

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Escola de Engenharia
Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas

Edinéia de Oliveira Marques

**Otimização da fragmentação obtida através do desmonte de rochas por explosivos em
mina a céu aberto de calcário**

Belo Horizonte
2019

Edinéia de Oliveira Marques

**Otimização da fragmentação obtida através do desmonte de rochas por explosivos
em mina a céu aberto de calcário**

Dissertação de Mestrado Profissional
apresentada ao Curso de Pós-Graduação em
Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas
da Universidade Federal de Minas Gerais como
parte dos requisitos necessários à obtenção do
título de Mestre em Engenharia Metalúrgica,
Materiais e de Minas

Orientador: Dr. Renan Collantes Candia

Coorientador: Dr. Douglas Batista Mazzinghy

Belo Horizonte

2019

M357o	<p>Marques, Edineia de Oliveira. Otimização da fragmentação obtida através do desmonte de rochas por explosivos em mina a céu aberto de calcário [recurso eletrônico] / Edineia de Oliveira Marques. – 2019. 1 recurso eletrônico (xv, 86 f. : il., color.) : pdf.</p> <p>Orientador: Renán Collantes Candia. Coorientador: Douglas Batista Mazzinghy.</p> <p>Dissertação (mestrado profissional) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.</p> <p>Bibliografia: f. 85-86. Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.</p> <p>1. Engenharia de minas - Teses. 2. Calcário - Teses. 3. Cominuição (Beneficiamento de minério) - Teses. 4. Otimização - Teses. I. Candia, Renán Collantes. II. Mazzinghy, Douglas Batista. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU: 622(043)</p>
-------	---

Ficha catalográfica: Biblioteca Profº Mário Werneck, Escola de Engenharia da UFMG



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA METALÚRGICA,
MATERIAIS E DE MINAS/MP

UFMG

ATA DA DEFESA DA DISSERTAÇÃO DA ALUNA EDINÉIA DE OLIVEIRA MARQUES

Realizou-se, no dia 28 de agosto de 2019, às 14:00 horas, Sala 4245, da Universidade Federal de Minas Gerais, a defesa de dissertação, intitulada *AVALIAÇÃO DO DESMONTE DE ROCHAS POR EXPLOSIVOS EM MINA A CÉU ABERTO DE CALCÁRIO ATRAVÉS DO MODELAMENTO MATEMÁTICO DE KUZ-RAM*, apresentada por EDINÉIA DE OLIVEIRA MARQUES, número de registro 2017721012, graduada no curso de ENGENHARIA DE MINAS, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em ENGENHARIA METALÚRGICA, MATERIAIS E DE MINAS, à seguinte Comissão Examinadora: Prof(a). Renan Collantes Candia - Orientador (UFMG), Prof(a). Douglas Batista Mazzinghy (UFMG), Prof(a). Jose Ildefonso Gusmao Dutra (UFMG).

A Comissão considerou a dissertação:

Aprovada

Reprovada

Finalizados os trabalhos, lavrei a presente ata que, lida e aprovada, vai assinada por mim e pelos membros da Comissão.
Belo Horizonte, 28 de agosto de 2019.

Prof(a). Renan Collantes Candia (Doutor)

Prof(a). Douglas Batista Mazzinghy (Doutor)

Prof(a). Jose Ildefonso Gusmao Dutra (Doutor)

Observação:

Segue a alteração no título da dissertação, conforme solicitado pela banca examinadora:

OTIMIZAÇÃO DA FRAGMENTAÇÃO OBTIDA ATRAVÉS DO DESMONTE DE
ROCHAS POR EXPLOSIVOS EM MINA A CÉU ABERTO DE CALCÁRIO

Prof. Vicente T. L. Buono
Coordenador
Mestrado Profissional em Engenharia
Metalúrgica, Materiais e de Minas/EE UFMG

A Deus, aos meus pais, irmãos, marido e amigos.

AGRADECIMENTOS

Deixo aqui registrado os meus sinceros agradecimentos a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a conclusão deste trabalho, especialmente:

A Deus que nos oferece os desafios certos no tempo exato em que estamos prontos a recebê-los e abraçá-los.

Ao meu orientador Professor Renan Collantes Candia pela dedicação.

Ao meu coorientador Professor Douglas Batista Mazzinghy pelo imenso suporte e indicação de referências bibliográficas sobre o tema.

Ao Anderson Rodrigues, *blaster* responsável pela mina de Matozinhos, pelo apoio, ensinamentos e interesse no projeto.

Ao Felipe, meu marido e engenheiro de minas, pelo apoio, paciência, colaboração técnica e incentivo.

À equipe da Belocal pelo suporte na pesquisa, incentivo à melhoria contínua e liberação de dados e recursos para realização deste trabalho.

“A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu, mas pensar o que ninguém ainda pensou sobre aquilo que todo mundo vê.” (Arthur Schopenhauer)

AGRADECIMENTOS

Deixo aqui registrado os meus sinceros agradecimentos a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a conclusão deste trabalho, especialmente:

A Deus que nos oferece os desafios certos no tempo exato em que estamos prontos a recebê-los e abraçá-los.

Ao meu orientador Professor Renan Collantes Candia pela dedicação.

Ao meu coorientador Professor Douglas Batista Mazzinghy pelo imenso suporte e indicação de referências bibliográficas sobre o tema.

Ao Anderson Rodrigues, *blaster* responsável pela mina de Matozinhos, pelo apoio, ensinamentos e interesse no projeto.

Ao Felipe, meu marido e engenheiro de minas, pelo apoio, paciência, colaboração técnica e incentivo.

À equipe da Belocal pelo suporte na pesquisa, incentivo à melhoria contínua e liberação de dados e recursos para realização deste trabalho.

RESUMO

A mina de calcário da Mineração Belocal localizada em Matozinhos fornece calcário para o processo produtivo de cal utilizada em diversos segmentos, desde o setor alimentício até indústrias químicas. A fragmentação inicial do calcário é obtida por meio do desmonte de rochas e pode ser modelada com o auxílio de modelos matemáticos. O modelo de Kuz-Ram utiliza dados de caracterização da rocha, do explosivo e dos parâmetros geométricos do plano de fogo para obter a distribuição granulométrica resultante do processo. A curva de fragmentação modelada foi comparada com a curva fornecida pela fotoanálise do material desmontado para verificar a aderência do modelo. Após validação, foram determinados novos parâmetros geométricos para testes em campo com o objetivo de minimizar a geração de material como granulometria abaixo de 50 mm sem comprometer o desempenho da planta de beneficiamento. A aderência do modelo em relação aos dados experimentais foi considerada razoável e os resultados dos testes foram satisfatórios aumentando o aproveitamento do material e reduzindo o custo.

Palavras chave: Desmonte por explosivos, Fragmentação, Modelo Kuz-Ram, Otimização, Calcário.

ABSTRACT

The limestone mine of Mineração Belocal located in Matozinhos provides limestone for the production process of lime used in various segments, from the food sector to chemical industries. The initial fragmentation of the limestone is obtained through blasting and can be modeled with the aid of mathematical models. The Kuz-Ram model uses data to characterize the rock, the explosive, and the geometric parameters used in the blasting to obtain the resulting particle size distribution of the process. The modeled fragmentation curve was compared with the curve provided by the granulometric photoanalysis of the blasted material to verify the adherence of the model. After validation, new geometric parameters were determined for field tests in order to minimize material generation such as particle size smaller than 50 mm without compromising the plant performance. The adherence of the model in relation to the experimental data was considered reasonable and the results of the tests were satisfactory increasing the utilization of the material and reducing the cost.

Key words: Rock blasting, Fragmentation, Kuz-Ram model, Optimization, Limestone.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Vista aérea da região da Mina de Matozinhos (Google Earth).....	22
Figura 2: Cráton São Francisco (Alkmim et al., 1993 in Alkmim, 2004).....	23
Figura 3: Forno de cal horizontal.....	29
Figura 4: Forno vertical de cal.....	30
Figura 5: Processo básico geral de uma indústria de cal.....	31
Figura 6: Zona dos processos de detonação. Fonte: ALONSO et. al., 2013.....	42
Figura 7: Pressão de detonação (Pd) e pressão de explosão (Pe) de dois tipos de explosivos. Fonte: ALONSO et. al., 2013.....	43
Figura 8: Tratamento dos dados descarregados.....	45
Figura 9: Principais tipos de malhas de perfuração. Fonte: Atlas Powder Company, 1987.	47
Figura 10: Maior eficiência no uso da energia do explosivo em furos inclinados (Alonso et. al., 2013).	48
Figura 11: Parâmetros geométricos do plano de fogo (ALONSO et. al., 2013, adaptado pela autora).	49
Figura 12: Diagrama representando a cadeia de operações unitárias mostrando a transferência de produtos (Hustrulid, 1999).	50
Figura 13: Representação do diagrama do sistema de fragmentação global “mine-to-mill” e os subsistemas mina e planta (Hustrulid, 1999).....	51
Figura 14: Visão geral do processamento de imagens no WipFrag.....	53

Figura 15: Curvas granulométrica dos desmontes realizados obtidas por meio de análise por imagem.	61
Figura 16: Equipamento utilizado para medição da velocidade de detonação.	62
Figura 17: Procedimento operacional para medição de VOD.	63
Figura 18: Curvas granulométricas obtidas por meio do modelo de Kuz-Ram para cada uma das simulações realizadas.	66
Figura 19: Índices físicos obtidos por meio das análises das amostras.	67
Figura 20: Gráficos de Tensão versus Deformação das amostras.	68
Figura 21: Resultado da medição do VOD em campo do encartuchado e ANFO alta densidade.	71
Figura 22: Resultado da medição do VOD em campo do encartuchado e ANFO baixa densidade.	71
Figura 23: Curva granulométrica obtida por meio do modelo de Kuz-Ram.	73
Figura 24: Curva granulométrica do modelo de Kuz-Ram e dos dados experimentais obtidos por meio de análise por imagem.	74
Figura 25: Malha sugerida para teste.	76
Figura 26: Curva granulométrica do desmonte baseado no modelo de Kuz-Ram com a nova malha de perfuração.	77
Figura 27: Curva granulométrica do modelo de Kuz-Ram e dos dados experimentais com a nova malha de perfuração obtidos por meio de análise por imagem.	78
Figura 28: Curva granulométrica do modelo de Kuz-Ram do caso base comparada a curva granulométrica do modelo Kuz-Ram do desmonte otimizado.	79
Figura 29: Curva granulométrica dos dados experimentais do caso base comparada a curva granulométrica do desmonte otimizado.	79

Figura 30: Figura do desmonte realizado para teste utilizando-se a nova malha.81

Figura 31: Figura do desmonte realizado para teste utilizando-se a nova malha.82

LISTA DE TABELAS

Tabela 01: Limite de velocidade de partícula por faixa de frequência (ABNT, 2018)...	19
Tabela 02: Quadro estratigráfico para o Grupo Bambuí (Dardenne & Walde, 1979, adaptado pela autora).....	24
Tabela 03: Resultados dos ensaios geomecânicos.	68
Tabela 04: Características do maciço rochoso.....	69
Tabela 05: Variáveis de definição do fator rocha.	69
Tabela 06: Parâmetros da malha de perfuração.	70
Tabela 07: Características do ANFO fornecidas pelo fabricante.....	70
Tabela 08: Parâmetros de entrada do modelo de desmonte.....	72
Tabela 09: Medições realizadas em campo.	73
Tabela 10: Comparação dos parâmetros do desmonte caso base e desmonte proposto..	76
Tabela 11: Avaliação de variáveis no desmonte utilizando a malha inicial e malha sugerida após os estudos.....	80

LISTA DE NOTAÇÕES

ν - Coeficiente de Poisson

A - Fator da rocha

ABS - *Absolute Bulk Strength*

ANFO - *Amonium Nitrate - Fuel Oil*

AWS - *Absolute Weight Strength*

B - Afastamento do furo

D - Diâmetro do furo

d - Densidade

E_r - Energia relativa em massa (RWS) do explosivo comparada ao ANFO (=100).

GPa - Giga Pascal

H - Altura do banco

ISRM - *International Society For Rock Mechanics*

K - Razão de carga (kg/m^3)

MPa - Mega Pascal

n - Índice de Uniformidade

P_d - Pressão de detonação

P_e - Pressão do furo

Q_e - Massa do explosivo utilizado (kg)

RBS - *Relative Bulk Strength*

S - Espaçamento do furo

u - Velocidade de partícula

VOD - Velocidade da Onda de Detonação

v - Velocidade de propagação

V_p - Afastamento prático

V_t - Afastamento teórico

X_{50} - Tamanho médio da partícula

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	17
1.1 Objetivos	17
1.2 Justificativa e relevância	18
2. MINA OBJETO DE ESTUDO.....	21
2.1 Localização.....	21
2.2 Caracterização geológica.....	22
2.2.1. Geologia regional	22
2.2.2. Geologia local	25
2.3 Lavra e beneficiamento	26
2.4 Produção de cal.....	27
2.5 Aplicações de cal	31
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	33
3.1 Maciço rochoso.....	33
3.2 Explosivos	36
3.2.1. Tipos de explosivos mais comuns.....	40
3.2.2. Ruptura da rocha	41
3.2.3. Medição de velocidade de detonação do explosivo	44
3.3 Plano de fogo.....	45
3.4 Processo produtivo.....	50
3.5 Análises granulométricas	51
3.5.1. Erros de análise	53
3.6 Modelos matemáticos	55
3.6.1. Modelo de Kuz-Ram	56
4. MATERIAIS E MÉTODOS	61
4.1 Análise granulométrica por imagem.....	61
4.2 Caracterização dos explosivos.....	61
4.3 Caracterização da rocha	63
4.4 Coleta dos dados da geometria do desmonte.....	64
4.5 Tratamento dos dados	64

4.6.	Simulações.....	65
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	67
5.1.	Caracterização da rocha	67
5.2.	Medidas em campo	70
5.2.1.	Parâmetros do Desmonte	70
5.2.2.	Características dos Explosivos.....	70
5.3.	Modelamento matemático	72
5.3.1.	Validação do modelo	74
5.4.	Análise financeira	74
5.5.	Aplicação dos novos parâmetros	76
6.	CONCLUSÕES	84
7.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	85
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	86

1. INTRODUÇÃO

No atual cenário da indústria mineral, o desmonte de rochas por explosivo ainda é largamente utilizado na cominuição primária do maciço rochoso, sobressaindo-se sobre o desmonte mecânico, pois este não é capaz de entregar a produtividade que uma operação mineira típica demanda, elevando-se os custos operacionais significativamente.

O desmonte de rocha possui custo operacional consideravelmente menor que a operação subsequente de cominuição, a britagem. Porém, por ter pouca representatividade em termos percentuais na composição do custo de mina, o desmonte de rocha por explosivos é deixado em segundo plano e a busca por melhorias não é priorizada.

Um desmonte de rocha bem realizado também afeta positivamente as operações de carregamento e transporte, reduzindo os custos operacionais dessas etapas por meio do aumento da produtividade e redução da necessidade de uma cominuição complementar. Além disso, a melhoria da regularidade na fragmentação do material no desmonte pode significar redução de energia na planta de britagem e o melhor aproveitamento do produto na indústria.

Pode-se dizer, também, que as técnicas de desmonte de rocha vêm se modificando nos últimos anos para minimizar seus efeitos percebidos pela comunidade circundante e respeitar as restrições ambientais no entorno do empreendimento. A proximidade com comunidades vizinhas pode gerar reclamações devido à vibração gerada, ruído e/ou poeira em suspensão. O empreendimento mineiro possui como principal característica a rigidez locacional, portanto, a continuidade de suas atividades está sujeita ao cumprimento de todas as normas pertinentes.

1.1 Objetivos

Visando aperfeiçoar o processo de desmonte e beneficiamento de calcário na unidade de Matozinhos, este trabalho terá como objetivos:

- Levantar dados para definir a situação atual;
- Criar cenários de desmonte a partir das simulações;
- Escolher cenário que atenda às premissas:
 - Obter uma distribuição granulométrica em conformidade com a demanda da planta de beneficiamento;
 - Reduzir geração de finos;
- Validar cenário em campo;
- Reduzir custos do desmonte.

1.2. Justificativa e relevância

A busca pela fragmentação ideal da rocha por meio do uso de explosivos é objeto de estudos realizados durante muito tempo por vários autores renomados, com destaque para Kuznetsov (1973), Cunningham (1983), Lilly (1986) e Djordjevic (1999).

O modelo de Kuz-Ram é, até hoje, muito utilizado e combina as propriedades da rocha, os parâmetros geométricos do plano de fogo e as características dos explosivos e prevê de maneira geral o comportamento granulométrico da rocha após o desmonte.

Na prática, em minas de porte menor, a definição dos parâmetros do desmonte de rocha é realizada de forma empírica, baseado na experiência do *blaster* (pessoa responsável pela detonação) e, uma vez atingido o objetivo inicial, não se trabalha no aperfeiçoamento do desmonte de rochas. Os mesmos parâmetros continuam sendo utilizados a menos que haja alguma alteração na rocha ou na granulometria demandada pelos processos posteriores.

O melhor aproveitamento do desmonte gera ganhos financeiros percentualmente significativos, além de maior recuperação física do minério que, no caso da produção da cal, possui grandes restrições quanto a finos no processo e na operação dos fornos.

Existem muitas alterações que podem ser realizadas nos parâmetros do desmonte e/ou nas características dos explosivos de forma a obter-se um desmonte mais próximo do desejado sem investimentos significativos. Porém, deve-se ter um direcionamento de

forma a alterar parâmetros que impactem positivamente o resultado para evitar testes sem sucesso e desmontes trabalhosos de se lavrar ou com baixa recuperação.

Existem outros aspectos do desmonte de rocha que demandam atenção, pois garantem a estabilidade das instalações e estruturas - sejam naturais ou não -, além do conforto da comunidade vizinha. Entre eles estão a vibração de terreno e a pressão acústica que podem ser monitoradas por sismógrafos e são regulamentadas pela ABNT 9653/2018, “Guia para avaliação dos efeitos provocados pelo uso de explosivos nas minerações em áreas urbanas”. Os valores estabelecidos pela ABNT NBR 9653/2018 para vibração da partícula estão descritos na Tabela 01 que apresenta faixa de frequência versus velocidade de partícula individual por canal:

Tabela 01: Limite de velocidade de partícula por faixa de frequência (ABNT, 2018).

Faixa de frequência (Hz)	Limites de velocidade de vibração de partícula de pico
4 a 15	Iniciando em 15 mm/s, aumenta linearmente até 20 mm/s
15 a 40	Acima de 20 mm/s, aumenta linearmente até 50 mm/s
Acima de 40	50 mm/s

Para valores de frequência abaixo de 4 Hz, deve ser utilizado como limite o critério de deslocamento de partícula pico de no máximo 0,6 mm (de zero a pico).

Para as pressões acústicas, a norma ABNT NBR 9653/2018, recomenda uma pressão máxima de pico de 100 Pa (nível de 134 dB(L) pico).

Outro ponto que merece destaque, principalmente pelo aspecto ambiental e pelo incômodo que pode causar, é a geração de pó em suspensão durante o desmonte. Entretanto, esse limite não é regulamentado por nenhuma legislação específica.

Outro órgão que regulariza as operações de desmonte é o Exército através das diretrizes

e portarias que estabelecem controles rígidos da produção, consumo e utilização de explosivo. Como exemplo, há a Portaria COLOG N° 3 de 10 de maio de 2012, que aprova as normas relativas às atividades com explosivos e seus acessórios. Existe, também, a Portaria COLOG N° 42 de 28 de março de 2018 que dispõe sobre procedimentos administrativos relativos às atividades com explosivos e seus acessórios e produtos que contêm nitrato de amônio.

Além dessas, existem outras portarias e normas que regulamentam o trabalho de desmonte de rochas com explosivos, dentre elas:

- Portaria 237 de 2001 - Norma Regulamentadora de Mineração (NRM).
- Portaria 12 de 2002 - define a atividade de Mineração no Brasil incluindo desmonte de rocha com explosivos.
- NRM-16 - Norma Regulamentadora de Mineração - operações com explosivos - estabelece critérios e cuidados com transporte e manuseio e armazenamento de explosivos na mineração.
- Portaria 18 - D Log de 07 de novembro de 2005 - Normas Administrativas relativas às atividades com explosivos e acessórios.
- Portaria 09 - D Log de 31 de dezembro de 2008 altera os artigos 20, 21, 22 e 25 das normas administrativas relativas às atividades com explosivos e acessórios - NaraExAc, aprovada pela portaria 18 - D Log de 7 de novembro de 2005.
- R105 Decreto 55.649 de 28 de janeiro de 1965.

Desta forma pode-se propor alterações do desmonte embasadas no modelo matemático e, de forma a manter os impactos dentro dos limites estabelecidos pela legislação.

2. MINA OBJETO DE ESTUDO

Neste capítulo, são apresentadas de forma sumarizada as principais características da mina em estudo, explicitando ao leitor características locais, além dos processos empregados na produção e aplicações do produto.

2.1. Localização

O município de Matozinhos localiza-se na Bacia do Rio São Francisco, Sub-Bacia do Ribeirão da Mata, estando inserido na Macrorregião Central de Minas Gerais, na região norte da Mesorregião Metropolitana de Belo Horizonte e Microassociação Municipal do Campo das Vertentes/Central.

A mina em questão explora de calcário e é de propriedade da empresa Mineração Belocal Ltda pertencente ao grupo Belga Lhoist. A capacidade nominal de produção é quatro milhões de toneladas de calcário por ano. A Figura 1 apresenta uma vista aérea da região da mina.



Figura 1: Vista aérea da região da Mina de Matozinhos (Google Earth).

2.2. Caracterização geológica

A caracterização geológica é apresentada subdividida em geologia regional e local para melhor entendimento.

2.2.1. Geologia regional

As rochas da área em apreço estão inseridas regionalmente no Grupo Bambuí, que representa parte da cobertura do Cráton do São Francisco (núcleo arqueano de longa estabilidade tectônica). O Cráton do São Francisco ocupa parte do território brasileiro numa faixa aproximada N-S, desde o estado de Sergipe, passando pela Bahia, Goiás, Mato Grosso e Minas Gerais. É delimitado por faixas de dobramento e cavalgamento mais jovens (predominantemente neoproterozóicas) que geralmente correspondem aos altos topográficos (vide Figura 2, modificada de Alkmin et al., 1993 in Alkmin, 2004).

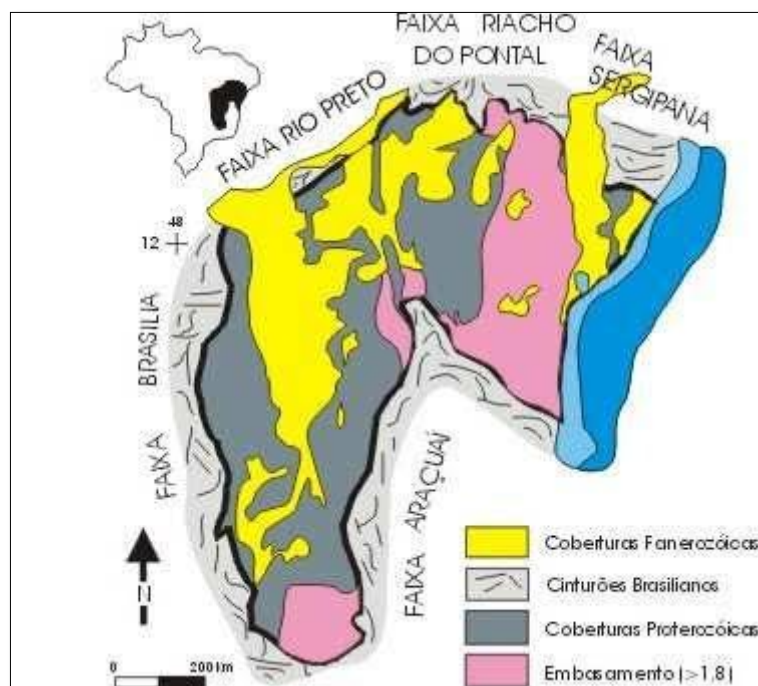


Figura 2: Cráton São Francisco (Alkmim et al., 1993 in Alkmim, 2004).

As coberturas neoproterozóicas perfazem a maior parte, em superfície, do cráton. A unidade de maior expressão geográfica é o Supergrupo São Francisco e, dentro deste, o Grupo Bambuí (unidade de topo).

A estratigrafia regional, da base para o topo, pode ser descrita como se segue:

I. Complexo Belo Horizonte

Associações granitóides essencialmente dos tipos TTG (tonalito-trondhjemitogranodiorito) e granito-granodiorito, estas últimas geralmente tardi-arqueanas. Suítes granitóides cálcio-alcalinas são comuns na borda sul do bloco.

II. Complexo Gnáissico-Granítico Migmatítico

De idade arqueana, é composto basicamente por três conjuntos litológicos distintos: rochas básicas encontradas em blocos com esfoliação esferoidal, granitóides de coloração esbranquiçada a rósea com granulação irregular, e gnaisse-migmatitos compostos por ortognaisses variados, granitóides migmatizados e metassedimentos com grande variedade metamórfica.

III. Grupo Bambuí

Importante unidade litoestratigráfica neoproterozóica. Como referências bibliográficas citam-se os trabalhos de Dardenne (1978), Dardenne & Walde (1979), Magalhães (1988) e CPRM (2003). Um quadro estratigráfico para a unidade é apresentado na Tabela 02.

Tabela 02: Quadro estratigráfico para o Grupo Bambuí (Dardenne & Walde, 1979, adaptado pela autora).

Formação	Litotipos
Três Marias	Arcóseos, siltitos e folhelhos esverdeados com proporções menores de rochas carbonáticas.
Serra da Saudade	Constituída por siltitos, verdetes (pelitos verdes), folhelhos e argilitos com pequenas e esparsas intercalações lenticulares de calcário.
Lagoa do Jacaré	Representa um pacote de intercalações cíclicas de siltitos, margas, calcários pretos, calcários fétidos e calcários oolíticos a pisolíticos.
Serra de Santa Helena	Folhelhos sílticos, folhelhos, siltitos, margas e lentes esparsas de calcário preto. O termo "ardósia" tem sido utilizado para designar os folhelhos sílticos.
<u>Sete Lagoas</u>	Calcários argilosos, calcários puros, calcários e dolomitos com brechas lamelares e estruturas estromatolíticas e dolomitos litográficos. Dividido em: Membro Pedro Leopoldo (nível basal constituído predominantemente por calcissiltitos e subordinadamente calcarenitos e margas) e <u>Membro Lagoa Santa</u> (nível superior representado por calcarenitos e subordinadamente calcissiltitos e calcirruditos), representando dois ciclos de sedimentação distintos.
Carrancas/Samburá	Paraconglomerado de matriz é arcoseana, mal selecionado. Arcabouço com predomínio de seixos e grânulos de quartzo e fragmentos de rochas (principalmente gnaiss e calcário); tamanho grânulo a matacão. A posição estratigráfica e o ambiente de sedimentação desta unidade são ainda muito controversos.

IV. Formações Superficiais

Representam o conjunto mais recente de idades terciárias e quaternárias. Na área estudada correspondem a depósitos aluviais (cascalho fino a grosso, areia, silte e argila) e coberturas detrito-lateríticas (sedimentos areno-argilosos e fragmentos de quartzo originados principalmente por retrabalhamento da Formação Serra de Santa Helena).

2.2.2. Geologia local

O reconhecimento geológico local foi efetuado a partir de trabalhos de campo, furos de sondagem e histórico das frentes de lavras.

De um modo geral predominam calcários com percentuais variáveis de óxidos e enxofre, este último na forma de pirita ou como enxofre livre em associação com grafita. As variações litoquímicas distribuem-se em geometria tabular ou lenticular. O contato entre os membros Pedro Leopoldo e Lagoa Santa é bastante nítido, sendo de natureza tectônica sub-horizontal.

Em termos litológicos, a base da Formação Sete Lagoas, verificada nos furos de sondagem, é composta por fácies carbonáticas impuras do Membro Pedro Leopoldo. Trata-se de dololutitos margosos, calcilutitos impuros, margas e milonitos de cor cinza-claro a verde-claro, com frequentes lâminas de metapelitos de cor mais escura. O conglomerado basal não ocorre no local.

O contato com as rochas cristalinas do embasamento parece ter sido retrabalhado tectonicamente, visto que segue o ângulo do S1//S0 (30° a 40°).

As rochas carbonáticas impuras predominantes no Membro Pedro Leopoldo, ocorrem logo acima dos calcilutitos, compondo margas ou meta-margas ricas em filossilicatos que se orientam segundo o S1//S0. A foliação é frequentemente anastomosada, e em seus planos é marcante a existência de forte lineação de estiramento/mineral. O grau de deformação na região do contato brusco com o Membro Lagoa Santa sugere a existência de uma falha de descolamento (*décollement*), caracterizada pela presença de microdobras,

estruturas sigmoidais (sombas de pressão, caudas de recristalização) e veios concordantes e discordantes de calcita e/ou quartzo. O alto teor em sílica faz desta rocha estéril na produção da cal.

Estratigraficamente acima do Membro Pedro Leopoldo afloram calcarenitos e, mais raramente, calcissiltitos e microbrechas do Membro Lagoa Santa. A fácies principal da unidade é composta por calcário cinza escuro a preto, variando de cinza médio a claro quando alterado. A granulometria é de fina a média e a rocha dispõe-se em camadas tabulares contínuas ou descontínuas (“lentes”). Ocorrem ainda dobras assimétricas com vergência para oeste, microfalhas, veios de calcita dobrados e tension gashes rotacionados. A espessura atinge aproximadamente 150m.

O Membro Lagoa Santa aloja as reservas de minério para cal. Contudo, não pode ser considerado minério como um todo, pois variações geoquímicas ocorrem constantemente, podendo atingir patamares de SiO_2 e S que inviabilizam sua utilização na fabricação da cal. O modelamento geológico da jazida foi realizado com base nessas características geoquímicas somadas às peculiaridades litológicas.

As unidades proterozóicas e arqueanas são cobertas ainda por depósitos aluvionares e lateríticos de idade quaternária.

O que se pode afirmar, em linhas gerais, é que o calcário puro (minério) e estéril corresponde aos calcarenitos típicos do Membro Lagoa Santa, ao passo que a marga (estéril) relaciona-se ao Membro Pedro Leopoldo. Os calcários silicosos brando e intermediário podem ocorrer em um ou outro membro, são comuns nas zonas de contato, e estão preferencialmente no Membro Lagoa Santa.

2.3. Lavra e beneficiamento

Todas as informações coletadas durante o período de sondagem da região dão origem ao modelo de blocos que, por sua vez, orienta o avanço da lavra. Dessa forma, é possível prever a qualidade e os volumes de minério e estéril em toda a extensão dos possíveis

avanços. As áreas são delimitadas pela equipe da topografia e a remoção do estéril se dá com o auxílio de escavadeiras e caminhões. No caso da mina de Matozinhos, o estéril é basicamente solo e argila e é depositado em uma área denominada Depósito Controlado de Estéril em conformidade com um projeto que define a configuração do mesmo garantindo a estabilidade e prevê, também, gradativamente a recomposição vegetal de toda a área.

A lavra do minério é realizada através do desmonte de rocha com explosivos. A rocha é perfurada em uma malha pré-estabelecida e o explosivo inserido nos furos que são ligados entre si através de acessórios de desmonte. A detonação é iniciada e causa a primeira fragmentação da rocha. O calcário fragmentado é carregado utilizando-se escavadeiras e transportado por caminhões até a planta de beneficiamento onde é britado e classificado.

Na planta de beneficiamento, há um britador primário de mandíbulas da fabricante Metso modelo C140 e um britador secundário da fabricante ICON W1515 de rolos dentados. As peneiras utilizadas na classificação são da fabricante Metso e o produto classificado é dividido em três pilhas das seguintes granulometrias:

Pilha 01: 15 – 45 mm

Pilha 02: 45 – 95 mm

Pilha 03: 95 – 127 mm

O calcário abaixo de 15 mm é comercializado como material agregado.

2.4. Produção de cal

O processo de fabricação de cal consiste em submeter o calcário, com diferentes granulometrias, a altas temperaturas (por volta dos 1200°C) para que se processe a reação química de transformação do calcário em cal, com a liberação de dióxido de carbono, como mostrado na Equação 01.



Depois de transportado para a planta de beneficiamento, o calcário bruto é cominuído através dos britadores e posteriormente classificado em peneiras vibratórias até atingir as granulometrias desejadas para aplicação em diferentes tipos de fornos. As granulometrias utilizadas nos fornos da Belocal são:

1. Fornos Horizontais: 15 – 45 mm
2. Fornos Verticais: 45 – 127 mm

Há uma limitação na alimentação dos fornos de calcário de granulometria inferior a 15 mm, em função da quantidade de calor necessária à calcinação do calcário com menor diâmetro. O grau de calcinação é o resultado da exposição do minério a uma dada temperatura, que geralmente permanece fixa, durante um tempo.

No caso do forno horizontal, mostrado na Figura 3, o tempo de residência é menor, aproximadamente 3 horas, e isso possibilita uma alimentação de calcário com granulometria menor, porém limitado ao mínimo de 15 mm para evitar a calcinação excessiva do material e a formação de anéis de colagem no interior do forno.

No caso do forno vertical, mostrado na Figura 4, esse tempo de residência é, em média 24 horas, podendo variar em função da capacidade do forno. Calcários de menor granulometria necessitam de menos energia para uma calcinação completa, no entanto, o ajuste de temperatura pelo tempo de exposição leva em conta a melhor configuração para a distribuição granulométrica na entrada do forno, e não apenas a fração fina. Portanto, fragmentos menores calcinam mais facilmente e tendem a formar aglomerados de cal, causando instabilidade ao processo e comprometendo a qualidade da cal.



Figura 3: Forno de cal horizontal.



Figura 4: Forno vertical de cal.

A cal, por sua vez, também passa por processos de britagem e peneiramento para ser estocada nos silos de diferentes faixas granulométricas, de acordo com a necessidade de cada cliente. A expedição do produto pode ser através de rodovia e/ou ferrovia.

A Figura 5 ilustra o fluxograma geral simplificado da fabricação da cal, desde a mina até o processo de calcinação. O processo pode variar de fábrica para fábrica ou entre empresas, entretanto, são apenas variações desse arranjo geral.

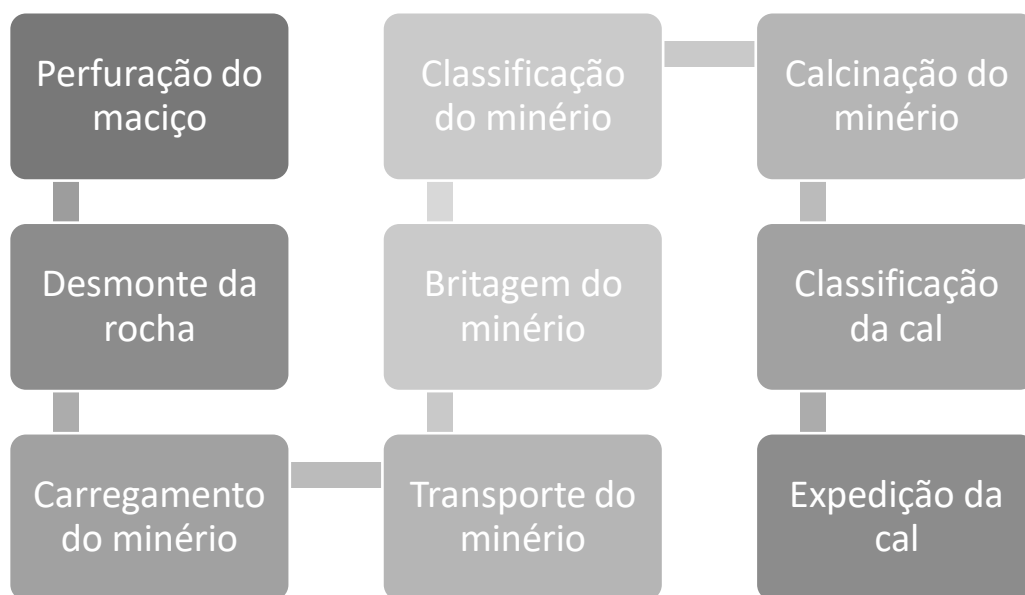


Figura 5: Processo básico geral de uma indústria de cal.

2.5 Aplicações de cal

A cal é comercializada em diversos segmentos por possuir várias aplicações, entre elas pode-se destacar:

1. Açúcar e álcool – é utilizada como agente de clarificação do caldo de cana na fabricação de açúcar branco, na lavagem de cana de açúcar e no tratamento de efluentes;
2. Vidro – utilizada no processo de fabricação do vidro;
3. Mineração de não ferrosos – é utilizada na recuperação de ouro, cobre, níquel, zinco e nióbio. Também utilizada na fabricação de alumina como agente desfosforante e na recuperação de soda cáustica;
4. Siderurgia – é utilizada como aglomerante na sinterização, como fundente na produção de aço líquido e como matéria-prima em agentes dessulfurantes e desfosforantes no refino do aço;
5. Mistura asfáltica – é utilizada como *filler* ativo na mistura asfáltica, principalmente concreto betuminoso usinado a quente;
6. Construção civil – é destinada ao preparo de argamassas de alto padrão de qualidade;

7. Indústrias químicas – é empregada como matéria-prima de variados compostos químicos, controle de pH em diversos processos e tratamento de efluentes e resíduos;
8. Tratamento de água, efluentes e esgotos – é empregada na correção de pH e no controle de agentes microbiológicos de água potável, efluentes, esgotos e resíduos em geral;
9. Tratamento de gases – é utilizada na captura de poluentes como dióxido de enxofre (SO_2), ácido clorídrico (HCl), metais pesados, dioxinas e furanos;
10. Mineração de ferrosos – é utilizada no espessamento e no ajuste da viscosidade da polpa;
11. Estabilização do solo – é aplicada na estabilização de solos para pavimentação em bases e sub-bases em construções civis;
12. Celulose e papel – é utilizada como agente químico para o processo de recuperação de soda cáustica do licor verde e como matéria-prima na fabricação do carbonato de cálcio precipitado – empregado para carga e revestimento de papéis de impressão;
13. Agricultura e fertilizantes – é utilizada como corretivo de pH de solo.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O desmonte de rocha é feito com técnicas específicas que consistem em perfurar o maciço rochoso, introduzir o explosivo nas perfurações, detoná-lo e, finalmente, remover o material (RICARDO e CATALANI, 2007).

A fragmentação do maciço no desmonte de rochas é definida por três fatores determinantes:

1. Características do maciço rochoso;
2. Características dos explosivos utilizados;
3. Geometria do plano de fogo.

3.1. Maciço rochoso

Segundo Morais (2004), existem quatro aspectos críticos para um projeto de desmonte de rochas: o maciço rochoso, o explosivo, sua distribuição e a sequência da detonação. Os dois últimos aspectos têm recebido análise bastante rigorosa nos últimos anos, com o desenvolvimento de ferramentas computacionais baseadas em modelos e programas de projeto de desmonte. O desempenho dos explosivos pode ser descrito por complexas características dos detonadores, mas tem permanecido no domínio de poucos técnicos e peritos e deve ainda ser associado ao desempenho do desmonte de uma maneira mais apropriada, principalmente nas rotinas de elaboração de projeto de desmonte. As propriedades do maciço rochoso têm uma influência controladora sobre o desempenho do desmonte, mas permanece bastante complexa a incorporação dessas propriedades nos atuais procedimentos de elaboração dos planos de fogo.

Devido à grande variação nas propriedades das rochas, podem-se tomar como referência algumas medições básicas para caracterizá-las. Algumas propriedades, por serem relativamente fáceis de serem medidas, são muito úteis nesse aspecto e podem ser designadas como propriedades-índice das amostras de rocha (AZEVEDO; MARQUES, 2006).

As propriedades-índice das rochas são propriedades físicas que refletem a estrutura, a composição, o arranjo espacial e o comportamento mecânico do material, como:

- Densidade
- Teor de umidade
- Porosidade
- Capacidade de absorção
- Permeabilidade
- Durabilidade
- Resistência

Essas propriedades visam caracterizar e quantificar a rocha matriz, além de fornecerem resultados correlacionáveis com as propriedades mecânicas.

Normalmente, esses índices são medidos em pequenas amostras de rocha intacta (componentes minerais + poros + microfissuras). Assim, as propriedades-índice medidas podem não ser indicativas das propriedades do maciço rochoso. A lista dessas propriedades de um espécime de laboratório ajuda a classificá-lo, primariamente, quanto ao comportamento somente da rocha e não do maciço rochoso.

A presença de porosidade nas rochas diminui sua resistência, ao passo que aumenta sua capacidade de sofrer deformação. Um pequeno volume de poros pode produzir um considerável efeito mecânico. Informações sobre a porosidade natural das rochas são frequentemente ignoradas em descrições petrológicas, mas essas informações são muito importantes quando a descrição da petrografia é usada para fins de avaliação de comportamento mecânico.

Arenitos e rochas carbonáticas apresentam, naturalmente, comportamento mecânico característico devido à sua grande variação de porosidade. Rochas ígneas, quando estão em processo de deterioração pela ação de processos intempéricos, também possuem uma porosidade elevada típica.

A maioria das rochas possui uma densidade de grãos similar, por isso possuem valores

de porosidade e densidade seca que estão muito bem correlacionados. A baixa densidade de algumas rochas geralmente está associada à sua alta porosidade. Por isso, essa é uma informação comumente vista como suficiente para se citar sobre a porosidade, mas uma descrição completa e precisa, requer a apresentação dos valores de ambos, porosidade e densidade (ISRM, 1979).

As propriedades mecânicas da rocha são uma variedade das propriedades físicas. Manifestam-se sob a ação de forças mecânicas externas e são expressas pela capacidade das rochas de opor resistência à deformação e desagregação. Dentre elas, figura a resistência mecânica que é uma função da resistência da rocha intacta, das descontinuidades presentes no maciço, da porosidade e qualquer alteração à que a rocha foi exposta.

Mokhnachev e Gromova (1970) discutem a relação entre resistência estática e dinâmica e concluem que as rochas fracas exibem uma maior dependência da taxa de deformação do que rochas resistentes. Assim sendo, um ajuste universal que considera a resistência dinâmica um múltiplo da resistência estática, é inapropriado.

As constantes mecânicas módulo de Young e coeficiente de Poisson estão relacionadas ao comportamento elástico e plástico de uma rocha sob carregamento e a partição da energia do explosivo. O Módulo de Young corresponde à razão entre a tensão e a deformação axial. O coeficiente de Poisson é a relação entre a deformação lateral e a deformação longitudinal, para uma tensão aplicada na direção longitudinal. Se uma deformação crítica é tomada como um critério de ruptura, as rochas com maiores valores de módulo de Young requerem uma maior energia dos explosivos para a sua fragmentação.

A caracterização da rocha é realizada através do teste de compressão uniaxial no qual o corpo de prova, com forma de cilindro ou prisma, é comprimido paralelamente ao eixo longitudinal e é aplicada uma carga uniaxial a uma taxa constante. A resistência uniaxial da amostra corresponde à carga axial no momento da ruptura da amostra dividido pela área da amostra. A partir desse ensaio, também é possível obter-se os valores de Módulo

de Elasticidade e Razão de Poisson.

Densidade da rocha intacta

É a massa por unidade de volume da rocha, expressa em g/cm^3 ou t/m^3 . A densidade depende principalmente do peso específico de seus elementos constituintes e de suas porosidades. Os fatores que exercem influência na densidade das rochas são os seguintes: estado de alteração, porosidade e grau de compactação. Para uma determinada rocha, por exemplo, o arenito, é possível constatar regiões onde a compactação foi mais intensa do que em outras. Nesses casos, apesar da igualdade de composição mineralógica e homogeneidade, há uma variação espacial da densidade. As rochas que apresentam uma baixa densidade e são, conseqüentemente mais porosas, tem uma menor resistência à trituração e são mais fáceis de perfurar, pois se deformam e rompem com facilidade, requerendo um fator de energia relativamente baixo enquanto as rochas densas precisam de uma maior quantidade de energia para obter uma fragmentação satisfatória.

3.2. Explosivos

Explosivos são substâncias ou misturas em qualquer estado que, quando submetidas a uma carga térmica ou mecânica suficientemente energética (calor, atrito, impacto etc.), se transformam total ou parcialmente em gases, liberando uma grande quantidade de energia num intervalo de tempo muito curto, gerando altas pressões e temperaturas (CROSBY, 1998).

Porém, vale ressaltar que uma pequena parte da energia liberada pelos explosivos é destinada para fragmentação que se dá da seguinte forma:

- Criação fraturas;
- Aumento das fraturas pré-existentes;
- Deslocamento de fragmentos do maciço rochoso;
- Movimentação do centro de gravidade para frente.

Há ainda outros efeitos indesejáveis como ultralancamento, vibração do terreno,

deslocamento de ar e pressão acústica elevada.

Alguns tipos de rocha demandam a criação de novas fraturas para fragmentação adequada. As energias de choque necessárias para a geração de novas fraturas estão associadas às altas pressões de detonação (alta velocidade de detonação e alta densidade). Outros tipos de rochas, que já se encontram fraturadas, dependem mais da ação de lançamento/deslocamento obtida pela pressão dos gases para quebra. Esse papel será melhor cumprido por um explosivo com menores velocidade de detonação e densidade.

No passado não havia uma gama de produtos explosivos entre os quais o engenheiro poderia escolher. Atualmente, os produtos disponíveis para serem colocados nos furos são muitos e suas propriedades podem ser facilmente variadas ao longo do comprimento do furo (HISTRULID, 1999).

Para a seleção do explosivo mais adequado a uma finalidade específica, é necessário conhecer as características de cada explosivo e, a partir delas, escolher o mais adequado ao tipo de aplicação requerida.

As características práticas básicas de um explosivo estão indicadas abaixo (ALONSO et. al., 2013):

Energia dos explosivos – segundo Scott et. al. (1996), é expressa em termos de massa ou volume e é definida como se segue:

- *AWS*: energia absoluta por unidade de peso do explosivo (cal/g)
- *ABS*: energia absoluta por unidade de volume do explosivo (cal/cm³)

Desses valores obtêm-se a Energia Relativa por unidade de peso (RWS) e por unidade de volume (RBS) em relação ao ANFO (produto ao qual o valor 100 é dado) que é determinado pelas relações mostradas nas Equações 02 e 03 (ALONSO et. al., 2013):

$$RWS = \left(\frac{AWS}{AWS_{Anfo}} \right) \cdot 100 \quad (02)$$

$$RBS = \left(\frac{ABS}{ABS_{Anfo}} \right) \cdot 100 \quad (03)$$

É conveniente usar o desempenho do ANFO como base de comparação com outros explosivos por ser amplamente usado, simples de fazer e com um desempenho consistente (SCOTT et. al., 1996).

Velocidade de detonação – segundo Cooper (1997) é a velocidade a que se propaga a decomposição ao longo do comprimento de uma carga explosiva. Cada tipo de explosivo tem sua própria velocidade de detonação característica, que depende dos seus componentes químicos, densidade, confinamento e diâmetro da carga. De acordo com Crosby, a velocidade de detonação de um explosivo depende de:

- Composição química do explosivo;
- Diâmetro da carga explosiva;
- Confinamento e diâmetro das partículas do explosivo;
- Grau de homogeneização da mistura;
- Densidade do explosivo;
- Umidade do explosivo;
- Temperatura do explosivo;
- Tipo e gramatura (massa) da iniciação.

Densidade do explosivo – É definida como o peso específico do explosivo, sendo a relação entre a massa e o volume medida em g/cm³. A densidade dos explosivos comerciais varia de 0,60 a 1,45 g/cm³ e é determinada por sua composição, tamanho de grão e a densidade dos componentes (CLARK, 1980).

Resistência à água – É a capacidade do explosivo se manter inalterável em presença de água. Se o explosivo tiver baixa resistência à água, não detonará. É outra propriedade importante, pois, em muitos casos, haverá concentração de água nas perfurações e, devido a isso, é importante saber se há água ou não dentro dos furos antes de selecionar o tipo de explosivo a ser utilizado (RICARDO, CATALANI, 2007).

Qualidade e volume dos gases – A detonação de uma coluna contínua de explosivos causará a transformação do explosivo em um grande volume de gases a alta temperatura e pressão. A velocidade na qual essa transformação ocorre é chamada de velocidade de detonação, sendo sua unidade de medida metros por segundo (m/s). A velocidade de detonação é uma característica a se considerar na escolha do explosivo. Em rochas menos resistentes, serão escolhidos explosivos que detonam lentamente, desenvolvendo sua energia progressivamente nos casos em que uma menor fragmentação é necessária. Explosivos com alta velocidade de detonação devem ser escolhidos quando se busca fragmentação mais intensa em rochas duras. Os explosivos industriais têm uma composição tal que as reações químicas que ocorrem geram vapores explosivos de conteúdo limitado em gases nocivos (CO e NOx), indicando que ocorre uma reação química completa (ALONSO et. al., 2013).

Sensibilidade – A sensibilidade de um explosivo pode ser definida como o maior ou menor grau de energia de iniciação que deve ser transmitida a ele para que ocorra sua iniciação e, em seguida, sua detonação.

Diferentes aspectos relacionados à sensibilidade dos explosivos podem ser considerados; alguns afetam a segurança no manuseio (fabricação, transporte e uso) e outros ao seu início na detonação. São eles:

1. Sensibilidade do detonador: Os explosivos industriais são geralmente iniciados pela detonação de uma pequena carga de explosivo de alta potência. Esse explosivo pode ser localizado em um detonador, em um cabo detonador ou em um multiplicador, de acordo com o procedimento usado para a iniciação.
2. Sensibilidade à onda explosiva: Essa característica consiste na capacidade de transmitir a detonação entre os cartuchos explosivos, colocados em linha e um após o outro ou separados um do outro por certa distância. Tal fato é chamado de “detonação por simpatia”.
3. Sensibilidade ao choque e fricção: Para estabelecer a sensibilidade do choque de

um explosivo, são realizados testes padronizados, que consistem em derrubar um martelo na amostra do explosivo a ser testado para determinar a altura mínima de queda produzida pela detonação do mesmo.

Além disso, segundo Alonso (2013), para determinar a sensibilidade ao atrito, existe outro teste padronizado para avaliar a força mínima de atrito que é capaz de suportar o explosivo sem detonação. Esses testes estão diretamente relacionados à melhoria da segurança no manuseio industrial de produtos explosivos e à prevenção e redução de acidentes.

Estabilidade Química – A estabilidade química de um explosivo é sua capacidade de permanecer quimicamente inalterado com a passagem do tempo. A estabilidade é garantida se as condições de armazenamento e o período de armazenamento forem adequados e corretos, permitindo que o usuário tenha um produto totalmente seguro e confiável para o trabalho de detonação. O armazenamento prolongado e/ou em más condições de umidade, temperatura e ventilação, podem originar a desestabilização do explosivo e, conseqüentemente, facilitar sua decomposição. Nesse caso, precauções devem ser tomadas para manipulá-lo e proceder a sua destruição.

O comportamento do explosivo a altas ou baixas temperaturas, por exemplo, determina as condições e o tempo máximo de armazenamento. Um explosivo muito higroscópico poderia absorver e reter a umidade a ponto de afetar sua estabilidade química (ALONSO et. al., 2013).

3.2.1. Tipos de explosivos mais comuns

Os explosivos mais utilizados em minas de calcário são ANFO e emulsões encartuchadas ou bombeadas.

ANFOs: São explosivos compostos à base quase que, exclusivamente, de nitrato de amônio, produto químico largamente utilizado como fertilizante agrícola. A denominação ANFO vem do inglês “ammonium nitrate + fuel oil”, já que é formulado a partir da mistura de nitrato de amônio com óleo diesel.

Os ANFOs necessitam de uma escorva para detonar, normalmente um reforçador ou uma emulsão encartuchada para iniciar o processo. São explosivos de nenhuma resistência à água, baixa densidade e baixo custo. Devido à baixa densidade são recomendados, muitas vezes, para o preenchimento da carga de coluna (RICARDO, CATALANI, 2007).

EMULSÕES: São explosivos desenvolvidos para, através de sua consistência, facilitar o carregamento com as mais variadas inclinações e níveis hidrostáticos. Apresentam excelente resistência à água e, devido à facilidade de acomodação ao furo, proporcionam ótimas densidades de carregamento. Podem ser bombeadas, propiciando grande rapidez no carregamento mecânico de furos, particularmente nos de grande diâmetro ou podem ser adquiridas encartuchadas em diâmetros variados. As emulsões podem ser utilizadas mesmo em perfurações com 100% de água. Por serem mais densas que a água e por terem grande resistência à água, expulsa boa parte da mesma, ocupando seu espaço (RICARDO, CATALANI, 2007).

3.2.2. Ruptura da rocha

Segundo Alonso (2013), para entender o funcionamento do fenômeno da detonação, é importante saber como são as diferentes zonas de reação que ocorrem durante a detonação. Se uma carga cilíndrica detonada por uma de suas extremidades for considerada, as seguintes zonas podem ser distinguidas (Figura 6):

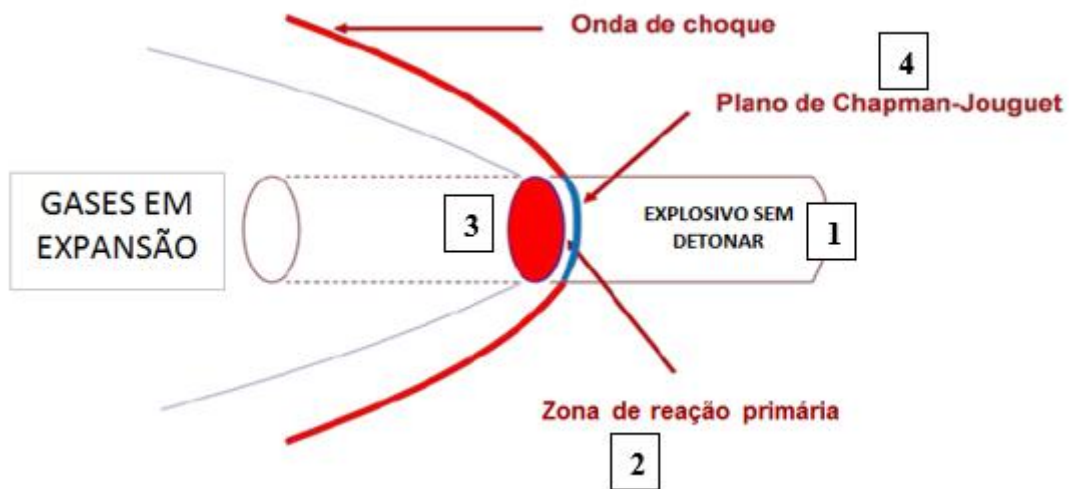


Figura 6: Zona dos processos de detonação. Fonte: ALONSO et. al., 2013.

1. Uma área de explosivo que ainda não detonou;
2. Uma zona de reação primária, que se propaga a uma velocidade de vários milhares de metros por segundo (velocidade de detonação), na qual ocorrem as reações mais rápidas e violentas, produzindo um movimento vigoroso das partículas próximas. Esse movimento se propaga na forma de uma onda de choque de pressão muito alta para o ambiente circundante. Essa pressão é chamada de pressão de detonação;
3. Uma zona de reação secundária, onde os produtos explosivos se encontram mais lenta em seu deslocamento do que a onda de choque, e eles produzem uma série de reações complementares que supostamente dão origem a uma grande parte dos gases produzidos na reação. É caracterizada por uma pressão menor que a anterior, que é chamada de pressão de explosão, causada pela expansão de todos esses produtos gasosos;
4. A superfície de separação entre as zonas primária e secundária, embora não exatamente plana, é conhecida como "Plano de Chapman-Jouget".

A composição e as características do explosivo, entre outras variáveis, determinam a velocidade de detonação, bem como as pressões de explosão e detonação. Como indicado na Figura 7, um explosivo à base de nitroglicerina, por exemplo, teria alta velocidade de detonação e, também, alta pressão de detonação. Em contraste, o volume relativamente

baixo de gases produzidos pela detonação da nitroglicerina geraria uma baixa pressão de explosão. Por outro lado, um explosivo à base de nitrato de amônio, cuja detonação é mais lenta, mas produz mais gases, teria uma pressão de detonação menor, mas uma pressão de explosão mais alta.



Figura 7: Pressão de detonação (Pd) e pressão de explosão (Pe) de dois tipos de explosivos. Fonte: ALONSO et. al., 2013.

A pressão da onda de detonação é dada pela Equação 04:

$$P_d = d \cdot v \cdot u \quad (04)$$

Sendo:

P_d = pressão das ondas (pressão de detonação);

d = densidade média (explosivo);

v = velocidade de propagação (velocidade de detonação);

u = velocidade de partícula.

Onde " P_d " seria expresso em bar, " d " em g/cm^3 e " v " e " u " em m/s.

A determinação, através de fotografias radiográficas da relação entre " v " e " u ", feita por Cook e outros pesquisadores, concluiu que " u " era aproximadamente igual a 25% de " v ". Assim, a Equação 04 pode ser expressa como mostrado na Equação 05:

$$P_d = 258 \cdot 10^5 \cdot v^2 \cdot d \quad (05)$$

Onde " P_d " seria expresso em bar, " d " em g/cm³ e " v " em m/s.

A Equação 06 supõe a relação v/u como função da densidade " d ", resultando, para as mesmas unidades expressas anteriormente:

$$P_d = \frac{464 \cdot 10^5 \cdot v^2 \cdot d}{1 + 0,8 \cdot d} \quad (06)$$

Em qualquer caso, a pressão de detonação, causada pela energia cinética das partículas, é proporcional à densidade e ao quadrado da velocidade de detonação como mostrado na Equação 07:

$$P_d \propto (v^2, d) \quad (07)$$

Por outro lado, a pressão da explosão depende apenas da densidade, da composição química do explosivo e a reação é mais completa. A pressão da explosão é diretamente proporcional à densidade do explosivo e ao calor liberado na reação. Assim, uma maneira de aumentar as propriedades de um explosivo é aumentar o calor liberado na reação. Uma opção é incorporar o alumínio em sua composição para que a oxidação desse elemento durante a explosão aumente o calor de detonação, como acontece nos explosivos aluminosos.

3.2.3. Medição de velocidade de detonação do explosivo

A velocidade de detonação (VOD) dos explosivos é um parâmetro importante na simulação da fragmentação dos desmontes de rochas e pode ser medida através do equipamento DataTrap fabricado pela empresa canadense MREL- Specialty Explosive Products Limited.

De acordo com MORAIS (2004), esse equipamento é um gravador da velocidade de detonação contínua dos explosivos, que utiliza a técnica de resistência de cabo (fio)

coaxial (probecable). Um fio de resistência linear conhecida, W/m, é colocado ao longo da coluna de explosivo do furo. Quando a frente de detonação destrói o fio, a resistência do circuito decresce na proporção do decréscimo do comprimento do fio. O DataTrap grava a variação de voltagem do circuito com o tempo. O software do DataTrap converte automaticamente os dados em um gráfico de distância x tempo. A inclinação desse gráfico representa a velocidade de detonação do explosivo.

Após a medição da VOD em campo, os dados são transferidos do equipamento para o computador, onde um programa específico do DataTrap trata os dados e gera o gráfico de distância x tempo, conforme mostrado na Figura 8.

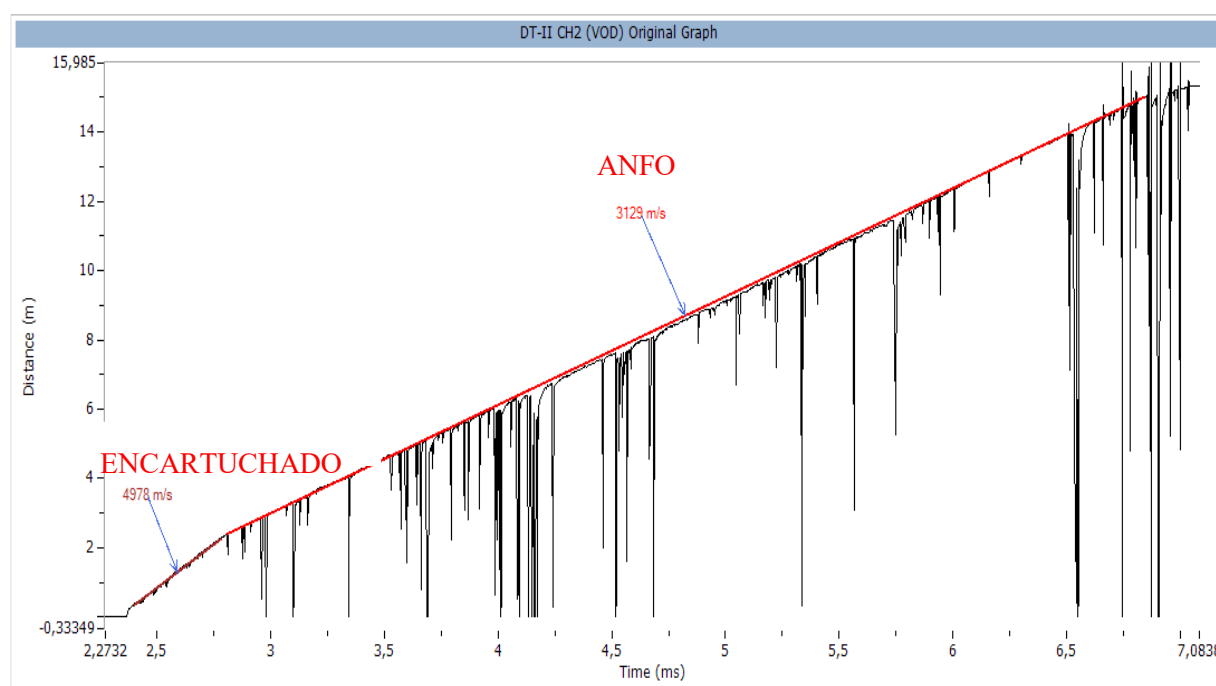


Figura 8: Tratamento dos dados descarregados.

3.3. Plano de fogo

O plano de fogo é um documento que apresenta todos os dados do desmorte desde a perfuração até a quantidade de explosivos utilizada e o volume a ser desmontado.

O plano de fogo é construído baseado em parâmetros e condições da mina em que será executado. Os parâmetros avaliados são:

1. **Diâmetro da perfuração:** A seleção do diâmetro de perfuração depende da produção requerida, do ritmo de escavação, da altura da bancada e das características da rocha (SILVA, 1998). Nas operações em mineração a céu aberto e pedreiras, os diâmetros dos furos geralmente variam de 76 mm (3”), para perfuratrizes a percussão, a furos de grande diâmetro, como 381 mm (15”), para grandes perfuratrizes rotativas (CAMERON & HAGAN, 1996).
2. **Afastamento:** O afastamento (B) é definido como a distância entre a face livre da bancada e a primeira linha do fogo ou a distância entre as linhas da detonação. O valor do afastamento é função do diâmetro do furo, das características da rocha e do tipo de explosivo utilizado (SILVA, 1998).
3. **Espaçamento:** O espaçamento (S) é definido como a distância entre os furos de uma mesma linha do fogo (SILVA, 1998).

É importante verificar a relação entre o espaçamento e o afastamento (razão S/B). Malhas de perfuração com razões S/B demasiadamente altas podem levar a uma má fragmentação na linha média dos espaçamentos. Em rochas duras com resistência à compressão superior a 100MPa, recomenda-se uma relação $S/B = 1,15$ a $1,30$. Em rochas friáveis, podem-se adotar as malhas alongadas com razão S/B superior a $1,75$ (SILVA, 1998). Essa relação origina tipos de malhas diferentes, como mostrado na Figura 9, que podem ser adotadas de acordo com o perfil de cada maciço e a fragmentação desejada.

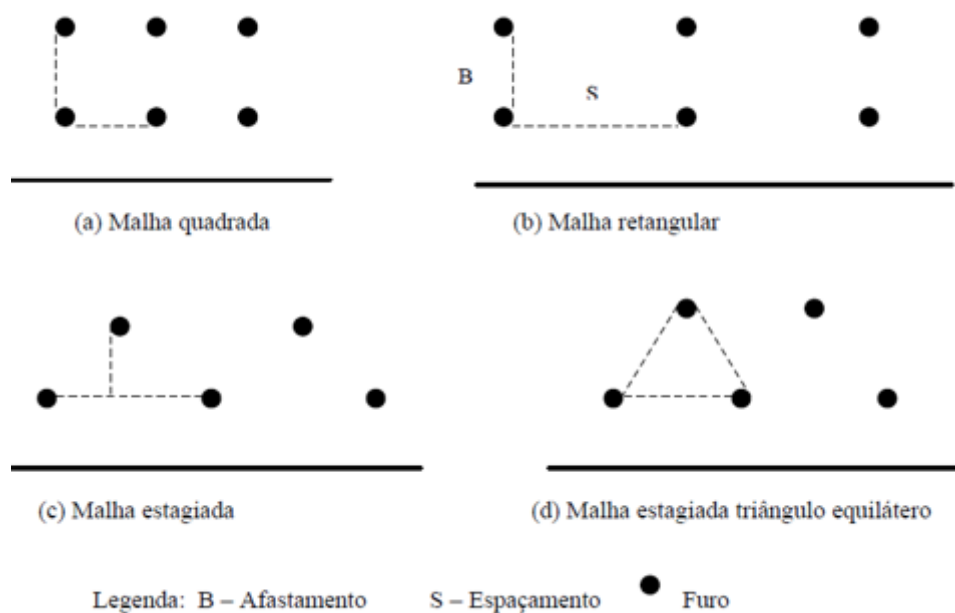


Figura 9: Principais tipos de malhas de perfuração. Fonte: Atlas Powder Company, 1987.

4. **Inclinação do furo:** Segundo Silva (1998), as principais vantagens da perfuração inclinada são:

- a. Melhor fragmentação;
- b. Diminuição dos problemas de repé devido ao melhor aproveitamento das ondas de choque nas regiões críticas da detonação (região do tampão e pé da bancada);
- c. Maior lançamento;
- d. Permite maior malha de perfuração e, conseqüentemente, menor razão de carga;
- e. Maior estabilidade da face da bancada (menor “back-break”).

As desvantagens mais relevantes são:

- a. Menor produtividade da perfuratriz;
- b. Maior desgaste de brocas, hastes e estabilizadores;

- c. Maior custo de perfuração;
- d. Maior comprimento do furo para uma mesma altura de bancada;
- e. Maior risco de ultralanchamento de fragmentos rochosos;
- f. Maior desvio da perfuração.

Na Figura 10, pode-se perceber o efeito da onda em um desmonte com furos inclinados em comparação com furos verticais:

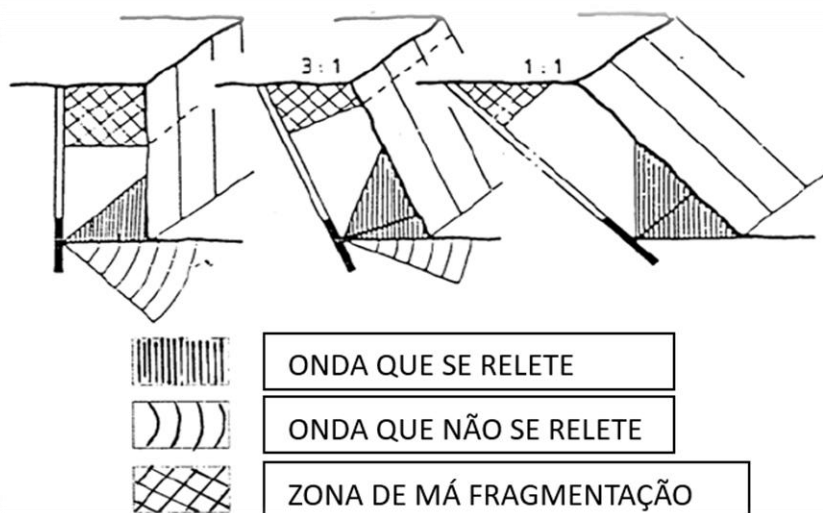


Figura 10: Maior eficiência no uso da energia do explosivo em furos inclinados (Alonso et. al., 2013).

5. **Profundidade da perfuração:** De acordo com Ricardo e Catalani (2007), a profundidade de perfuração é função da altura da bancada. Não é a altura da bancada simplesmente, porque se recomenda executar uma subperfuração, isso é, prosseguir na perfuração além do plano da praça da bancada, para evitar o que se chama de repé. O repé é a detonação insuficiente do pé da bancada, uma superfície irregular inclinada e que dificultará a lavra das bancadas sucessivas. Para removê-lo serão necessárias perfurações adicionais que implicarão em perda de tempo e maiores gastos com perfuração e detonação.
6. **Comprimento da carga:** É o comprimento do furo que é preenchido com explosivos, ou seja, a profundidade de perfuração menos a altura do tampão e/ou porções intermediárias do furo, ambos que são carregadas com material inerte, normalmente fragmentos da própria rocha ou brita.

Na Figura 11 são mostrados os parâmetros geométricos do plano de fogo:

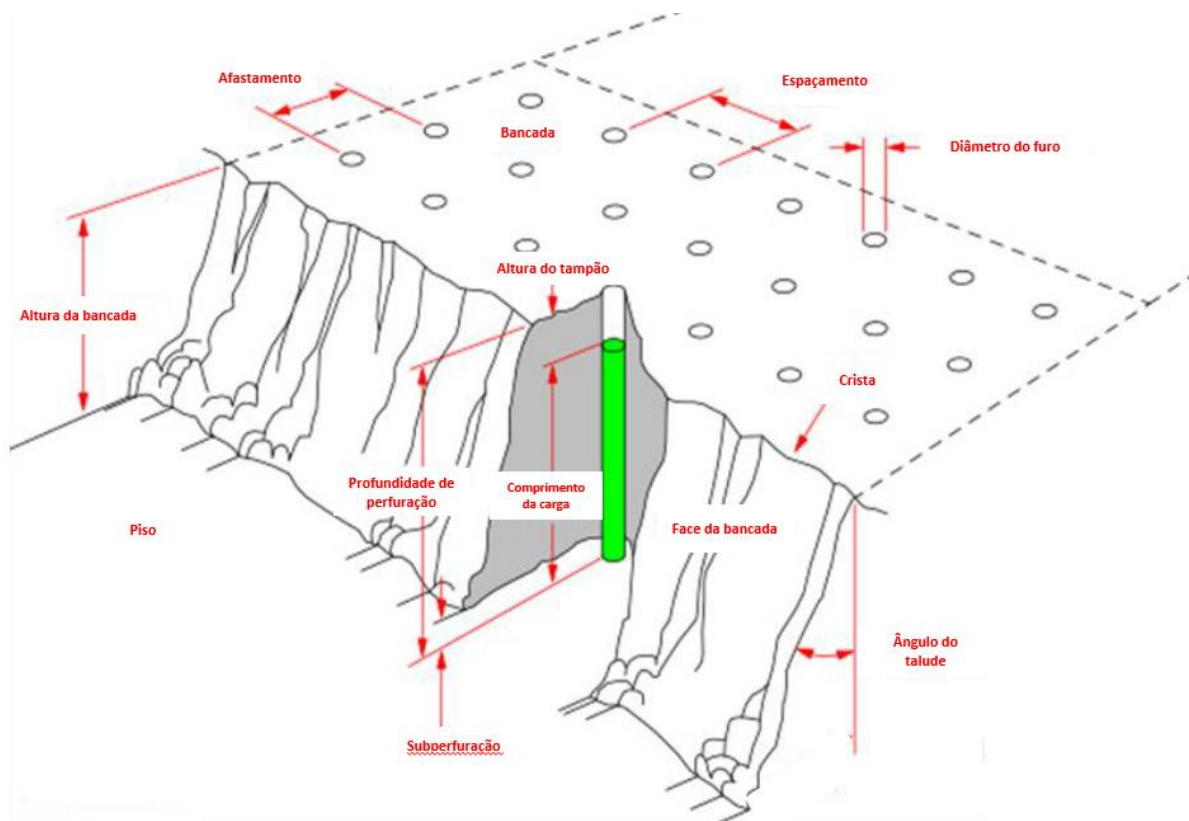


Figura 11: Parâmetros geométricos do plano de fogo (ALONSO et. al., 2013, adaptado pela autora).

3.4. Processo produtivo

Hustrulid (1999) explica o conceito de sistema de fragmentação mina-usina. As principais operações unitárias da lavra, como mostrado na Figura 12, são perfuração, detonação, carregamento, transporte e britagem primária. Cada etapa de operação gera um produto distinto.

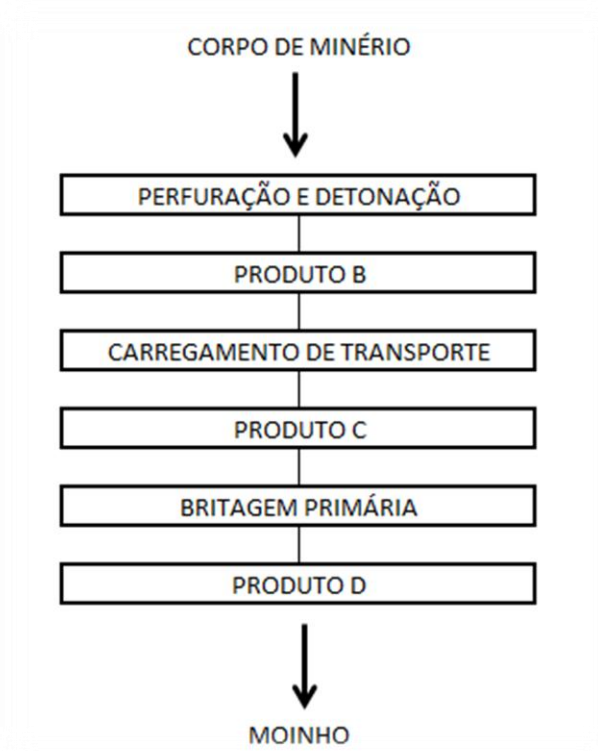


Figura 12: Diagrama representando a cadeia de operações unitárias mostrando a transferência de produtos (Hustrulid, 1999).

A Figura 13 apresenta uma visão geral do sistema de fragmentação “mine-to-mill”. Assume-se que todas as fases de fragmentação mecânica dos subsistemas mina e planta estão completas quando o minério chega ao moinho. Frequentemente, os subsistemas de fragmentação da mina e usina são tratados separadamente e isso é indicado pelas linhas pontilhadas da Figura 13. O subsistema planta consiste na britagem secundária e moagem.

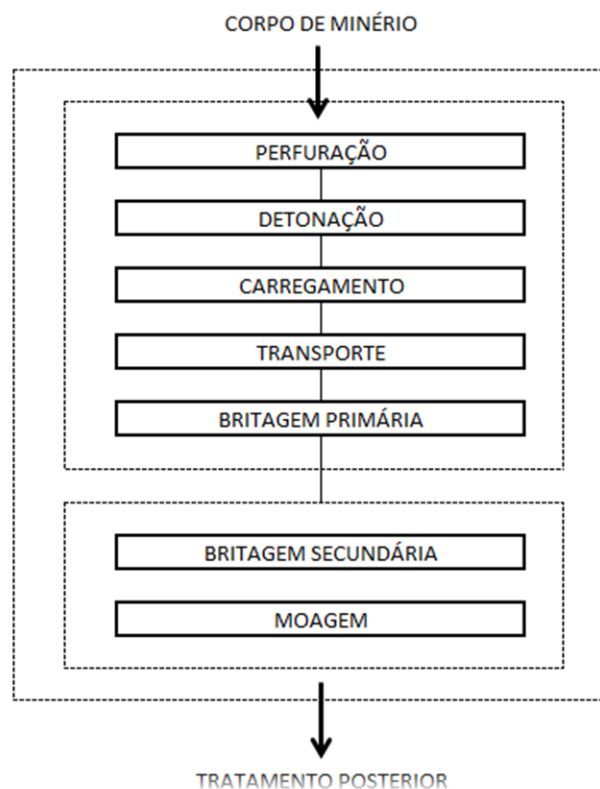


Figura 13: Representação do diagrama do sistema de fragmentação global “mine-to-mill” e os subsistemas mina e planta (Hustrulid, 1999).

3.5. Análises granulométricas

Métodos fotográficos são métodos de avaliação mais rápidos, mais práticos e mais acessíveis que fornecem descrições quantitativas da distribuição do produto da detonação. Nos ambientes de produção atuais, esses métodos podem retornar resultados razoavelmente confiáveis em tempo quase real e fornecer um meio para avaliação rápida e decisão proativa ou corretiva.

Esses sistemas de análise de imagem classificam, granulometricamente, diferentes tipos de materiais através de algoritmos para identificar blocos individuais e criar uma rede de contorno.

Nesse trabalho foi utilizado o programa WipFrag de propriedade da empresa. O WipFrag é um sistema de fotoanálise desenvolvido pelos técnicos John Franklin e Norbert Maerz,

pesquisadores da Universidade de Waterloo. Os resultados podem ser exibidos como histogramas ou gráficos com o percentual passante em massa. O WipFrag utiliza imagens na forma de fotografias.

O sistema possui um amplificador de vídeo acoplado para ajustes de compensação manual ou automático de iluminação da imagem original. O processamento da imagem é usado para transformar a imagem dos fragmentos de rochas em uma imagem binária, formando uma rede de contornos dos blocos.

A delimitação dos blocos no WipFrag envolve a identificação do limite dos blocos em dois estágios: o primeiro usa várias técnicas convencionais de processamento de imagens, incluindo o uso de operadores gradientes. Os operadores detectam as sombras opacas entre os blocos adjacentes. Essa técnica apresenta um melhor resultado em imagens limpas e em superfície de rochas de coloração clara. O segundo estágio usa um número de técnicas de reconstrução para ajudar delinear os blocos que ainda estão parcialmente contornados durante o primeiro estágio (CASTRO, 2000).

Para cada estágio do processamento da imagem, os parâmetros chamados EDV (variáveis de detecção de contorno) podem ser usados para melhorar o processo de detecção dos contornos. O usuário tem a oportunidade de ajustar as variáveis individuais para melhorar um estágio ou selecionar uma das nove combinações possíveis de EDV. Essas combinações estão arranjadas em sequência para produzir mais ou menos limites, dependendo da natureza da imagem (MORAIS, 2004).

Quando se necessita de uma melhor precisão, a qualidade da rede de blocos (linhas de contorno dos fragmentos) pode ser aumentada pela edição manual. Um conjunto de ferramentas iterativas pode ser usado para remover linhas de contorno falsas ou inserir limites não detectados pelo processamento automático da imagem (MORAIS, 2004).

Após a identificação da rede de blocos, o WipFrag procede a análise das medidas. Essa etapa envolve medidas em duas dimensões na imagem, reconstrução de uma distribuição em três dimensões e a produção de gráficos de saída (MORAIS, 2004).

A Figura 14 mostra as principais etapas envolvidas na determinação da curva granulométrica por fotoanálise com a utilização do programa WipFrag.

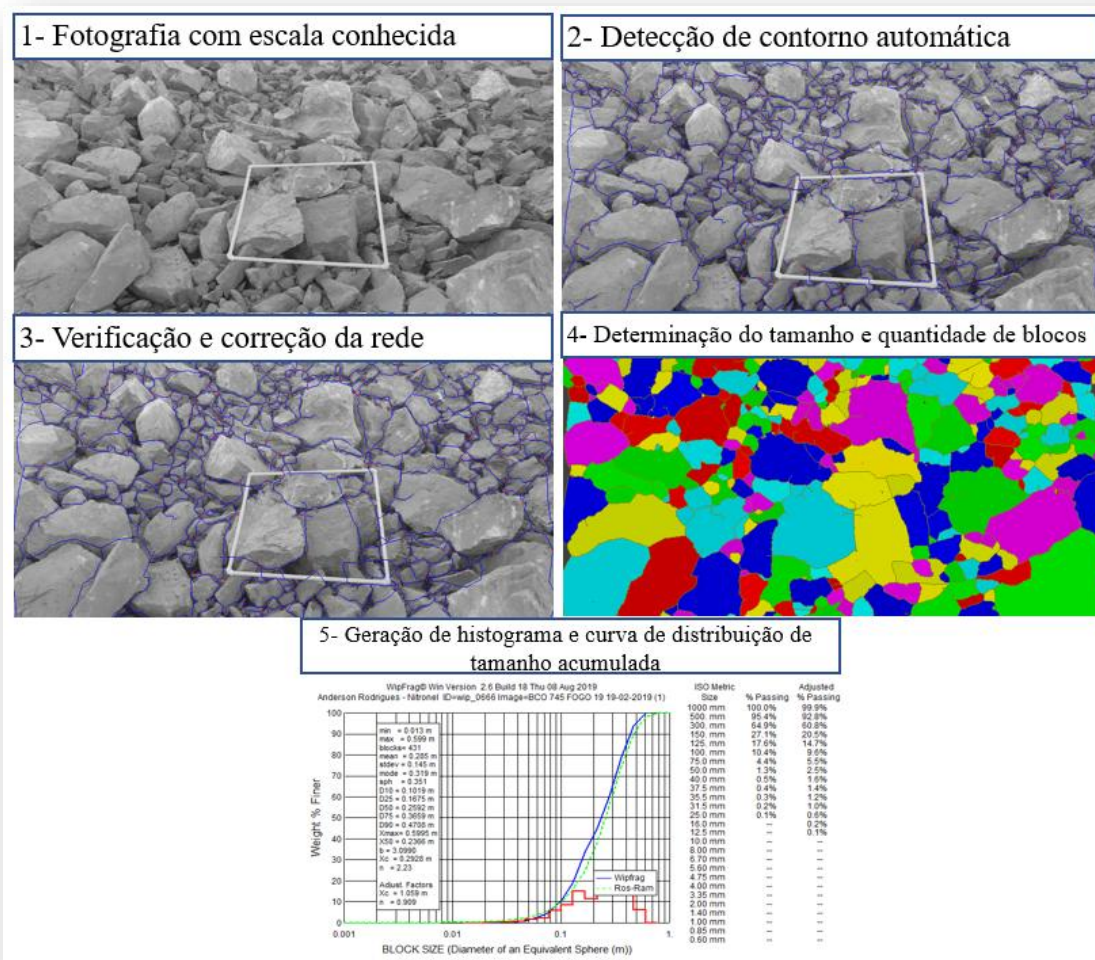


Figura 14: Visão geral do processamento de imagens no WipFrag.

3.5.1. Erros de análise

Existem basicamente três origens de erros significativos nos sistemas de determinação da granulometria por fotoanálise, são eles: erros de amostragem, má qualidade da rede de contorno dos fragmentos e perda na identificação dos finos (WipWare, 1996).

O erro de amostragem resulta do processo de obtenção da imagem. Se a câmera é posicionada em uma região da pilha onde se observa a predominância de material mais grosseiro ou muito fino já se configura um erro de amostragem. Outro problema, também, é que a imagem representa somente a superfície da pilha detonada, não representando o material do interior da pilha. Esse erro pode ser minimizado com o aumento do número de imagens dentro pilha durante a evolução da lavra do material detonado (MORAIS, 2004).

Uma má delimitação dos fragmentos individuais culminará em resultados errôneos. A pobre delimitação provém de duas origens:

1. Imagens de má qualidade: contraste baixo ou alto, iluminação inadequada ou o tamanho dos fragmentos na imagem é muito pequeno;
2. Rocha com textura onde as cores da superfície são tão proeminentes quanto às sombras entre os fragmentos de rocha, reduzindo o contraste entre o fragmento e seu contorno (MORAIS, 2004).

Uma pobre delimitação dos fragmentos é evidenciada de duas maneiras:

1. Um grupo de fragmentos é enganosamente agrupado e identificado como um único bloco. Isso é chamado de fusão e representa uma tendência de superestimação do tamanho verdadeiro do fragmento;
2. Um único fragmento é subdividido enganosamente em dois ou mais blocos individuais. Isso é chamado de desintegração e representa uma tendência de subestimação do tamanho verdadeiro do fragmento. Os efeitos de fusão e desintegração podem ser reduzidos com a utilização da EDV e/ou pela edição manual das linhas de contorno dos fragmentos (MORAIS, 2004).

A perda de finos é caracterizada pela não delimitação dos fragmentos pequenos na imagem processada. Isso ocorre por que os fragmentos são muito pequenos com relação à imagem ou por estarem escondidos ao redor de fragmentos maiores. Quando isto ocorre, existe uma tendência de superestimação da distribuição de tamanho. O WipFrag pode minimizar este problema usando calibração empírica ou usando múltiplas imagens com área de abrangência reduzida (MORAIS, 2004).

3.6. Modelos matemáticos

Para evitar custos desnecessários e testes sem sucesso em campo, o método mais adequado para avaliação da variação de algum parâmetro é por meio de modelamento e posteriores simulações. Elas nos permitem levar ao extremo alguns parâmetros e analisar seu impacto no resultado final, e, dessa forma, realizar os testes em campo apenas a partir do momento em que os valores encontrados possuam uma grande chance de alcançar os resultados buscados.

Na literatura, encontram-se muitas referências aos parâmetros que devem ser adotados para a malha de perfuração na confecção do plano de fogo.

De acordo com Ricardo e Catalani (2007), o afastamento é igual a 45 vezes o diâmetro da perfuração em mm. Esse, no entanto é o afastamento teórico, designado por V_t . Como ocorrem desvios originados pelo desalinhamento das perfurações, define-se um afastamento prático V_p dependendo do número de linhas de perfurações:

$$V_p = V_t - 0,02H \text{ (linha singela)} \quad (08)$$

$$V_p = V_t - 0,05H \text{ (linhas múltiplas)} \quad (09)$$

Sendo:

H = altura da bancada.

O espaçamento é igual ao afastamento prático multiplicado por um fator que varia de 1,0 a 1,3.

Olofsson (1990) escreve sobre a relação entre afastamento e espaçamento como sendo:

- 1,25 para uma fragmentação fina;
- < 1,25 para uma fragmentação grosseira.

Outros autores ainda fazem outros tipos de relação.

Rajpot (2009) coloca os parâmetros da malha em função do diâmetro de perfuração, da altura da bancada e da fragmentação desejada.

Jimeno (1994) relaciona afastamento e espaçamento em função dos diâmetros de perfuração, propriedades das rochas e dos explosivos, da altura do banco e do grau de fragmentação desejado.

Hustrulid (1999) menciona uma constante que relaciona o espaçamento e o afastamento definidos em função da malha escolhida.

Encontram-se também, valores de afastamento em função de tensão inicial da rocha, impedância, pressão de detonação e atenuação até as faces livres.

Neste trabalho serão considerados modelos matemáticos baseados na caracterização da rocha, do explosivo e geometria do desmonte que são mostrados a seguir.

3.6.1. Modelo de Kuz-Ram

A simulação segundo o modelo de Kuz-Ram utiliza as seguintes equações:

Equação de Kuznetsov

Foi desenvolvida em 1973 por Kuznetsov e modificada por Cunningham em 1983. A Equação 10 relaciona tamanho médio do fragmento, características da rocha, razão de carga e tipo de explosivo:

$$X_{50} = A \cdot K^{-0,80} \cdot Q_e^{0,167} \cdot (115/Er)^{0,633} \quad (10)$$

Sendo:

X_{50} = tamanho médio da partícula (cm);

A = fator da rocha (adimensional);

K = razão de carga (kg/m³);

Q_e = massa do explosivo utilizado por furo (kg);

Er = energia relativa em massa (RWS) do explosivo comparada ao ANFO.

Os valores de Q_e e K podem ser obtidos pelas das Equações 11 e 12, respectivamente:

$$Q_e = 1000 \cdot \left(\frac{\pi d^2}{4}\right) \cdot L \cdot \rho_e \quad (11)$$

Sendo:

d = diâmetro do furo (m);

L = comprimento da carga (m);

ρ_e = densidade do explosivo (t/m³).

$$K = \frac{Q_e}{B \cdot S \cdot H} \quad (12)$$

Sendo:

K = Razão de carga (kg/m³);

B = Afastamento (m);

S = Espaçamento (m);

H = Altura da bancada (m).

Equação de Tidman

A energia liberada pelo explosivo comparado ao ANFO é calculada a partir da Equação 13 desenvolvida por Tidman desenvolvida em 1991:

$$Er = \left(\frac{VOD_e}{VOD_n}\right) \cdot RWS \quad (13)$$

Sendo:

Er = energia relativa por massa efetiva do explosivo (adimensional);

VOD_e = velocidade de detonação efetiva do explosivo (medida em campo m/s);

VOD_n = velocidade de detonação nominal do explosivo (m/s);

RWS = energia relativa por massa comparada ao ANFO (%).

Equação de Rosin-Rammler

A distribuição de tamanho dos fragmentos é calculada pela adaptação da equação de Rosin-Rammler, desenvolvida em 1933:

$$P = 100 \cdot \left[1 - e^{-0,693(X/X_{50})^n} \right] \quad (14)$$

Sendo:

X = tamanho da malha da peneira (mm)

X_{50} = tamanho médio da partícula (mm)

n = índice de uniformidade (adimensional)

P = percentual passante na peneira de tamanho X (%).

Índice de uniformidade de Cunningham

A Equação 15 foi desenvolvida por Cunningham em 1987 e correlaciona todos os parâmetros geométricos do plano de fogo:

$$n = \left[2,2 - 14 \cdot \left(\frac{B}{D} \right) \right] \cdot \left[\frac{(1+S/B)}{2} \right]^{0,5} \cdot \left\{ \left(1 - \frac{W}{B} \right) \cdot \left(\frac{L}{H} \right) \right\} \cdot P \quad (15)$$

Sendo:

B = afastamento (m);

S = espaçamento (m);

D = diâmetro do furo (mm);

W = desvio da perfuração (m);

L = comprimento total da carga (m);

H = altura do banco (m);

P = Tipo de malha (adimensional) - Quadrada = 1 e Estagiada = 1,1.

Fator rocha

A Equação 16, que calcula o fator rocha, foi desenvolvida em 1986 por Lilly e modificada por Cunningham em 1987 e atualizada pelo mesmo em 2005 e é determinada por meio

dos dados abaixo. O valor do fator rocha pode variar entre 0,8 e 22 dependendo da rocha. O fator $C(A)$ foi proposto para melhor adequação ao modelo e pode variar de 0,5 a 2.

$$A = 0,06. (RMD + RDI + HF). C(A) \quad (16)$$

O valor de RMD se refere à classificação do maciço rochoso em friável, fraturado ou maciço:

- Friável = 10;
- Fraturado = JF;
- Maciço = 50.

No caso do maciço fraturado, o valor é dado por JF que é igual a soma do valor atribuído ao espaçamento entre as descontinuidades e o valor atribuído à direção e mergulho do maciço em relação à face livre.

$$JF = JPS + JPA \quad (17)$$

Para espaçamento das descontinuidades:

- $< 0,1$ m, JPS = 10;
- Entre 0,1 m e oversize da britagem primária (m), JPS = 20;
- Entre oversize da britagem primária e parâmetros da malha de perfuração (m), JPS = 50.

O valor de RDI é relativo à influência da densidade:

$$RDI = 25. d - 50 \quad (18)$$

Em que d é a densidade da rocha intacta (g/cm^3).

O valor de HF varia em função do módulo de elasticidade da rocha:

- Se $E < 50$ GPa, $HF = E/3$;

- Se $E > 50$ GPa, $HF = UCS/5$, em que UCS é a resistência a compressão uniaxial do maciço (Mpa).

Em posse destes dados, é possível realizar a simulação e verificar o impacto de cada uma das variáveis no produto final, facilitando assim, o direcionamento para os testes em campo.

Algumas variáveis envolvem investimento para alteração como, por exemplo, um grande aumento ou diminuição no diâmetro do furo pode gerar a necessidade de compra de uma nova perfuratriz. Já outras alterações como afastamento e espaçamento são possíveis de serem realizadas sem investimentos ou custos adicionais à operação.

De qualquer forma, qualquer mudança deve ser bem embasada e justificada para minimizar os resultados indesejados.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Análise granulométrica por imagem

As análises granulométricas foram realizadas por meio do software Wipfrag. Os desmontes foram fotografados durante um mês totalizando 7 análises realizadas. Os resultados das análises foram unificados em uma curva granulométrica para obter-se uma análise mais representativa. Os dados obtidos foram comparados posteriormente aos resultados esperados pelo modelo. Os resultados das análises estão mostrados na Figura 15.

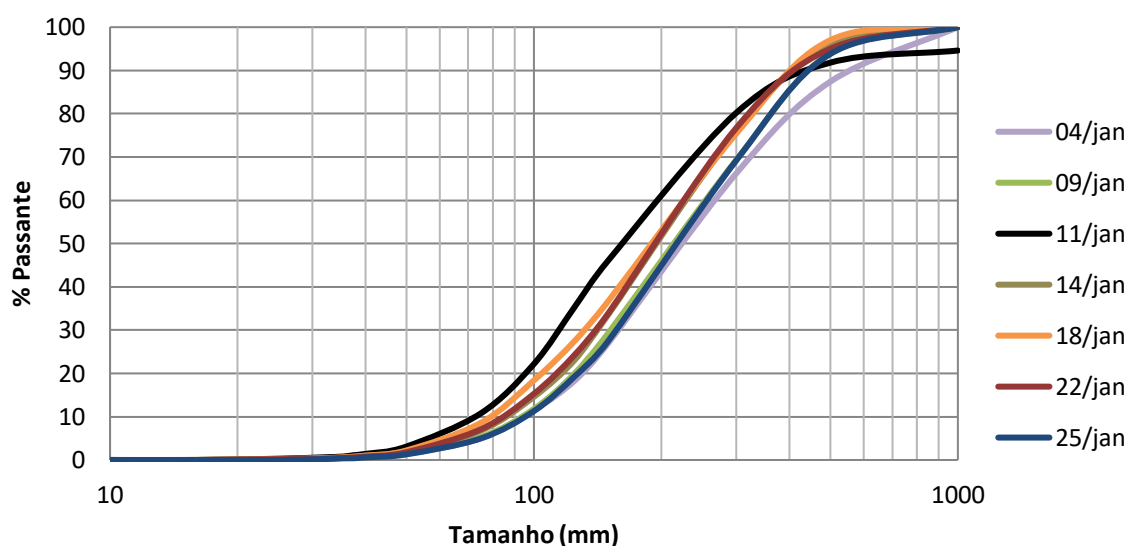


Figura 15: Curvas granulométrica dos desmontes realizados obtidas por meio de análise por imagem.

4.2. Caracterização dos explosivos

Para a medição da velocidade de detonação dos explosivos foi utilizado o equipamento DataTrap. A Figura 16 mostra o equipamento utilizado para medição na mina de Matozinhos no monitoramento da velocidade do explosivo.



Figura 16: Equipamento utilizado para medição da velocidade de detonação.

Para a medição da velocidade de detonação foi utilizado o procedimento operacional descrito no abaixo e ilustrado na Figura 17:

1. Preparar a primeira ponta do cabo coaxial (*probecable*), desencapando os fios interno e externo;
2. Conectar as duas extremidades fechando o circuito;
3. Isolar a emenda com fita isolante;
4. Amarrar a extremidade do *probecable* no iniciador (emulsão encartuchada) do primeiro furo da sequência de detonação;
5. Descer o iniciador juntamente com o *probecable* no primeiro furo da sequência de detonação;
6. Cortar o *probecable* e desencapar os fios interno e externo;
7. Emendar essas duas extremidades em um cabo coaxial tipo RG58 com o objetivo de afastar o equipamento DataTrap da área de fogo;
8. Emendar a extremidade do cabo coaxial RG58 no conector do DataTrap;
9. Conectar na entrada PROBE do equipamento DataTrap.
10. Ligar o equipamento DataTrap e testar a resistência total do circuito;

11. Verificar se a resistência total está entre 200W e 1500W;
12. Carregar os furos com os explosivos;
13. Ligar o equipamento MiniTrap e acionar o botão “start”, para o monitoramento da detonação;
14. Detonar o fogo;
15. Transferir os dados registrados para o software DataTrap;
16. Interpretar o gráfico e determinar a VOD do explosivo.

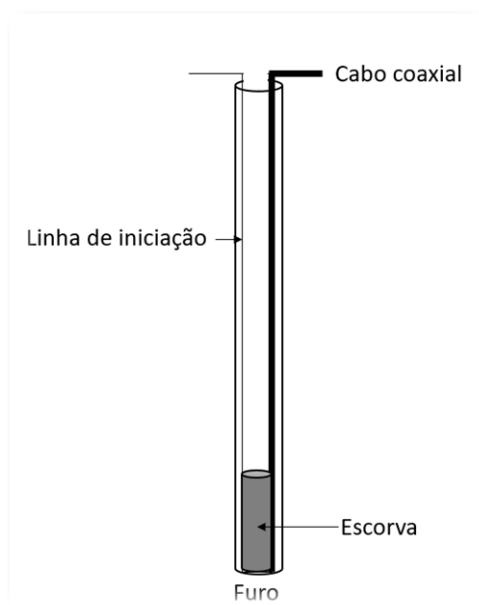


Figura 17: Procedimento operacional para medição de VOD.

Foram realizadas medições em dois tipos de explosivos, no ANFO convencional (SE) e no ANFO de baixa densidade (BD).

4.3. Caracterização da rocha

Foram realizados ensaios de determinação de índices físicos e ensaios de determinação da resistência à compressão uniaxial e foram estimados os parâmetros de deformabilidade, Módulo de Elasticidade (E) e Coeficiente de Poisson (ν) das amostras de rochas.

Foram utilizados corpos de prova cilíndricos extraídos em blocos enviados ao laboratório. Os corpos de prova foram, então, cortados utilizando uma serra diamantada e retificados em um torno mecânico.

Os ensaios obedeceram às sugestões da International Society of Rock Mechanics - Suggested Methods for Determining the Uniaxial Compressive Strength and Deformability of Rock Materials.

4.4. Coleta dos dados da geometria do desmonte

Os dados foram obtidos por meio do acompanhamento das atividades em campo e verificação dos planos de fogo arquivados. Os parâmetros são fixos para todos os desmontes realizados na mina, objeto do estudo.

4.5. Tratamento dos dados

Em posse dos dados de caracterização foram realizadas algumas simulações de forma a adequar os parâmetros de fácil alteração e grande impacto para a obtenção de um desmonte com distribuição granulométrica de acordo com os objetivos propostos.

Os valores relativos à caracterização da rocha obviamente não podem ser alterados. Com relação ao explosivo, o ANFO que já é utilizado atualmente, possui velocidade de detonação e densidade muito baixas o que é diretamente proporcional à menor fragmentação da rocha.

Dessa forma, as alterações mais significativas devem ser realizadas nos parâmetros do desmonte. São eles:

Diâmetro do furo e altura da bancada: são de difícil alteração. O diâmetro do furo porque já é o menor possível para a capacidade da perfuratriz que a empresa possui. A altura da bancada é a altura ideal considerando diversos fatores de segurança e operacionais da mina.

Desvio do furo: é o desvio natural do furo que está intimamente ligado às características do maciço rochoso.

Tipo de malha: a malha estagiada é a que oferece a melhor distribuição dos furos no maciço de forma a permitir uma fragmentação mais uniforme.

Comprimento da carga: O comprimento da carga depende da altura da bancada, tampão e subperfuração utilizados, que por sua vez estão relacionados com o afastamento utilizado.

Espaçamento e afastamento: são variáveis de fácil alteração e merecem mais atenção no momento das simulações. Quanto menor o número de furos na mesma área do maciço, menor a fragmentação da rocha após o desmonte.

4.6. Simulações

Para garantir uma fragmentação mais homogênea, como consequência da melhor distribuição dos furos no maciço, optou-se por definir os parâmetros geométricos da malha respeitando as proporções de uma malha estagiada no formato triângulo equilátero. As proposições estão dispostas na Tabela 03:

Tabela 03: Simulações de medidas de afastamento e espaçamento.

Simulação	Afastamento (m)	Espaçamento (m)
1	3	3,5
2	3,5	4
3	4	4,6
4	4,6	5,3
5	4,3	5

As distribuições granulométricas foram obtidas de acordo com o Modelo de Kuz-Ram e avaliadas. A Figura 18 mostra a curva granulométrica de cada uma das simulações:

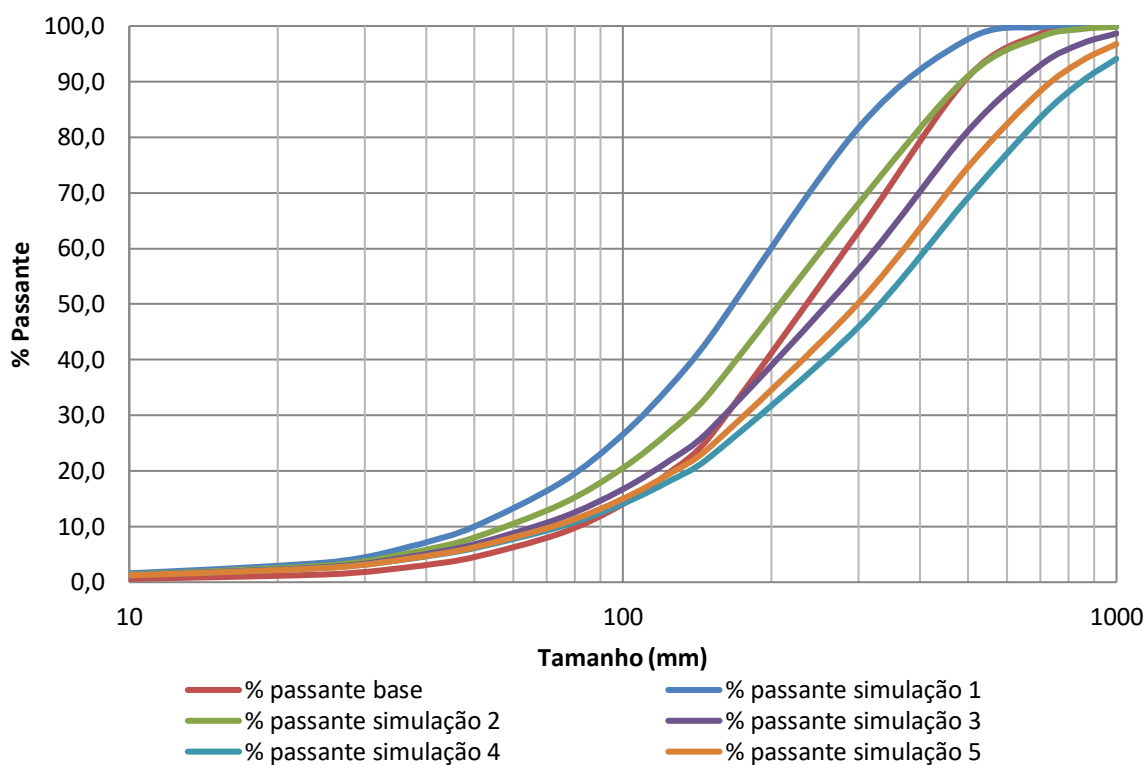


Figura 18: Curvas granulométricas obtidas por meio do modelo de Kuz-Ram para cada uma das simulações realizadas.

A malha escolhida para o teste em campo foi a realizada pela Simulação 5 porque minimiza a geração de fragmentos abaixo de 50 mm e não ultrapassa significativamente o limite de entrada do britador primário. Apesar da simulação demonstrar que haveria geração de fragmentos acima de 1000 mm, o material ainda está sujeito às quebras decorrentes do carregamento, transporte e descarga, além da possibilidade do formato da malha escolhido (triângulo equilátero) contribuir para a melhor distribuição da energia do explosivo e, conseqüente, uma fragmentação mais homogênea da rocha, de forma a evitar a ocorrência desses fragmentos mais grossos. A área da malha foi aumentada em 19,4% e, segundo os cálculos, o X_{50} deverá ser acrescido em 16,4%.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. Caracterização da rocha

Foi obtida por meio da análise em laboratório a massa específica da rocha, o módulo de elasticidade e resistência à compressão uniaxial conforme mostrados na Figura 19 e Figura 20.

Litologia	Amostras	Massa A (g)	Massa B (g)	Massa C (g)	$p_{a_{sec}}$ Kg/m ³	$p_{a_{sat}}$ Kg/m ³	η_a %	α_a %
MS	1	1130,89	1140,94	714,59	2652	2676	2,36	0,89
	2_(1)	969,95	971,95	612,96	2702	2707	0,56	0,21
	2_(2)	902,24	904,03	570,11	2702	2707	0,54	0,20
	3	1137,63	1139,86	719,27	2705	2710	0,53	0,20
	4	1334,83	1337,91	844,17	2704	2710	0,62	0,23
	MÉDIA				2692,94	2702,15	0,92	0,34
	DESVIO PADRÃO				22,64	14,64	0,80	0,30
COEFICIENTE DE VARIAÇÃO				0,84	0,54	87,29	88,60	

Figura 19: Índices físicos obtidos por meio das análises das amostras.

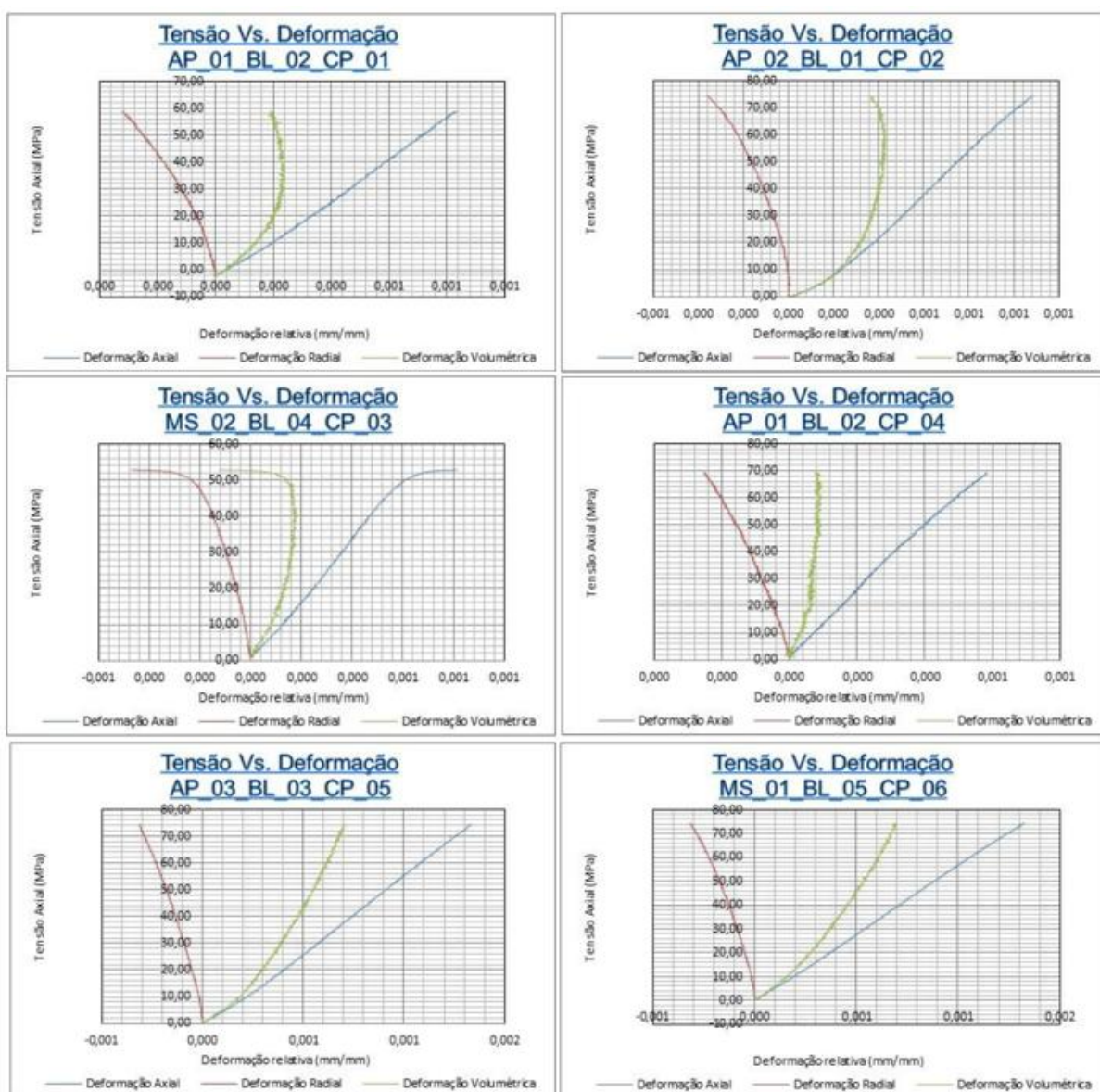


Figura 20: Gráficos de Tensão versus Deformação das amostras.

Os resultados compilados estão apresentados na Tabela 03:

Tabela 03: Resultados dos ensaios geomecânicos.

Resistência (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Massa específica (kg/m ³)
101,9	72,1	2.706

A classificação do maciço rochoso foi realizada pelo geólogo da empresa. O maciço foi classificado como fraturado. O espaçamento entre as discontinuidades varia de 2 a 3 metros. O limite de granulometria aceito da britagem primária é 856 mm, segundo o

manual do fabricante e o acamamento da rocha é horizontal. Os dados estão dispostos na Tabela 04:

Tabela 04: Características do maciço rochoso.

Maciço rochoso	Fraturado
Espaçamento entre descontinuidades	2 a 3 metros
Direção e mergulho em relação a face livre	Horizontal

Dessa forma, é possível calcular o fator rocha (A) utilizando a Equação 16. O fator $C(A)$ foi definido de forma a permitir a melhor adequação do algoritmo ao verificado em campo. Os valores para obtenção do fator rocha (A) são mostrados na Tabela 05:

Tabela 05: Variáveis de definição do fator rocha.

Variável	Descrição	Valor	Valor final
RMD	Maciço rochoso	Fraturado	JF
JF	Maciço fraturado	JPS + JPA	60
JPS	Espaçamento entre as fraturas (m)	MS a DP = 0,856 a 3	50
JPA	Direção e mergulho em relação à frente livre do fogo da família principal	Horizontal	10
RDI	Influência da densidade	$25 \times d - 50$	17,5
d	Densidade (g/cm^3)	4,56	
HF	Se $E < 50$ GPa Se $E > 50$ GPa	E/3 UCS/5	20,8
E	Módulo de Young (GPa)	72,14	
UCS	Resistência à compressão uniaxial (Mpa)	101,91	101,91
$C(A)$	Fator de correção	0,5	
A	Fator rocha		2,94

5.2. Medidas em campo

5.2.1. Parâmetros do Desmonte

A malha de perfuração utilizada em Matozinhos é fixa devido à uniformidade do maciço rochoso. Os parâmetros utilizados são apresentados na Tabela 06:

Tabela 06: Parâmetros da malha de perfuração.

Parâmetros	Valores
Malha estagiada	1,1
Diâmetro do furo (mm)	76,2
Altura da bancada (m)	14
Afastamento (m)	3
Espaçamento (m)	6
Subperfuração (m)	1
Tampão (m)	2
Comprimento da carga (m)	13

Para a simulação, assumiu-se um desvio do furo igual a 0, uma vez que não há histórico de medidas no banco em que foram realizados os testes.

5.2.2. Características dos Explosivos

De acordo com o fabricante, as características dos explosivos estão descritas na Tabela 07:

Tabela 07: Características do ANFO fornecidas pelo fabricante.

Tipo granulado	Velocidade confinado em tubo de 2" ($\pm 5\%$)	Densidade ($\pm 5\%$)
Baixa Densidade	3.100 m/s	0,70
Alta densidade	3.200 m/s	0,90

As propriedades dos explosivos foram medidas durante um desmonte na unidade. As

velocidades do ANFO alta densidade e ANFO baixa densidade, que são utilizados no desmonte, estão apresentadas na Figura 21 e Figura 22, respectivamente e demonstram estar de acordo com as características fornecidas pelo fabricante.

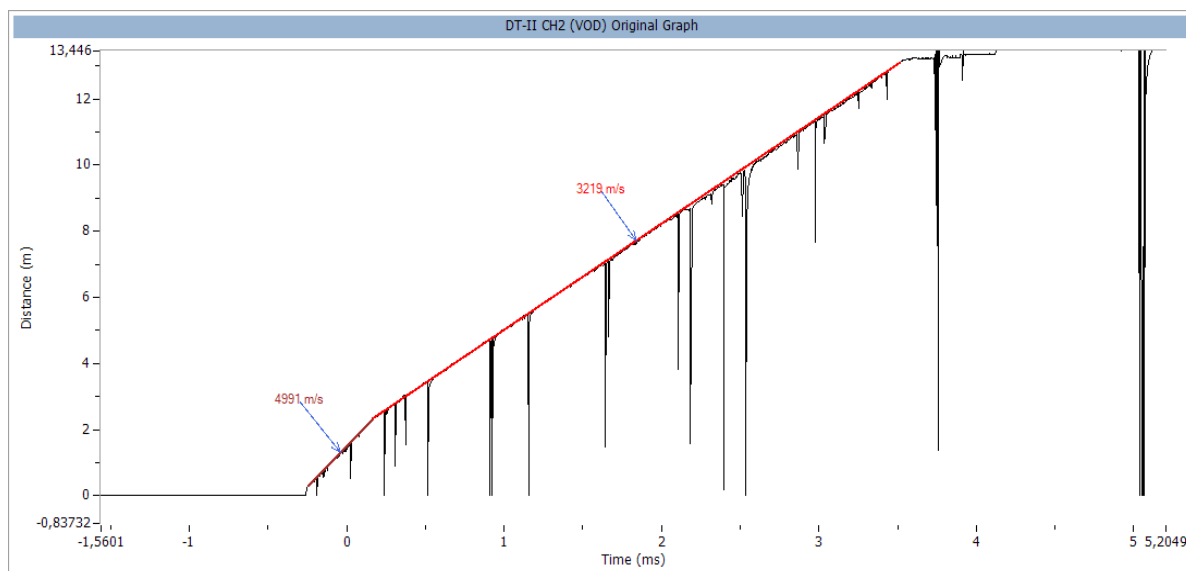


Figura 21: Resultado da medição do VOD em campo do encartuchado e ANFO alta densidade.

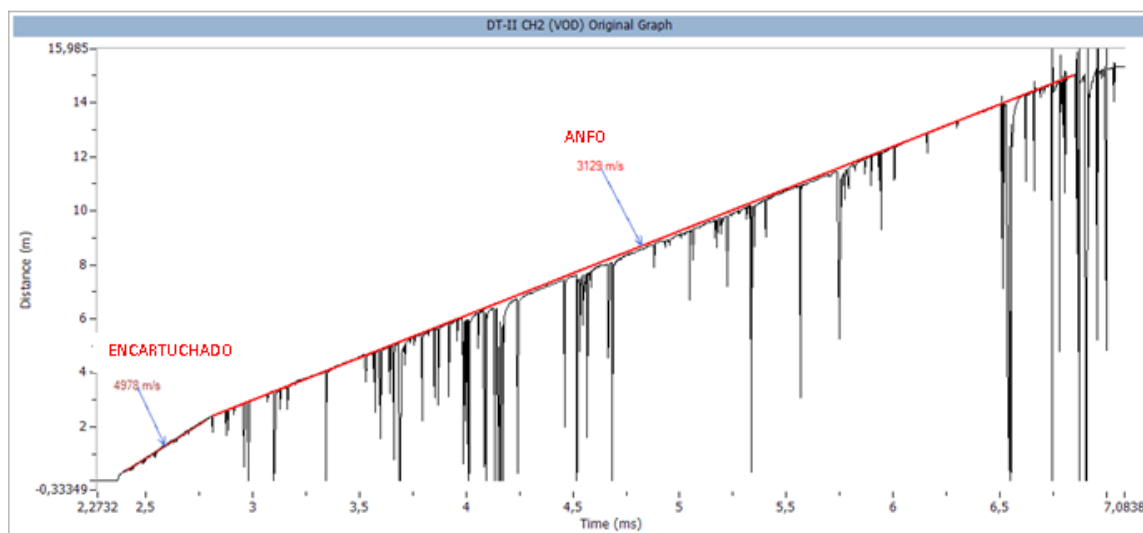


Figura 22: Resultado da medição do VOD em campo do encartuchado e ANFO baixa densidade.

A densidade do explosivo foi obtida por meio de ensaios laboratoriais utilizando provetas, em triplicata. O erro associado à proveta é de 1%. Foi encontrando o valor de $0,90\text{g/cm}^3$

para o ANFO alta densidade e $0,69\text{g/cm}^3$ para o ANFO baixa densidade.

A RWS é 100% por se tratar do ANFO, o explosivo que está sendo avaliado para o modelamento.

5.3. Modelamento matemático

O modelamento foi realizado utilizando-se o modelo de Kuz-Ram para a simulação da caracterização granulométrica do desmonte.

Por meio dos dados de caracterização da rocha, do explosivo e da geometria do desmonte obteve-se uma curva granulométrica do mesmo. Essa curva foi comparada aos resultados das análises do desmonte para verificação e validação do modelo. Os parâmetros de entrada do modelo estão mostrados na Tabela 08:

Tabela 08: Parâmetros de entrada do modelo de desmonte.

Parâmetro	Símbolo	Unidade	Valor
Malha estagiada	<i>P</i>	-	1,1
Diâmetro do furo	<i>D</i>	mm	76,2
Afastamento	<i>B</i>	m	3
Espaçamento	<i>S</i>	m	6
Subperfuração		m	1
Comprimento da carga	<i>L</i>	m	13
Altura da bancada	<i>H</i>	m	14
Tampão	<i>T</i>	m	2

Por meio desses valores, é possível determinar o índice de uniformidade de Cunningham, sendo igual a 2,06.

Os resultados obtidos por meio das medições de campo dos explosivos estão listados na Tabela 09.

Tabela 09: Medições realizadas em campo.

Parâmetro	Unidades	Valor
Massa de explosivo	kg/furo	53,4
Densidade do explosivo	g/cm ³	0,90
Razão de carga	kg/m ³	0,212
Energia relativa por massa de explosivo	%	101,2
<i>VOD_e</i>	m/s	3.219
<i>VOD_n</i>	m/s	3.200
<i>RWS</i>	%	100

A partir destes dados e dos resultados obtidos na caracterização do maciço rochoso e posterior obtenção do fator rocha é possível encontrar o tamanho médio (X_{50}) do produto gerado pelo desmonte, utilizando a Equação de Kuznetsov. O X_{50} calculado é de 214,19 mm.

É possível ainda calcular o comportamento granulométrico do desmonte a partir das variáveis X_{50} e n utilizando a Equação de Rosin-Rammler. Desta forma, obteve-se o gráfico mostrado na Figura 23:

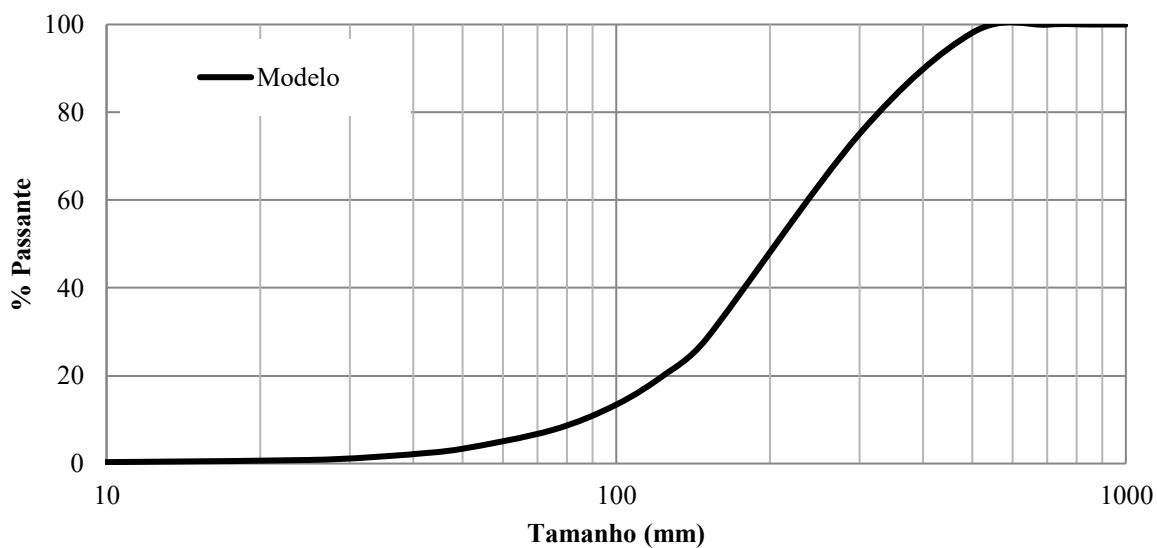


Figura 23: Curva granulométrica obtida por meio do modelo de Kuz-Ram.

5.3.1. Validação do modelo

O modelo foi comparado à análise realizada pelo Wipfrag e se mostrou aderente como apresentado no gráfico na Figura 24:

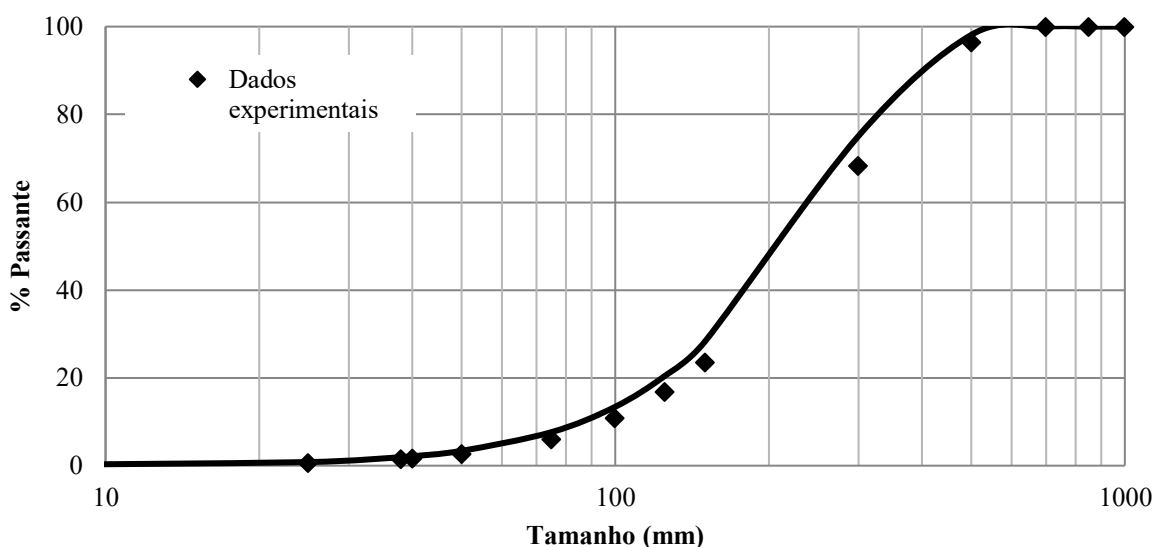


Figura 24: Curva granulométrica do modelo de Kuz-Ram e dos dados experimentais obtidos por meio de análise por imagem.

5.4. Análise financeira

O custo utilizando a malha atual é, em média, R\$ 0,29/t, utilizando-se carga de fundo composta por emulsão encartuchada e carga única de ANFO. A granulometria média do desmante com estes parâmetros é de aproximadamente 214 mm. Respeitando o limite máximo de 856 mm (limite de catálogo do britador primário), é possível planejar um desmante cujo diâmetro médio das partículas seja de aproximadamente 300 mm reduzindo-se, assim, o custo do desmante sem prejudicar o desempenho da planta de beneficiamento.

A geração de finos, é diretamente proporcional a três variáveis do desmante. Como não é de interesse do processo a geração de finos, estes parâmetros devem ser reduzidos ou,

pelo menos, mantidos. O primeiro parâmetro a ser analisado é o diâmetro de perfuração. No caso da mina de Matozinhos, o diâmetro de perfuração já é o menor que a perfuratriz é capaz de operar e uma troca do equipamento resultaria em um alto investimento inicial, o que não é interesse para a empresa no momento.

Os dois próximos parâmetros são a velocidade de detonação do explosivo e a densidade do mesmo. Neste caso, existe a oportunidade de diminuir estes valores, reduzindo assim, a geração dos indesejáveis finos. O explosivo utilizado é o ANFO e possui a menor velocidade e densidade se comparado às emulsões.

Há uma variação do ANFO que pode ser utilizada, denominada ANFO de baixa densidade na qual é misturado aproximadamente 10% em massa de casca de arroz (material inerte). Este explosivo possui densidade teórica de $0,7\text{g/cm}^3$ e velocidade de detonação teórica de 3100 m/s, como apresentado anteriormente na Tabela 07 e informado pelo fabricante.

Outra ação relacionada ao mesmo objetivo é a alteração do iniciador, substituindo-se a emulsão encartuchada, que possui alta densidade e velocidade de detonação, por booster de forma a iniciar o desmonte sem maior geração de finos nesta região, porém em casos de furos com presença de água no fundo, o uso de encartuchado é mais indicado por sua alta resistência à água até que a mesma seja totalmente expulsa do furo. O uso do encartuchado também é indicado para garantir o lançamento do desmonte, uma vez que a base da bancada possui uma maior resistência ao arranque. Como o volume de encartuchado é em torno de apenas 10% do furo, optou-se por não realizar alteração nesta variável.

A alteração na malha será de forma a aumentar a área de atuação do explosivo, reduzindo assim a razão de carga e, por consequência, minimizando a geração de fragmentos finos. Para garantir que as ondas geradas na detonação atinjam de igual forma todos os pontos do maciço, será utilizada a malha de triângulo equilátero, como mostrado na Figura 25.

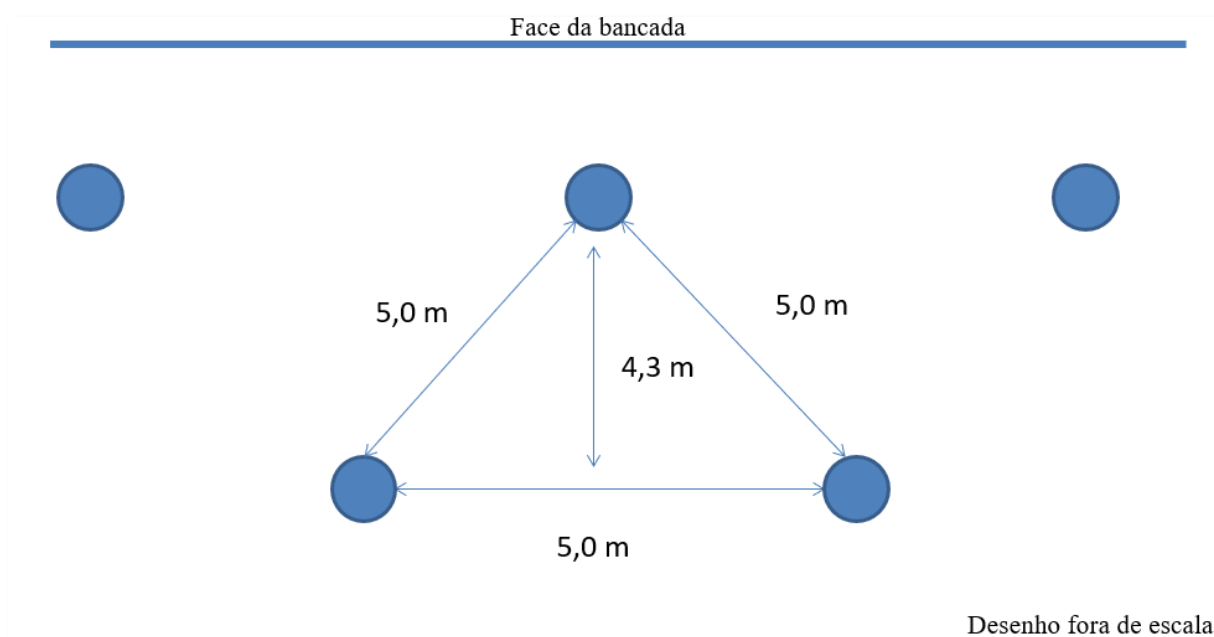


Figura 25: Malha sugerida para teste.

5.5. Aplicação dos novos parâmetros

As alterações propostas para que os objetivos sejam atingidos estão mostradas na Tabela 10:

Tabela 10: Comparação dos parâmetros do desmonte caso base e desmonte proposto.

Parâmetro	Caso Base	Desmonte proposto
Formato da malha	Estagiada	Estagiada – triângulo equilátero
Afastamento	3 m	4,3 m
Tampão	2 m	3 m
Espaçamento	6 m	5 m
Densidade do explosivo	0,90 g/cm ³	0,69 g/cm ³
Velocidade do explosivo	3219 m/s	3129 m/s

O formato da malha foi alterado para triângulo equilátero para garantir um melhor aproveitamento da energia do explosivo em todos os pontos do maciço. Desta forma, a distância entre um furo e o ponto do maciço mais distante dele é a menor possível.

O afastamento e espaçamento foram ajustados de acordo com as simulações de forma a aumentar a área de atuação do explosivo sem gerar fragmentos de granulometria prejudicial à planta de beneficiamento.

O tampão foi alterado, pois o mesmo é função do afastamento. Como o afastamento é maior, o confinamento do furo também deve ser maior para garantir o melhor aproveitamento da energia na fragmentação da rocha.

A alteração no explosivo se dá pela utilização do ANFO de baixa densidade que, devido à adição da casca de arroz, possui menor densidade e menor velocidade de detonação.

Por meio do modelo de Kuz-Ram é possível prever qual o comportamento granulométrico do desmorte com as alterações propostas, como mostrado na Figura 26.

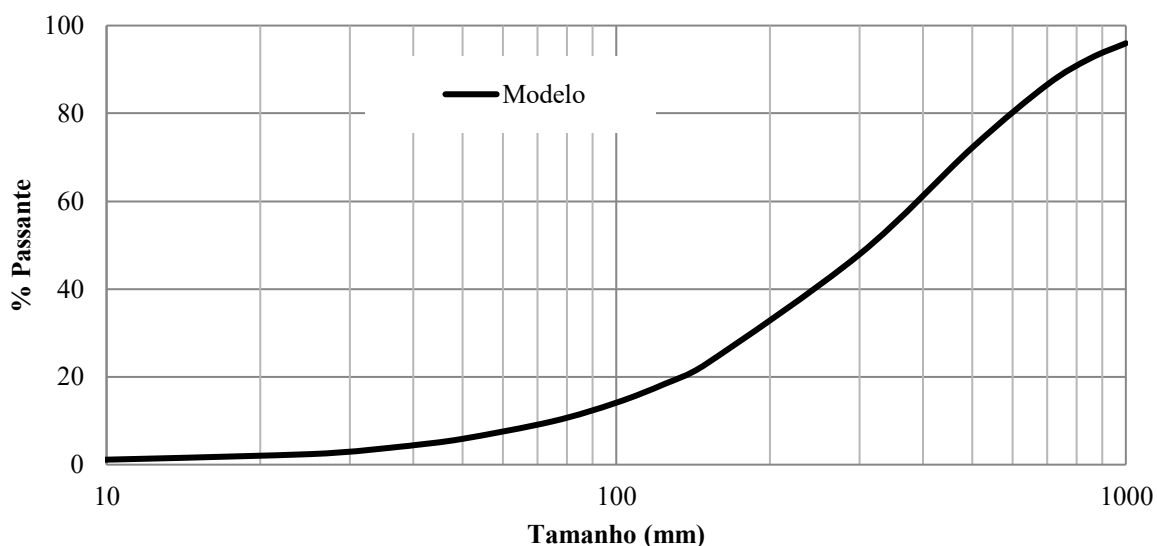


Figura 26: Curva granulométrica do desmorte baseado no modelo de Kuz-Ram com a nova malha de perfuração.

Por meio da análise granulométrica do desmorte, verificou-se o resultado apresentado no gráfico na Figura 27:

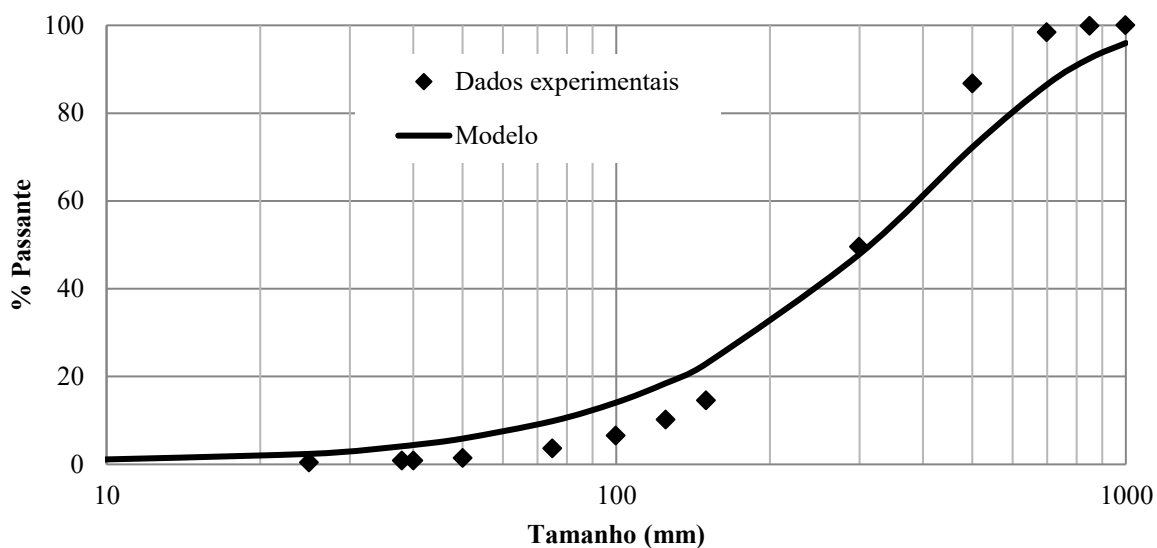


Figura 27: Curva granulométrica do modelo de Kuz-Ram e dos dados experimentais com a nova malha de perfuração obtidos por meio de análise por imagem.

Percebe-se que o modelo foi aderente ao verificado em campo. As variações se devem ao modelo ter considerado que haveria mais finos na fração abaixo de 300 mm e mais grossos na fração acima deste valor. De maneira geral, o resultado da análise se mostrou mais interessante para os objetivos do trabalho do que o resultado do modelo. O percentual acima do limite máximo do britador foi consideravelmente baixo, em torno de 0,2% na análise obtida e o percentual abaixo de 50 mm caiu de 2,7% para 1,5%. O sucesso desta redução foi a alteração da velocidade de detonação e da densidade do explosivo.

Ao se comparar o caso base com o desmonte otimizado, pode-se facilmente perceber o aumento da fração mais grossa tanto no modelo quanto nos resultados obtidos em campo, o que está conformidade com o objetivo proposto. Os resultados estão mostrados na Figura 28 e Figura 29.

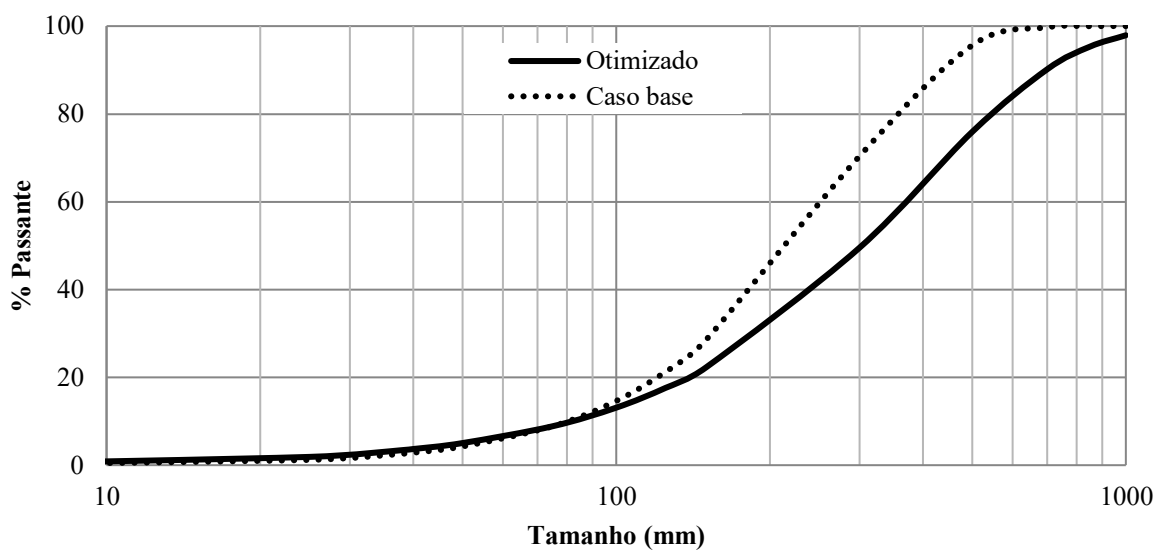


Figura 28: Curva granulométrica do modelo de Kuz-Ram do caso base comparada a curva granulométrica do modelo Kuz-Ram do desmonte otimizado.

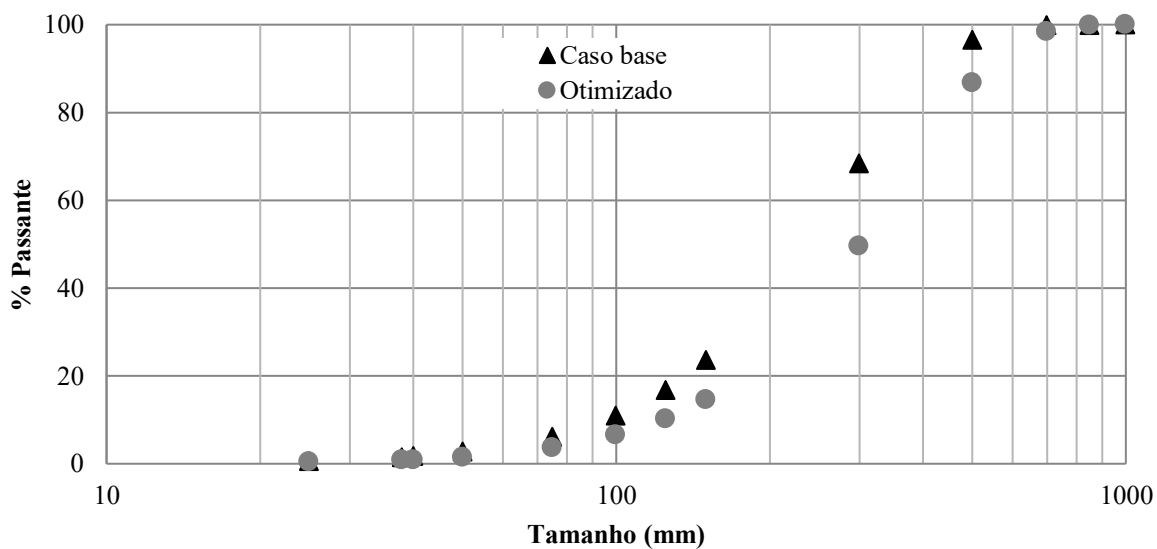


Figura 29: Curva granulométrica dos dados experimentais do caso base comparada a curva granulométrica do desmonte otimizado.

De acordo com os resultados apresentados, pode-se concluir que:

- Na nova malha, o X_{50} foi planejado para subir de 245 mm para 304 mm e o resultado obtido foi de 302 mm.
- O X_{99} medido alcançou o valor de 761 mm, ainda abaixo do limite do britador indicado pelo fabricante que é de 856 (anteriormente de 641 mm).
- A geração de partículas abaixo de 50 mm foi reduzida de 2,7% para 1,5%.
- O custo de desmonte foi reduzido de R\$ 0,29/t para R\$0,23/t (redução de 20,7%).

Os resultados estão compilados na Tabela 11:

Tabela 11: Avaliação de variáveis no desmonte utilizando a malha inicial e malha sugerida após os estudos.

Parâmetro	Malha inicial	Malha sugerida (modelo)	Malha sugerida (análise)
X_{50}	214 mm	314	302 mm
Fragmentos ≤ 50 mm	2,7 %	5,9 %	1,5 %
Custo	R\$ 0,29/t	-	R\$ 0,23/t
Razão de carga	0,212 kg/m ³	0,120 kg/m ³	0,120 kg/m ³

Considerando uma produção de 2.000.000 de toneladas por ano, a redução de custo seria de R\$120.000,00 no ano. Levando em consideração que a britagem está subutilizada, com desgastes insignificantes dos revestimentos e a empresa não tem interesse em geração de finos, este retorno não impacta negativamente em nenhuma outra etapa do processo.

Além disso, a redução percentual da geração de material menor que 50 mm, aumenta o aproveitamento de calcário para produção de cal, reduzindo o custo por tonelada aproveitável para a planta, uma vez que o custo de carregamento, transporte, britagem e classificação é o mesmo e a produção útil é maior. Somado a isso, aumenta-se a vida útil da mina.

Com o método de análise por imagem não é possível avaliar precisamente os ganhos de aproveitamento devido a esta redução, uma vez que este método não é o mais indicado para análise granulométrica de finos e a análise posterior por outro método oferece interferências de reduções de granulometria de outras etapas do processo como carregamento, transporte, descarga e o próprio beneficiamento.

Apesar dos resultados satisfatórios, percebeu-se que houve um baixo lançamento da pilha desmontada durante a detonação. Esta ocorrência dificulta a lavra do material, já que a escavadeira precisa escavar e carregar o mesmo, causando lentidão no ciclo de carregamento e transporte. O resultado pode ser percebido na Figura 30 e Figura 31:



Figura 30: Figura do desmonte realizado para teste utilizando-se a nova malha.



Figura 31: Figura do desmorte realizado para teste utilizando-se a nova malha.

O baixo lançamento da rocha pode ser devido à redução da razão de carga e aumento do afastamento. Durante a retomada do material, foi evidenciado que o minério estava bem fragmentado, como esperado, confirmando que se deve trabalhar apenas no melhor lançamento do material em posteriores detonações. Isso pode se dar por meio da implementação de inclinação durante a execução dos furos, otimização dos tempos de retardo utilizados e esquema de amarração dos acessórios no desmorte.

É de grande importância salientar que o histórico de desgaste dos equipamentos da britagem nesta unidade é extremamente baixo e a redução de geração de material abaixo de 50 mm no desmorte aumenta a recuperação física do calcário para a produção de cal, diminuindo o custo de produção e aumentando a vida útil da mina. Desta forma, a

alteração do desmonte não traz nenhum efeito negativo seja em performance ou custo para as operações subsequentes.

Os tempos de retardo utilizados nos desmontes não foram variados, tampouco a amarração.

Deve-se enfatizar também que o modelo possui erros e a fotoanálise também, portanto todos os dados obtidos serviram como uma estimativa e um direcionamento para auxiliar a empresa na tomada de decisão.

Desta forma, obteve-se resultados importantes e positivos para a operação da mina, tanto na melhora do aproveitamento do material e consequente aumento da vida útil da mina, quanto na redução do custo anual da unidade.

6. CONCLUSÕES

Como resultado do estudo realizado, objetivando a otimização do desmonte de rochas para atendimento das necessidades da fabricação de cal, foram obtidos resultados consistentes. Somados aos resultados de melhor aproveitamento do material, obteve-se também uma redução no custo do desmonte.

O modelo de Kuz-Ram se mostrou bastante aderente nas simulações. No caso da malha sugerida, foi percebida uma diferença entre os resultados do modelo e os resultados experimentais devido à inclinação da curva, dada pelos resultados do parâmetro n (Índice de uniformidade). Esta pequena variação não afetou o atendimento aos objetivos e a geração de fragmentos abaixo de 50 mm foi reduzida em 1,2% no desmonte.

Os desmontes obtidos demandam melhorias para que sua retomada não cause lentidão na operação. Essas melhorias podem ser obtidas por meio de pequenos ajustes na inclinação dos furos ou no arranjo e tempos da amarração do desmonte.

Foram obtidos ganhos financeiros devido à mudança da malha e, conseqüente redução do uso de explosivos, de aproximadamente R\$120.000,00 ao ano e aumento do aproveitamento do material para a fabricação de cal devido à redução dos finos sem nenhum prejuízo à planta de beneficiamento, uma vez que a rocha não provoca desgaste significativo nos equipamentos e revestimentos.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir desta dissertação de mestrado, podem ser desenvolvidos alguns trabalhos futuros:

- Efeitos dos tempos de retardo na granulometria final e lançamento do material.
- Avaliação individual da contribuição das variáveis no lançamento do material durante a detonação por meio da criação de cenários e simulações.
- Utilização do Modelo das Duas Componentes (TCM) para caracterização dos fragmentos finos do desmonte.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alkmim F.F. 2004. O que faz de um cráton um cráton? O Cráton São Francisco e as revelações almeidianas ao delimitá-lo. In: V. Mantesso Neto, A. Bartorelli, C. Dal Ré Carneiro e B.B. Brito Neves (eds.) Geologia do continente sul americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida. Editora Beca, pp.: 17-35.

Alonso, J. B., Gómez, J. C., Herbert, J. H. Perforación y Voladura de rocas en minería, Madrid, 2013. 256p.

Azevedo, I.C.D; Marques, E.A.G. Introdução à Mecânica das Rochas. 1ª ed. Viçosa. Ed. UFV, 2006. 363p

Cameron, A. & Hagan, T. Curso Internacional: Tecnologia de desmonte de rochas com explosivos para minas a céu aberto e subterrâneas. Belo Horizonte: IBRAM, 1996. 146p.

Castro, A. S. Avaliação da Fragmentação dos desmontes de Rocha através do Sistema de Fotoanálise. Universidade Federal de Ouro Preto, 2000. 89 p. (Dissertação de mestrado em Engenharia Mineral).

Clark, G.B. Industrial High Explosives: Composition and Calculations for Engineers. Colorado School of Mines. Quarterly, vol. 75, nº. 1, 1980. 47 p.

Cooper, P. W. (1997). Explosives Engineering. USA: Wiley-VCH, 1997. 455p.

Crosby, W. International Drilling, Blasting and Explosives Technology Course. Ouro Preto: 17 a 20 de agosto de 1998.

Cunningham, C.V.B. 1983. The Kuz-Ram model for prediction of fragmentation from blasting. In R. Holmberg & A Rustan (eds), Proceedings of First International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting, Luleå, 439-454

Cunningham, C.V.B. Fragmentation Estimations and The Kuz-Ram Model – Four Years On. In Proceedings 2nd Int. Symp on Rock Fragmentation by Blasting, Lulea, 1987. p.475 – 487.

Cunningham, C.V.B. The Kuz-Ram fragmentation model – 20 years on. Brighton Conference Proceedings, 2005. p. 201 - 210.

Dardenne M.A. 1978. Síntese sobre estratigrafia do Grupo Bambuí no Brasil central. In: SBG, Cong. Bras. Geol., 30, Anais, p. 597-610.

Hustrulid, W. Blasting Principles for Open Pit Mining. Vol 1. Rotterdam: Balkema, 1999. 301p.

ISRM (1979a). Suggested methods for determining the uniaxial compressive strength and deformability of rock material. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 16, 135-140.

Jimeno, C.L. *Manual de Perforacion y Voladura de Rocas*. Instituto Tecnológico Geominero de Espanã, 2ª edição, Espanha, 1994. 541p.

Kuznetsov, V.M. The mean diameter of the fragments formed by blasting rock. *Soviet Mining Science*, 1973. p. 144-148.

Lilly, P.A. An Empiral Method of Assessing Rock Massing Blastability. Large Open Pit Mining Conference. The AusIMM/IE Aust Newman Combined Group, Austrália, 1986. p. 89 – 92.

Magalhães L. 1988. Análise estrutural qualitativa nos sedimentos do Grupo Bambuí, Região Sudeste da Bacia do São Francisco (Faixa 7 Lagoas – Serra do Cipó). Dissertação de Mestrado, Escola de Minas, UFOP, 109 p.

Mokhnachev, M.P and Gromova, N.V. Laws of Variation of Tensile Strength. Indices and Deformation Properties of Rocks with Rate and Duration of Loading. *Sov. Min. Sci.No. 6*, 1970. 609p.

Morais, J. L. Simulação da Fragmentação dos Desmontes de Rochas por Explosivos. Programa de Pós Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, 2004. 224p

Olofsson, S. O. *Applied Explosives Technology For Construction and Mining*, Sweden, 1990. 315p.

Rajpot, M.A., The effect of fragmentation specification on blasting cost. Kingston, Ontario, Canada: Queen's University, 2009. (Master of Science Engineering - degree Thesis), 2009.

Ricardo, H. S; Catalini, G. *Manual Prático de Escavação: Terraplenagem e Escavação de Rocha*. 3. ed. São Paulo: PINI, 2007. 656 p.

Scott, A., Cocker, A., Djordjevic, N., Higgins, M., La Rosa, D., Sarma, K., Wedmaier, R. *Open Pit Blast Design: Analysis and Optimisation*. JKMRC, Queensland, Austrália, 1996. 341 p.

Silva, V.C. *Desmonte de Rochas com Explosivos*. Ietec, Belo Horizonte, 1998. 126p

WipWare Inc. *Photoanalysis Systems: Catálogo de apresentação*, 1996.