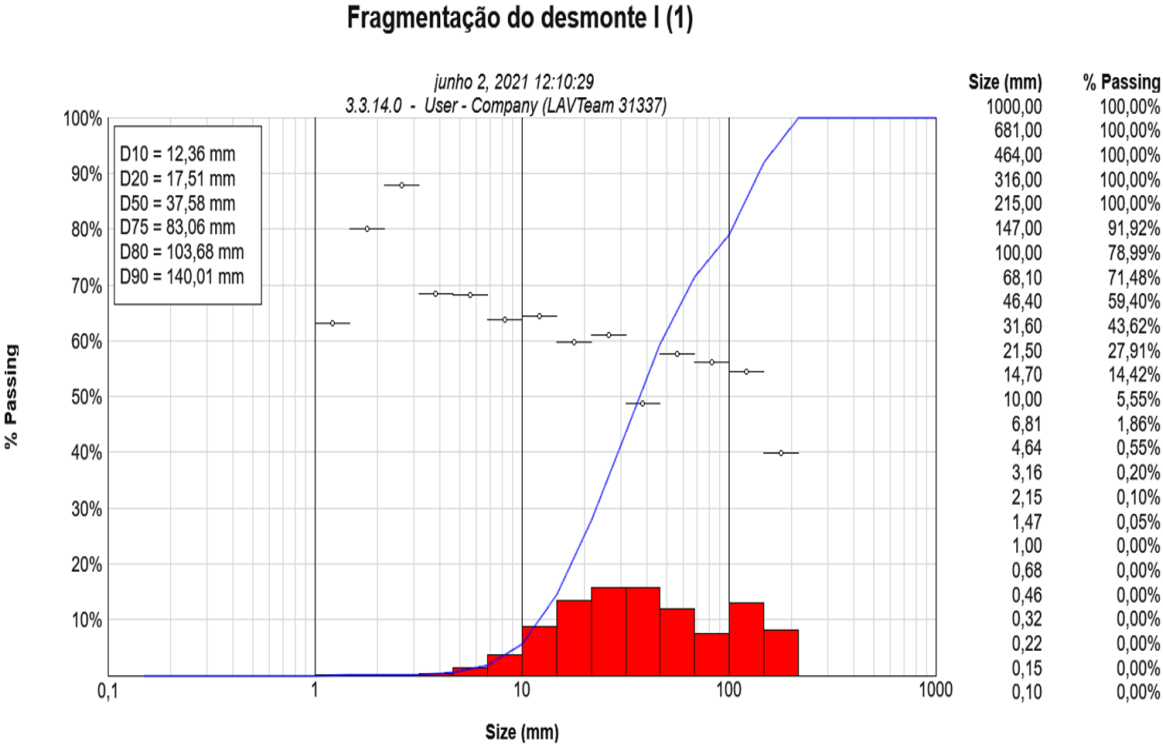


Figura 11: Gráfico da curva de fragmentação do desmonte I

Fonte: (Contribuição do Autor)

4.1.4. Dados do desmonte II

Tabela 6: Parâmetro do plano de fogo utilizado do segundo desmonte

Acessórios de Detonação	
Booster (u)	169
Detonador (u)	169
Conector 17ms	60
Conector 25ms	120

Cálculo das cargas	
Quantidade do explosivo (Kg)	8188
Razão de carga (Kg/m³)	1,07

Carga Explosiva	Densidade (t/m³)	RLC (Kg/m)
Emulsão Bombeada	1,15	11,94

Material desmontado	
Volume por furo (m³)	45,39
Volume total (m³)	7671
Tonelagem desmontada (t)	22245,9

Parâmetros gerais	
Diâmetro do furo (mm)	115
Afastamento (m)	2,5
Espaçamento (m)	3
Inclinação dos furos (°)	5
Subfuração (m)	0,75
Tampão (m)	1,75
Profundidade média (m)	6,05
Número de furos	169
Metros perfurados (m)	1022,8
Perfuração específica (m/m³)	0.13
Densidade da Rocha (t/m³)	2.9

Fonte: (Sintrapel Nova Era Lda, 2021)

4.1.4.1. Fragmentação

Para a realização da análise da fragmentação do segundo desmonte também foi utilizado o *software WipFrag*, onde, através de imagens capturadas da pilha do material é possível a qualificação e quantificação da fragmentação.

Para o segundo desmonte seguiu-se os mesmos procedimentos para analisar a fragmentação do material desmontado, e obteve-se o seguinte gráfico da curva de fragmentação.

Fragmentação do desmonte II (1)

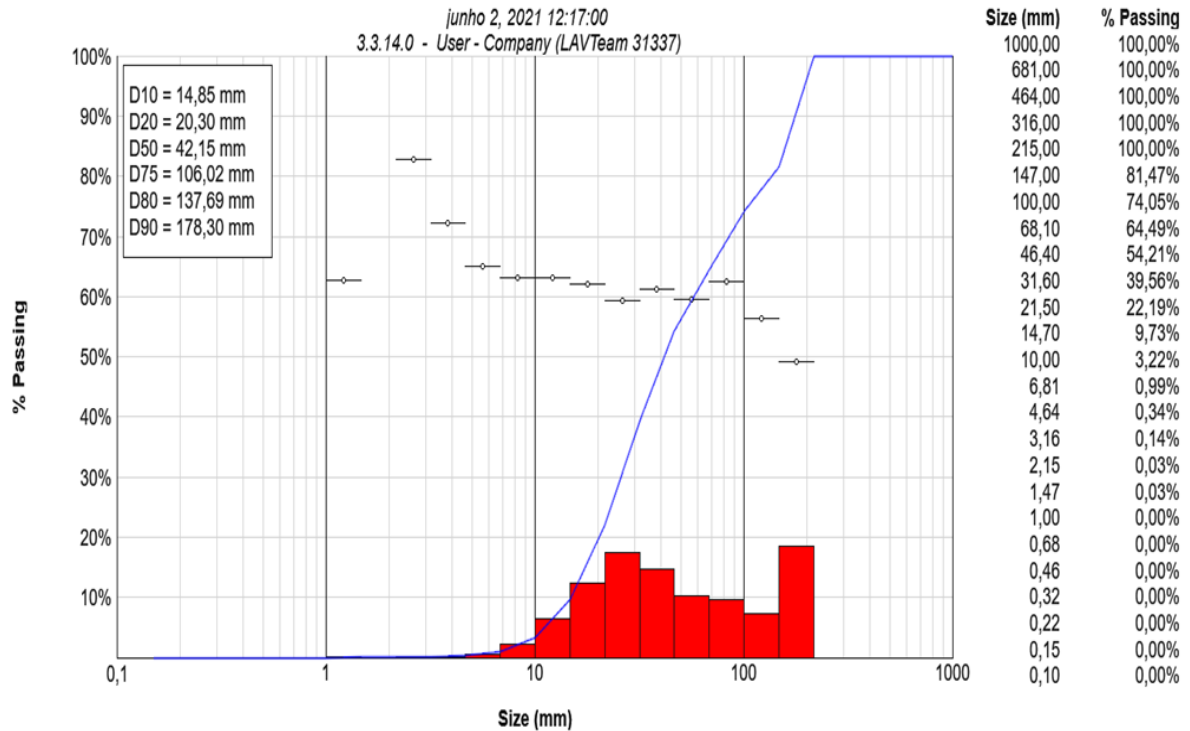


Figura 12: Gráfico da curva de fragmentação do desmonte II

Fonte: (Contribuição do Autor)

As figuras referentes a imagem do material, análise do material e análise da selecção do desmonte II serão encontrados na lista dos apêndices.

4.1.5. Operações de carregamento, transporte e britagem primaria

Para realização das operações de carregamento, transporte e britagem primária do material a Pedreira de Mafilipa dispõe de (2) duas escavadeiras, uma da Volvo com capacidade do balde de 3,5 m³ e a remanescente da marca DOOSAN também com capacidade do balde de 3,5 m³; Para o transporte a pedreira executa essa operação por meio de três (3) camiões sendo dois (2) basculantes um da marca Volvo e outro da marca Sino Trruk ambos com 14 m³ de capacidade e o camião remanescente é um camião articulado da Marca Bell B25D de 28 m³ de capacidade; Para a britagem primária é realizada por um britador de mandíbula da marca NORDBERG, modelo C01-HT120414 com abertura de alimentação de 3'' (80mm) e descarga de 1,45'' (37mm).

4.2. Análise dos dados e Discussão dos Resultados

Nesse subcapítulo foram analisados os dados colectados, apresentados e discutidos os resultados obtidos através da utilização da metodologia proposta, nos dois desmontes de rocha estudados no presente trabalho, realizados na Pedreira de Mafilipa.

4.2.1. Análise dos dados

A pedreira de Mafilipa responsável pela extração de gnaiss, mediante as frequentes ocorrências do engailamento no britador primário e ineficiência das operações de carregamento e transporte, decidiu em alterar os parâmetros geométricos do plano de fogo. A malha de perfuração passou a ser de 2,5 m de afastamento e 3 m de espaçamento em vez dos 2 m de afastamento e 3 m de espaçamento, altura do tampão foi modificada de 1,4 m para 1,75 m o que possibilitou a redução da quantidade e custo de explosivo por furo e aumento dos números de furos de 92 para 169 furos.

Quanto aos parâmetros físicos-químicos e temporais os dois desmontes apresentaram o mesmo padrão, diferindo apenas no número de linhas e furos e o mesmo esquema de amarração dos furos.

Mesmo com alterações dos parâmetros geométricos realizada pela pedreira na perspectiva de incrementar a quantidade material desmontado e a qualidade na fragmentação, as expectativas não foram satisfeitas essencialmente na qualidade da fragmentação que em vez de melhorar com as alterações feitas mostram um resultado totalmente oposto do planejado.

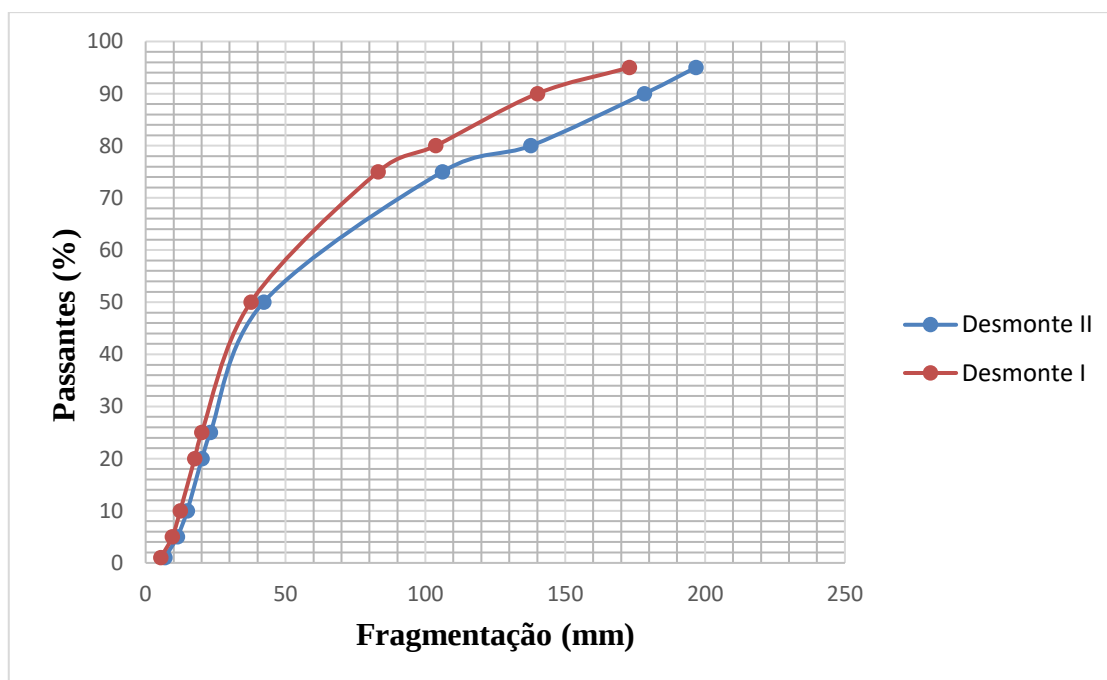


Figura 13: Gráfico comparativo dos resultados da fragmentação do desmonte I e desmonte II

Fonte: (Contribuição do Autor)

Como ilustra o gráfico acima a fragmentação alcançada pela pedreira não é satisfatória mesmo com alteração dos parâmetros geométricos do plano de fogo. No caso do desmonte I a pedreira desmontou cerca de $4429,8\text{m}^3$ mas $3145,158\text{m}^3$ o que corresponde cerca de 71% do material com a granulometria adequada o que significa uma perda de $1284,642\text{m}^3$ o que

corresponde 29% de material que necessitam de ser refragmentados por desmonte mecânico, ou por desmonte secundário. Para o desmonte II o cenário mostrou-se ainda mais insatisfatório pelo que a pedreira desmontou 7671m^3 mas o material que estava na granulometria adequada era $4985,15\text{m}^3$ o que corresponde 65% o que significa $2684,8\text{m}^3$ que corresponde a 35% de material que precisa de ser refragmentado por desmonte mecânico, ou por desmonte secundário. Quanto ao índice de uniformidade o desmonte I teve 1,53 enquanto o desmonte II 1,31 o que deixa claro que os parâmetros variáveis do plano de fogo do desmonte I alcançaram melhores resultados comparativamente aos do desmonte II.

4.2.2. Otimização do desmonte I

Para aplicação do *software O-Pitblast* para otimização dos parâmetros variáveis do plano de fogo empregues na pedreira, foram elaborados designs e simulações dos parâmetros dos variáveis dos desmontes estudados e foram realizadas duas otimizações por cada desmonte.

4.2.2.1. Primeira otimização do desmonte I

No primeiro cenário de otimização houve alteração da malha de perfuração, o afastamento de 2m para 1,5m, o espaçamento de 3m para 2,5m que possibilitou a redução de um furo, aumento da altura do tampão de 1,4m para 1,5m que ocasionou redução da quantidade e custo do explosivo por furo, sequência de fogo sofreu alteração do método box cut para método paralelo e os conectores da linha de controlo também sofreram alteração de 17ms para 25ms.

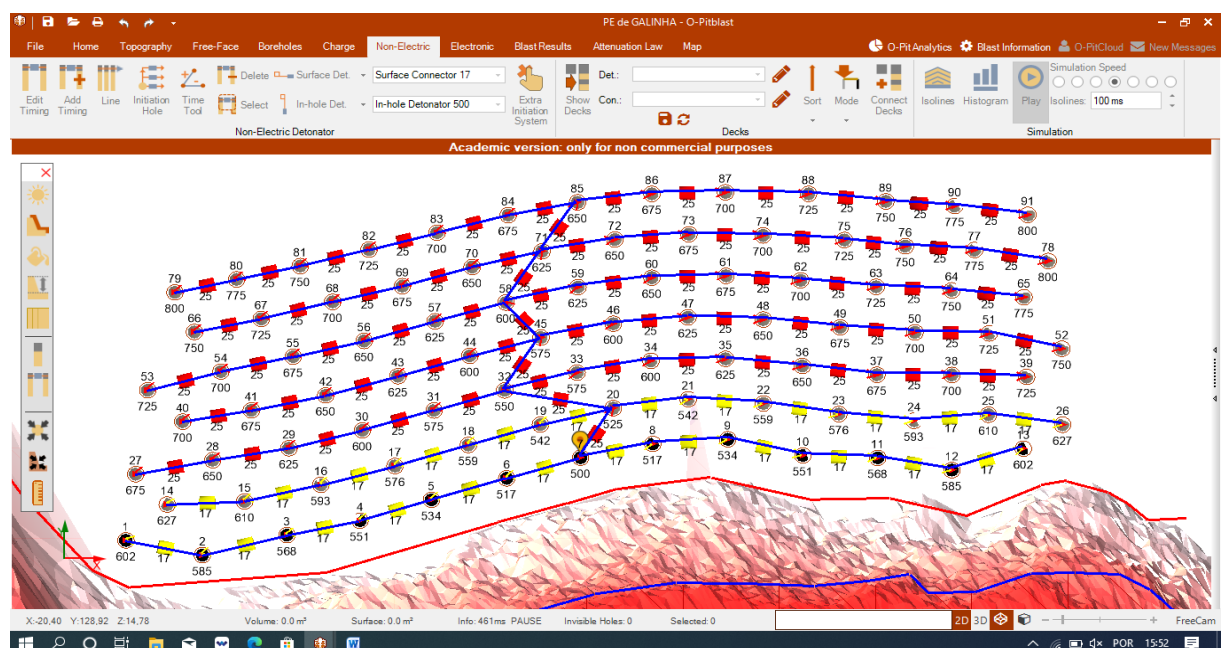


Figura 14: Plano de perfuração e sequenciamento de fogo da primeira otimização do desmonte I

Fonte: (Contribuição do Autor)

Com as alterações dos parâmetros do plano de fogo realizadas o *software O-Pitblast* gerou um gráfico que mostra a curva da previsão da fragmentação da otimização.

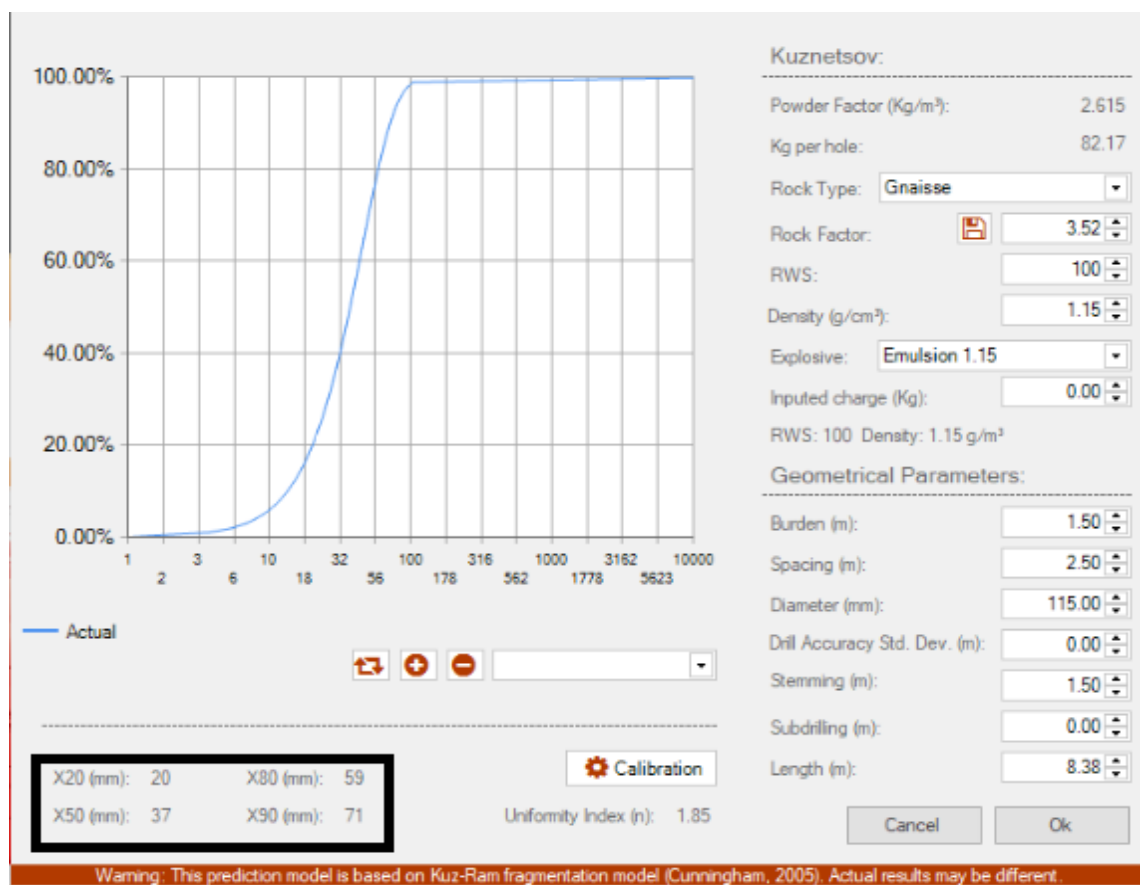


Figura 15: Gráfico da curva de fragmentação da primeira otimização do desmonte I

Fonte: (Contribuição do Autor)

4.2.2.2. Segunda otimização do desmonte I

No segundo cenário de otimização desmonte I houve alteração do tipo malha de perfuração de estagiada para quadrada, o afastamento de 2m para 1,5m, o espaçamento não sofreu alteração e que também possibilitou a redução de um furo, redução da altura do tampão de 1,4m para 1,2m que ocasionou aumento da quantidade e custo do explosivo por furo e as variáveis temporais foram usadas as da primeira otimização.

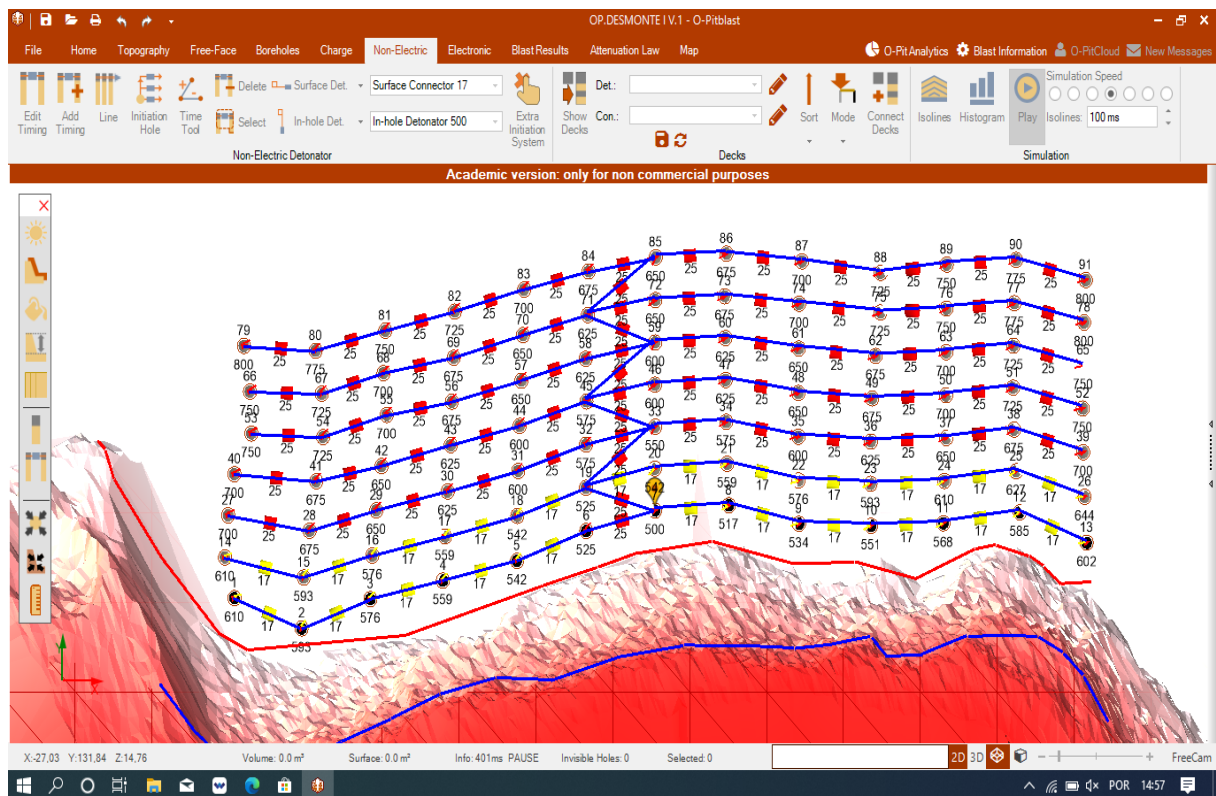


Figura 16: Plano de perfuração e sequenciamento de fogo da segunda otimização do desmonte I

Fonte: (Contribuição do Autor)

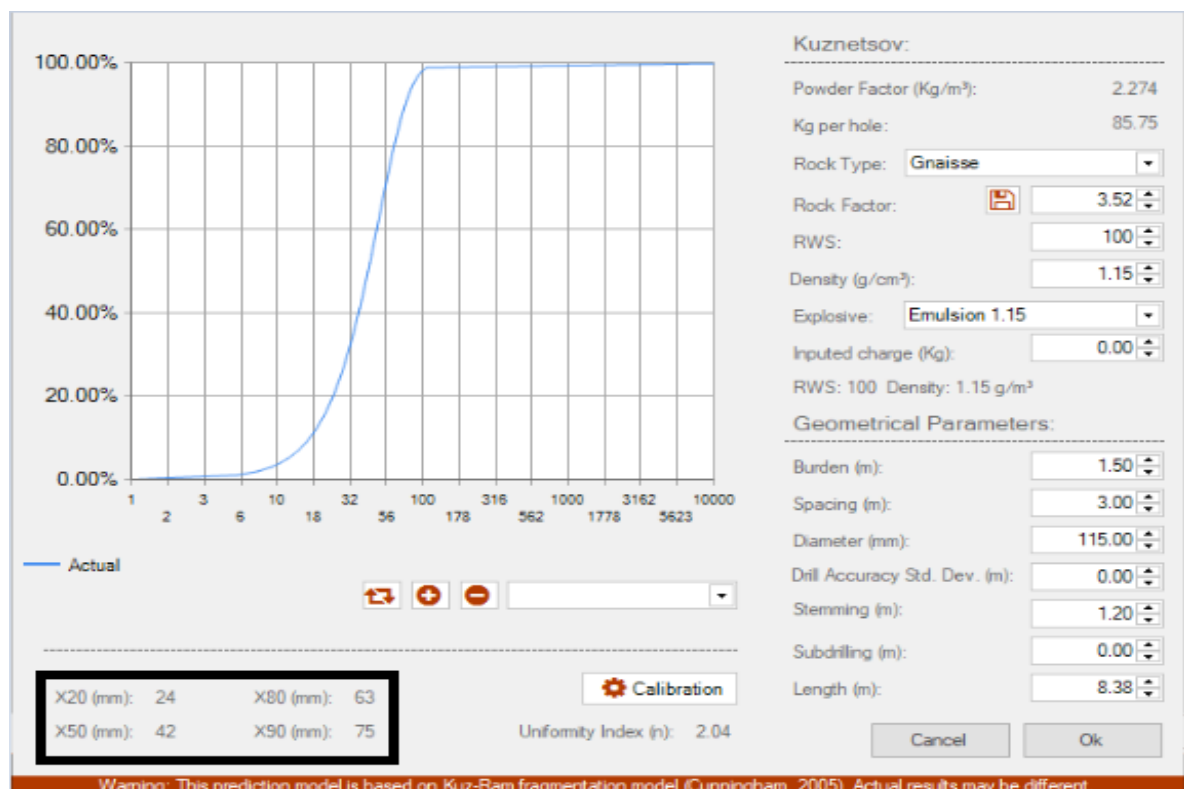


Figura 17: Gráfico da curva de fragmentação da segunda otimização do desmonte I

Fonte: (Contribuição do Autor)

4.2.3. Discussão dos Resultados das otimizações do desmonte I

4.2.3.1. Fragmentação com os parâmetros empregues pela Pedreira Versus Fragmentação com os parâmetros otimizados com o software *O-Pitblast* do desmonte I

Os resultados da optimização dos parâmetros variáveis do plano de fogo para melhorarem a fragmentação no desmonte I na Pedreira de Mafilipa resultaram num aumento significativo na ordem dos 20% na qualidade fragmentação, o que garante cerca de 91% do material que desmontado esteja na fragmentação adequada, o que significa que apenas 274,995m³ que corresponde a 9 % do material desmontado que não esta na granulometria adequada que é uma melhoria comparativamente aos 71% do material desmontado com granulometria adequada alcançados pela pedreira que por sua vez significa que 1284,642m³ que corresponde a 29% do material desmontado que não esta na granulometria exigida na britagem primária.

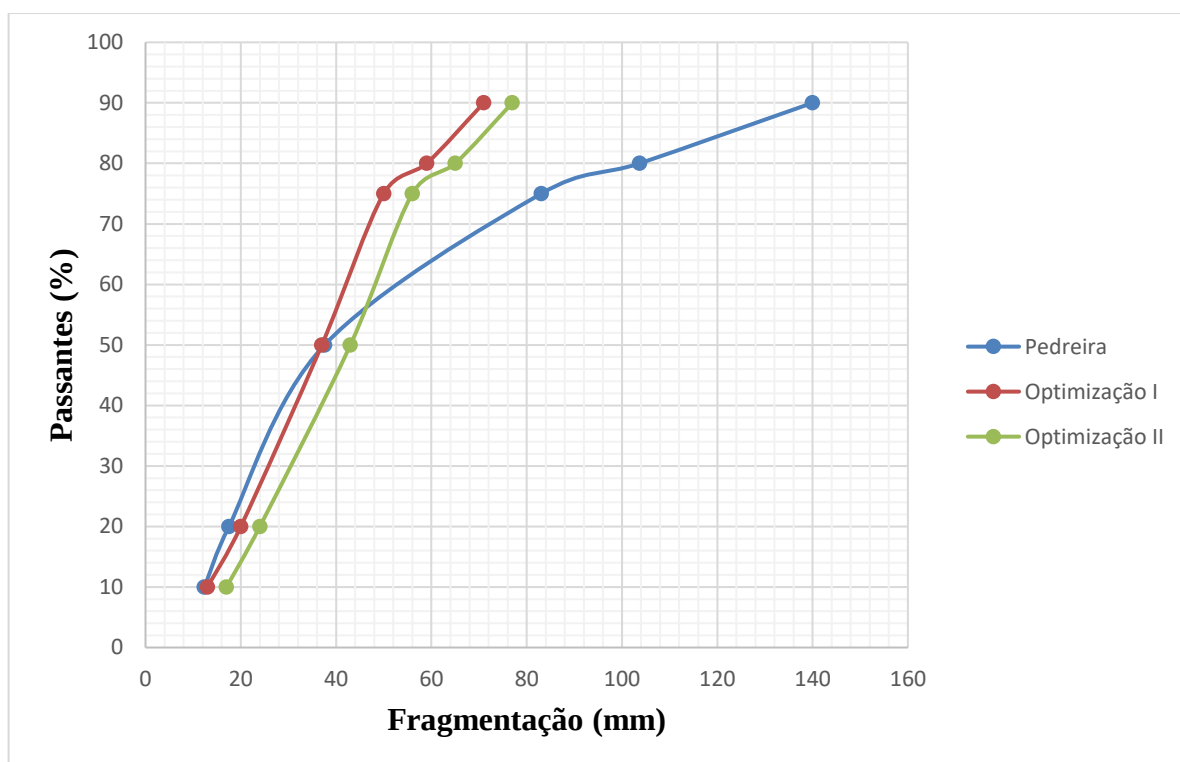


Figura 18: Gráfico comparativo dos resultados da fragmentação do desmonte I

Fonte: (Contribuição do Autor)

Pode se observar que o desmonte executado pela pedreira de Mafilipa que a sua curva de fragmentação até os 50% material desmontado esta em conformidade com a granulometria deseja, mas a partir dos 70% observa-se um cenário totalmente oposto com uma grande discrepância da granulometria alcançada pela pedreira com a exigida na britagem primária,

que revela que os parâmetros do plano de fogo aplicados na pedreira são inadequados para suprir a granulometria desejada.

4.2.4. Otimização do desmonte II

4.2.4.1. Primeira otimização do desmonte II

No primeiro cenário de otimização houve alteração da malha de perfuração, o afastamento de 2,5m para 1,5m, o espaçamento de 3m para 2,5m, redução da altura do tampão de 1,75m para 1,4m que ocasionou aumento da quantidade e custo do explosivo, sequência de fogo sofreu alteração do método box cut para método paralelo e os conectores da linha de controle também sofreram alteração de 17ms para 25ms.

Com as alterações dos parâmetros do plano de fogo pelos da primeira otimização desmonte II realizadas o *software O-Pitblast* gerou o plano de perfuração e sequenciamento de fogo e o gráfico da curva da previsão da fragmentação da otimização.

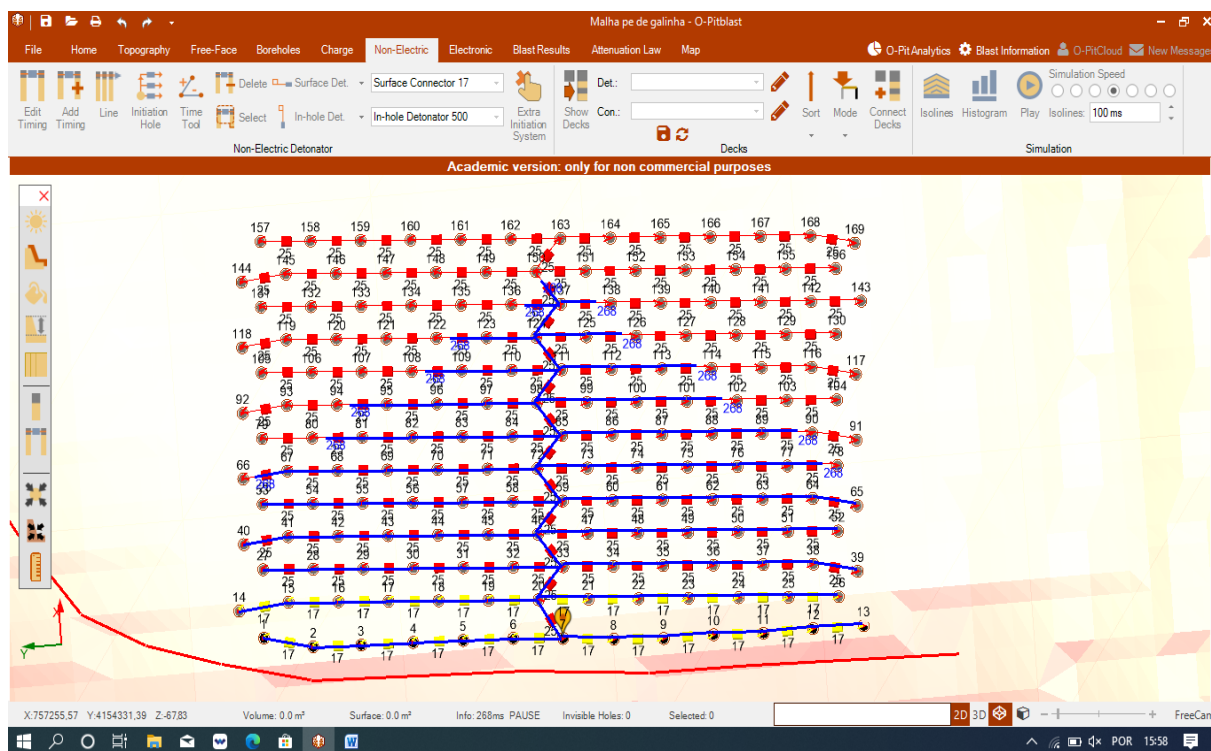


Figura 19: Plano de perfuração e sequenciamento de fogo da primeira otimização do desmonte II

Fonte: (Contribuição do Autor)

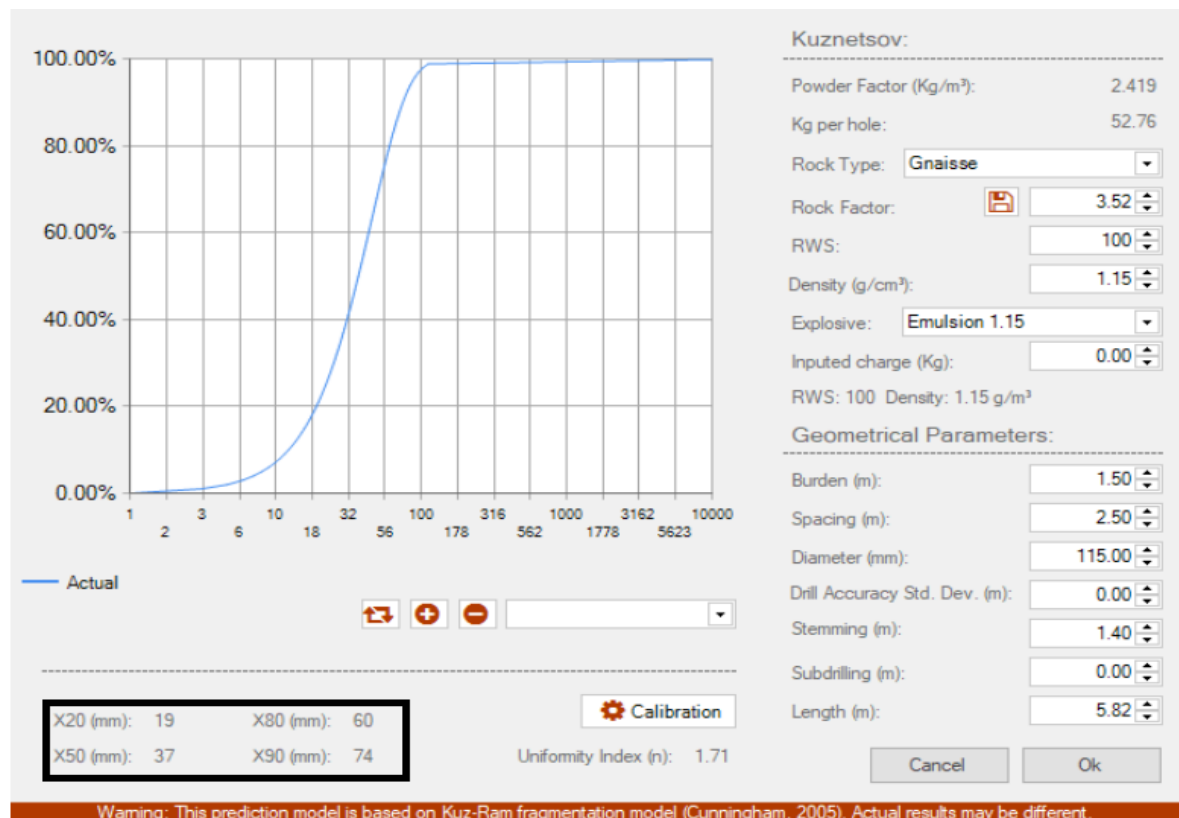


Figura 20: Gráfico da curva de fragmentação da primeira otimização do desmonte II

Fonte: (Contribuição do Autor)

4.2.4.2. Segunda otimização do desmonte II

No segundo cenário de otimização do desmonte II houve alteração do tipo malha de perfuração de estagiada para quadrada, o afastamento de 2,5m para 1,6m, o espaçamento de 3m para 2m, redução da altura do tampão de 1,75m para 1,6m que ocasionou aumento da quantidade e custo do explosivo por furo e as variáveis temporais foram usadas as da primeira otimização.

Com as alterações dos parâmetros do plano de fogo pêlos da segunda otimização desmonte II realizadas o *software O-Pitblast* gerou o plano de perfuração e sequenciamento de fogo, o gráfico da curva da previsão da fragmentação da otimização.

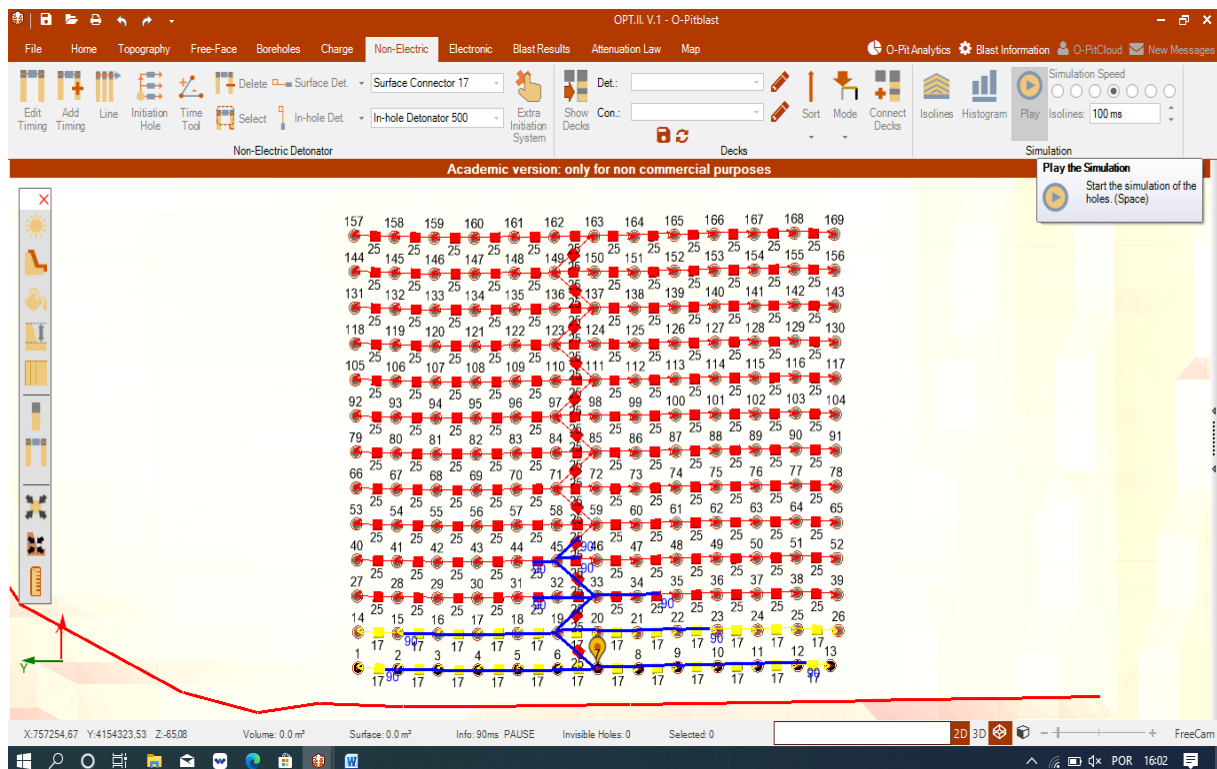


Figura 21: Plano de perfuração e sequenciamento de fogo da primeira otimização do desmonte II

Fonte: (Contribuição do Autor)

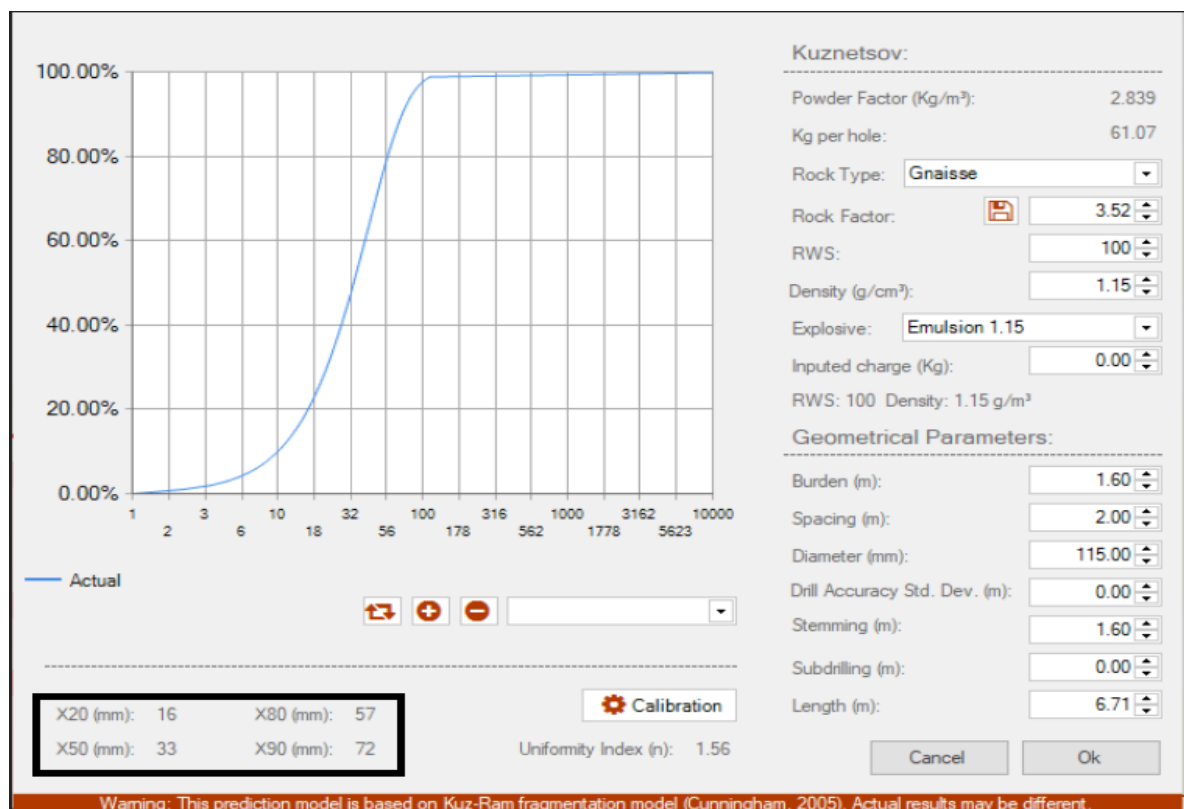


Figura 22: Gráfico da curva de fragmentação da segunda otimização do desmonte II

Fonte: (Contribuição do Autor)

4.2.5. Discussão dos Resultados das otimizações do desmonte II

4.2.5.1. Fragmentação com os parâmetros empregues pela Pedreira Versus Fragmentação com os parâmetros otimizados com o *software O-Pitblast* do desmonte II

A avaliação das curvas da fragmentação do desmonte executado pela Pedreira de Mafilipa com as otimizações elaboradas com do *software O-Pitblast* mostrou que as otimizações apresentam um maior percentual com uma media em torno de 92% do material desmontado com granulometria que é exigida na primeira etapa de processamento que significa que apenas 284,64m³ que corresponde a 8% do material desmontado que não esta na granulometria adequada, que por sua vez também é uma melhoria comparativamente aos 65% do material desmontado com granulometria adequada atingidos pela pedreira que significa que 2684,85m³ que corresponde a 35% do material desmontado que não esta na faixa granulometrica exigida na britagem primária.

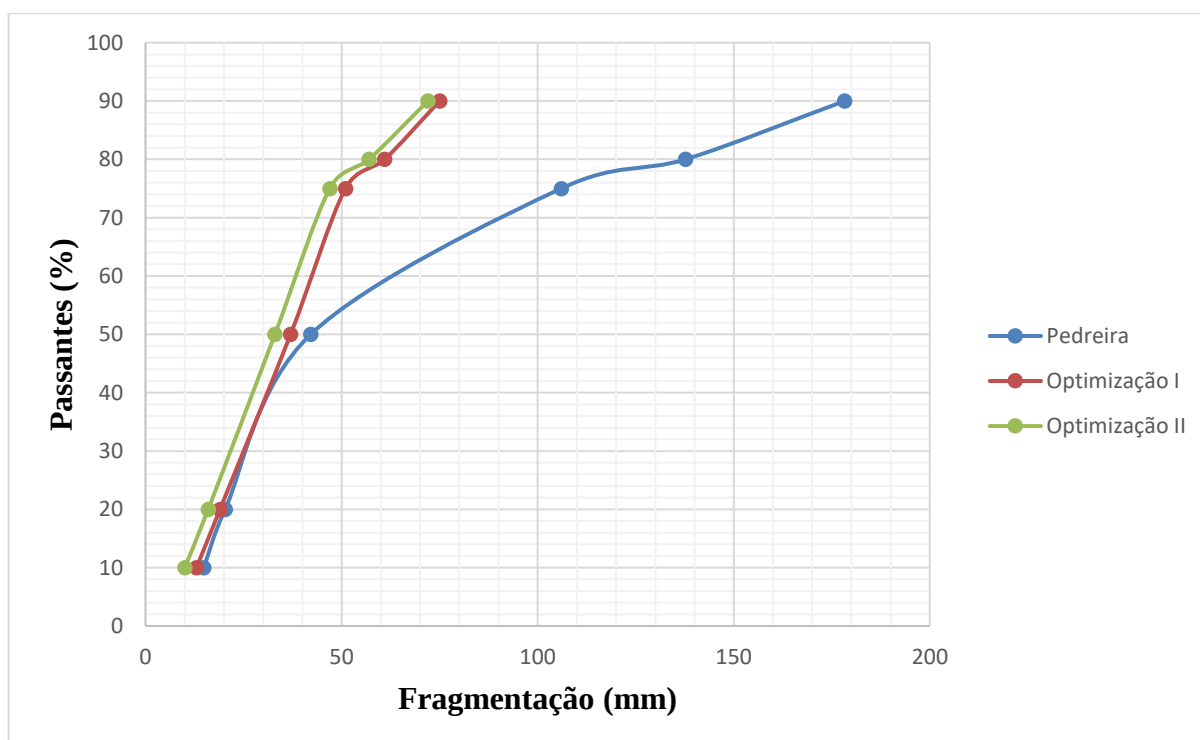


Figura 23: Gráfico comparativo dos resultados da fragmentação do desmonte II

Fonte: (Contribuição do Autor)

No segundo desmonte também se observa que o desmonte executado pela pedreira de Mafilipa que a sua curva de fragmentação até os 50% do material desmontado esta em conformidade com a granulometria deseja, mas a partir dos 70% observa-se um cenário totalmente oposto com uma grande discrepância da granulometria alcançada pela pedreira

com a exigida na britagem primária, que revela que os parâmetros do plano de fogo aplicados na pedreira são inadequados para suprir a granulometria desejada.

Apos a discussão dos resultados (curvas de fragmentação) das otimizações realizadas com o *software O-Pitblast*, o autor propõe a pedreira de Mafilipa que redimensione o plano de fogo aplicando os parâmetros variáveis do plano de fogo ensaiados na primeira otimização do desmonte I ou os parâmetros do plano de fogo ensaiados na segunda otimização do desmonte II, porque prevê melhores resultados na fragmentação. Porém cenário ótimo é dos parâmetros variáveis do plano de fogo ensaiados na primeira otimização do desmonte I porque prevê melhor fragmentação e reduz os custos com explosivo e acessórios de detonação.

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1. Conclusões

Após o desenvolvimento desse trabalho e tendo alcançado os objectivos do mesmo conclui-se que:

- ✓ O desmonte de rocha com recurso a explosivo esta inserido na cadeia produtiva das pedreiras do sector mineiro, com esse intuito essa operação deve receber uma abordagem sistemática, isto é, deve-se levar em conta todos processos e procedimentos envolvidos para sua execução.
- ✓ Os parâmetros variáveis do plano de fogo (variáveis geométricas, variáveis físico-químicas e variáveis temporais) devem receber uma especial atenção pelo que o grau de fragmentação que se deseja atingir depende dos mesmos. O grau de fragmentação resultante do desmonte de rocha com recurso a explosivo influencia directamente nas operações subsequentes tais como: carregamento, transporte, britagem primaria e para além de afectar a granulometria do produto final.
- ✓ As optimizações realizadas nos desmontes estudados melhoraram a qualidade da fragmentação em 20% para o primeiro desmonte e 27% e para o desmonte II o que pode possibilitar a pedreira o incremento da produção.
- ✓ A análise das curvas de fragmentação com os parâmetros variáveis do plano de fogo empregues pela pedreira com as optimizações realizadas, mostraram que as curvas da fragmentação das optimizações efectuadas no *software O-Pitblast* prevêem uma melhorar de distribuição dos fragmentos não havendo possibilidade de haver blocos de rochas com dimensões muito grandes.

5.2. Recomendações

Após a elaboração do presente trabalho, recomenda-se:

1. O acompanhamento e supervisão efectiva na operação de perfuração de rocha.
2. Redimensionamento dos parâmetros variáveis do plano de fogo empregues na pedreira utilizando métodos científicos.
3. Aplicação de *softwares* e/ou métodos que ajudem a estimar a fragmentação com os parâmetros do plano de fogo a serem aplicados no desmonte.
4. Realização de uma avaliação dos custos e benefícios com aquisição e operacionalização do *software O-Pitblast*, para que as propostas das optimizações feitas ganhem mais confiabilidade.
5. A aquisição do *software O-Pitblast* para melhor planeamento e optimização do desmonte de rocha, visto que, autor usou a versão estudante que não dispões de todas ferramentas operacionais que o *software* dispõe na sua versão comercial.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Alonso, J., Gomez, J., & Herbert, J. (2013). *Perforacion y Voladura de Rocas em Minería*. Madrid.
2. Atlas Geográfico Vol.1. (1980). Maputo: Ministério de Educação.
3. Atlas Geográfico Vol.2. (s.d.). Maputo: Ministério de Educação.
4. Atlas Power Co. (1987). *Explosives and Rock Blasting*. Dallas-Estados Unidos de América.
5. Bhandari, S. (1997). *Engineering Rock Blasting Operation*. Rotterdam: A.A. Balkema.
6. Braga, N. Y. (2018). *Monografia. Análise da fragmentação de gnaiss no desmonte com explosivos por métodos analíticos e uso de imagens*. Minas Gerais: Universidade de Ouro Preto.
7. Cavadas, P. M. (2012). *Optimização do Desmonte numa Mina a Ceu Aberto com Aplicação de Air Decks Dissertação (Mestrado)*. Porto-Portugal.
8. Clerici, C., & Mincini, R. (1974). *Blasting operations in quarry*. Torino.
9. Ferreira, D. R. (2017). *Monografia. Método de Optimização de Desmonte por Explosivo*. Recife: Universidade Federal de Pernambuco.
10. Geraldi, J. L. (2011). *ABC das Escavações de Rocha*. Rio de Janeiro: Interciencia.
11. Gomes, J. P. (2016). *Metodologia para Analise de Vibrações Provocadas por Desmontes com Recurso a Explosivo*. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
12. Gripp, M. d., & Morais, L. J. (2004). *Fundamentos para Simulações dos desmontes de rocha por explosivo*. Ouro Preto: Revista Escola de Minas.
13. GTK Consortium. (2006). *Noticia Explicativa da Carta Geológica 1:2500.000*. Maputo: Direcção Nacional de Geologia.
14. Hartman, H. L. (1996). *SME Mining Engineering Handbook*. EUA: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration.
15. Herrmann, C. (1968). *Manual de Perfuração de Rocha*. São Paulo: Polígono.
16. Hustrulid, W. (1999). *Blasting Principles for Open Pit Mininig*. Colorado: CRC Press.
17. Hustrulid, W., Kuchta, M., & Martin, R. (2013). *Open Pit Mine: Planning & Design*. Países Baixos: CRC Press.
18. Jimeno, E. L. (1987). *Influencia de Las Propriedades de las Rocas y Macizos Rocosos en el Diseno y Resultado de las Voladuras*.

19. Jimeno, L. C. (2003). *Manual de Perforacion y Voladura de Rocas*. Madrid-Espanha: Instituto Geologio y Minero de Espana.
20. Leite, S. F. (2013). *Dissertação. Desenvolvimento de uma Herramienta de Diseno de Voladuras en Tuneles*.
21. Manual Britanite. (2010). *Guia de Utilização de produtos*. Quatro Barras-PR.
22. Marinho, J. P. (2017). *Monografia. Otimização dos custos de desmonte com recurso de explosivos NA*. Brasil: CEULP/ULBRA.
23. Pina, M. D. (2017). *Dissertação. Analise da Eficiência do Desmonte de Explosivo com uso de Tampão não Convencional Rígido de Gesso*. Pernambuco: Universidade Federal de Pernambuco.
24. Quaglio, O. A. (2003). *Dissertação de Mestrado. Otimização da perfuração e segurança nos desmontes de agregados através dos sistemas laser profile e boretrak*. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto.
25. Reis, P. A. (2016). *Otimização de Parâmetros Geométricos em Diagramas de Fogo para Desmonte a Céu Aberto. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mineral, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto*. Porto.
26. Ricardo., H. S., & Catalani, G. (1977). *Manual Pratico de Escavação (Terraplanagem e Escavação de Rocha)*. São Paulo: McGraw-Hil do Brasil.
27. Ricardo., H. S., & Catalani, G. (1990). *Manual Pratico de Escavação*. São Paulo: PINI.
28. Ricardo., H. S., & Catalani, G. (1990). *Manual Pratico de Escavação*. São Paulo: PINI.
29. Ricardo., H., & Catalani, G. (2007). *Manual Pratico de Escavação - Terraplanagem e Escavação de rocha*. São Paulo: PINI.
30. Rodrigues, L. A. (2017). *Monografia. Otimização de Desmonte de Rocha: Com Auxílio do software O-Pitblast*. Brasil: CEULP/ULBRA.
31. Sanchidrian., J. A., & Muniz, E. (2000). *Curso de Tecnologia de Explosivos*. Madrid: Servicio de Publicaciones de la Fundacion Gomez-Pardo.
32. Silva, A. C. (2015). *Dissertação. Simulação e Analise da Fragmentação do Desmonte De rochas na Pedreira Herval – barreiros – PE”*. Pernambuco: Universidade Federal de Pernambuco.
33. Silva, N. (2013). *Monografia. Otimização da Blendagem de calcário da Votorantim Cimentos Em Xambioa*. Palmas: CEULP.
34. Silva, V. C. (2009). *Apostila do Curso de Desmonte de Rocha*. Universidade Federal de Ouro Preto. Departamento de Engenharia de Minas.

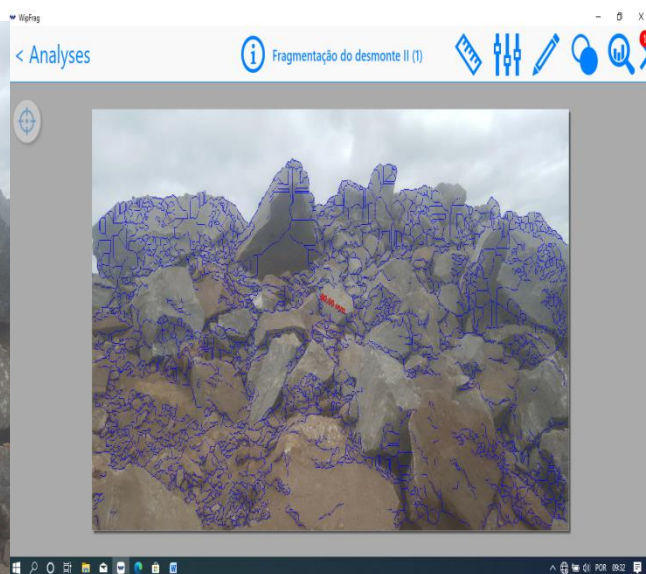
35. Silva, V. C. (2011). *Desmonte e Transporte de Rocha*. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto. Departamento de Engenharia de Minas.
36. Silva, V. C. (2014). *Apostila do Curso de Desmonte de Rochas*. Universidade Federal de Ouro Preto. Departamento de Engenharia de Minas.
37. Teixeira, J. L. (2010). *Dissertação. Qualidade da Fragmentação no Desmonte de Rocha: Analise Preliminar*. Porto: Instituto Superior de Engenharia do Porto.
38. O-Pitblast. (2017). *O-Pitblast: The Latest Blast Design & Optimization Platform*. Disponível em: <https://www.o-pitblast.com/> Acesso em 20 de Abril 2021.
39. WipWare. WipFrag. (2016). Disponível em: <https://www.wipfrag.com/> Acesso em 20 de Abril 2021.

APÊNDICES



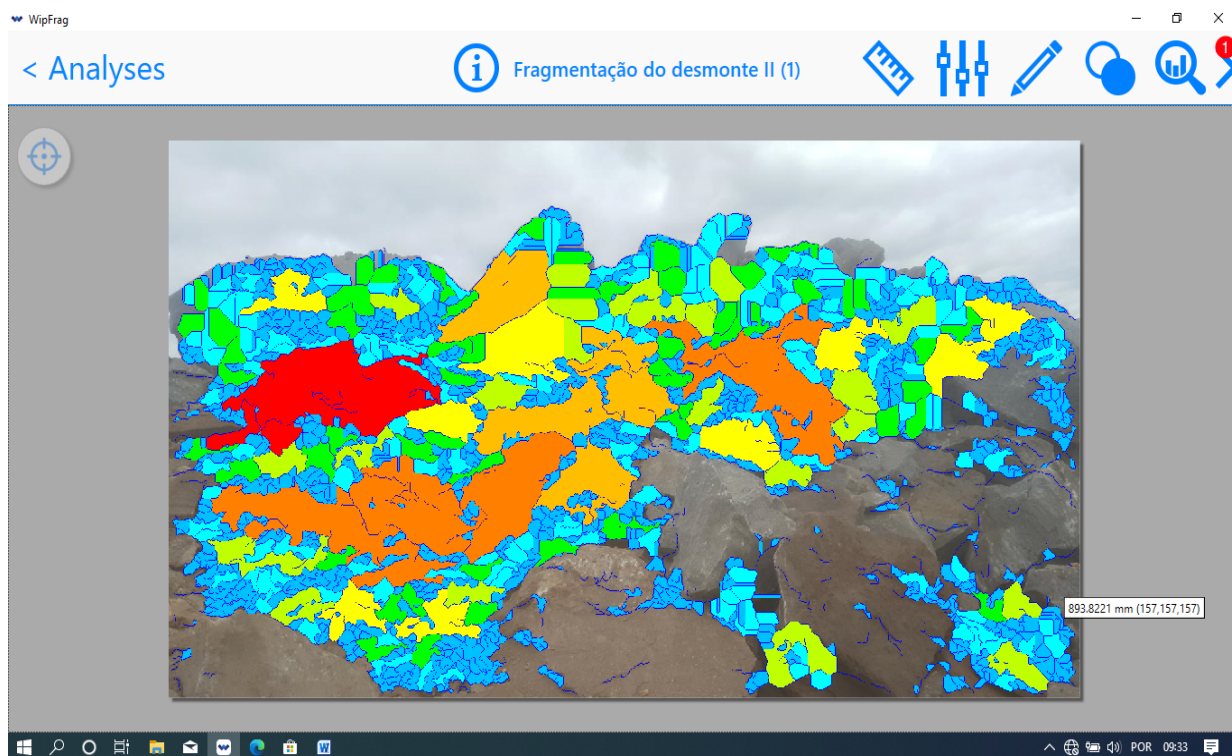
Apêndice 2: Imagem do material

Fonte: (Contribuição do Autor)



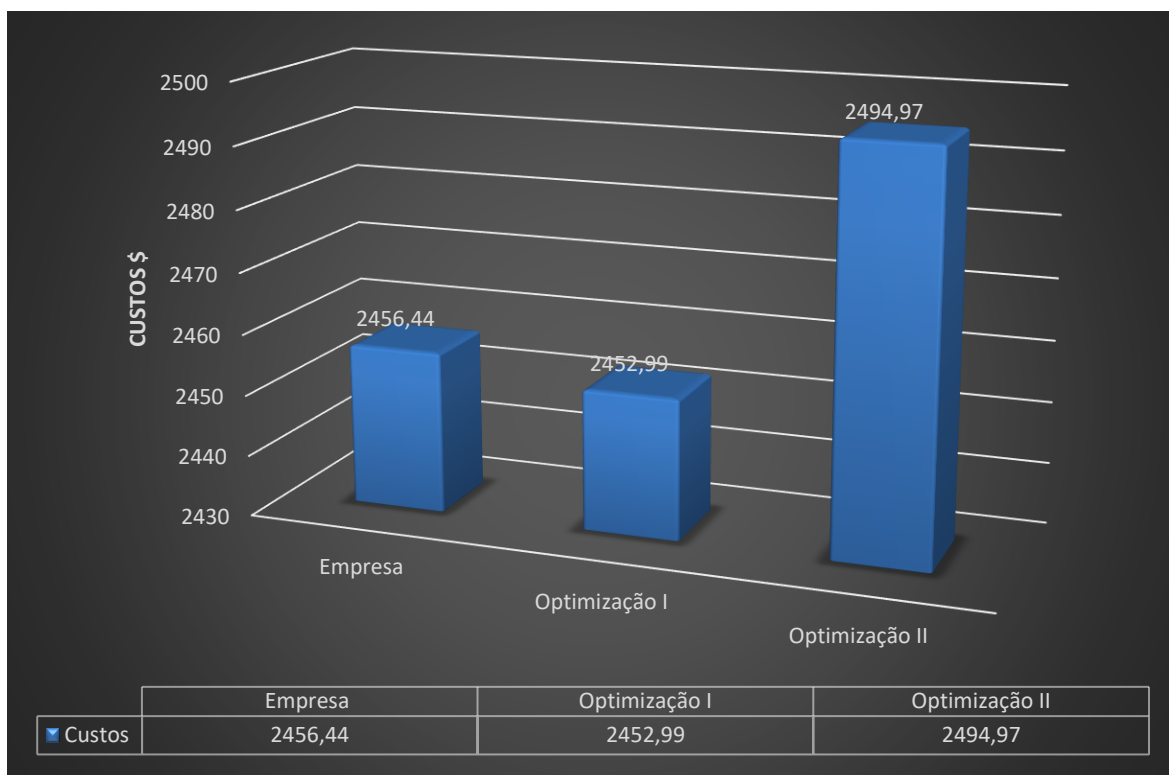
Apêndice 1: Análise do material

Fonte: (Contribuição do Autor)



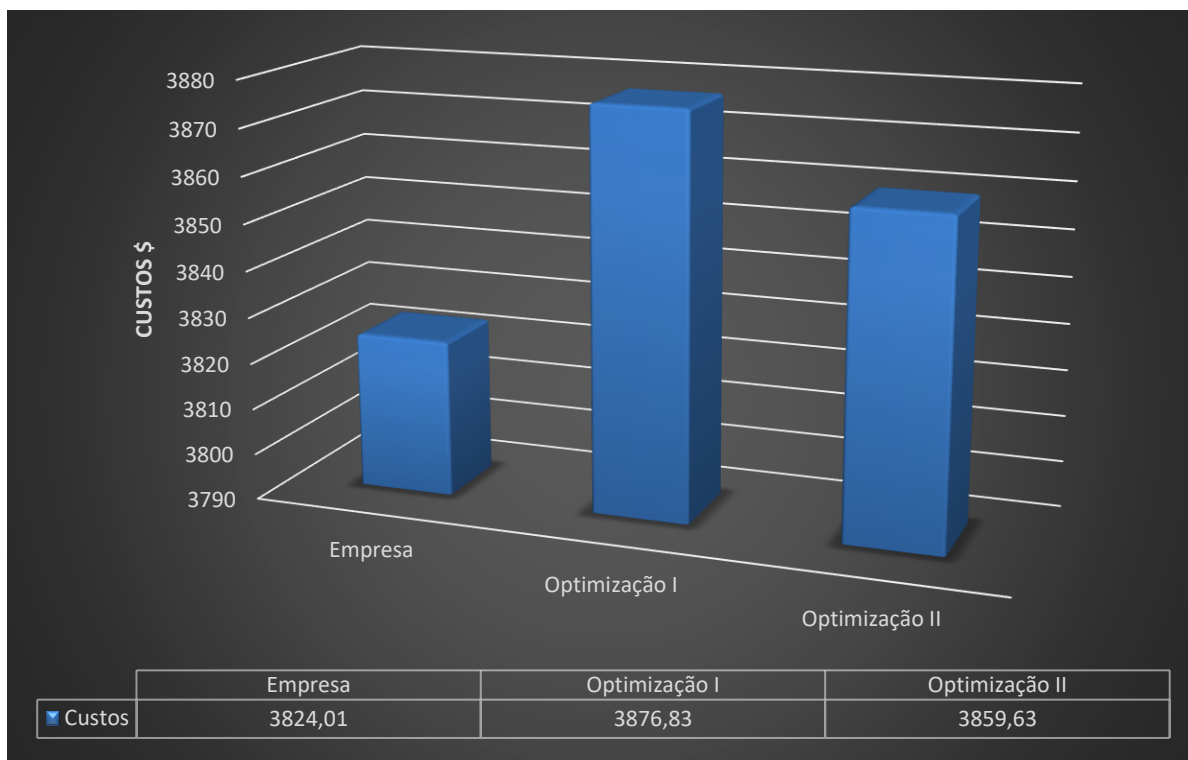
Apêndice 3: Análise da selecção

Fonte: (Contribuição do Autor)



Apêndice 4: Gráfico comparativo de custos com explosivo e acessórios de detonação do desmonte I

Fonte: (Contribuição do Autor)



Apêndice 5: Gráfico comparativo de custos com explosivo e acessórios de detonação do desmonte II

Fonte: (Contribuição do Autor)

ANEXOS

Anexo 1: Tabela de preços do explosivo e acessórios de detonação do desmonte I

Nome	Unidade	Preço	Quantidade	Preço total
Booster 150 Gms	\$/u	2,57	92	\$ 236,44
Detonador de 500 ms	\$/u	6,00	92	\$ 552
Conector de 17 ms	\$/u	6,48	36	\$ 233,28
Conector de 25 ms	\$/u	5,64	60	\$ 338,4
Emulsão Bombeada	\$/Kg	0,16	6852	\$ 1096,32
Valor total	\$ 2456,44			

Fonte: (FEM, 2021)

Anexo 2: Tabela de preços do explosivo e acessórios de detonação do desmonte II

Nome	Unidade	Preço	Quantidade	Preço total
Booster 150 Gms	\$/u	2,57	169	\$ 434,33
Detonador de 500 ms	\$/m	6,00	160	\$ 1014
Conector de 17 ms	\$/m	6,48	60	\$ 388,8
Conector de 25 ms	\$/m	5,64	120	\$ 676,8
Emulsão Bombeada	\$/Kg	0,16	8188	\$ 1310,08
Valor total	\$ 3824,01			

Fonte: (FEM, 2021)