



CENTRO UNIVERSITÁRIO LUTERANO DE PALMAS

Recredenciado pela Portaria Ministerial nº 1.162, de 13/10/16, D.O.U nº 198, de 14/10/2016
ASSOCIAÇÃO EDUCACIONAL LUTERANA DO BRASIL

João Pedro da Silva Marinho

OTIMIZACAO DOS CUSTOS DE DESMONTE COM RECURSO DE EXPLOSIVOS NA
MINERADORA GOIASCAL: Controle dos parâmetros geométricos do plano de fogo a céu
aberto.

Palmas – TO

2017

João Pedro da Silva Marinho

OTIMIZACAO DOS CUSTOS DE DESMONTE COM RECURSO DE EXPLOSIVOS NA
MINERADORA GOIASCAL: Controle dos parâmetros geométricos do plano de fogo a céu
aberto.

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

Orientador: Prof. José Cleuton Batista.

Co-orientador: Prof. M.e Vinicius Gouveia de
Miranda

Palmas – TO

2017

João Pedro da Silva Marinho

OTIMIZACAO DOS CUSTOS DO DESMONTE COM RECURSO DE EXPLOSIVOS DE
PEDREIRAS NO TOCANTINS: Controle dos parâmetros geométricos do plano de fogo a
céu aberto.

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

Orientador: Prof. José Cleuton Batista.

Co-orientador: M.e Vinicius Gouveia de
Miranda

Aprovado em: ____/____/____

BANCA EXAMINADORA

Prof. José Cleuton Batista

Orientador

Centro Universitário Luterano de Palmas – CEULP

Prof. Dr. Erwin Francisco Tochtrop Junior

Centro Universitário Luterano de Palmas - CEULP

Prof. Caroline Dourado Moreira Lima

Centro Universitário Luterano de Palmas - CEULP

Palmas – TO

2017

“Viver é arriscar tudo. Caso contrário você é apenas um pedaço inerte de moléculas, montadas aleatoriamente à deriva, onde o universo te sopra. ”

(Rick and Morty)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente aos meu pais, **Valdelice da Silva Menezes** e **Gilberto Coelho Menezes**, pelo apoio incondicional, os conselhos, ensinamentos e amor, que hoje me fazem ser uma pessoa melhor e me ajudaram a passar por essa fase acadêmica.

Meus irmãos, **Vanessa da Silva Menezes** e **Pedro Paulo da Silva Menezes**, que fizeram parte dessa caminhada e estiveram morando junto comigo durante quase todo o percurso. Por ser o último dos irmãos a completar essa fase, pude aprender com eles e acompanhar o crescimento de ambos.

Meus amigos, que viraram irmãos, **Vinicius Neres** (Zé boneco), **Vitor Barcellos** (Vitão), **Jorge Oliveira** (Jorgete) e **Lucas Nascimento** (Bolinha), que hoje são minha segunda família desde o ensino médio.

Aos amigos que fiz durante a fase acadêmica, **Auã Kiahla** (Tapurú), **Carlos Henrique** (Gotinha), **Matheus Mota** (Rato), **Erick Torres** (Xibas), **Jair Jr.** (Pé de bolo), **Pedro Neto** (Chico), **Fellype Menezes** (Seco), **Vitor Hugo** (Neguin), **Waltudes Fernando** (Teta negra), **Yago Sousa**, **Letycia Duarte**, **Lindaiane Mota**, **Fernanda Almeida** e **Adriana Raniely**, pelas noites de estudos e alegrias que tivemos juntos, durante esses 4 anos e meio de curso.

Ao meu amigo **Gean Frank**, pelos ensinamentos durante o meu primeiro estágio na área, por todos os conselhos de vida que não hesitou em me dar durante o privilégio que tive de ser estagiário no Departamento Nacional de Produção Mineral.

Ao meu orientador professor **José Cleuton**, que não só colaborou para esse trabalho como foi um mestre na orientação de vida, de como ser um bom profissional e de como a humildade nos faz ser uma pessoa melhor.

Ao meu coorientador e amigo M.e **Vinicius Gouveia**, por todo apoio durante a realização desse trabalho e vasto conhecimento que não hesitou em repassar.

Aos professores do curso de Engenharia de Minas do Centro Universitário Luterano de Palmas pelo conhecimento repassado.

A toda minha família que esteve presente de forma direta ou indireta nessa fase da minha vida.

E a todas as pessoas que colaboram nesses últimos anos para minha formação, agradeço de todo coração.

RESUMO

MARINHO, João Pedro da Silva. **OTIMIZACAO DOS CUSTOS DO DESMONTE COM RECURSO DE EXPLOSIVOS DE PEDREIRAS NO TOCANTINS:** Controle dos parâmetros geométricos do plano de fogo a céu aberto. 2017. 78 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Minas, Centro Universitário Luterano de Palmas, Palmas, 2017.

O processo de lavra de mina a céu aberto pode originar significativos custos nas operações de uma mineradora, contudo não depende somente do método utilizado para o desmonte para se ter um menor custo nessa etapa. A utilização de desmonte com explosivos é bastante comum na lavra a céu aberto, porém se for mal dimensionado e controlado pode gerar um aumento significativo dos custos de lavra, devido a consequente utilização de fragmentação secundária. O presente trabalho tem com intuito avaliar os resultados de desmonte na mineradora GoiasCal, com o intuito de investigar a influência da geometria do plano de fogo na execução do desmonte, propondo alternativas que ajudem a melhorar sua aplicação e execução. A análise dos dados é primordial para que se possa avaliar os pontos da geometria que podem ser melhorados para, assim, diminuir os custos de desmonte e com a utilização de ferramentas modernas poder elaborar uma solução eficaz para cada local que será aplicado o plano de fogo. Com isso será possível fazer uma otimização dos custos e garantir que a granulometria esperada, após o desmonte, atinja padrões aceitáveis, conhecidos em minas que operam de maneira eficiente.

Palavras-chave: Otimização, Desmonte de rocha, Fragmentação.

ABSTRAC

MARINHO, João Pedro da Silva. **OTIMIZACAO DOS CUSTOS DO DESMONTE COM RECURSO DE EXPLOSIVOS DE PEDREIRAS NO TOCANTINS:** Controle dos parâmetros geométricos do plano de fogo a céu aberto. 2017. 78 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Minas, Centro Universitário Luterano de Palmas, Palmas, 2017.

The open pit mining process can lead to significant costs in the operations of a mining company, however, not only depends on the method used for the clearing to have a lower cost in this stage. The use of blasting operation is quite common in open pit mining, if poorly dimensioned and controlled it can generate a significant increase in mining costs due to the consequent use of secondary fragmentation. The objective of this work is to evaluate the results of blasting operation at the GoiaCal mining company, in order to investigate the influence of the geometry of the fire plan on the execution of the blasting operation, proposing alternatives that help to improve its application and execution. The analysis of the data is essential so that it is possible to evaluate the points of the geometry that can improve in order to reduce the costs of blasting operation and with the use of modern tools to be able to elaborate an effective solution for each place that will be applied the fire plan. This will make it possible to optimize costs and ensure that the expected granulometry, after blasting operation, reaches acceptable standards, known in mines that operate efficiently.

Key words: Optimization, Blasting Operation, Fragmentation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|--|----|
| Figura 1. a) Propagação da onda de choque, b) Expansão dos gases | 8 |
| Figura 2. Mecanismo de ruptura da rocha causada por explosivo..... | 9 |
| Figura 3. Geometria do plano de fogo | 12 |
| Figura 4. Detonador não elétrico do tipo RIONEL | 16 |
| Figura 5. Parte de uma espoleta eletrônica (HOLLANDA, 2016) | 17 |
| Figura 6. Fluxograma de ciclo de produção mineira | 22 |
| Figura 7. Gráfico com as restrições | 25 |
| Figura 8. Valores (x_1, x_2) ótimos para a solução da função $3x_1+5x_2$ (2,6) | 26 |
| Figura 9. Casos possíveis de acontecer..... | 27 |
| Figura 10. Medição das distancias | 31 |
| Figura 11. Medição da profundidade dos furos | 31 |
| Figura 12. Fotografia do material | 33 |
| Figura 13. Análise do material..... | 33 |
| Figura 14. Analise da seleção | 34 |
| Figura 15. Determinação do fator de rocha utilizando o programa O-Pitblast..... | 35 |
| Figura 16. Conjunto Rompedor Hidraulico com Escavadeira Komatsu PC 350 LC ... | 36 |
| Figura 17. Croqui..... | 39 |
| Figura 18. Valores Médios dos Parametros Geometricos | 40 |
| Figura 19. Furos (Desmonte I)..... | 41 |
| Figura 20. Local após transporte do material | 41 |
| Figura 21. Resultado do desmonte (Foto 1)..... | 42 |
| Figura 22. Resultado do desmonte (Foto 2)..... | 42 |
| Figura 23. Resultado do desomonte (Foto 3)..... | 43 |
| Figura 24. Croqui (Desmonte II) | 45 |
| Figura 25. Parametros geometricos | 46 |
| Figura 26. Furos (Desmonte II) | 47 |
| Figura 27. Local após transporte do material | 47 |
| Figura 28. Resultado do desmonte (Desmonte II) | 48 |
| Figura 29. Croqui..... | 50 |
| Figura 30. Parametros Geometricos | 50 |
| Figura 31. Furos (Desmonte III)..... | 51 |
| Figura 32. Local do desmonte III | 52 |
| Figura 33. Resultado do desmonte (Desmonte III)..... | 52 |

| | |
|--|----|
| Figura 34. Parâmetros de restrições e suas referências (Desmonte I) | 60 |
| Figura 35. Parâmetros de restrições e suas referências (Desmonte II) | 60 |
| Figura 36. Parâmetros de restrições e suas referências (Desmonte III)..... | 61 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1. Emulsões | 10 |
| Tabela 2. Produtos do Afno | 11 |
| Tabela 3. Produtos do Hidrogel | 11 |
| Tabela 4. Classificação geomecânica para obtenção do fator de rocha | 19 |
| Tabela 5. Dados do problema | 23 |
| Tabela 6. Controle do Rompedor..... | 30 |
| Tabela 7. Dados dos planos de fogo fornecidos pela empresa | 32 |
| Tabela 8. Dados da rocha e razão de carga fornecidos pela empresa..... | 32 |
| Tabela 9. Dados Levantados..... | 36 |
| Tabela 10. Custos..... | 37 |
| Tabela 11 Resultados | 37 |
| Tabela 12. Custos dos Explosivos e Acessórios utilizados nos desmontes | 38 |
| Tabela 13. Resultados reais do desmonte (Desmonte I)..... | 40 |
| Tabela 14. Custos (Desmonte I) | 44 |
| Tabela 15. Resultados reais do desmonte (Desmonte II) | 46 |
| Tabela 16. Custos (Desmonte II) | 49 |
| Tabela 17. Resultados reais do desmonte (Desmonte III) | 51 |
| Tabela 18. Custos (Desmonte III)..... | 54 |
| Tabela 19. Custos para o desmonte otimizado (Desmonte I) | 55 |
| Tabela 20. Custos para o desmonte otimizado (Desmonte II)..... | 56 |
| Tabela 21. Custos para o desmonte otimizado (Desmonte III)..... | 56 |
| Tabela 22. Resultados otimizado (Desmonte I)..... | 57 |
| Tabela 23. Resultado otimizado (Desmonte II)..... | 57 |
| Tabela 24. Resultados otimizado (Desmonte III) | 57 |
| Tabela 25. Malha otimizada | 59 |

GRÁFICOS

| | |
|--|----|
| Gráfico 1. Resultado da fotoanálise | 34 |
| Gráfico 2. Resultado granulométrico (Foto 1)..... | 43 |
| Gráfico 3. Resultado granulométrico (Desmonte II) | 48 |
| Gráfico 4. Resultado granulométrico (Desmonte III)..... | 53 |
| Gráfico 5. Comparativo dos resultados granulométricos (Desmonte I) | 58 |
| Gráfico 6. Comparativo dos resultados granulométricos (Desmonte II)..... | 58 |
| Gráfico 7. Comparativo dos resultados granulométricos (Desmonte III)..... | 59 |
| Gráfico 8. Comparativo de custos | 62 |
| Gráfico 9. Comparativo de passante | 62 |
| Gráfico 10. Comparativo de quantidade de material melhor fragmentado | 63 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|---------|--|
| ANFO | <i>Ammonium Nitrate Fuel Oil</i> (Nitrato de Amônia e Óleo Diesel) |
| UNICAMP | Universidade Estadual de Campinas |
| 3D | Terceira Dimensão |
| A | Afastamento |
| E | Espaçamento |
| IOS | <i>iPhone Operating System</i> (Sistema Operacional do <i>iPhone</i>) |
| PO | Pesquisa Operacional |
| Subp | Subperfuração |
| T | Tampão |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|-----------------|-------------------------------------|
| t | Tonelada |
| m | Metros |
| m ³ | Metros cúbicos |
| mm | Milímetros |
| ms | Milissegundos |
| mg | Miligramas |
| cm | Centímetros |
| cm ³ | Centímetros cúbicos |
| D | Diâmetro |
| L | Comprimento |
| X ₅₀ | Média de tamanho da partícula |
| Er | Energia relativa |
| RF | <i>Rock Factor</i> (Fator de Rocha) |
| Q | Massa do explosivo por furo |
| VOD | Velocidade de detonação |
| n | Índice de uniformidade |
| BCL | Comprimento da carga de fundo |
| CCL | Comprimento da carga de coluna |
| W | Desvio do furo |
| H | Altura do banco |
| US\$ | Dólar americano |
| % | Porcentagem |
| R\$ | Real |
| e | Euler |
| Kg | Quilograma |
| Hb | Altura da Bancada |

SUMÁRIO

| | | |
|--------------|--|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 5 |
| 1.1 | PROBLEMA DE PESQUISA | 6 |
| 1.2 | HIPÓTESES | 6 |
| 1.3 | OBJETIVOS | 6 |
| 1.3.1 | Objetivo Geral | 6 |
| 1.3.2 | Objetivos Específicos | 7 |
| 1.4 | JUSTIFICATIVA | 7 |
| 2 | REFERENCIAL TEÓRICO | 8 |
| 2.1 | DESMONTE DE ROCHAS A CÉU ABERTO COM EXPLOSIVOS | 8 |
| 2.1.1 | Ruptura da Rocha | 9 |
| 2.2 | TIPOS DE EXPLOSIVOS | 10 |
| 2.2.1 | Emulsão | 10 |
| 2.2.2 | Anfo | 11 |
| 2.2.3 | Hidrogel | 11 |
| 2.3 | GEOMETRIA DO PLANO DE FOGO | 12 |
| 2.3.1 | Espaçamento (E) | 13 |
| 2.3.2 | Afastamento (A) | 13 |
| 2.3.3 | Tamponamento (T) | 14 |
| 2.3.4 | Subperfuração (S) | 15 |
| 2.3.5 | Sistemas de Iniciação | 15 |
| 2.3.5.1 | Detonadores Não Elétricos | 15 |
| 2.3.5.2 | Detonadores Elétricos | 16 |
| 2.3.5.3 | Detonadores Eletrônicos | 16 |
| 2.4 | FRAGMENTAÇÃO | 17 |
| 2.4.1 | Equação de Kuznetsov | 18 |
| 2.4.1.1 | Equação de Tidman (Er) | 18 |
| 2.4.1.2 | Rock Factor | 19 |
| 2.4.2 | Equação de Rosin-Rammler | 20 |
| 2.4.3 | Equação da uniformidade | 20 |
| 2.5 | AVALIAÇÃO ECONOMICA DO DESMONTE..... | 21 |
| 2.6 | OTIMIZAÇÃO MATEMÁTICA..... | 22 |
| 2.6.1 | Programação Linear | 23 |
| 2.6.1.1 | Solução gráfica..... | 25 |

| | | |
|-------|--|----|
| 2.7 | SOFTWARE E TECNOLOGIAS APLICADAS NA MINERAÇÃO..... | 27 |
| 2.7.1 | Excel Solver..... | 27 |
| 2.7.2 | WipFrag (Software para análise granulométrica) | 28 |
| 2.7.3 | Split-Desktop..... | 28 |
| 2.7.4 | O-Pitblast | 28 |
| 3 | METODOLOGÍA APLICA | 29 |
| 3.1 | COLETA DOS DADOS..... | 29 |
| 3.1.1 | Levantamento dos Gastos com Rompedor Hidráulico | 30 |
| 3.1.2 | Coleta de Dados dos Desmontes Aplicados | 30 |
| 3.1.3 | Dados de Referência dos Planos de Fogo | 31 |
| 3.2 | ANÁLISE DOS DADOS | 32 |
| 3.2.1 | Análise Granulométrica..... | 33 |
| 3.2.2 | Análise do Fator de Rocha..... | 35 |
| 3.2.3 | Custo com Rompedor Hidráulico, Explosivos e Acessórios | 35 |
| 3.2.4 | Plano de Fogo..... | 38 |
| 4 | ESTUDO DE CASO | 39 |
| 4.1 | PRIMEIRO DESMONTE | 39 |
| 4.1.1 | Análise Granulométrica..... | 42 |
| 4.1.2 | Custos | 44 |
| 4.2 | SEGUNDO DESMONTE | 45 |
| 4.2.1 | Análise Granulométrica..... | 47 |
| 4.2.2 | Custos | 49 |
| 4.3 | TERCEIRO DESMONTE | 49 |
| 4.3.1 | Análise Granulométrica..... | 52 |
| 4.3.2 | Custos | 53 |
| 4.4 | OTIMIZAÇÃO..... | 54 |
| 5 | RESULTADOS E DISCUSSÕES | 62 |
| 6 | CONSIDERAÇÕES FINAIS | 64 |
| | REFERÊNCIAS..... | 65 |
| | ANEXO..... | 68 |
| | ANEXO – 1 ESTRUTURA PARA OTIMIZAÇÃO | 69 |

1 INTRODUÇÃO

A rocha calcária possui uma característica de derivar múltiplos produtos. Podendo ser utilizado para a fabricação de cimento, cal, brita, tinta, tendo utilidade na indústria química e metalúrgica. No Brasil o seu maior consumo é para o corretivo de acidez do solo, sendo o segundo maior consumidor de calcário nessa modalidade (PARAHYBA, 2013).

No ano de 2013 a região Centro-Oeste representava 24% da produção do país (PARAHYBA, 2013), já no ano de 2015 foi considerada a região de maior produção de calcário do ano, tendo a fatia de 38,1% da produção do Brasil (BRASIL, 2016). Está claro que houve um crescimento significativo na produção desse produto o que implica dizer que houve um aumento da demanda dos produtos derivados do calcário, o que implica em uma extração mais elaborada que atenda o aumento da produtividade a um custo menor.

Boa parte das mineradoras de calcário utilizam o método de lavra a céu aberto, com um dos motivos principais o baixo custo de extração e utiliza, basicamente, as principais fases método a céu aberto, tais como o decapeamento e as fase unitárias de perfuração e desmonte, carregamento, transporte e beneficiamento (SILVA, 2009).

Nas operações de lavra a céu aberto o desmonte com a utilização de explosivos tende a ser bastante empregado, tendo em vista o objetivo da fragmentação da rocha *in situ*. Sendo assim, torna-se necessário uma boa avaliação do plano de fogo aplicado no desmonte, para que o resultado possa atender, de forma satisfatória, o volume de produção, atendendo o sistema de carregamento e transporte, e a granulometria exigida pelo sistema de beneficiamento do material.

Quando não se atende a granulometria pertinente ao britador primário, tem-se um aumento dos custos de lavra. Godberry (1984) defende que provavelmente um dos principais custos adicionais devido a fraca fragmentação do desmonte primário é a fragmentação secundária, pois, ao utilizar-se “*drop ball*”¹, rompedores hidráulicos, fogos secundários, etc., o custo por tonelada é significativamente incrementado.

Contudo é possível melhorar o desmonte para evitar custos adicionais, utilizando-se de ferramentas e softwares de última geração para avaliar e implementar o melhor desmonte para cada situação. Miranda et. al. (2017) diz que modulação do terreno em 3D colabora para uma maior precisão no controle dos parâmetros da face livre, que resulta num melhor desmonte com utilização de explosivos.

¹ “*Dropball*” é uma esfera de aço de grande peso, lançada a uma certa altura sobre um determinado bloco de rocha.

Desta forma é preciso que as empresas se atentem as novas técnicas e ferramentas para a melhoria dos custos provenientes do desmonte com utilização de explosivos, pois assim terão menores problemas com custos adicionais elevados e melhorarão a produção do material.

Sendo assim, o presente trabalho demonstra técnicas que podem ser aplicadas no cotidiano de uma mineradora para se ter uma redução satisfatória dos custos de lavra, onde a geometria do plano de fogo se adapta para a redução dos custos do desmonte com explosivos e gere uma fragmentação aceitável para a britagem primária. Demonstrando também quais os principais erros que são cometidos na aplicação da geometria do plano de fogo, identificando assim os fatores que levam ao aumento dos custos na etapa de lavra.

1.1 PROBLEMA DE PESQUISA

Qual a influência da geometria do plano de fogo no custo total da operação de desmonte de rocha com a utilização de explosivos?

1.2 HIPÓTESES

A elaboração do plano de fogo de forma empírica não é o bastante para se garantir um bom resultado da fragmentação do material, sendo assim não se pode garantir uma boa eficiência do desmonte, com isso é preciso avaliar quais parâmetros da geometria podem colaborar para um eficiente desmonte de rocha e conseqüente melhoria nos custos na operação de lavra.

A aplicação de novas ferramentas tecnológicas para a melhoria do desmonte de rocha pode colaborar para um bom resultado da fragmentação e reduzir os custos nas etapas de beneficiamento, por tanto os investimentos nessas ferramentas podem ser vantajosos para o empreendedor.

E a utilização de software em conjunto com a otimização matemática dos custos do desmonte devem colaborar para diminuir o custo total do empreendimento, sendo assim é de grande importância o seu estudo e aplicação nos trabalhos desenvolvidos na mineração.

1.3 OBJETIVOS

Adequação da geometria do plano de fogo para a otimização dos custos oriundo do desmonte de rocha com utilização de explosivos.

1.3.1 Objetivo Geral

Avaliar a geometria do plano de fogo com o intuito de otimizar os custos das operações de desmonte, identificando os pontos que podem ter mais influência para o aumento dos gastos

com essa etapa, comparando o plano de fogo utilizado na aplicação na frente de lavra de pedreiras com outro aplicado na mesma pedreira após estudos que favoreceram na melhoria da geometria do plano de fogo, utilizando ferramentas modernas de otimização de plano de fogo.

1.3.2 Objetivos Específicos

Verificar como a geometria do plano de fogo pode ser relevante para a otimização dos custos provenientes da operação de perfuração e desmonte de rocha. Utilizando, para isso, softwares de última geração e métodos empíricos de otimização para se chegar na geometria ideal para o desmonte, reduzindo os custos da operação de lavra e também de beneficiamento, com o objetivo que o material atinja uma porcentagem ideal da granulometria exigida pela britagem primária.

1.4 JUSTIFICATIVA

A fase de lavra de uma mina tem grande influência no processo de obtenção do minério e o desmonte de rocha com a utilização de explosivos é bastante comum, porém se não for bem aplicado pode acarretar em um aumento significativo dos custos totais de uma mineradora.

Com isso é importante avaliar os parâmetros que influenciam no aumento dos custos dessa operação e a elaboração de um plano de fogo não é o bastante para se obter bons resultados, pois se sua aplicação não ocorrer de maneira correta poderá acarretar no aumento dos custos dessa etapa.

Sendo assim, esse trabalho tem o propósito de analisar a influência da geometria do plano de fogo nos custos totais da operação de desmonte, tendo em vista que é uma parte do plano de fogo com menos variáveis, com custos relevantes, que se pode alterar.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 DESMONTE DE ROCHAS A CÉU ABERTO COM EXPLOSIVOS

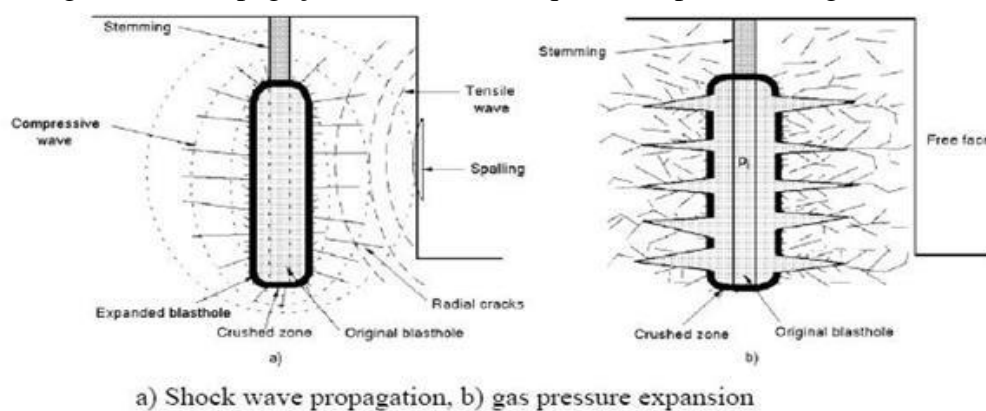
O desmonte com recursos de explosivos é utilizada para o rompimento da rocha a fim de se quebrar o minério ou estéril e ainda para se criar espaços vazios. Na mineração o objetivo é fazer com que a rocha se quebre a uma granulometria necessária para se extrair uma maior quantidade de bens minerais com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

Deve-se observar a interação das forças geradas na detonação do explosivo com a rocha, tendo em vista que para se obter uma melhor fragmentação é importante entender de que forma ocorre essa interação e as possíveis adaptações para se tirar melhor proveito das forças geradas pelo explosivo ao detonar.

Segundo Sanchidrián e Muñiz (2000) é importante observar alguns parâmetros para a realização dos cálculos de carga de explosivos para que se tenha um melhor aproveitamento desse recurso, deve-se entender o tipo de rocha que será desmontada, a altura da bancada, inclinação, diâmetro de perfuração disponível, tipo de explosivo que será utilizado e a geometria do plano de fogo que será empregada no desmonte.

Para causar a fragmentação da rocha é preciso criar novas fraturas na detonação, que poderão se juntar as fraturas pré-existentes e causas a fragmentação do maciço, isso é possível devido a duas fases existentes na detonação que é a fase Dinâmica, que corresponde a geração de ondas que se propagam na rocha e a fase semi-estática, que representa a expansão dos gases a pós a detonação (REIS, 2016). A figura 1 demonstra como ocorre a propagação de onda de choque e expansão dos gases ao detonar o explosivo que causa a formação de fraturas e aumento das pré-existentes, causando a ruptura e fragmentação da rocha (SHARMA, 2012).

Figura 1. a) Propagação da onda de choque, b) Expansão dos gases



Fonte: Sharma², 2012

² Disponível em: < <https://Miningandblasting.Wordpress.com> > Acesso em maio, 2017

2.1.1 Ruptura da Rocha

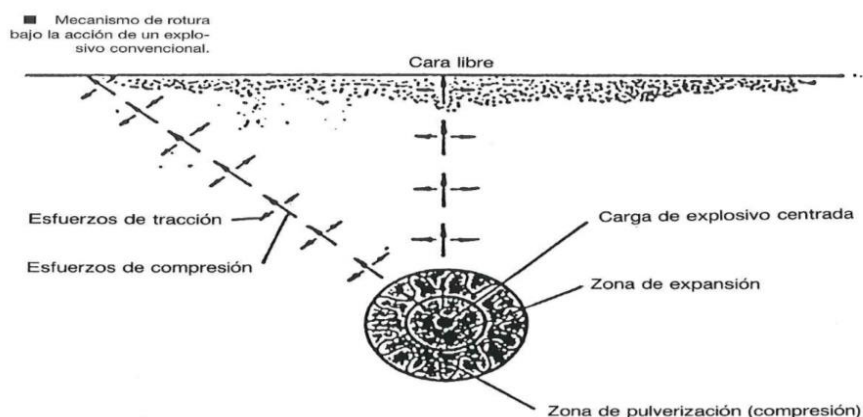
No geral, a rocha apresenta uma resistência a compressão maior que a resistência a tração e o desmorte com a utilização de explosivos gera uma força de tração maior que a do maciço, provocando, assim, o surgimento de fissuras, que é primordial para a fragmentação. Segundo Sanchidrián e Muñiz (2000) a diferença das resistências a compressão é de 5 a 10 vezes maior que a tração. No momento que a onda de choque atinge a face do furo a força gerada supera a resistência a compressão da rocha, provocando um aumento do furo e pulverização do material próximo ao mesmo.

Segundo Reis (2016) a velocidade da onda de choque vai depender das propriedades que a rocha tem de propaga-la e a fragmentação se iniciará quando ocorre a reflexão da onda ao atingir a face livre da bancada, gerando assim, forças de tração que contribuem para a ruptura do maciço.

A existência de fraturas tem influência direta na qualidade do desmorte, tendo em vista que a propagação da onda é limitada, devido ao fato da reflexão ocorrer na descontinuidade, com isso a formação de grandes fraturas não ocorre, pois, a ruptura acontece mais intensamente nas proximidades do furo causando muita fragmentação próxima do mesmo e não provocando o surgimento de fraturas maiores, que são de importância para o desmorte da área em questão (REIS, 2016).

Ao termino da fase Dinâmica inicia-se a fase Semi-Estática, onde há a expansão dos gases, que ocorre em alta pressão e temperatura, esses gases penetram nas fraturas expandindo-a e fragmentado, por fim o material é empurrado para a face livre da bancada (Unión Española de Explosivos, 1999).

Figura 2. Mecanismo de ruptura da rocha causada por explosivo



Fonte: Unión Española de Explosivos, 1999, p. 130.

A figura 2 representa como ocorre as duas fases supracitadas, também a ocorrência das forças de tração e compressão, zona de expansão do furo e é notável uma maior fragmentação do material nas proximidades do furo.

Compreendido as fases que ocorrem no desmorte com a utilização de explosivos fica a critério do responsável técnico o planejamento do plano de fogo para que o processo ocorra da melhor forma possível. Jimeno et al. (2003) define alguns aspectos controláveis para o dimensionamento do plano de fogo, tais como, a geometria, o melhor explosivo a ser utilizado, tempo de detonação entre furos e sentido de iniciação, temas que serão abordados na sequência.

2.2 TIPOS DE EXPLOSIVOS

Para se realizar um desmorte de qualidade é preciso ser feito uma seleção minuciosa do tipo de explosivo que será utilizado, pois é um dos critérios mais importantes devido ao fato das diferentes características dos explosivos e suas peculiaridades, levando em consideração o tipo de rocha, as condições do ambiente e as fraturas pré-existente no material.

A então Unión Española de Explosivos (1999)³, diz que os explosivos são divididos de acordo com suas características, tais como: resistência a presença de água, velocidade de detonação, densidade, calor gerado, potência relativa e suas aplicações principais.

2.2.1 Emulsão

A emulsões são constituídas pela a mistura básica de duas substâncias, geralmente a primeira é oxidante, sendo composta por uma solução de nitrato e óleos combustíveis, podendo ser adicionado aditivos para facilitar sua iniciação. Existem diversas formas de fabrica-las, podendo ser encontrada encartuchada e bombeadas, sendo carregadas através de caminhões próprios (Unión Española de Explosivos, 1999).

Jimeno et al. (2003) da ênfase as características das emulsões, tais como a equivalência das propriedades dos hidrogel e sua maior vantagem de ser resistente a água. A baixo a tabela 1 apresenta alguns produtos da categoria das emulsões e suas características.

Tabela 1. Emulsões

| Nombre Comercial | Potencia relativa % | Densidad gr/cm ³ | Velocidad detonación m/s | Calor de Explosión cal/g | Resistencia al agua | Aplicaciones principales |
|-------------------------|---------------------|-----------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------|--|
| Riomex E 20/24 | 111/134 | 1,15 | 5.000 | 713/863 | EXCELENTE | Carga de fondo de barrenos. Para trabajos subterráneos. |
| Riomex V 20/24 | 117/147 | 1,25 | 5.000 | 694/869 | EXCELENTE | Carga de barrenos de mediano y gran calibre a cielo abierto. |
| Riomex V 150/154 | 111/144 | 1,25 | 5.000 | 655/852 | EXCELENTE | Carga de barrenos de mediano y gran calibre a cielo abierto. |

Fonte: Unión española de explosivos, 1999, p. 41.

³ Unión Española de Explosivos” é hoje conhecida como “Maxam”, empresa multinacional de explosivos

2.2.2 Anfo

Segundo a Unión Española de Explosivos (1999) e Jimeno et al. (2003) o Anfo (*Ammonium Nitrate Fuel Oil*) é a mistura de nitrato de amónia e combustível líquido, tais como, gasolina ou diesel, infelizmente não tem uma boa resistência a água, entretanto apresenta a vantagem de ser pouco volátil, proporcionando menor risco ao ser manuseado, é geralmente utilizado nas cargas de colunas e em matérias que apresentam uma elevada temperatura no seu interior. A tabela 2 mostra alguns produtos derivados do anfo e suas principais características.

Tabela 2. Produtos do Anfo

| Nombre Comercial | Potencia relativa % | Densidad gr/cm ³ | Velocidad detonación m/s | Calor de Explosión cal/g | Resistencia al agua | Aplicaciones principales |
|------------------|---------------------|-----------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------|--|
| Nagolita | >70 | 0,80 | >2.000 | 925 | MUY MALA | Carga de columna en voladuras a cielo abierto |
| Alnafo | >80 | 0,80 | 3.000 | 1.175 | MUY MALA | Idem en voladuras de rocas muy duras. |
| Naurita | >70 | 0,80 | 2.000 | 1.108 | MUY MALA | Voladuras de barrenos con temperaturas elevadas. |

Fonte: Unión Española de Explosivos, 1999, p. 38.

2.2.3 Hidrogel

O hidrogel tem a peculiaridade de não ter em sua composição produtos que isolados são explosivos, sendo eles, nitrato de amónia, água e sensibilizadores, os produtos sensibilizadores são, geralmente, sais orgânicos e alumínio. Apesar de não ser formado por substâncias previamente explosivas, possui uma grande potência, resistência a água e segurança no seu manuseio e transporte. Por ter grande potência é mais utilizado em cargas de fundo (Union Española de Explosivos, 1999). A tabela 3, a baixo, mostra as características de alguns produtos hidrogel.

Tabela 3. Produtos do Hidrogel

| Nombre Comercial | Potencia relativa % | Densidad gr/cm ³ | Velocidad detonación m/s | Calor de Explosión cal/g | Resistencia al agua | Aplicaciones principales |
|------------------------------|---------------------|-----------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------|--|
| Riogel 2 | >72 | 1,15 | 4.500 | 860 | EXCELENTE | Carga de fondo de barrenos en voladuras a cielo abierto. |
| Riogur R Riogur F | >72 | 1,10 | 3.000 7.000 | 860 | EXCELENTE | Voladuras de contorno. |

Fonte: Unión Española de Explosivos, 1999, p. 40.

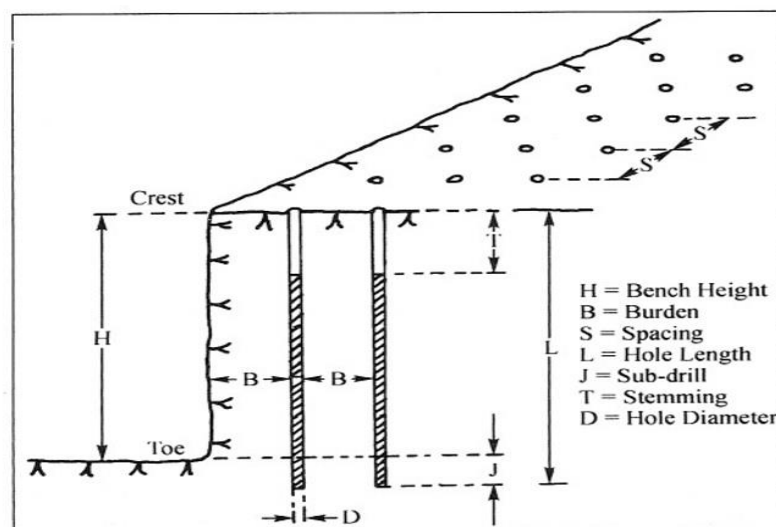
2.3 GEOMETRIA DO PLANO DE FOGO

Um bom planejamento do plano de fogo é primordial para que o desmonte seja bem aproveitado, tendo em vista sua influência nos custos que surgiram quando o mesmo é mau dimensionado. De acordo com Silva (2011) a malha do plano de fogo pode ser dividida em 5 geometrias básicas, podendo ser uma malha quadrada, retangular, estagiada, triângulo equilátero ou alongada.

- **Malha quadrada (A=E) e retangular (E>A):** são de fáceis perfuração devido ao fato das perfuratrizes terem menos dificuldade de locomoção entre os furos.
- **Malha estagiada:** por ter uma variação da posição dos furos dificulta a perfuração, isso ocorre devido à dificuldade de movimentação que o equipamento de perfuração faz entre o furo terminado e a perfuração do furo seguinte, mas tem uma melhor distribuição das cargas no maciço.
- **Malha triângulo equilátero:** são malhas que considera o espaçamento 15% maior que o afastamento, sendo mais utilizada em rochas compactas e duras por possuir uma maior distribuição de energia entre a área de influência do furo, o que ajuda na fragmentação da rocha.
- **Malha alongada:** esse tipo de malha possui uma elevada relação entre espaçamento e afastamento, sendo o espaçamento 75% maior que o afastamento. Indicadas para rochas macias e podem gerar ultra lançamentos, devido ao fato de terem um afastamento menor.

Para Hustrulid (1999) existem parâmetros que não são possíveis de serem controlados na execução de um desmonte, citando exemplos como geologia, características de tensão dos materiais, presença de descontinuidades, meteorologia do local e presença de água, sendo a última um fator de possível controle, dependendo da situação.

Figura 3. Geometria do plano de fogo



Fonte: Hustrulid, 1999, p. 74.

A figura 3 exemplifica cada aspecto que faz parte da geometria do plano de fogo, onde S é o espaçamento, B o afastamento em relação a face livre, J é a subfuração, T é o tampão utilizado entre o explosivo e a superfície do furo, H a altura da bancada, L sendo a profundidade do furo e D como diâmetro de furação.

2.3.1 Espaçamento (E)

Segundo Hollanda ([200-]) o espaçamento é considerado o espaço existente entre os furos de mesma linha, onde o mesmo tem relação com o afastamento. Bhandari (1997) diz que fatores como profundidade do furo, carga utilizada, afastamento entre as linhas dos furos e a frente, e o intervalo de tempo de iniciação são fatores que podem ser levados em consideração para a escolha do espaçamento.

Uma boa distribuição da energia liberada na detonação de cada furo depende de um dimensionamento correto do espaçamento, Hustrulid (1999) aconselha que o espaçamento (E) deve estar entre uma a duas vezes o afastamento (A), determinando a seguinte razão:

$$1 \leq \frac{E}{A} \leq 2$$

(Equação 1)

Silva (2011) afirma que o afastamento não deve ser maior que o espaçamento, pois isso pode gerar blocos com dimensões maiores que a capacidade do equipamento de britagem primária e/ou equipamento de carregamento, também conhecidos como “matacos”, o que prejudica a operação e aumenta os custos de desmonte, devido ao fato de ser preciso utilizar equipamento, como rompedores, e fogo secundário.

2.3.2 Afastamento (A)

O afastamento é definido como a distância mínima entre a primeira linha de furação e a face livre da bancada, tendo que levar em consideração o diâmetro da furação, propriedade da rocha, do explosivo que será utilizado, fragmentação desejada e altura da bancada (JIMENO et al., 2003).

Para Silva (2011) o afastamento é considerado o parâmetro do plano de fogo mais crítico, devido ao fato do seu mau dimensionamento causar um desmonte pouco efetivo, levando em consideração que se o afastamento for pequeno ele pode causar ultra lançamento do material na face livre e gerar muitos finos, se a caso for grande essa distância, ocorre sobreescavação forte na parede do furo e se for um afastamento excessivo a uma geração maior

de gases, onde pode ocorrer ultra lançamento de material a distâncias maiores, vibração excessiva na rocha, fragmentação maior do material e pode ocorrer problemas de ré pé, que são grandes irregularidades na área após detonação.

Existem muitas metodologias de cálculos para se determinar o afastamento, algo que veio surgindo devido ao fato de vários pesquisadores observarem as variáveis que deveriam ser levadas em consideração para se determinar o melhor afastamento, toda via é notável que todos concordam que o diâmetro é fundamental para tal cálculo, porém com o aumento das várias é preciso ter um maior conhecimento sobre o material em que está trabalhando, algo que na realidade não acontece, sendo assim o melhor a se fazer é utilizar a melhor formula que se encaixe na realidade vivenciada no empreendimento (JIMENO et al., 2003). Abaixo será demonstrado a equação que melhor se adequa quando se tem um limitado grau de conhecimento sobre os fatores do material a ser desmontado.

$$A = \sqrt{D \times L}$$

(Equação 2)

Onde:

A: Afastamento

D: Diâmetro do furo

L: Comprimento do furo

2.3.3 Tamponamento (T)

O tamponamento é o processo de enchimento do espaço livre entre a carga explosiva e a superfície do furo, sendo utilizado para evitar que os gases gerados na detonação não escapem, gerando uma maior pressão nas paredes dos furos. Geralmente são utilizados materiais com formato e granulometria que favoreça o seu encaixe, gerando mais resistência no tampão.

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

2.3.4 Subperfuração (S)

Subperfuração é a distância perfurada abaixo da praça que se pretende obter, é utilizado para evitar a geração de repé, que são irregularidades no espaço após o desmonte, essa ocorrência é prejudicial para os trabalhos futuros de desmonte e pode causar danos nas máquinas que circulam no local e dependendo de suas dimensões pode ser de perigo para os trabalhadores.

Autores como Sanchidrián e Muñiz (2000), Jimeno et al. (2003) e Silva (2003) concordam com a utilização de 30% a 50% do valor do afastamento para determinar a altura da subperfuração.

2.3.5 Sistemas de Iniciação

A Union Española de Explosivos (1999) diz que o sistema de iniciação nada mais é que a incitação da carga explosiva, para que a mesma detone, para isso o explosivo deve ser sensível ao detonador, que é introduzido junto ao explosivo no furo, gerando um processo em cadeia de ativação da carga detonante, quando a carga explosiva necessita de uma maior energia de iniciação que a fornecida pelo detonador é preciso utilizar multiplicadores, onde os mesmo se iniciaram com o detonador e transmitirá uma energia maior para as cargas menos sensíveis. O sistema de iniciação é de grande importância para um efetivo desmonte e para que se obtenha uma otimização satisfatória e relevante o conhecimento sobre a aplicabilidade de cada uma, pois o mesmo têm um efeito significativo na liberação de energia do explosivo, podendo gerar uma perda significativa dessa energia no modo que for aplicada, tendo efeitos mais graves em explosivos de sensibilidade maior (MOHANTY; JOYCE, 1994).

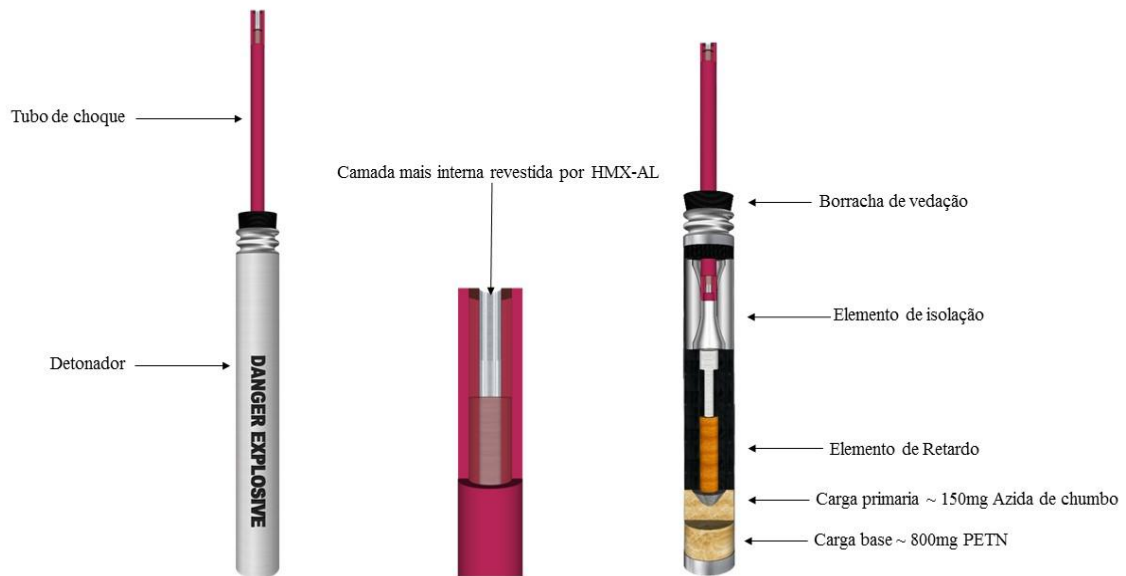
2.3.5.1 Detonadores Não Elétricos

Detonadores não elétricos são mais fáceis de serem utilizados, por serem mais simples e serem iniciados com uma simples transmissão de calor. Pode ser utilizado em qualquer tipo de explosivo e tem uma variada combinação de tempo, o sistema em si é constituído por um tubo plástico, onde no seu interior é transmitido uma onda de choque de baixa velocidade (UNION ESPAÑOLA DE EXPLOSIVOS, 1999). Por não utilizar corrente elétrica para sua iniciação apresenta uma maior segurança, devido ao fato de não sofrer interferências de campos elétricos, por isso é mais usual em tempos nublados, onde existe o risco de raios e próximo a linhas de transmissões elétricas.

As espoletas simples são detonadores não elétricos formada por uma capsula de alumínio que contem Azida de Chumbo como carga primária, sendo mais sensível a chamas, e

Nitropenta como carga secundária que é responsável pela iniciação da massa explosiva (HOLLANDA, 2016).

Figura 4. Detonador não elétrico do tipo RIONEL



Fonte: Ilustração feita por Eng. Minas Eraldo Florencio, 2017.

2.3.5.2 Detonadores Elétricos

Esses tipos de detonadores utilizam corrente elétrica para serem acionados. Também conhecido como espoleta elétrica, os detonadores elétricos são constituídos basicamente por uma resistência elétrica que é envolvido por pólvora negra, sendo o usual dois tipos, a instantânea e de retardo, a utilização dos detonadores com retardos permite um maior controle da vibração, bem como o direcionamento de deposição do material e equilíbrio da fragmentação (HOLLANDA, 2016).

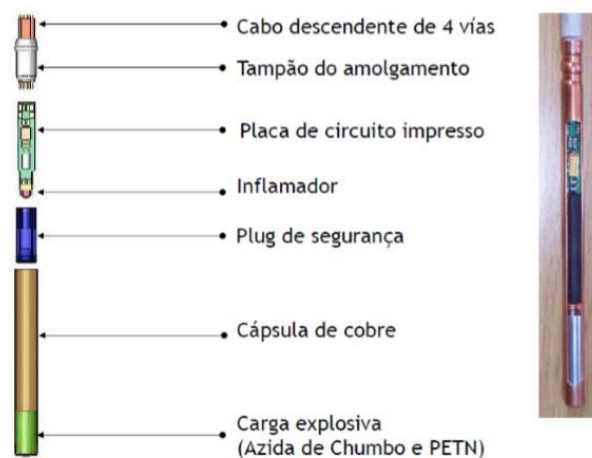
Como se trata de um dispositivo que utiliza corrente elétrica para seu acionamento, fica sujeito ao perigo de uma iniciação por forças externas, tais como campos elétricos e tempestades, sendo assim, se limita a distância onde possa ocorrer influência de tais fatores externos (SANCHIDRIÁN; MUÑIZ, 2000).

2.3.5.3 Detonadores Eletrônicos

Para Hollanda (2016) um diferencial dos detonadores eletrônicos é o fato de serem controlados por computadores, devido ao fato de possuírem um *chip* programável no seu sistema, aceitando que o operador determine qualquer tempo de retardo para o sistema, fazendo com que se tenha uma melhor aplicabilidade dos tempos de retardos calculados.

Também é de se notar o fato de atender somente a um sinal de comando, onde aumenta sua segurança contra acionamento acidental devido a influências externas, além desses detonadores de última geração possuírem sistema que impedem a detonação da linha seguinte caso um ou mais furos da linha anterior não tenha detonado ou detonado de maneira incorreta, permitindo o conhecimento dos furos não detonados através do computador, permitindo um melhor controle da efetuação do desmorte (REIS, 2016). A figura 5 exemplifica as partes que constituem um iniciador eletrônico de detonação.

Figura 5. Parte de uma espoleta eletrônica (HOLLANDA,



Fonte: Hollanda, 2016, p. 30.

2.4 FRAGMENTAÇÃO

Uma operação de beneficiamento pode ser responsável por volta da metade do custo total das operações de uma mineradora, sendo dependente das operações antecessoras, com isso uma produtividade da planta de beneficiamento irá necessitar da eficiência do transporte e os resultados provenientes do desmorte, tendo em vista que uma má fragmentação da rocha, após o desmorte com explosivos, implica na utilização de desmorte secundário para atender a granulometria exigida pelo britador primário (LISBOA, 2011). Uma má fragmentação poderá acarretar o aumento significativo dos custos totais das operações de uma mina, sendo assim é primordial que o desmorte feito no minério atenda, de maneira satisfatória, a granulometria requerida pelo processo de britagem primário.

É possível chegar a uma granulometria desejável através de cálculos empíricos, que ajustam o plano de fogo de acordo com o tamanho desejado do material. Reis (2016) e Alvarado (2013) entram em consenso na utilização de um modelo, conhecido mundialmente por Kuz-

Ram. Foram estudos efetuados por Kuznetsov, que desenvolveu um relacionamento entre os parâmetros do plano de fogo, tais com: a geometria, razão de carga, energia do explosivo, etc. com a granulometria gerada, resultando em uma estimativa da granulometria gerada após a execução do desmonte, Rosin-Rammler, que associa a distribuição granulométrica de probabilidade contínua pelo método de Weibull e a equação da uniformidade.

2.4.1 Equação de Kuznetsov

Equação utilizada para se prever a média do tamanho das partículas após o desmonte, onde leva em consideração fatores da rocha e características dos explosivos utilizados, chegando a uma estimativa da granulometria.

$$X_{50} = RF \times (K)^{-0,80} \times Q^{0,167} \times \left(\frac{115}{Er}\right)^{\frac{19}{20}} \quad (\text{Equação 3})$$

Onde:

X₅₀ é a média de tamanho da partícula (cm),

RF é o *Rock Factor*,

K é a quantidade de explosivos em quilogramas utilizado para desmontar um metro cúbico de rocha,

Q é a massa de explosivos utilizada em cada furo e

Er é a energia relativa em massa (RWS) do explosivo, sendo comparada ao ANFO (ANFO=100).

O *Rock Factor* (RF) e a energia relativa do explosivo (Er) serão explicadas nos próximos capítulos.

2.4.1.1 Equação de Tidman (Er)

A equação a seguir foi desenvolvida por Tidman para se determinar a energia do explosivo: VOD_e VOD_n

$$Er = \left(\frac{VOD_e}{VOD_n}\right)^2 \times RWS \quad (\text{Equação 4})$$

Onde:

Er é a energia relativa por massa efetiva do explosivo,

VOD_e é a velocidade de detonação efetiva do explosivo (aferida em campo),

VOD_n é a velocidade de detonação nominal do explosivo (m/s) e

RWS a energia relativa por massa comparada ao ANFO.

2.4.1.2 Rock Factor

O fator de rocha (*Rock Factor*) foi, primeiramente, desenvolvido por Lilly em 1986 e em 1987 modificada por Cunningham. Teixeira (2010), Morais e Gripp (2004) dizem que esse fator é levantado através de condições geomecânicas, que consideram a direção e mergulho das descontinuidades em relação a frente livre a ser desmontada e o tipo de rocha. Esse fator é utilizado para o ajuste da média do tamanho dos fragmentos e é dada pela seguinte fórmula:

$$A = 0,06 \times (RMD + JF + RDI + HF)$$

(Equação 5)

A tabela 4 apresenta a classificação dos parâmetros geomecânicos para a obtenção do fator de rocha, onde se deve selecionar os aspectos do maciço para se obter os índices para o cálculo do referido fator.

Tabela 4. Classificação geomecânica para obtenção do fator de rocha.

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

Fonte: Morais e Gripp, 2004, p. 243.

2.4.2 Equação de Rosin-Rammler

É uma equação bastante utilizada na mineração, tanto no processamento de minério quanto na definição de peneiras. Utilizando o método de Weibull foi possível se chegar a uma fórmula que estipula a porcentagem de material que passara em uma certa peneira.

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

(Equação 6)

Onde:

P é o resultado e porcentagem de material passante na peneira de tamanho **X**,

X é o tamanho da malha da peneira,

X₅₀ é a média do tamanho da partícula e

n é o índice de uniformidade que define a curva granulométrica.

2.4.3 Equação da uniformidade

A equação da uniformidade foi elaborada através dos trabalhos de campo realizados por Cunningham (1987) que correlacionou todos os parâmetros da geometria de um plano de fogo (MORAIS; GRIPP, 2004). Jimeno et al. (2003) afirma que esse valor varia entre 0,8 e 2,2, onde valores elevados implicam em uma fragmentação mais uniforme e valores baixos indicando quantidade significativas de material grosseiro e finos. Chegando a seguinte equação:

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

(Equação 7)

Onde:

A é o afastamento em metros,

E é o espaçamento em metros,

D é o diâmetro do furo e milímetros,

W é o desvio do furo em metros,

L é o comprimento total da carga em metros,

H é a altura do banco,

(BCL – CCL) é a diferença entre a carga de fundo e a carga de coluna (m) e

abs é o valor absoluto referente a $(BCL - CCL)/L$

2.5 AVALIAÇÃO ECONOMICA DO DESMONTE

Em senso comum na literatura (Jimeno, 1997, Hustrulid, 1999, Bhandari, 1997 entre outros) o desmonte com a utilização de explosivos é a obtenção de uma fragmentação da rocha com o menor custo, tendo em vista que esse custo tenha impacto positivo nas despesas finais na operação de lavra. Jimeno et al. (2003) diz que os principais custos na execução do plano de fogo são provenientes dos explosivos (carga de fundo e coluna), reforçadores, cordão detonante, sistema de iniciação utilizado, mão de obra e outros acessórios, tais como: retardos, conectores, etc.

Os demais custos podem ser provenientes de fogo e/ou quebra secundária (s), esses são utilizados quando não se atinge a granulometria exigida pela britagem primária. Para que se possa considerar um desmonte aceitável Jimeno et al. (2003) consideram que a porcentagem de rocha que passará por rompedor hidráulico não seja superior a 5% do volume total do material desmontado⁴.

As vezes pode-se pensar que o custo adicional da fragmentação secundária não seja tão relevante, um pensamento que contradiz a opinião de *Godberry* (1984) e conseqüentemente, a do autor desse trabalho. *Godberry* faz um comparativo da utilização da quebra secundária de rochas, considerando a utilização de *drop ball*⁵ para o processo citado, ele destaca que a utilização do *drop ball* pode gerar um custo em torno de 2 a 5 centavos de dólares⁶ por tonelada da produção total, que comparado com o custo de 35 a 70 centavos de dólares por tonelada gastos com perfuração e desmonte pareça quase insignificante, O que demonstra ser um engano quando se leva em conta a tonelagem produzida.

Em seu exemplo, *Goldberry* (1984) considerou uma produção anual de 1 milhão de toneladas, considerando que aproximadamente 3% do material ultrapassa a granulometria exigida pelo britador primário, serão 30 mil toneladas de material que precisaram ser quebrados por *drop ball*, considerando o custo de 5 centavos de dólares por tonelada de produção tem-se um custo de US\$ 50 mil por ano, sendo assim são gastos US\$ 1,67 por tonelada apenas para a fragmentação secundária, isso sem levar em consideração os gastos extras com o carregamento e transporte desse material para o local de quebra secundária.

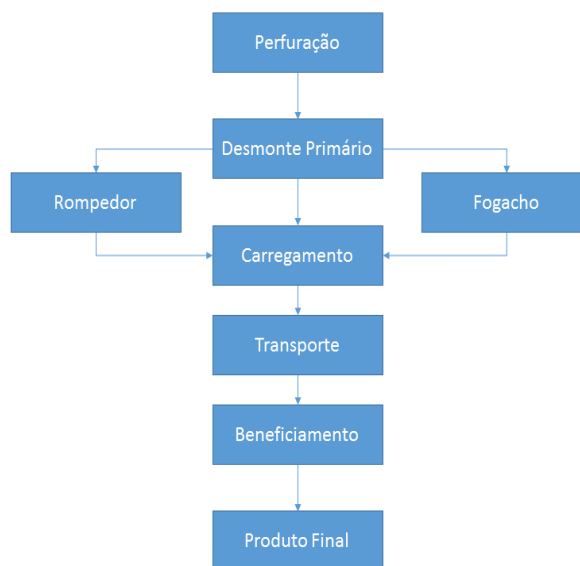
⁴ *Manual de perforacion y voladura de rocas*, 1995, p. 465

⁵ “*Dropball*” é uma esfera de aço de grande peso, lançada a uma certa altura sobre um determinado bloco de rocha.

⁶ Todos os valores foram atualizados levando em consideração uma inflação entre 1984-2017 de 134,02% (Fonte: <<http://fxtop.com/pt>> Acesso em: 28/05/2017).

A figura 6 exemplifica as etapas decorrente de um ciclo de mineração, onde a utilização de rompedor e fogacho⁷ tem impacto negativo nos custos do desmonte, devido ao fato de serem utilizados quando não se tem uma boa fragmentação após o desmonte primário. Com isso é preciso rever o plano de fogo aplicado e os motivos que estão fazendo com que os materiais de granulometria indesejável sejam gerados.

Figura 6. Fluxograma de ciclo de produção mineira



Fonte: Elaborado pelo autor.

2.6 OTIMIZAÇÃO MATEMÁTICA

A otimização matemática consiste no método para buscar a melhor solução para determinados problemas, podendo gerar várias alternativas para isso. Também conhecida com Pesquisa Operacional (PO). Hillier e Lieberman (2006) e Marins (2011) entram em senso comum nos passos que devem ser tomados para a caracterização do problema, que são: a definição do problema a ser resolvido, a formulação de um modelo empírico, levantamento das restrições para a solução do problema e avaliação da melhor solução que deve ser empregada, logo depois são realizados testes do modelo e solução, para posterior implementação, sempre levando em consideração as necessidades do processo.

Marins (2011) explica que os modelos matemáticos reais são uma representação provenientes de fórmulas matemáticas que descrevem o problema, sendo que se existem n tipos

⁷ “Fogacho” é o nome dado ao método de fragmentação de blocos maiores que a boca do britador utilizando explosivos (Jimeno 1999).

de decisões quantificáveis que vão ser formadas por n variáveis de controle ou de decisão. Hillier e Lieberman (2006) afirmam que desta forma as variáveis de decisão (x_1, x_2, \dots, x_n) expressam matematicamente as relações dos problemas, que em consequência geram uma função matemática ($P = 3x_1 + x_2 + \dots + 4x_n$), chamada de função objeto, que deve ser limitada por uma expressão matemática de restrição (por exemplo: $x_1 + 2x_2 + x_1x_2 \leq 5$). Os coeficientes da função objeto são conhecidos como os parâmetros do modelo.

É de conhecimento básico alguns métodos matemáticos que se associam às diversas áreas compostas pela Pesquisa Operacional. Marins (2011) cita os métodos de Programação Linear, Teoria dos Grafos, Teoria das Filas e Programação em Redes.

Para o presente trabalho será utilizado o método de Programação Linear que conforme Hillier e Lieberman (2006) é um dos métodos mais utilizados na indústria, tanto em grandes empresas como em pequenas, além de sua aplicação em vários setores da sociedade, sendo considerado um dos avanços científicos mais importante do século XX.

2.6.1 Programação Linear

Como todo contexto de otimização matemática a Programação Linear visa encontrar a melhor solução para um problema que possam ser representados por expressões lineares, sendo de uma vasta aplicabilidade e compreensibilidade, sendo sua principal tarefa a minimização ou maximização da função objeto, levando em consideração as restrições (MARINS, 2011).

Para um melhor entendimento do funcionamento da Programação Linear será abordado em seguida um exemplo adaptado de Hillier e Lieberman (2006) que abordar dois meios para se alcançar o resultado ótimo para a solução do problema que consiste na maximização do lucro (Z) da produção de dois lotes (x_1 e x_2) que são fabricados semanalmente.

Tabela 5. Dados do problema

| Fábrica | Tempo de produção de cada lote | | Tempo de produção disponível por semana |
|----------------|--------------------------------|-------|---|
| | Produto | | |
| | 1 | 2 | |
| F1 | 1 | 0 | 4 |
| F2 | 0 | 2 | 12 |
| F3 | 3 | 2 | 18 |
| Lucro por lote | R\$ 3 | R\$ 5 | |

Fonte: Adaptado, Hillier e Lieberman, 2006, p. 23.

Temos então que x_1 e x_2 são as variáveis para a decisão do modelo, contendo a quantidade de produtos que se pode produzir por lote. Sendo que o objetivo da função objeto, nesse caso, é a maximização do lucro (Z), gerando a seguinte função $Z = 3x_1 + 5x_2$, que é sujeita as restrições impostas pela limitação de produção imposta nas três fábricas. Temos que na fábrica F1 só se fabrica lote do produto 1 com uma disponibilidade de 4 horas semanais, essa restrição pode ser expressa da seguinte forma $x_1 \leq 4$. Com a mesma lógica tem-se na fábrica F2 a seguinte restrição $2x_2 \leq 12$. A fábrica F3 produz lote dos 2 produtos (x_1 e x_2), que consiste na produção conjunta, sendo a expressão da taxa de produção expressa por $3x_1 + 2x_2$. Porém, tem-se um tempo de disponibilidade para a fábrica F3, gerando a seguinte restrição $3x_1 + 2x_2 \leq 18$. Como as taxas de produção não podem ser negativas é preciso restringir as variáveis de decisões a montantes negativos: $x_1 \geq 0$ e $x_2 \geq 0$.

Em resumo temos as seguintes expressões matemática do problema:

Maximizar: $Z = 3x_1 + 5x_2$,

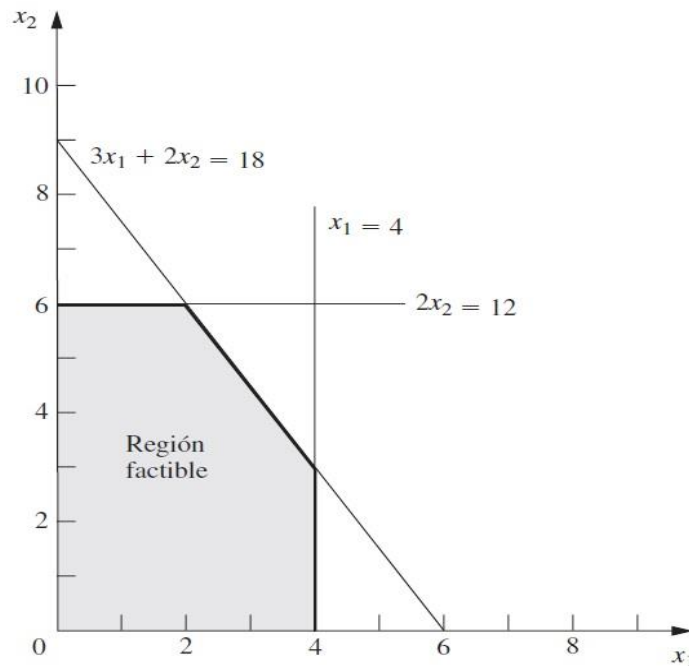
Limitado pelas seguintes restrições:

- $x_1 \leq 4$
- $2x_2 \leq 12$
- $3x_1 + 2x_2 \leq 18$
- $x_1 \geq 0$ e $x_2 \geq 0$

2.6.1.1 Solução gráfica

Como o problema possui apenas duas variáveis de decisão, isto é, duas dimensões, é possível utilizar um procedimento gráfico para a sua resolução. O procedimento consiste basicamente na construção de um gráfico de duas dimensões, sendo x_1 e x_2 suas dimensões. De início é preciso identificar os valores para x_1 e x_2 possibilitado pelas restrições, gerando assim o gráfico a seguir (figura 7), onde a parte sombreada indica a área permitida pelas restrições.

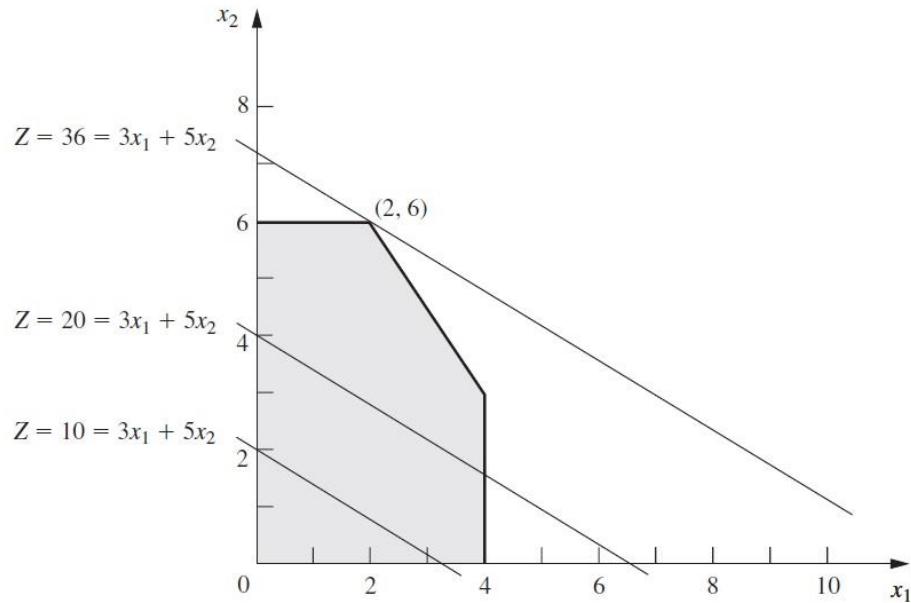
Figura 7. Gráfico com as restrições



Fonte: Hiller e Lieberman, 2006, p. 25

Definido os valores permitidos para a solução do problema é preciso encontrar o ponto que maximiza o valor de $Z = x_1 + x_2$. Hiller e Liberman (2016) utiliza valores de prova e erro para descobrir a lógica de funcionamento da área de solução do problema, ou seja, como se comportará os pontos de solução dentro do gráfico, eles fizeram a tentativa para $Z = 10$ e $Z = 20$, onde os valores determinados para x_1 e x_2 , para as duas tentativas, se comportaram de maneira crescente, sendo que a reta para $Z=20$ se encontra mais distante da origem do gráfico em comparação com a reta gerada por $Z=10$. Sendo assim, a aplicação utilizada com o procedimento de prova e erro gerou retas paralelas que contem ao menos um ponto dentro da região permitida pelas restrições. Consequentemente é possível seguir essa lógica de retas paralelas, seguindo de maneira crescente até atingir o ponto máximo da área permitida pelas restrições, alcançando o valor ótimo para a solução, que no caso do exemplo seria $Z=36$, com valores de $x_1 = 2$ e $x_2 = 6$, como mostra o gráfico da figura 8 (Hiller e Liberman, 2016).

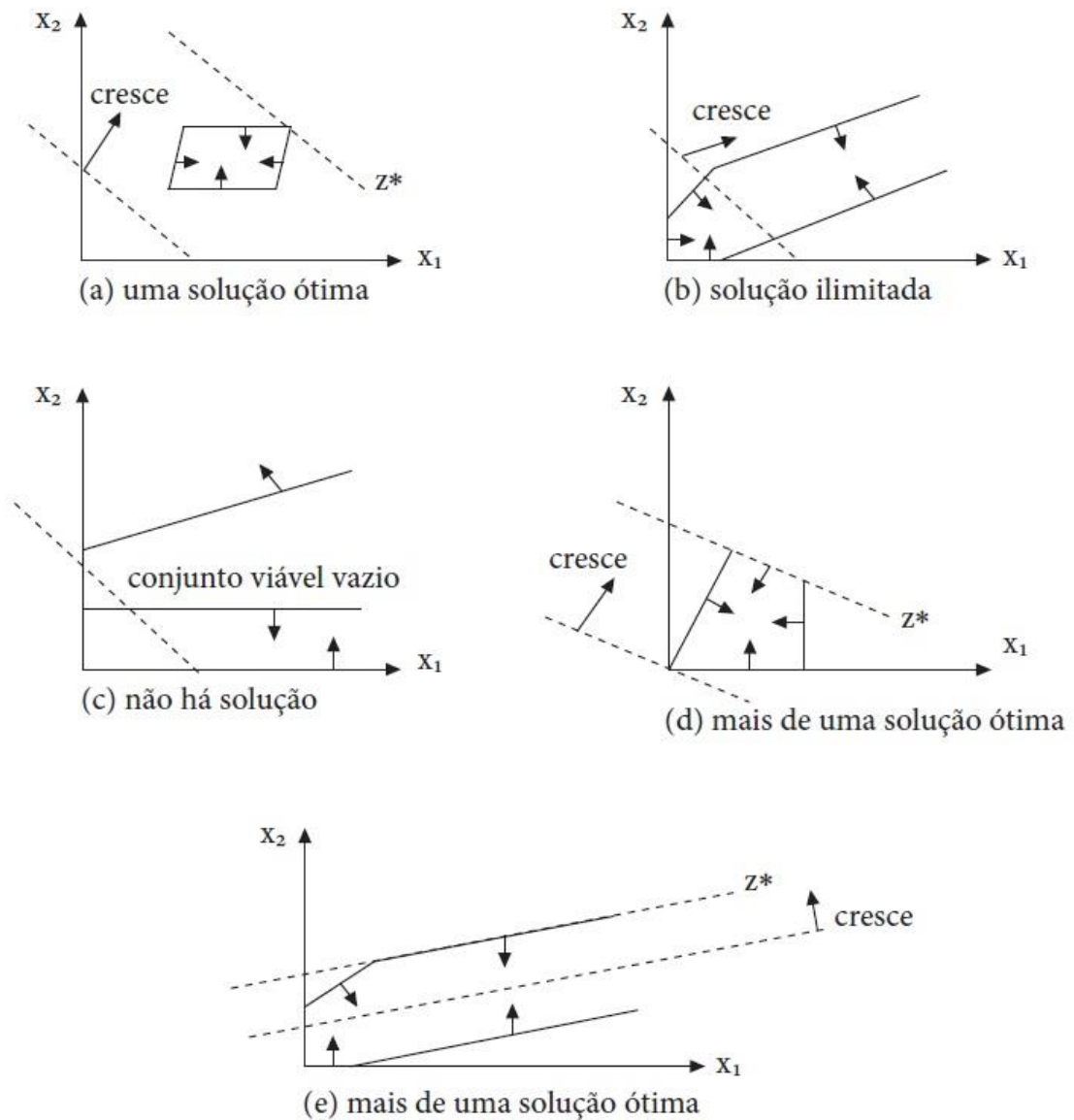
Figura 8. Valores (x_1, x_2) ótimos para a solução da função $3x_1+5x_2$ (2,6)



Fonte: Hiller e Liberman, 2016, p. 26.

Para a resolução de problemas utilizando o princípio básico de programação linear e método dos gráficos é importante saber que existem certas situações no emprego dessa técnica. A figura 9 apresenta alguns casos possíveis que foram exemplificados por Marins (2011), onde se tem uma reta arbitrária gerada por uma função objeto qualquer, área permitida pelas restrições (quando existir), o sentido tomado para melhoria da função objeto e o valor e as soluções para Z^* .

Figura 9. Casos possíveis de acontecer



Fonte: Marins, 2011, p. 46.

2.7 SOFTWARE E TECNOLOGIAS APLICADAS NA MINERAÇÃO

2.7.1 Excel Solver

Os métodos empregados na Pesquisa Operacional vêm evoluindo constantemente e conseqüentemente diversos softwares foram desenvolvidos para se ter uma melhor eficiência na resolução de problemas e poder trabalhar com uma maior quantidade de dados. O *Solver* é uma ferramenta que utiliza do método de teste de hipóteses para se chegar a um valor ideal da função objeto, tanto para soluções onde se visam a maximização do resultado quanto a minimização. Ele utiliza a fórmula em célula, célula objeto, submetida a restrições formuladas

em uma planilha, trabalhando com um grupo de células, conhecida como células variáveis, que fazem parte do cálculo das fórmulas nas células objeto e de restrições, com isso ele faz o ajuste das variáveis de decisão contidas nas células até satisfazer os limites impostos pelas células de restrições e gerar o usuário deseja para a função objeto (MICROSOFT, 2010).

2.7.2 WipFrag (Software para análise granulométrica)

Ferramenta desenvolvida em 1986 na Universidade de Waterloo, Canadá, a *WipFrag* foi uma das primeiras ferramentas para se analisar o tamanho de partículas através de imagens. Essa ferramenta colabora para a otimização do desmonte, tendo em vista a análise mais rápida da fragmentação e o comparativo rápido com dados anteriores, tendo um maior controle das variações. Uma das melhorias do software foi a disponibilidade de execução da ferramenta em sistemas iOS, analisando de forma rápida as imagens tiradas através de *iPad* ou *iPhone* ou baixada de outro dispositivo fotográfico (WIPWARE, 2016).

2.7.3 Split-Desktop

É um software padrão para determinação de fragmentação de rocha grosseira através de imagens digitais adquiridas no campo, sendo analisadas em qualquer computador com sistema operacional compatível. Ele determina a distribuição granulométrica das partículas da rocha fragmentada em qualquer fase do processo de fragmentação, sendo a imagem facilmente editada manualmente para uma boa precisão da fragmentação (SPLITERNG, 2017).

2.7.4 O-Pitblast

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

3 METODOLOGÍA APLICADA

O presente trabalho visa o estudo dos fatores geométricos que podem ser manipulados para o melhoramento do desmonte de rocha com a utilização de explosivos. Serão coletados os dados de custos com rompedores hidráulicos e desmonte primário, bem como a avaliação da geometria empregada, se caracterizando como um estudo quantitativo de caráter exploratório.

A primeira etapa do projeto baseia-se em um levantamento bibliográfico, onde foi buscado na literatura menções ao tema abordado no trabalho. Esta parte compreende no levantamento das principais teorias e práticas realizadas em relação ao tema, com o objetivo de se obter o melhor caminho para o estudo prático do projeto. Foram utilizados artigos científicos, dissertações, livros, apostila, materiais disponíveis na internet, etc.

A segunda etapa consistirá no levantamento dos dados em campo, onde será pesquisado, junto a mineradora Goiáscal, os custos com desmonte primário e fragmentação secundária, dados do plano de fogo utilizado e granulometria exigida pela britagem primária.

Após a etapa de levantamento de dados fornecidos pela empresa, será realizado o tratamento desses dados, com a utilização de ferramentas e software de última geração, além de utilizar métodos matemáticos que geram dados para a otimização do processo, consequentemente reduzindo os custos com o processo de desmonte com a utilização de explosivos.

3.1 COLETA DOS DADOS

A coleta dos dados foi realizada em campo, com prévia autorização da gerência da mineradora GoiásCal, observando como está sendo aplicado o desmonte de rocha e levantado os principais custos que estão sendo gerados nessa etapa.

Foi realizado um registro da fragmentação, através de fotografias, gerada no desmonte tradicional aplicado pela empresa e consequentemente os custos que estão sendo gerados por hora de utilização de rompedores hidráulicos para se realizar a fragmentação secundária, onde também será determinado as horas trabalhadas do equipamento.

Os tipos de explosivos e acessórios utilizados no desmonte foram registrados e a quantidade utilizada também, com o intuito de se determinar os custos que estão sendo gerado em seu consumo.

E por fim, foi feita uma avaliação da aplicação da geometria do plano de fogo, fazendo a medição de espaçamento, afastamento e profundidade real do furo, com a finalidade de determinar, se houver, os erros que podem estar colaborando para a má fragmentação do material.

3.1.1 Levantamento dos Gastos com Rompedor Hidráulico

Em um período de 9 (nove) dias foi realizado o acompanhamento da utilização do rompedor, sendo que foram registrados os dados de tempo de locomoção, tempo rompendo e gastos básicos de manutenção e abastecimento.

A tabela 6 demonstra os dados coletados através de registros feitos pelo operador do equipamento no período analisado e os dados de abastecimentos, que foram coletados junto ao almoxarifado da empresa, que faz todo o controle dos abastecimentos dos equipamentos de lavra.

Tabela 6. Controle do Rompedor

| CONTROLE DO ROMPEDOR | | | | | | |
|----------------------------------|---------|----------------|-----|---------|---------------|----------|
| Locomoção entre frentes de Lavra | | Tempo rompendo | | | Abastecimento | |
| Saída | Chegada | Começo | Fim | Horário | Dia/mês | Qnt (Lt) |
| : | : | : | : | : | ___/___ | |
| : | : | : | : | : | ___/___ | |
| : | : | : | : | : | ___/___ | |
| : | : | : | : | : | ___/___ | |
| : | : | : | : | : | ___/___ | |
| : | : | : | : | : | ___/___ | |
| : | : | : | : | : | ___/___ | |
| : | : | : | : | : | ___/___ | |

Fonte: *Print Screen* da aplicação *Microsoft Excel* (2017).

3.1.2 Coleta de Dados dos Desmontes Aplicados

Foram coletados, em campo, os dados geométricos dos planos de fogo, utilizando uma trena para a verificação de espaçamento, afastamento, tampão e altura real do furo. As figuras 10 e 11, ilustram o método utilizado para coletar os dados.

Figura 10. Medição das distancias



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 11. Medição da profundidade dos furos



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.1.3 Dados de Referência dos Planos de Fogo

As informações repassadas pela empresa sobre os dados da geometria do plano de fogo de cada desmontem acompanhado, foram coletadas junto ao responsável pelos desmontes, onde o mesmo repassou os dados que são informados ao exército. A tabela 7 e 8 demonstra os dados que foram levados em consideração no estudo.

Tabela 7. Dados dos planos de fogo fornecidos pela empresa

| Desmonte | Malha (E/A) | Incl. do furo | Diâmetro do furo (pol.) | Tampão | Profundidade Média |
|-----------------|--------------------|----------------------|--------------------------------|---------------|---------------------------|
| D1 | 3,5/2,5 | 10° | 3" | 1,5 | 11,0 |
| D2 | 3,0/2,5 | 10° | 3" | 1,5 | 14,5 |
| D3 | 4,0/2,2 | 10° | 3" | 1,2 | 8,5 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 8. Dados da rocha e razão de carga fornecidos pela empresa

| Desmonte | Rocha | Dens. Média da Rocha (g/cm³) | Razão de Carga (kg/m³) |
|-----------------|--------------|--|--|
| D1 | Dolomítica | 2,70 | 0,496 |
| D2 | Dolomítica | 2,70 | 0,557 |
| D3 | Calcítica | 2,70 | 0,317 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2 ANÁLISE DOS DADOS

Com o auxílio de ferramentas de última geração, tais como: *WipFrag*, será gerado dados granulométricos dos resultados dos desmontes efetuados, habitualmente, pela minerado GoiasCal, analisada e posteriormente comparados com os realizados, utilizando um plano de fogo otimizado e controlado.

Posteriormente será feito um levantamento dos prováveis erros que podem estar ocorrendo na aplicação do plano de fogo e com o auxílio do software *O-Pitblast* simular o desmonte aplicado pela pedreira, então será possível fazer um comparativo entre o desmonte praticado e teórico, possibilitando o diagnóstico dos erros cometidos, se houver, e propor uma melhoria na geometria do plano de fogo que reduza significativamente os custos com o desmonte de rocha com explosivos.

Com esses dados em mãos, e o conhecimento sobre o plano de fogo utilizado, será possível definir as variáveis do processo e assim definir uma função objeto e suas restrições para que se possa chegar nos resultados ótimos da fragmentação através do melhor plano de fogo que se pode aplicar a tal situação.

3.2.1 Análise Granulométrica

A análise granulométrica foi realizada através do *software WipFrag*, onde, através de fotografia, é possível ser feita uma análise do material após o desmonte. Todos os desmontes foram fotografados e suas imagens foram analisadas no programa.

A primeira etapa se resume em fotografar o material fragmentado utilizando uma esfera de referência, na figura 12 pode-se observar as duas esferas brancas de 300 milímetros, que foi utilizada com base de referência para o programa poder identificar, de maneira mais precisa, a granulometria do material fotografado.

Figura 12. Fotografia do material



Fonte: Elaborado pelo autor.

Após referenciar a esfera o programa contorna o material, mas o usuário tem a opção de selecionar melhor o formato da rocha fragmentada e as que não foram identificadas pelo programa, dando também a opção de excluir as partes que não interessam para análise, tais como a bancada, vias de acesso, etc., conforme a figura 13.

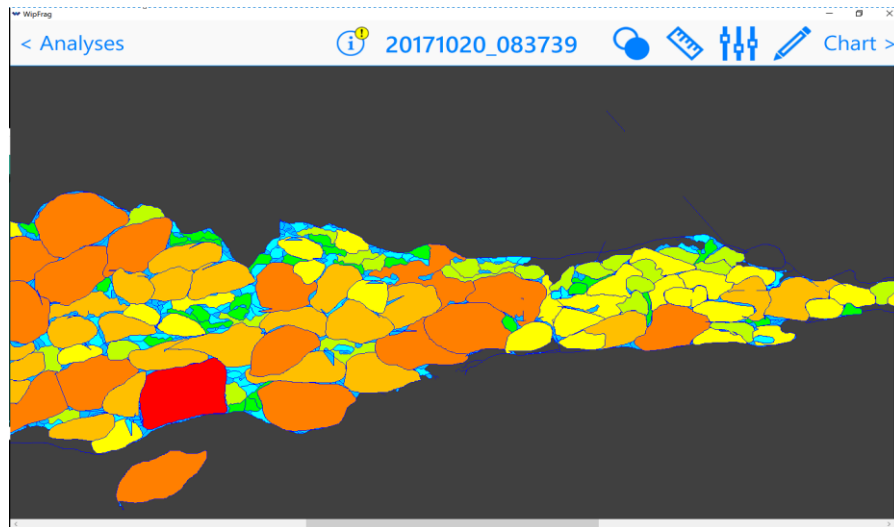
Figura 13. Análise do material



Fonte: *Software WipFrag* (2017).

O programa gera um modelo com variação de cor, onde o azul representa os materiais mais fragmentados indo até o vermelho que são os materiais de maior granulometria, para que o usuário possa ter uma noção melhor do material selecionado, com isso fica fácil identificar os locais onde não teve material devidamente contornado. A figura 14 exemplifica o resultado da seleção da rocha fragmentada.

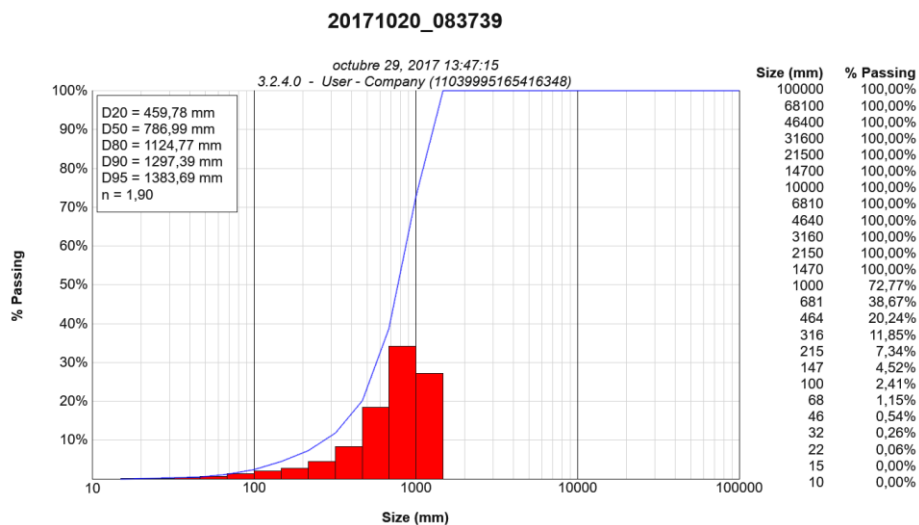
Figura 14. Análise da seleção



Fonte: Software WipFrag (2017).

O programa gera os resultados granulométricos e fator de uniformidade. A figura 15 demonstra o gráfico gerado pelo programa e granulometria do material passante, gerando o resultado dos materiais passantes em 20%, 50%, 80%, 90% e 95%.

Gráfico 1. Resultado da fotoanálise

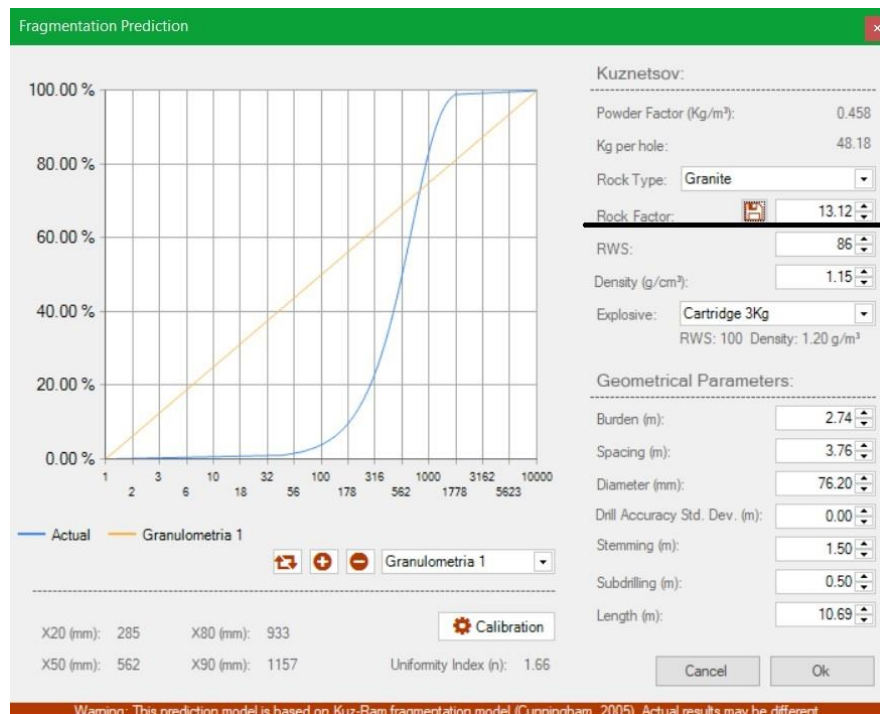


Fonte: Software WipFrag (2017).

3.2.2 Análise do Fator de Rocha

Utilizando o *software* O-Pitblast é possível determinar o fator de rocha da região onde foram analisados os planos de fogo. O processo consiste na utilização dos resultados da fragmentação gerado no programa *WipFrag*, com os resultados da granulometria e os dados do plano de fogo utilizado, em cada plano de fogo, é possível gerar o resultado do fator de rocha da região do maciço. Conforme a figura 15 esse valor foi determinado em 13.12, na imagem o resultado é identificado como *Rock Factor* como destacado na figura 15.

Figura 15. Determinação do fator de rocha utilizando o programa O-Pitblast



Fonte: *Software O-Pitblast* (2017).

3.2.3 Custo com Rompedor Hidráulico, Explosivos e Acessórios

O rompedor hidráulico é utilizado em conjunto com uma escavadeira do modelo *Komatsu* PC 350 LC, conforme a figura 16. Outros custos com manutenção não foram levados em consideração devido ao fato da empresa não ter uma relação concreta com esses gastos, devido a esse fato os custos de manutenção foram relativos apenas a lubrificação do equipamento, que foi a única informação repassadas sobre custos de manutenção preventiva. Com esse fato é possível que o custo por hora da máquina seja maior que o custo estimado.

Figura 16. Conjunto Rompedor Hidraulico com Escavadeira Komatsu PC 350 LC



Fonte: Elaborado pelo autor.

A tabela 9 tem os resultado levantado a partir dos dados informados pelo almoxarifado e operador do equipamento, esses dados são referentes ao período de 9 (nove) dias, o resultado de todo o combustível nesse período foi dividido pelos nove dias, resultado em um média de 139,44 litros de combustível por dia, o total de horas trabalhadas no período também foi levantada e resultou em uma efetividade de trabalho da máquina de 7,94 horas e por fim o gasto médio de lubrificante, que resultou em 5,33 litros por dia.

Tabela 9. Dados Levantados

| Análise dos custos do rompedor (Período de 9 (nove) dias) | | | | |
|---|--------|---------|------------------|---------|
| Especificações | Qnt. | Unidade | Consumo por hora | |
| Méd. de hora trabalhadas/dia | 7,94 | Horas | Qnt. | Unidade |
| Méd. Combustível/dia | 139,44 | Litros | 17,57 | lt/h |
| Méd. Lubrificante/dia | 5,33 | Litros | 0,67 | lt/h |

Fonte: Elaborado pelo autor.

A tabela 10 especifica os custos relativos a cada item analisado, onde o combustível, diesel, resultou em um valor médio de 2,91 R\$/litro no período analisado, o lubrificante 9,25 R\$/litro e o salário do operador, sem os descontos, resultou em 6,51 R\$/hora. Todos esses dados foram informados pela empresa.

Tabela 10. Custos

| Análise dos custos do rompedor (Período de 9 (nove) dias) | | |
|---|------|--------|
| Custos | | |
| Combustível | 2,91 | R\$/lt |
| Lubrificante | 9,25 | R\$/lt |
| Operador | 6,51 | R\$/h |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados gerados foram convertidos para custos por hora, onde o gasto médio de combustível e lubrificante, por dia, foram divididos pelas horas médias trabalhadas por dia e posteriormente os resultados foram somados, gerando um custo por hora, médio, de R\$ 63,85. Esse resultado pode ter uma variação, devido ao fato de que custos mais específicos com manutenção e a variação nos custos de combustível possam alterar esse valor, dependendo do período analisado.

Tabela 11 Resultados

| Análise dos custos do rompedor (Período de 9 (nove) dias) | | |
|---|--------------|--------------|
| Resultados | | |
| Especificações | Qnt. | Unidade |
| Gasto de combustível por hora | 51,13 | R\$/h |
| Gasto de lubrificante por hora | 6,22 | R\$/h |
| Custo do operador por hora | 6,51 | R\$/h |
| Custo médio por hora trabalhada | 63,85 | R\$/h |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os custos com explosivos foram repassados pela empresa, onde foram repassados os valores gastos com a compra de cada material. A tabela 12 está com os valores discriminados e o tipo de explosivos utilizados, incluindo os acessórios.

Tabela 12. Custos dos Explosivos e Acessórios utilizados nos desmontes

| Custo dos Explosivos e Acessórios (Valores repassados pela a empresa) | | |
|---|-------------------|-------------|
| Itens | Unidade de medida | Valor (R\$) |
| Encartuchado 2”x 24” | Quilograma | 7,20 |
| ANFO | Quilograma | 3,19 |
| Cordel detonante NP5 | Metro | 0,74 |
| Cordel detonante NP10 | Metro | 0,98 |
| Retardo de 50 milissegundos | Peça | 12,66 |
| Conjunto Espoleta-Estopim | Peça | 8,52 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2.4 Plano de Fogo

Como explicado no capítulo 3.1.2, foram levantados os dados de profundidade, afastamento, espaçamento e tampão de 3 (três) desmontes realizados na mineradora GoiasCal. Esses dados foram registrados para que fosse possível ter uma noção real da geometria aplicada e identificar os possíveis erros que possam colaborar para a variação de espaçamento, afastamento e altura do furo.

4 ESTUDO DE CASO

O estudo de caso foi realizado na mineradora Goiascal Mineração, localizada no município de Indiara, estado do Goiás. Foram analisados 3 (três) desmontes realizados pela a empresa. No estudo foram analisados os fatores geométricos de cada plano de fogo, que são: afastamento, espaçamento, altura do furo, tampão e subperfuração, também foram levados em consideração o tipo de explosivo utilizado, amarração, granulometria após o desmonte e os custos relativos a utilização do rompedor hidráulico.

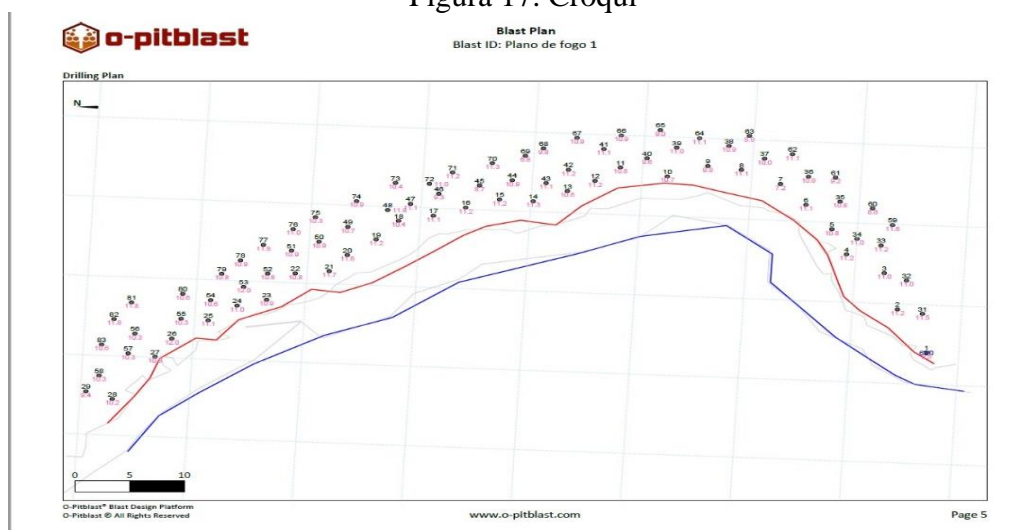
4.1 PRIMEIRO DESMONTE

A figura 16 foi gerada através do programa O-Pitblast, onde foi inserido os valores retirados em campo. O total de furos desse primeiro desmonte foi de 83, com uma malha esperada de 3,5 metros de espaçamento, 2,5 metros de afastamento e altura do furo de 10,5 metros, conforme informado pela empresa e especificado na tabela 7 do capítulo 3.1.3.

Com a imagem já é possível observar que os furos não contem um espaçamento e afastamento contínuo, conforme previsto pelos dados fornecidos pela empresa. O programa gerou os resultados médios, reais, da geometria, onde o afastamento (*Burden*) médio real foi de 2,74 metros, espaçamento (*Spacing*) médio de 3,76 metros e altura do furo (*Length*) de 10,69 metros, sendo demonstrados na figura 17 abaixo.

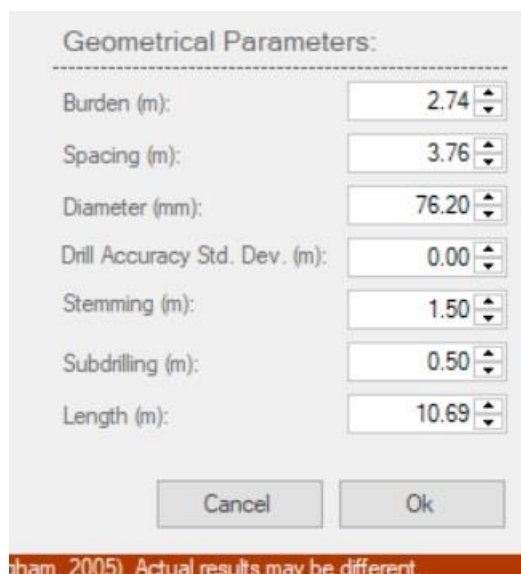
Com isso, é possível dizer que há uma variação de aumento de aproximadamente 7,43% do afastamento, 9,6% para o espaçamento e de 1,81% da altura do furo. Como esses valores são médios, é possível que tenham espaçamentos, afastamentos e profundidade de furos maiores ou menores que os especificados, podendo gerar outros problemas, tais como repés e matacos.

Figura 17. Croqui



Fonte: *Software* O-PitBlast.

Figura 18. Valores Médios dos Prametros Geometricos



Geometrical Parameters:

Burden (m): 2.74

Spacing (m): 3.76

Diameter (mm): 76.20

Drill Accuracy Std. Dev. (m): 0.00

Stemming (m): 1.50

Subdrilling (m): 0.50

Length (m): 10.69

Cancel Ok

gham, 2005). Actual results may be different.

Fonte: Software O-PitBlast.

A tabela 13 revela os resultados gerados pelo *software O-Pitblast*, onde o mesmo gerou os valores reais de material desmontado no fogo aplicado, bem como a altura média real da bancada, total de furos, razão de carga e outros dados que foram discriminados na tabela a seguir.

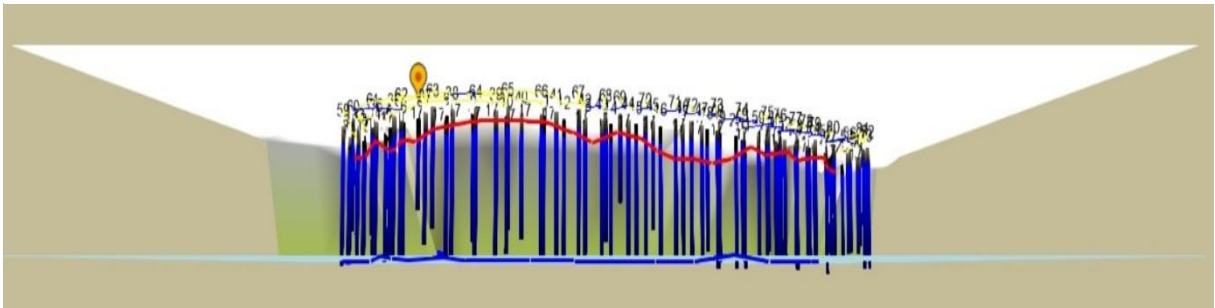
Tabela 13. Resultados reais do desmonte (Desmonte I)

| | |
|--|-------------------------|
| Altura do Banco | 9,15 m |
| Total de Furos | 83 |
| Total de Metros Perfurados | 873,61 m |
| Volume Desmontado | 6.500,7 m ³ |
| Toneladas de Material | 17.570,8 t |
| Perfuração Específica | 0,134 m/m ³ |
| Razão de Carga (Kg/m³) | 0,443 Kg/m ³ |
| Razão de Carga (Kg/t) | 0,164 Kg/t |
| Densidade da Rocha | 2,70 g/cm ³ |

Fonte: Adaptado, Software O-Pitblast (2017).

A figura 18 ilustra a variação do tamanho dos furos, que, apesar de terem uma média próxima do desejado, teve grande parte fora do alcance da subperfuração e outros que ficaram com altura bem abaixo do esperado. Com isso é possível prever a geração de repés e matacos, o que realmente aconteceu após o desmorte conforme visto na figura 19. Esses erros de perfuração poderiam ser facilmente evitados com a verificação da altura do furo após cada furação, apesar de não ser garantia de que todos os furos estejam na altura correta, pois não é possível, medindo com trena, saber se houve desvio do furo e outros fatores que também podem influenciar na má perfuração, tais como a perfuratriz não conseguir limpar o furo direito, algum detrito cair no momento da furação do próximo furo, erro de operação e etc.

Figura 19. Furos (Desmorte I)



Fonte: *Software O-PitBlast* (2017).

Figura 20. Local após transporte do material



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.1.1 Análise Granulométrica

Conforme explicado no capítulo 3.2.1, a análise granulométrica foi realizada utilizando a ferramenta *WipFrag*. O resultado para o primeiro desmonte demonstra uma fragmentação maior do que a esperada para a britagem primária, que exige um material de granulometria com 80% passante em 600 milímetros, informação repassada pela a empresa. Devido a extensão do fogo, foram realizadas três fotografias, onde é possível observar uma má fragmentação do material em todas, figuras 20, 21 e 22.

Figura 21. Resultado do desmonte (Foto 1)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 22. Resultado do desmonte (Foto 2)



Fonte: Elaborado pelo autor.

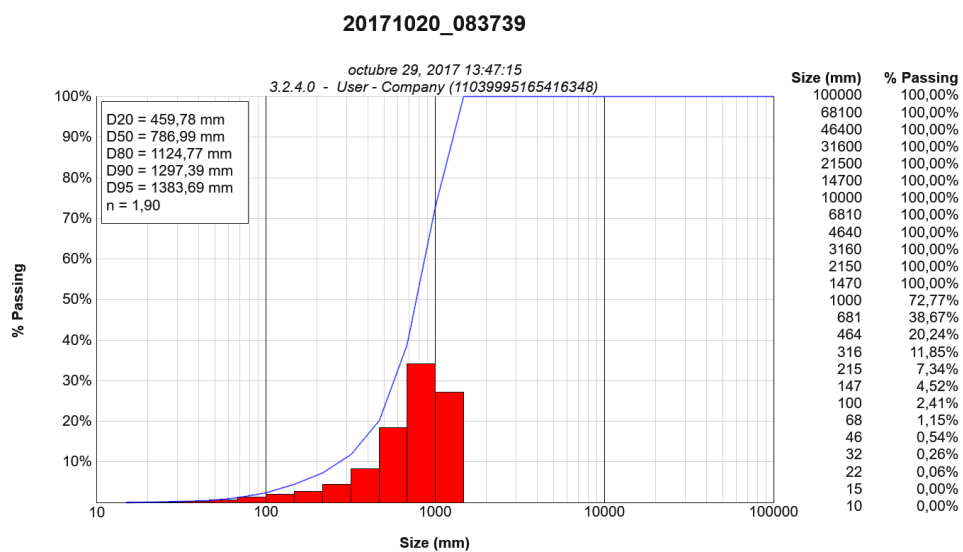
Figura 23. Resultado do desomonte (Foto 3)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Após análise realizada pelo programa o material da foto 1, figura 19, teve um resultado que não atende aos requisitos repassados pela a empresa, onde 50% do material analisado possuía granulometria acima de 700 milímetros, o programa informou que esse material apresentou 38,67% da granulometria abaixo de 681 milímetros, o que não é ideal para a britagem primária, o valor do índice de uniformidade n indica a fragmentação se comportou de forma relativamente uniforme, apesar de não atingir os parâmetros granulométricos esperados, o gráfico 2 gerado pelo programa demonstra os resultados.

Gráfico 2. Resultado granulométrico (Foto 1)



Fonte: Software WipFrag (2017).

4.1.2 Custos

Os dados da quantidade em metros de cordel, NP5 e NP10, utilizado foram fornecidos pela empresa, bem como a quantidade de retardos de 50 milissegundos, conjunto Espoleta-Estopim, quilograma de Encartuchado e ANFO utilizado por furo. Os valores totais de cada produto foram calculados com base nos valores informados na tabela 12 do capítulo 3.2.3.

O operador informou que foram gastos 2 (dois) dias e meio de trabalho com o rompedor hidráulico após o desmonte, e conforme estipulado o gasto horário de R\$ 63,85 e carga horaria dia efetiva de 7,94 horas, o gasto com fragmentação secundária, utilizando rompedor, ficou em torno de R\$ 1.267,42 ou R\$ 0,07 por tonelada. Incluindo ainda a utilização de fogacho para desmonte de repé, sendo esse valor repassado pela empresa de R\$ 2.216,39. Conforme a tabela 14 os custos totais relacionados a esse desmonte foi de R\$ 17.350,79.

Somente com gastos de fragmentação secundária houve um aumento de aproximadamente 25,12% nos custos totais do desmonte, sem ser levado em consideração os gastos maiores com transporte e britador primário, sendo que a má fragmentação implica no aumento dos gastos com tais etapas.

Tabela 14. Custos (Desmonte I)

| Produto | Quantidade Utilizada | Total Gasto |
|---------------------------|-----------------------------|----------------------|
| Encartuchado 2" x 24" | 807,6 Kg | R\$ 5.814,65 |
| ANFO | 2.075 Kg | R\$ 6.619,25 |
| Cordel NP5 | 460 m | R\$ 340,40 |
| Cordel NP10 | 835 m | R\$ 818,30 |
| Retardo de 50ms | 21 unidades | R\$ 265,86 |
| Conjunto Espoleta-Estopim | 1 unidade | R\$ 8,52 |
| TOTAL | | R\$ 13.866,98 |
| Custo com Rompedor | - | R\$ 1.267,42 |
| Custo com Fogacho | - | R\$ 2.216,39 |
| TOTAL | | R\$ 17.350,79 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

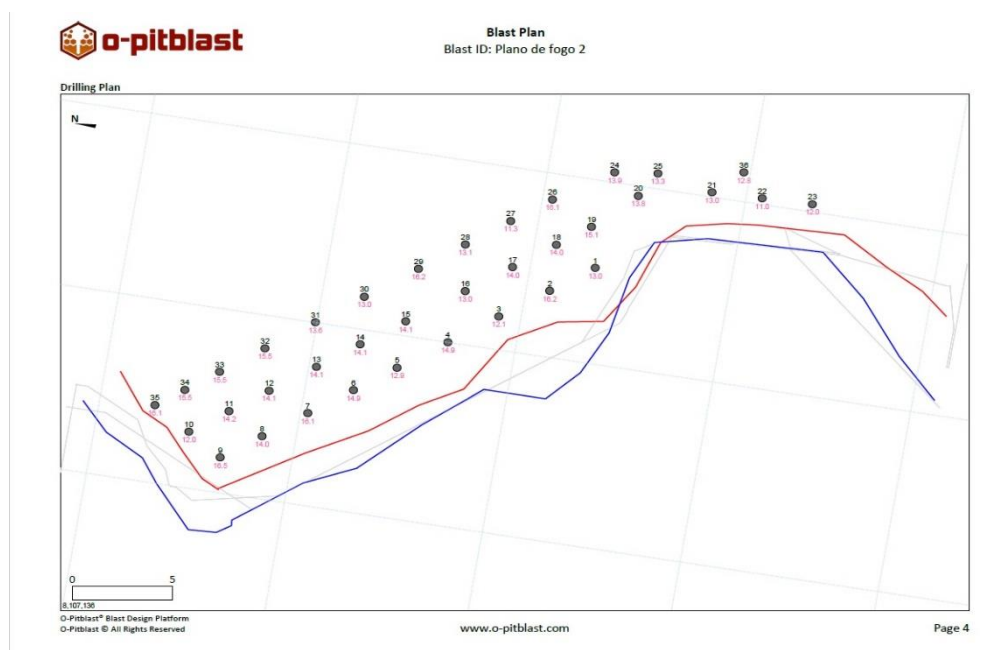
4.2 SEGUNDO DESMONTE

O segundo desmonte também foi tratado no software *O-Pitblast*, onde gerou o croqui da malha de desmonte, conforme os dados retirados em campo, a figura 23 ilustra como ficou distribuído os furos. Para esse desmonte foram utilizados 36 furos, e a geometria que deveria ser aplicada, segundo os dados repassado pela empresa era de um espaçamento de 3 metros, afastamento de 2,5 metros e altura do furo de 14,5 metros, mas conforme a figura 23 é possível perceber as discrepâncias da malha.

Conforme ocorrido no primeiro desmonte analisado houve uma diferença entre o espaçamento, afastamento e altura do furo, conforme a figura 24 é possível verificar que o afastamento (*Burden*) médio foi de 2,19 metros, espaçamento (*Spacing*) de 2,81 metros e altura média do furo (*Length*) de 14,22 metros.

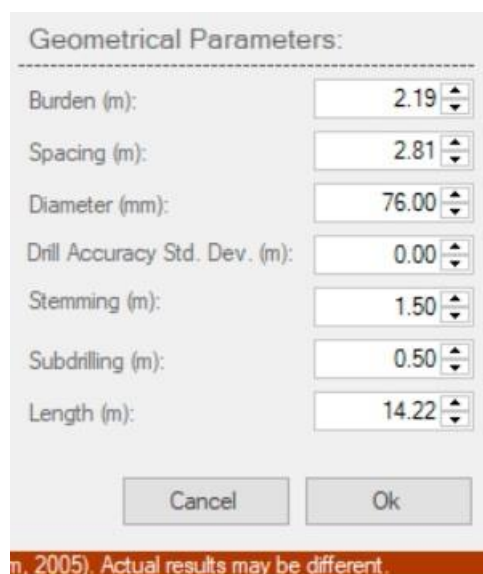
Sendo assim é possível dizer que existe uma variação menor de aproximadamente 12,4% na média do afastamento, 6,33% no espaçamento e 1,93% na altura do furo. Esses valores são médios, ou seja, podem existir valores de afastamento, espaçamento e altura do furo maiores e menores, esse tipo de variação implica em problemas no desmonte, onde nesse desmonte houveram furos que atingiram profundidades bem maiores que a esperada e em contrapartida, furos com profundidades bem abaixo, o que gera problemas com repé, matacos e para esse caso desníveis na praça.

Figura 24. Croqui (Desmonte II)



Fonte: Software *O-Pitblast* (2017).

Figura 25. Parametros geometricos



Geometrical Parameters:

Burden (m): 2.19

Spacing (m): 2.81

Diameter (mm): 76.00

Drill Accuracy Std. Dev. (m): 0.00

Stemming (m): 1.50

Subdrilling (m): 0.50

Length (m): 14.22

Cancel Ok

n, 2005). Actual results may be different.

Fonte: Software O-Pitblast (2017).

O provável resultado do desmonte esta discriminado na tabela 15, onde são dados gerados pelo programa, esses resultados são baseados nos dados retirados em campo e alimentado no sistema, onde o mesmo estipula os prováveis resultados após o desmonte.

Tabela 15. Resultados reais do desmonte (Desmonte II)

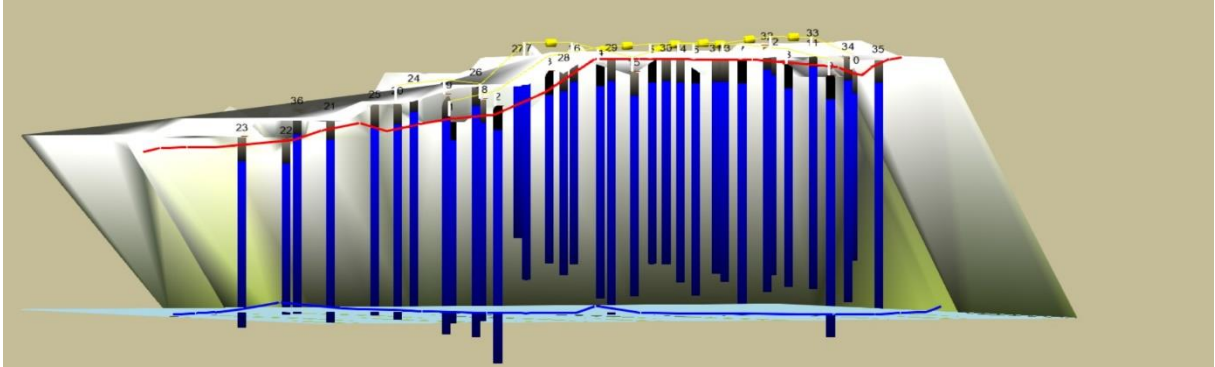
| | |
|--|-------------------------|
| Altura do Banco | 12,61 m |
| Total de Furos | 36 |
| Total de Metros Perfurados | 505 m |
| Volume Desmontado | 2.652,6 m ³ |
| Toneladas de Material | 7.162,02 t |
| Perfuração Específica | 0,190 m/m ³ |
| Razão de Carga (Kg/m³) | 0,602 Kg/m ³ |
| Razão de Carga (Kg/t) | 0,241 Kg/t |
| Densidade da Rocha | 2,70 g/cm ³ |

Fonte: Adaptado, Software O-Pitblast (2017).

Conforme a figura 25 é possível perceber a variação altura dos furos, o que nos permite deduzir a formação de repés e matacos, onde a figura 26, que é da área após o carregamento da

maior parte do material, demonstra as regiões que foram gerados os repés, que é a mesma onde os furos não atingiram a profundidade adequada.

Figura 26. Furos (Desmorte II)



Fonte: *Software O-PitBlast* (2017).

Figura 27. Local após transporte do material



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.1 Análise Granulométrica

Assim como na análise do primeiro desmorte, foram registradas as fotos do material rompido após o desmorte, figura 27. As fotos foram analisadas no programa *WipFrag*, onde o mesmo resultou em uma fragmentação pobre para atender a britagem primária, onde a mesma exige que 80% do material da alimentação seja abaixo na granulometria de 600 milímetros.

Figura 28. Resultado do desmorte (Desmorte II)

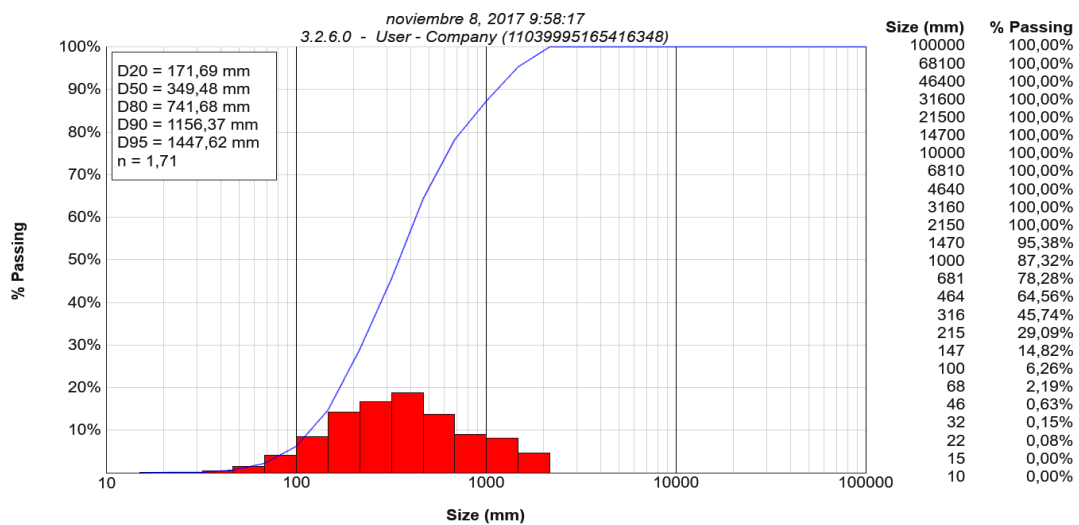


Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados mostram que 80% do material é passante a partir de 741,68 milímetros, ou seja, uma boa parte do material deve passar por fragmentação secundária e outra parte poderá ir para o britador primário fora dos padrões que ele exigiu, aumentando o consumo com energia e gerando outros problemas, tais como travamento do britador.

Gráfico 3. Resultado granulométrico (Desmorte II)

20171102_082118



Fonte: Software WipFrag (2017).

4.2.2 Custos

Os gastos registrados a seguir foram informados pela empresa, onde foram repassados os gastos com cordel, NP5 e NP10, retardos de 50 milissegundos, conjunto Espoleta-Estopim, quilogramas gastos com explosivo Encartuchado e ANFO. Os valores foram calculados conforme o custo desses materiais informados na tabela 12 do capítulo 3.2.3.

Foi informado que o rompedor hidráulico trabalhou o equivalente a meio período, sendo o gasto por hora de trabalho equivalente a R\$ 63,85 e uma carga horaria de trabalho efetivo de 7,94 hora/dia, o gasto com rompedor nessa área ficou estimulado em R\$ 253,48, ou seja, um gasto de R\$ 0,035 por tonelada desmontada. Com fogo secundário para o conserto da praça, devido a geração de repé, a empresa informou que foram gastos R\$ 2.707,69. Com isso o gasto total que envolve a operação de desmonte resulta em R\$ 11.873,91, conforme a tabela.

Devido à má perfuração o custo com esse desmonte teve um acréscimo de 33,22%, devido aos gastos com fragmentação secundária.

Tabela 16. Custos (Desmonte II)

| Produto | Quantidade Utilizada | Total Gasto |
|---------------------------|-----------------------------|----------------------|
| Encartuchado 2" x 24" | 828 Kg | R\$ 5.961,60 |
| ANFO | 732 Kg | R\$ 2.335,08 |
| Cordel NP5 | 118 m | R\$ 87,32 |
| Cordel NP10 | 505 m | R\$ 494,90 |
| Retardo de 50ms | 2 unidades | R\$ 25,32 |
| Conjunto Espoleta-Estopim | 1 unidade | R\$ 8,52 |
| TOTAL | | R\$ 8.912,74 |
| Custo com Rompedor | - | R\$ 253,48 |
| Custo com Fogacho | - | R\$ 2.707,69 |
| TOTAL | | R\$ 11.873,91 |

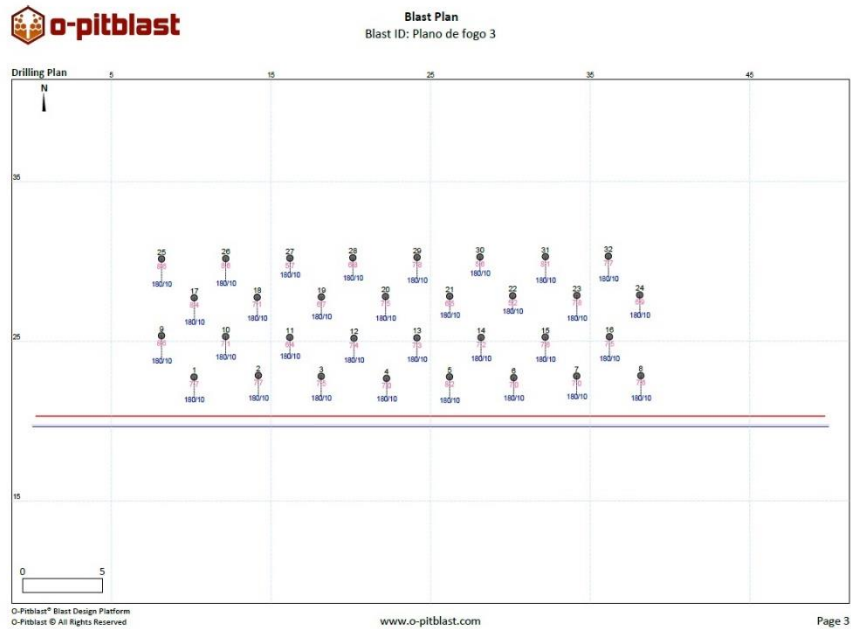
Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3 TERCEIRO DESMONTE

Assim como nos desmontes anteriores o terceiro foi tratado no programa *O-Pitblast*, onde a figura 28 retrata a geometria da malha conforme os dados retirados em campo. Para esse desmonte foram feitos 32 furos, com malha esperada de 4 metros de espaçamento, 2,2 de afastamento e altura do furo de 8,5 metros, conforme informado pela empresa e descrito na tabela 7 do capítulo 3.1.3.

Para esse desmonte a geometria da malha foi melhor empregada, comparando com as anteriores, tendo apenas uma variação no afastamento entre os furos e altura dos furos, conforme é possível observar nas figuras 28 e 29.

Figura 29. Croqui



Fonte: *Software O-Pitblast (2017)*

Figura 30. Parametros Geometricos

| Geometrical Parameters: | |
|---|------------------------------------|
| Burden (m): | <input type="text" value="2.58"/> |
| Spacing (m): | <input type="text" value="4.00"/> |
| Diameter (mm): | <input type="text" value="76.00"/> |
| Drill Accuracy Std. Dev. (m): | <input type="text" value="0.00"/> |
| Stemming (m): | <input type="text" value="1.20"/> |
| Subdrilling (m): | <input type="text" value="0.50"/> |
| Length (m): | <input type="text" value="7.43"/> |
| <input type="button" value="Cancel"/> <input type="button" value="Ok"/> | |

m, 2005). Actual results may be different.

Fonte: *Software O-Pitblast (2017)*

A tabela 17 mostra os resultados gerados pelo desmonte, conforme os dados que foram retirados em campo e alimentados no programa *O-Pitblast*. Revelando os valores de material

desmontado, perfuração específica, razão de carga, número de furos, bem como outros dados relativos ao desmonte.

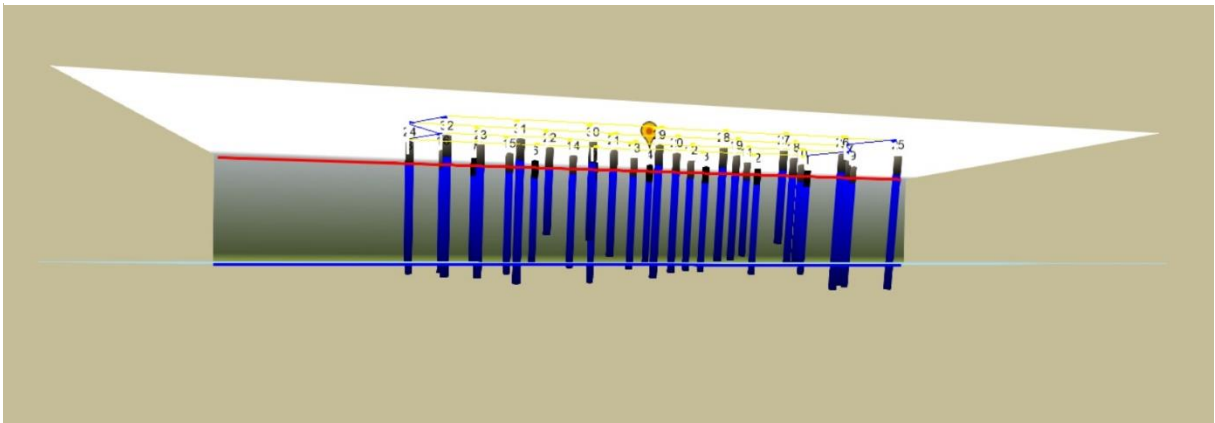
Tabela 17. Resultados reais do desmonte (Desmonte III)

| | |
|--|-------------------------|
| Altura do Banco | 6,7 m |
| Total de Furos | 32 |
| Total de Metros Perfurados | 233,85 m |
| Volume Desmontado | 2.229,5 m ³ |
| Toneladas de Material | 6.019,65 t |
| Perfuração Específica | 0,105 m/m ³ |
| Razão de Carga (Kg/m³) | 0,219 Kg/m ³ |
| Razão de Carga (Kg/t) | 0,082 Kg/t |
| Densidade da Rocha | 2,70 g/cm ³ |

Fonte: Adaptado, *Software O-Pitblast* (2017)

Conforme a figura 30 é possível perceber que também houve erros de furação, onde, por algum fator, o furo não atingiu a altura prevista para o plano de fogo, o que gera, conforme aconteceu nos outros desmontes, a formação de repés e material com granulometria não desejada. Devido ao desmonte ter sido realizado em uma área com presença de água, figura 31 não foi possível registrar o resultado da praça após o carregamento do material desmontado.

Figura 31. Furos (Desmonte III)



Fonte: *Software O-PitBlast* (2017)

Figura 32. Local do desmonte III



Fonte: Própria (2017)

4.3.1 Análise Granulométrica

Também utilizando o programa *WipFrag* para a realização da análise granulométrica o presente capítulo apresentará os resultados obtidos. Para esse desmonte a empresa exigiu uma fragmentação maior, tendo em vista que esse material alimentou um britador com abertura de 800 milímetros, devido ao fato do produto para esse material ser diferente, ele passa por outro processo de britagem, onde a britagem primária difere da utilizada para o material do primeiro e segundo desmonte. A figura 31 ilustra o resultado do desmonte.

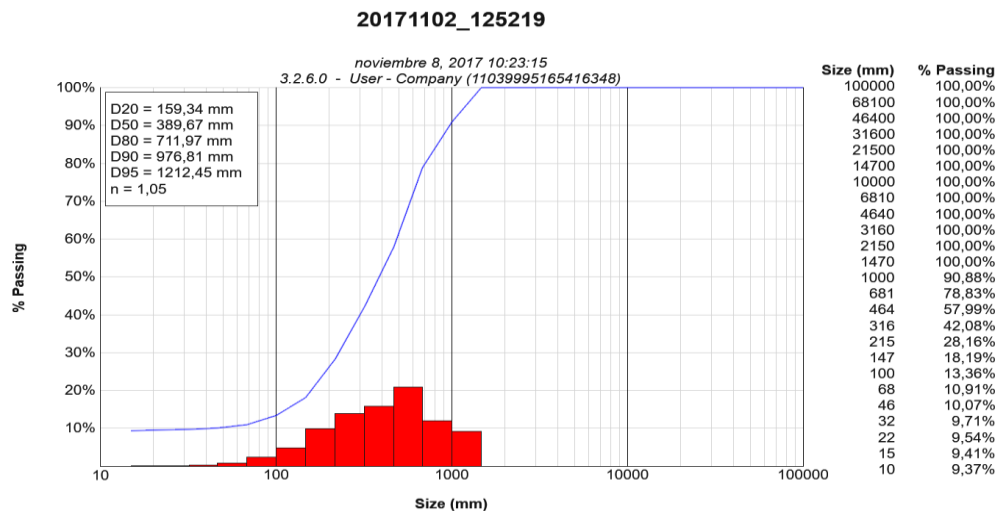
Figura 33. Resultado do desmonte (Desmonte III)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Após análise realizada no programa foi constatado que o material atingiu mais de 80% da granulometria exigida pela britagem primária desse material, onde 80% da rocha é passante na granulometria de 711 milímetros, conforme é demonstrado no resultado da análise do gráfico 4. Porém o índice de uniformidade n teve resultado menor em relação aos resultados dos desmontes anteriores, o que implica dizer que houve uma maior concentração de finos e rocha de granulometria maior. Com tudo não é possível garantir que esse material represente o todo, pois devido ao fato da presença de água boa parte do material ficou submersa, devido a esse fato foi feito a simulação no programa para se gerar a curva granulométrica através dos dados da geometria do plano de fogo, explosivo e explosivo utilizado, conforme o gráfico 7 do capítulo 4.4.

Gráfico 4. Resultado granulométrico (Desmorte III)



Fonte: *Software WipFrag* (2017)

4.3.2 Custos

Os valores gastos com acessórios e explosivos foram repassados pela a empresa, onde foi utilizado para esse desmorte cordel NP5 e NP10, retardos de 50 milissegundos, conjunto Espoleta-Estopim e Encartuchado. Os valores totais gastos para esse desmorte está discriminado na tabela 18 e foram calculados conforme os valores fornecidos pela a empresa e discriminados na tabela 12 do capítulo 3.2.3.

Devido a presença de água no local o único método de fragmentação secundária empregada foi a utilização de rompedor hidráulico, não tendo informações sobre os gastos com fogo secundário para essa situação, sendo que o mesmo trabalhou em situação limitada, fragmentando apenas o material que atingiu a granulometria que não foi esperada. O operador

informou que devido as condições o equipamento teve que operar por meio período no local, não diminuindo os custos com a operação horária da máquina. Com isso o gasto com o rompimento desse material foi de R\$ 253,48. Mesmo com essa redução é previsto que após a drenagem da água haverá a aplicação de fogo secundário para o concerto dos repés que vierem a ter surgido no local.

Tabela 18. Custos (Desmonte III)

| wProduto | Quantidade Utilizada | Total Gasto |
|---------------------------|-----------------------------|---------------------|
| Encartuchado 2" x 24" | 488,9 Kg | R\$ 3.520,01 |
| ANFO | - | - |
| Cordel NP5 | 116 m | R\$ 85,84 |
| Cordel NP10 | 263,85 m | R\$ 258,57 |
| Retardo de 50ms | 6 unidades | R\$ 75,96 |
| Conjunto Espoleta-Estopim | 1 unidade | R\$ 8,52 |
| TOTAL | | R\$ 3.948,90 |
| Custo com Rompedor | - | R\$ 253,48 |
| Custo com Fogacho | - | - |
| TOTAL | | R\$ 4.202,38 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.4 OTIMIZAÇÃO

A otimização dos três desmontes foram realizados utilizando a ferramenta solver, que pode ser utilizada no programa *Microsoft Excel*. Essa ferramenta, baseada nos estudos de Pesquisa Operacional, se baseia na resolução de problemas por métodos matemáticos, buscando uma solução, ou várias soluções, para a melhoria de processos, podendo ser utilizada para diminuir custos, aumentar produtividade, etc., assim como foi detalhado no capítulo 2.6 desse trabalho e mais especificamente sobre essa ferramenta no capítulo 2.7.1. O anexo A ilustra o padrão utilizado para a otimização desses desmontes.

A utilização dessa ferramenta, para esse trabalho, teve o intuito de se chegar a um menor custo para os desmontes apresentados, onde a granulometria também é levada em consideração, pois o objetivo da operação de desmonte de rocha é atingir uma fragmentação que atenda no mínimo 80% da granulometria exigida pela britagem primária.

No capítulo anterior foi diagnosticado que a fragmentação do material não está atingindo valores nem próximo da granulometria solicitada, com isso os gastos com

fragmentação secundária foi empregada em todos os casos. Apesar dos custos adicionais estarem relacionados a utilização de fragmentação secundária a literatura afirma que a má fragmentação é responsável pelo aumento dos custos principalmente de transporte, carregamento e britagem primária.

Os resultados a seguir são relativos a otimização dos fogos realizados, onde se faz uma previsão de como poderia ser a fragmentação do material se acaso um estudo tivesse sido realizado anteriormente e aplicado no campo.

Em todos os desmontes os valores para a melhoria da fragmentação foram estipulados acima do que foi gasto em campo, porém os valores não estão incluindo os gastos com carregamento, transporte e britagem primária. Abaixo estão os resultados otimizados dos desmontes efetuados, conforme as tabelas 19, 20 e 21. Devido a presença de água foi utilizado somente explosivo encartuchado para o desmonte III, com isso a otimização levou em consideração somente a utilização de um tipo de explosivo.

Tabela 19. Custos para o desmonte otimizado (Desmonte I)

| Produto | Quantidade Utilizada | Total Gasto |
|---------------------------|-----------------------------|----------------------|
| Encartuchado 2" x 24" | 1.691,5 Kg | R\$ 12.178,80 |
| ANFO | 4.940,2 Kg | R\$ 15.759,24 |
| Cordel NP5 | 381,32 m | R\$ 282,18 |
| Cordel NP10 | 1.948,2 m | R\$ 1908,24 |
| Retardo de 50ms | 21 unidades | R\$ 265,86 |
| Conjunto Espoleta-Estopim | 1 unidade | R\$ 8,52 |
| TOTAL | | R\$ 30.402,84 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 20. Custos para o desmonte otimizado (Desmonte II)

| Produto | Quantidade Utilizada | Total Gasto |
|---------------------------|-----------------------------|----------------------|
| Encartuchado 2" x 24" | 636,72 Kg | R\$ 4.584,38 |
| ANFO | 2.136,4 Kg | R\$ 6.815,12 |
| Cordel NP5 | 115,96 m | R\$ 85,81 |
| Cordel NP10 | 809,2 m | R\$ 793,02 |
| Retardo de 50ms | 4 unidades | R\$ 50,64 |
| Conjunto Espoleta-Estopim | 1 unidade | R\$ 8,52 |
| TOTAL | | R\$ 12.337,49 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 21. Custos para o desmonte otimizado (Desmonte III)

| Produto | Quantidade Utilizada | Total Gasto |
|---------------------------|-----------------------------|----------------------|
| Encartuchado 2" x 24" | 1.297,27 Kg | R\$ 9.340,35 |
| ANFO | - | - |
| Cordel NP5 | 192 m | R\$ 142,08 |
| Cordel NP10 | 612,54 m | R\$ 600,30 |
| Retardo de 50ms | 4 unidades | R\$ 50,64 |
| Conjunto Espoleta-Estopim | 1 unidade | R\$ 8,52 |
| TOTAL | | R\$ 10.141,89 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

As tabelas 22, 23 e 24 demonstram como seria a quantidade de material desmontado, bem como o número de furos, entre outros. Essa malha, sendo bem aplicada, acarretaria em uma melhor fragmentação e evitaria o surgimento de repés e matacos e foi elaborada levando em consideração as condições reais do terreno.

Tabela 22. Resultados otimizado (Desmonte I)

| | |
|--|------------------------|
| Altura do Banco | 11 m |
| Total de Furos | 170 |
| Total de Metros Perfurados | 1.948,2 m |
| Volume Desmontado | 6.500 m ³ |
| Toneladas de Material | 17.550 t |
| Razão de Carga (Kg/m³) | 1,02 Kg/m ³ |
| Razão de Carga (Kg/t) | 0,378 Kg/t |
| Densidade da Rocha | 2,70 g/cm ³ |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 23. Resultado otimizado (Desmonte II)

| | |
|--|------------------------|
| Altura do Banco | 14 m |
| Total de Furos | 56 |
| Total de Metros Perfurados | 808,98 m |
| Volume Desmontado | 2.600 m ³ |
| Toneladas de Material | 7.020 t |
| Razão de Carga (Kg/m³) | 1,07 Kg/m ³ |
| Razão de Carga (Kg/t) | 0,395 Kg/t |
| Densidade da Rocha | 2,70 g/cm ³ |

Fonte: Elaborado pelo autor.

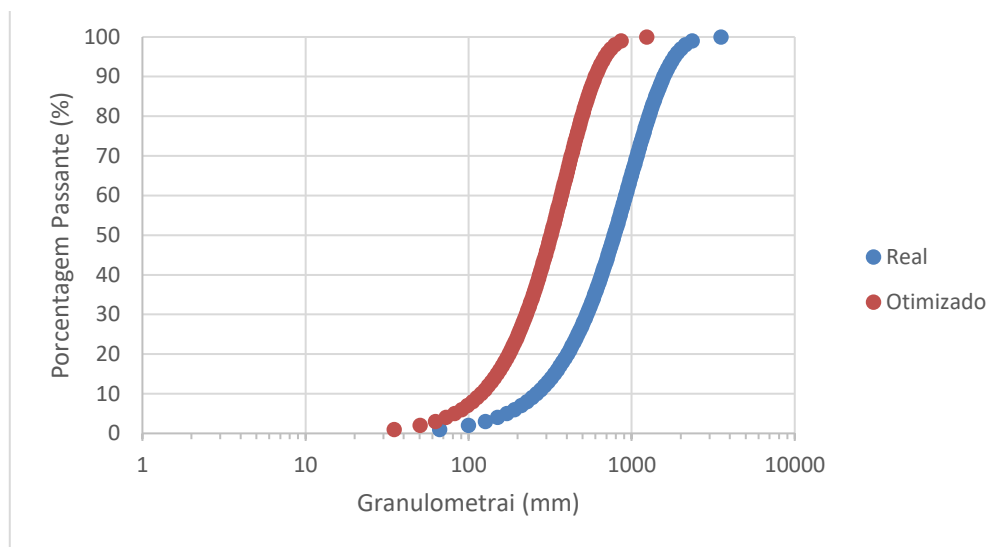
Tabela 24. Resultados otimizado (Desmonte III)

| | |
|--|-------------------------|
| Altura do Banco | 6,9 m |
| Total de Furos | 83 |
| Total de Metros Perfurados | 612,58 m |
| Volume Desmontado | 2.203,89 m ³ |
| Toneladas de Material | 5.950,50 t |
| Razão de Carga (Kg/m³) | 0,59 Kg/m ³ |
| Razão de Carga (Kg/t) | 0,218 Kg/t |
| Densidade da Rocha | 2,70 g/cm ³ |

Fonte: Elaborado pelo autor.

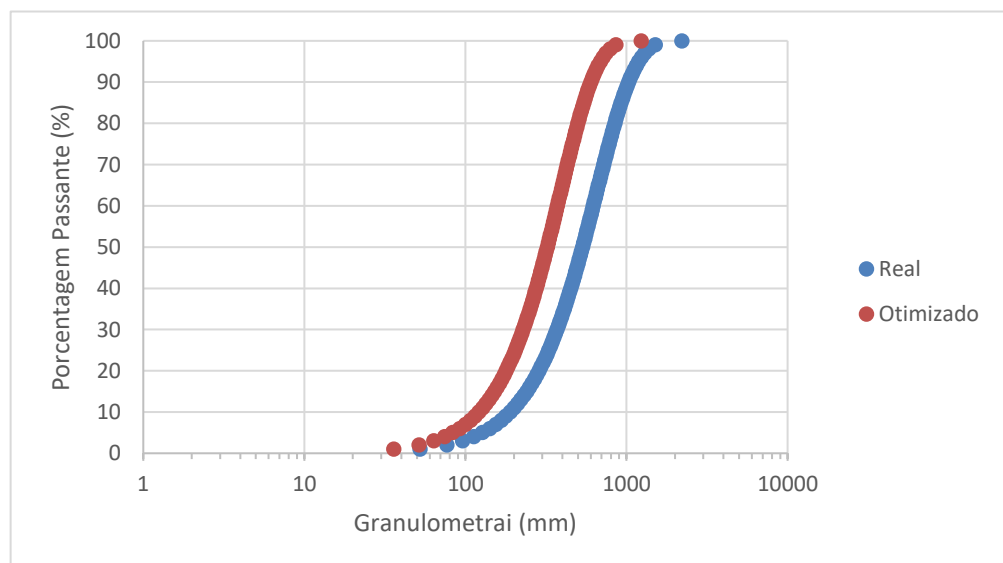
Apesar das diferenças de gastos serem maiores para os desmontes otimizados os resultados granulométricos atendem de forma satisfatória a exigência granulométrica para a britagem primária, garantindo que até 90% do material seja passante na granulometria de 600 milímetros para os desmontes I e II e de 800 milímetros para o desmonte III, conforme os gráficos 5, 6 e 7 é possível perceber uma grande melhoria da fragmentação, comparando aos desmontes aplicados.

Gráfico 5. Comparativo dos resultados granulométricos (Desmonte I)



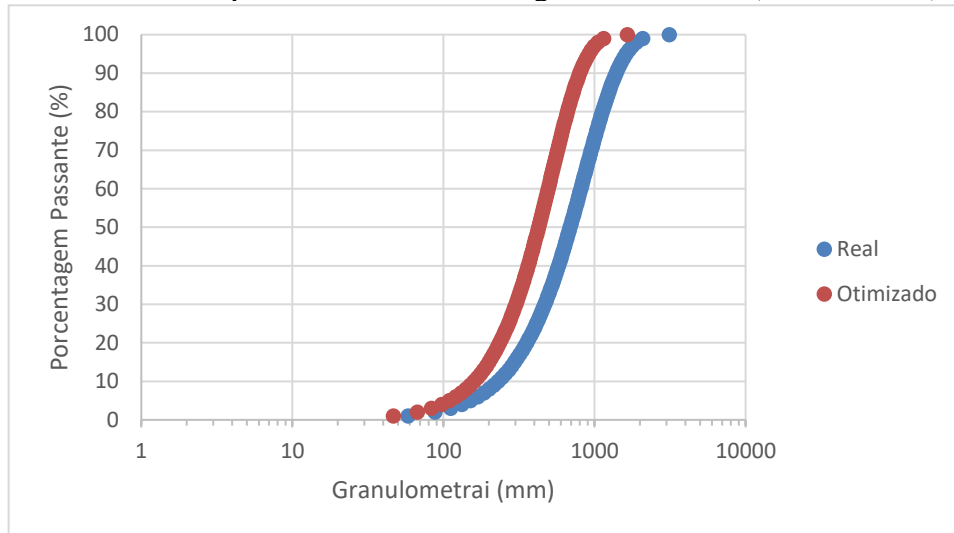
Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 6. Comparativo dos resultados granulométricos (Desmonte II)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 7. Comparativo dos resultados granulométricos (Demsonte III)



Fonte: Elaborado pelo autor.

A curva azul representa o resultado granulométrico do desmante que foi executado, enquanto a curva vermelha representa o resultado otimizado. É possível perceber que quanto mais a curva tendência para a direita, maior a porcentagem de materiais a cima da granulometria esperada e com a utilização de cálculos empíricos, junto com a ferramenta de otimização, SOLVER, estipular uma malha mais adequada para esse desmante, que apesar do aumento significativos dos custos, garantem um material melhor, e segundo a literatura, materiais com granulometrias a cima do ideal acarretam não apenas nos custos com fragmentação secundária, mas também no aumento de custos com transporte, carregamento e britagem, onde tendem a ter um maior impacto no custo total.

As tabelas 25, 26 e 27 são os parâmetros para a malha adequada, onde estão relacionados os valores ideais para afastamento, espaçamento, altura do furo, tampão e inclinação. Devido ao fato da empresa ter disponível apenas brocas de 3" polegadas não forma alterados os valores do diâmetro de furação.

Tabela 25. Malha otimizada

| Desmante | Malha (E/A) | Incl. do furo | Diâmetro do furo (pol.) | Tampão | Profundidade Média |
|----------|-------------|---------------|-------------------------|--------|--------------------|
| D1 | 2,30/1,50 | 10° | 3" | 1,10 | 11,45 |
| D2 | 2,20/1,50 | 10° | 3" | 1,30 | 14,45 |
| D3 | 2,40/1,60 | 10° | 3" | 1,60 | 7,40 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para a otimização dos planos de fogo foram levados em consideração os parâmetros que foram citados no referencial bibliográfico desse trabalho. Esses parâmetros foram levados em consideração para as restrições de valores que a ferramenta SOLVER precisou respeitar para que não houvesse erros na geometria empregada.

As figuras 33, 34 e 35 mostram esses padrões e identificam de quais literaturas foram retiradas, todas elas estão citadas nesse trabalho e são de experiências realizadas por estudiosos da área de mineração e desmonte.

Figura 34. Parâmetros de restrições e suas referências (Desmonte I)

| PARAMÊTROS DE RESTRIÇÕES | | | | |
|--------------------------|----|----------|-----------------|-------------------------|
| 1,50 | >= | 1 | Relação E/A | (HUSTRULID, 1999) ✓ |
| 0,71 | >= | 0,7 | Relação T/A | (SILVA, 2011) ✓ |
| 7,33 | >= | 3 | Relação Hb/A | (JIMENO et al., 2003) ✓ |
| 1,91 | >= | 0,7 | Uniformidade | (JIMENO et al., 2003) ✓ |
| 6.500,00 | >= | 6.500,00 | Volume desejado | ✓ |
| 0,30 | >= | 0,3 | Relação Subp/A | (JIMENO et al., 2003) ✓ |
| 1,02 | >= | 0,40 | CONSUMO MINIMO | ✓ |
| 1,50 | <= | 1,5 | Relação E/A | (HUSTRULID, 1999) ✓ |
| 0,71 | <= | 1 | Relação T/A | (SILVA, 2011) ✓ |
| 1,91 | <= | 2,2 | Uniformidade | (JIMENO et al., 2003) ✓ |
| 0,30 | <= | 0,5 | Relação Subp/A | (JIMENO et al., 2003) ✓ |
| 600,00 | <= | 600,00 | Fragmentação | ✓ |

Fonte: *Print Screen* da aplicação *Microsoft Excel*

Figura 35. Parâmetros de restrições e suas referências (Desmonte II)

| PARAMÊTROS DE RESTRIÇÕES | | | | |
|--------------------------|----|----------|-----------------|-------------------------|
| 1,50 | >= | 1 | Relação E/A | (HUSTRULID, 1999) ✓ |
| 0,88 | >= | 0,7 | Relação T/A | (SILVA, 2011) ✓ |
| 9,33 | >= | 3 | Relação Hb/A | (JIMENO et al., 2003) ✓ |
| 1,93 | >= | 0,7 | Uniformidade | (JIMENO et al., 2003) ✓ |
| 2.600,00 | >= | 2.600,00 | Volume desejado | ✓ |
| 0,30 | >= | 0,3 | Relação Subp/A | (JIMENO et al., 2003) ✓ |
| 1,07 | >= | 0,40 | CONSUMO MINIMO | ✓ |
| 1,50 | <= | 1,5 | Relação E/A | (HUSTRULID, 1999) ✓ |
| 0,88 | <= | 1 | Relação T/A | (SILVA, 2011) ✓ |
| 1,93 | <= | 2,2 | Uniformidade | (JIMENO et al., 2003) ✓ |
| 0,30 | <= | 0,5 | Relação Subp/A | (JIMENO et al., 2003) ✓ |
| 600,00 | <= | 600,00 | Fragmentação | ✓ |

Fonte: *Print Screen* da aplicação *Microsoft Excel*

Figura 36. Parâmetros de restrições e suas referências (Desmonte III)

| PARAMÊTROS DE RESTRIÇÕES | | | | | |
|--------------------------|----|----------|-----------------|-----------------------|---|
| 1,50 | >= | 1 | Relação E/A | (HISTRULID, 1999) | ✓ |
| 1,00 | >= | 0,7 | Relação T/A | (SILVA, 2011) | ✓ |
| 4,60 | >= | 3 | Relação Hb/A | (JIMENO et al., 2003) | ✓ |
| 1,91 | >= | 0,7 | Uniformidade | (JIMENO et al., 2003) | ✓ |
| 2.203,89 | >= | 2.200,00 | Volume desejado | | ✓ |
| 0,30 | >= | 0,3 | Relação Subp/A | (JIMENO et al., 2003) | ✓ |
| 0,59 | >= | 0,40 | CONSUMO MINIMO | | ✓ |
| 1,50 | <= | 1,5 | Relação E/A | (HISTRULID, 1999) | ✓ |
| 1,00 | <= | 1 | Relação T/A | (SILVA, 2011) | ✓ |
| 1,91 | <= | 2,2 | Uniformidade | (JIMENO et al., 2003) | ✓ |
| 0,30 | <= | 0,5 | Relação Subp/A | (JIMENO et al., 2003) | ✓ |
| 800,00 | <= | 800,00 | Fragmentação | | ✓ |

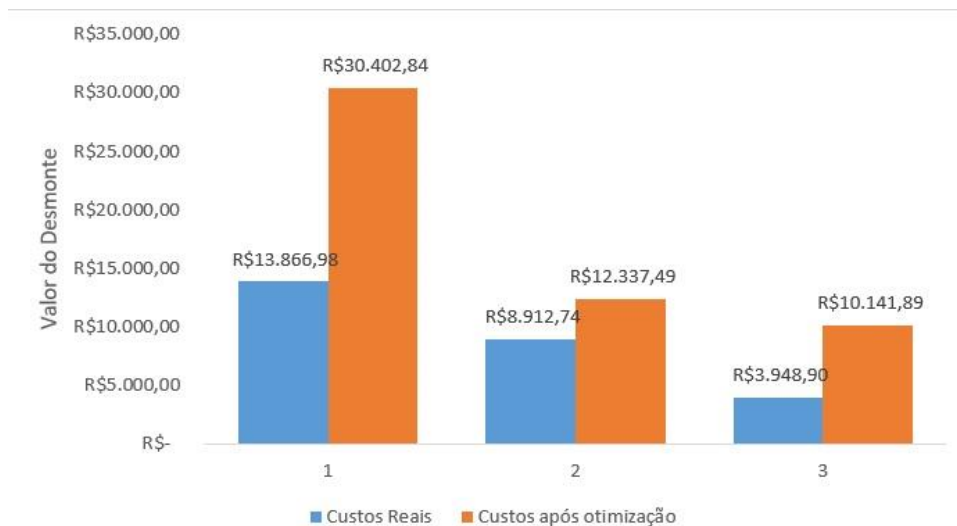
Fonte: *Print Screen* da aplicação *Microsoft Excel*

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados para a otimização dos custos para os três desmontes resultaram em um aumento significativo, conforme o comparativo do gráfico 8, dos custos, entre tanto a melhoria na fragmentação foi bastante superior e o resultado da otimização garante que 90 % do material atinja a granulometria exigida pela britagem primária, isso pode ser observado no gráfico 9.

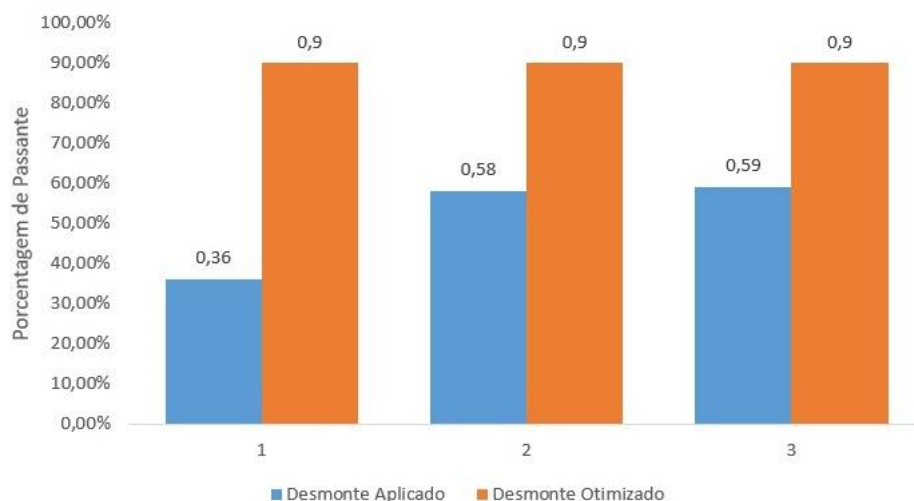
Com isso é possível garantir menos horas de trabalho com rompedor hidráulico e melhorias no transporte e britagem, tendo em vista que uma quantia maior do material já poderá ir diretamente para a britagem primária, conforme o gráfico 10, garantindo também que o britador não consuma uma maior quantidade de energia e aconteça um aumento significativo da produção, tendo em vista que boa parte do material já poderá ser transportado.

Gráfico 8. Comparativo de custos



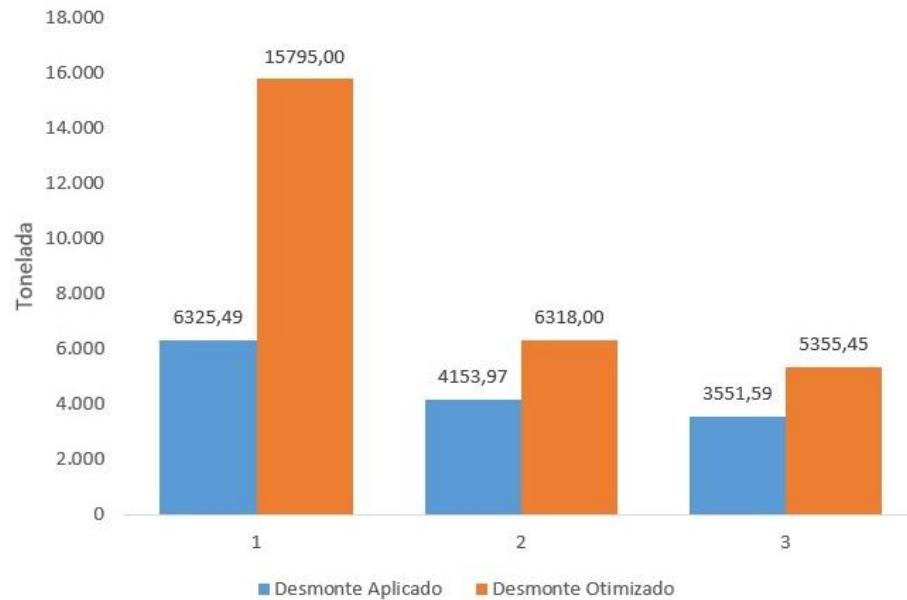
Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 9. Comparativo de passante



Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 10. Comparativo de quantidade de material melhor fragmentado



Fonte: Elaborado pelo autor.

Apesar de ter sido analisados três desmontes distintos em uma mesma mineradora não é possível garantir que as sugestões de malhas se adequem para todas as mineradoras. Porém é possível perceber que mesmo sendo aplicado no mesmo maciço rochoso nenhum dos três desmontes tiveram sugestões de malhas equivalentes, cada caso exige uma análise mais profunda para se saber como se deve empregar uma malhar que resulte em uma fragmentação de qualidade.

Para uma melhor avaliação dos custos seria necessário um tempo maior para a análise de gastos com transporte, carregamento e britagem primária, onde seria possível avaliar a verdadeira eficiência da otimização do desmorte e se o investimento maior no desmorte com explosivos implica em reduções significativas nos custos de outras etapas de lavra, porém devido ao tempo e disponibilidade da empresa não foi possível analisar tais dados, ficando assim como sugestão para trabalhos futuros.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Como citado anteriormente, é recomendado um estudo mais aprofundado dos custos relativos as operações de lavra, transporte, carregamento e britagem primária. Tendo em vista que os custos com fragmentação secundária resultaram em um aumento pouco significativo em comparação com os valores que seriam gastos para um desmonte otimizado, porém Lisboa (2011) afirma que a má fragmentação do material acarreta em um aumento significativo nos custos de carregamento, transporte e britagem primária.

Com isso, sugere-se que para os trabalhos futuros seja abordado os parâmetros citados, com o intuito de avaliar os verdadeiros impactos que a melhoria do desmonte podem causar, quando empregado de uma maneira mais eficiente, mesmo que os custos para tal operação aumentem.

Outra sugestão é a avaliação das causas dos erros de perfuração, principalmente de profundidade dos furos, onde é preciso verificar quais as causas mais pertinentes que levam a esses erros, sendo preciso verificar a fonte e as soluções para melhorar a perfuração dos furos.

O presente trabalho teve a colaboração de ferramentas de simulação de desmonte, análise granulométrica e otimização de processos. Isso demonstra que as evoluções na tecnologia colaboram de forma significativa para a melhoria e simulação de processos e que o estudo de Pesquisa Operacional é de grande aplicabilidade em diversas áreas da engenharia, onde colabora para a busca de respostas eficientes, algo primordial para mundo que vivemos, onde todos empreendimentos buscam melhorias e aumentos de produção juntamente com a redução de custos em todos os processos produtivos.

REFERÊNCIAS

- ALVARADO, Paulo César Fernández. **Estudio de Modelos de Fragmentación y su Mdedida Análisis Digital de Imágenes para Voladuras Superficiales**. 2013. 81 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Minas, Departamento de Ingeniería Química y Combustibles, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas, Madrid, 2013. Cap. 2.
- BHANDARI, Sushil. **Engineering Rock Blasting Operations**. Rotterdam: A.A. Balkema, 1997. 315 p.
- BRASIL. Thiers Muniz Lima. Departamento Nacional de Produção Mineral (Org.). **Sumário Mineral 2015**. 35. ed. Brasília: Dnrm, 2016. 135 p. Disponível em: <www.dnrm.gov.br>. Acesso em: 26 out. 2017.
- CUNNINGHAM, Claude. The kuz-ram model for prediction of fragmentation from blasting. In: FIRST INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ROCK FRAGMENTATION BY BLASTING, 1., 1983, Lulea, Sweden. **Symposium**. Johannesburg, South Africa: Aeci, 1983. p. 439 - 487.
- GODBERRY, Alan R. Poor Breakage: What Does it Really Cost. **International Journal Of Explosives Engineering**. Ohio, Eua, p. 23-29. jan. 1984.
- HILLIER, Frederick S.; LIEBERMAN, Gerald J.. **Introducción a la Investigación de Operaciones**. 5. ed. México, D.f: Interamericana Editores, S.a. de C.v, 2006. 736 p.
- HOLLANDA, G.. **Curso de Formação e Reciclagem de Blaster: Habilitação para uso de Explosivos**. [s.i]: G. Hollanda, [200-]. 81 p.
- HUSTRULID, William. **Blasting Principles For Open Pit Mining**. Golden: A.A. Balkema, 1999. 379 p.
- JIMENO, Dr. Carlos Lopez et al. **Manual de Perforacion y Voladura de Rocas**. Madri: Instituto Geologico y Minero de España, 2003. 439 p.
- MARINS, Fernando Augusto Silva. **Introdução à Pesquisa Operacional**. São Paulo: Pró-reitoria de Graduação, Universidade Estadual Paulista, 2011. 176 p.

MICROSOFT. **Definir e resolver um problema usando o Solver**. 2010. Disponível em: <<https://support.office.com/pt-br/article/Definir-e-resolver-um-problema-usando-o-Solver-9ed03c9f-7caf-4d99-bb6d-078f96d1652c>>. Acesso em: 30 maio 2017.

MIRANDA, V. G. et al (2017). A new Approach to 3D Modeling of Blast Free Faces. ISEE – International Society of Explosives Engineers. Florida

MOHANTY, B.; JOYCE, D.k.. Explosive Initiation Practice and Its Effect on Energy Release in Commercial Explosives. **International Society Of Explosives Engineers**, Cleveland, Oh (united States), v. 1, n. 7, p.295-301, 31 dez. 1994.

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

O-PITBLAST. **O-Pitblast: The Latest Blast Design & Optimization Platform**. 2017. Disponível em: <<http://www.o-pitblast.com/>>. Acesso em: 30 maio 2017.

PARAHYBA, Ricardo Eudes. **Economia Mineral do Brasil: Calcário Agrícola**. 2013. Elaborado pelo Departamento Nacional de Produção Mineral. Disponível em: <<http://www.dnpm.gov.br/dnpm/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/outras-publicacoes-1/7-1-2013-calcario-agricola>>. Acesso em: 26 out. 2017.

REIS, Pedro Alcides Santos. **Otimização de Parâmetros Geométricos em Diagramas de Fogo para Desmonte a Céu Aberto**. 2016. 64 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Minas e Geo-ambiente, Departamento de Engenharia de Minas, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2016. Cap. 2-3.

SANCHIDRIÁN, J.A.; MUÑIZ, E.. **Curso de Tecnologia do Explosivo**. Madrid: Fundacion Gomez Pardo, 2000. 545 p.

SHARMA, Partha das. **ROCK BREAKAGE AND BLAST DESIGN CONSIDERATIONS IN OPENPIT**. 2012. Disponível em: <<https://miningandblasting.wordpress.com/2012/10/12/rock-breakage-and-blast-design-considerations-in-openpit/>>. Acesso em: 11 mar. 2017.

SILVA, José Otávio da. Produto RT 55, **Perfil do calcário agrícola**. Ministério de Minas e Energia, J. Mendo Consultoria, Secretaria De Geologia, Mineração e Transformação Mineral, Banco Mundial: Projeto Estal, set. 2009.

SILVA, Valdir C. "Curso Min 210 – Operações Mineiras". Apostila de sala de aula. Engenharia de Minas. (Professor Valdir Costa e Silva) Escola de Minas da UFOP. Março. de 2009. Impresso.

SITE BLASTTRAINING.COM.AU. **Detonator**. 26/05/2017. Disponível em:

<<http://online.blasttraining.com.au/mod/glossary/print.php?id=40&mode=date&hook=&sortkey=CREATION&sortorder=desc&offset=-10>>. Acessado em: 07/05/2017

SPLITERNG. **Split-Desktop**. 2017. Disponível em:

<<https://www.spliteng.com/products/split-desktop-software/>>. Acesso em: 30 maio 2017.

TEIXEIRA, José Luís dos Santos. **Qualidade da Fragmentação no Desmonte de Rocha**: Análise Preliminar. 2010. 117 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Geotécnica e Geoambiente, Engenharia Geotécnica do Isep, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, 2010. Cap. 3.

UNION ESPAÑOLA DE EXPLOSIVOS (Madrid) (Ed.). **Manual de empleo de explosivos**. Madrid: Union Española de Explosivos, S.a. (uee), 1999. 197 p.

WIPWARE. **WipFrag**. 2016. Disponível em: <<http://wipware.com/wipfrag.php>>. Acesso em: 30 maio 2017.

ANEXO

ANEXO – 1 ESTRUTURA PARA OTIMIZAÇÃO

| TIPO | PARAMETRO | VALOR |
|------------------------------------|---|--------------|
| Geometria | A (fator de rocha) | 13,12 |
| | Altura da bancada (m) | 11,00 |
| Explosivos | RWS | 84,00 |
| | ANFO R\$/KG | 0,00 |
| | DENSIDADE Kg/m ³ | 0,00 |
| | ENCARTUCHADO R\$/KG | 7,20 |
| | DENSIDADE Kg/m ³ | 1.150,00 |
| | Nº DE BANANAS POR FURO | 11,00 |
| Acessorios | NPS R\$/m | 0,74 |
| | NP10 R\$/m | 0,98 |
| | Retardo R\$/Unidade | 12,66 |
| Produção | Volume desejado (m ³) | 2.200,00 |
| Fragmentação | Cons. Esp. (kg/m ³) mínimo | 0,40 |
| | Max X90 | 800,00 |
| Geometria | | |
| Parâmetros Geométricos | Número de furos | 83,00 |
| | Afastamento (m) | 1,60 |
| | Espaçamento (m) | 2,40 |
| | Tampão (m) | 1,60 |
| | Subperfuração (m) | 0,48 |
| | Altura da Bancada (m) | 6,90 |
| | Diâmetro do Furo (m) | 0,08 |
| Valores do Desmorte | | |
| Desmorte | Kg de Encartuchado por furo | 15,63 |
| | Kg de Anfo por furo | 0,00 |
| | Kg total de explosivos por furo | 15,63 |
| | Volume de rocha (m ³) | 26,55 |
| | Razão de carga Kg/m ³ | 0,59 |
| | Volume do furo (m ³) | 0,02 |
| | Volume de rocha total (m ³) | 2.203,89 |
| | Xmédio | 427,22 |
| | Uniformidade (n) | 1,91 |
| Altura da Carga (m) | 9,88 | |
| Custos | | |
| Custos do desmorte | Custo (cordel) | R\$ 142,23 |
| | Custo (iniciação) | R\$ 600,33 |
| | Custo (explosivos) | R\$ 9.340,35 |
| | Custo (acessórios) | R\$ 59,16 |
| Parâmetros de Restrições | | |
| Parâmetros, segundo a bibliografia | Espaçamento/Afastamento | 1,50 |
| | Tampão/Afastamento | 1,00 |
| | Subperfuração/Afastamento | 0,30 |
| | Passante em 90% | 800,00 |

| PARAMÉTROS DE RESTRIÇÕES | | | |
|--------------------------|----|----------|--------------------------------------|
| 1,50 | >= | 1 | Relação E/A (HUSTRULID, 1999) |
| 1,00 | >= | 0,7 | Relação T/A (SILVA, 2011) |
| 4,60 | >= | 3 | Relação Hb/A (JIMENO et al., 2003) |
| 1,91 | >= | 0,7 | Uniformidade (JIMENO et al., 2003) |
| 2.203,89 | >= | 2.200,00 | Volume desejado |
| 0,30 | >= | 0,3 | Relação Subp/A (JIMENO et al., 2003) |
| 0,59 | >= | 0,40 | CONSUMO MINIMO |
| 1,50 | <= | 1,5 | Relação E/A (HUSTRULID, 1999) |
| 1,00 | <= | 1 | Relação T/A (SILVA, 2011) |
| 1,91 | <= | 2,2 | Uniformidade (JIMENO et al., 2003) |
| 0,30 | <= | 0,5 | Relação Subp/A (JIMENO et al., 2003) |
| 800,00 | <= | 800,00 | Fragmentação |

| Otimização | |
|--------------------------|---------------|
| Obejetivo | 87,60 |
| Custo Total | R\$ 10.142,08 |
| Custo por m ³ | R\$ 4,60 |

Fonte: Elaborado pelo autor.