

Otimização de Parâmetros Geométricos em Diagramas de Fogo para Desmonte a Céu Aberto

Pedro Alcides Santos Reis

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA DE MINAS E GEO-AMBIENTE

Orientador: Professor Doutor Alexandre Júlio Machado Leite

Coorientador: Mestre Vinicius Gouveia de Miranda

Outubro de 2016

MESTRADO EM ENGENHARIA DE MINAS E GEO-AMBIENTE 2015/2016

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS

Tel. +351 225 081 986

+351 225 081 960

Fax +351 225 081 448

✉ minas@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351 225 081 400

Fax +351 225 081 440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>



O trabalho "Otimização de Parâmetros Geométricos em Diagramas de Fogo para Desmonte a Céu Aberto" de Pedro Alcides Santos Reis e Universidade do Porto está licenciado com uma Licença [Creative Commons - Atribuição-NãoComercial-Compartilhalgual 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

Without Engineers Science Is Just Philosophy.

Agradecimentos

Quero deixar os meus agradecimentos à direção do Departamento de Engenharia de Minas da Faculdade de Engenharia do Porto por aceitar a minha candidatura ao Mestrado.

Ao Professor Alexandre Leite, Orientador da presente dissertação, o meu sincero agradecimento por todo o seu trabalho e dedicação para que a entrega deste trabalho, que é a etapa final de um ciclo de estudos, fosse possível.

O meu agradecimento ao Coorientador Engenheiro Vinícius Miranda, por ter despendido do seu tempo para me ajudar em tudo o que eu precisasse para a realização do presente trabalho.

Deixo à Professora Aurora Futuro, ao Professor Mário Leite, ao Engenheiro Guedes, e ao Engenheiro João Fernandes, o meu agradecimento por a dada altura do meu percurso académico terem disponibilizado do seu tempo pós-laboral para me darem a devida orientação.

Aos meus Pais, amigos, colegas, namorada, às pessoas que acreditaram, e acima de tudo às que não acreditaram, o meu muito obrigado.

Resumo

A presente dissertação aborda possíveis otimizações que poderão ser efetuadas durante o planejamento do diagrama de fogo no desmonte a céu aberto.

As fases de perfuração, detonação, carga, transporte, e processo de britagem, conhecidas pelo termo inglês “*mine to mill*”, têm um custo associado em função da granulometria obtida no desmonte. Após a análise de estudos de caso, verificou-se que um investimento na fase de desmonte para incremento do grau granulométrico, reduzia consideravelmente o custo global do projeto.

Existindo a possibilidade de adotar modelos matemáticos que prevejam o volume e granulometria gerados pelo desmonte, a presente dissertação ilustra a construção de um modelo matemático a partir da ferramenta da *Microsoft Excel Solver*, que em função do volume, granulometria pretendida, e velocidade de vibração máxima (PPV), gera a melhor geometria do diagrama de fogo a adotar com o menor custo associado.

PALAVRAS-CHAVE: Céu-Aberto, Custo/Benefício, Desmonte, Diagrama de Fogo, Explosivos, Mine to Mill, Otimização, PPV.

Abstract

The following dissertation discusses possible optimizations that can be made during the fire diagram plan on open-pit blasting.

Drilling, Blasting, Loading, Hauling, and Communication process, are the phases of the “mine to mil” process which have an associated cost with the fragmentation degree desired after the blasting. Through cases of study, it was found that the investment in the detonation phase to increase the grain size degree, significantly reduces the overall cost of the project.

With the possibility of adopting mathematical models that provide the volume and particle size generated by the rock blasting process, this dissertation illustrates the construction of a mathematical model using Microsoft *Excel Solver add-in*, that due to the volume and desired particle size, and Peak Particule Velocity (PPV), generates the optimal geometry of the fire diagram to adopt with the lowest associated cost.

KEYWORDS: Open-Pit, Cost/Benefit, Blasting, Fire Diagram, Explosives, Mine to Mill, Optimization, PPV.

Índice

Agradecimentos	i
Resumo	iii
Abstract	v
Índice de Figuras	ix
Índice de Tabelas	xi
Glossário de Siglas e Acrónimos	xiii
1 Introdução	1
1.1 Enquadramento do Problema e Metodologia Proposta	2
2 Desmonte	5
2.1 A Rotura da Rocha.....	6
2.2 Propriedades dos Explosivos	8
2.2.1 A Energia do Explosivo	8
2.3 Planeamento do Diagrama de Fogo.....	11
2.3.1 Afastamento (B)	12
2.3.2 Espaçamento (S).....	13
2.3.3 Subperfuração (J)	13
2.3.4 Tamponamento (T).....	15
2.3.5 Rácio entre variáveis	15
2.4 Sistemas de Iniciação da Detonação	16
2.4.1 Detonadores Eléctricos	17
2.4.2 Detonadores não Eléctricos	19
2.4.3 Detonadores Electrónicos.....	20
3 Fragmentação	21
3.1 Modelo Kuz-Ram	23
3.1.1 Equação de Kuznetsov:	23
3.1.2 Equação de Rosin-Rammler:	24
3.1.3 Equação de Uniformidade:.....	24
3.1.4 Rock Factor	25
4 Modelação Matemática	29
4.1 Linearidade e não Linearidade	29
4.2 Ferramenta <i>Excel Solver</i>	32
5 Construção do Modelo	35
5.1 Função Objectivo	35
5.2 Limitações Impostas.....	37

5.3	Restrições impostas.....	37
5.3.1	Restrições do Diagrama de Fogo.....	38
5.3.2	Restrições Granulométricas	38
5.3.3	Velocidade Máxima de Vibração (PPV)	38
5.4	Variáveis de Decisão.....	41
5.5	Parâmetros In-Situ Necessários	43
5.6	Modelo Gerado	43
5.7	Exemplo Ilustrativo.....	45
5.7.1	Objetivo do desmonte.....	45
5.7.2	Limitações Impostas	45
5.7.3	Parâmetros In-Situ.....	45
5.7.4	Distância a Infraestruturas	45
5.7.5	Seleção do Explosivo	46
5.7.6	Tabela de Preços	46
5.7.7	Resultados	46
6	Avaliação Económica	49
6.1	Desmonte 1 - Resultados Reais Fornecidos	50
6.1.1	Desmonte 1 - Resultados Estimados com Modelo criado.....	51
6.1.2	Desmonte 1 – Comparação de Resultados	52
6.2	Desmonte 2 - Resultados Reais Fornecidos	53
6.2.1	Desmonte 2 - Resultados Estimados com Modelo criado.....	54
6.2.2	Desmonte 2 – Comparação de Resultados	55
6.3	Desmonte 3 - Resultados Reais Fornecidos	56
6.3.1	Desmonte 3 - Resultados Estimados com Modelo criado.....	57
6.3.2	Desmonte 3 – Comparação de Resultados	58
6.4	Discussão dos Resultados.....	59
7	Conclusão	61
7.1	Perspetivas Futuras	62
8	Bibliografia	63
8.1	Links Consultados.....	64
	ANEXOS	I
	ANEXO A – Vibração e Granulometria estimada do Exemplo de Aplicação	III

Índice de Figuras

Figura 1 - Relação entre o custo e o incremento do grau granulométrico em cada fase do processo de "mine to mill"	1
Figura 2 - Diferença de Custos associados ao incremento do grau granulométrico	2
Figura 3 - Propagação das ondas de choque e expansão de gases.....	5
Figura 4 - Reflexão da onda de choque e formação de fraturas tangenciais	6
Figura 5 - Efeito da expansibilidade dos gases.....	7
Figura 6 - Diversas fases de fragmentação da Rocha.....	7
Figura 7 - Influência da distribuição de NA e FO na Velocidade de Detonação.....	9
Figura 8 - Influência do Diâmetro do furo na Velocidade de Detonação	9
Figura 9 - Diferentes curvas de P-V em dois explosivos com a mesma energia	10
Figura 10 - Exemplo das características técnicas de um explosivo.....	11
Figura 11 - Representação geométrica das variáveis controláveis do desmonte.....	12
Figura 12 - Área fragmentada por furo	13
Figura 13 - Importância da subperfuração para o desmonte do material na base da frente de desmonte	14
Figura 14 - Relação Inclinação do furo com a Subperfuração	14
Figura 15 - Propagação da onda de Choque na parte inferior do maciço	15
Figura 16 - Esquema Ilustrativo de Influencia entre as Variáveis Geométricas do Diagrama de Fogo.....	16
Figura 17 - Riscos de uma má sequenciação entre linhas	17
Figura 18 - Planeamento do sequenciamento de detonação	20
Figura 19 - Imagem ilustrativa da geração de blocos pós desmonte com granulometria superior à boca de alimentação do britador	21
Figura 20 - Consequências da geração de granulometrias indesejadas	22
Figura 21 - Comparação da curva granulométrica prevista pelo modelo Kuz-Ram com a Analise Granulométrica por Imagem.....	23
Figura 22 - Relação entre Espaçamento das Descontinuidades e Espaçamento entre Furos	27
Figura 23 - Modelo de Origem Linear	31
Figura 24 - Modelo de Origem Não Linear.....	31
Figura 25 - Otimização Linear obtida com a ferramenta Solver	32
Figura 26 - Otimização Não Linear obtida com a ferramenta Solver.....	33
Figura 27 - Diferença entre Pontos Localmente Ótimos e Globalmente Ótimos	34
Figura 28 - Exemplo de uma Curva Granulométrica originada através de parâmetros pré-definidos.....	36
Figura 29 - Modo de Verificação das Restrições Impostas	37
Figura 30 - PPV em função da Distância Escalada por diferentes modelos matemáticos.....	40
Figura 31 - Modo como as Variáveis de Decisão estão relacionadas	42
Figura 32 - Diagrama Ilustrativo do Funcionamento do Modelo Criado	44
Figura 33 - Parâmetros Obtidos que obedecendo a suas restrições permitem obter o menor custo de desmonte.....	47
Figura 34 - Dados Reais Fornecidos - Desmonte 1.....	50
Figura 35 - Resultados do Desmonte 1 com o Modelo Criado	51
Figura 36 - Comparação das Curvas Granulométrica Pós Desmonte 1	52
Figura 37 - Dados Reais Fornecidos - Desmonte 2.....	53
Figura 38 - Resultados do Desmonte 2 com o Modelo Criado	54

Figura 39 - Comparação das Curvas Granulométrica Pós Desmorte 2	55
Figura 40 - Dados Reais Fornecidos - Desmorte 3.....	56
Figura 41 - Resultados do Desmorte 3 com o Modelo Criado	57
Figura 42 - Comparação das Curvas Granulométrica Pós Desmorte 3	58
Figura 43 - Comparação Percentual Granulométrica - Desmorte 1.....	59
Figura 44 - Comparação Percentual Granulométrica - Desmorte 2.....	60
Figura 45 - Comparação Percentual Granulométrica - Desmorte 3.....	60

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Rácios a ser obedecidos na geometria do diagrama de fogo	15
Tabela 2 - Características Elétricas dos Detonadores Elétricos	18
Tabela 3 - Distancia de Segurança consoante proximidade de Radiotelefonos com determinada potencia.....	19
Tabela 4 - Distancia de Segurança consoante proximidade de Fontes Emissoras de Radiofrequências.....	19
Tabela 5 - Classificação de Lilly	26
Tabela 6 - Dados para o Problema	30
Tabela 7 -Objetivo Do Desmonte a preencher	35
Tabela 8 - Tabela de Preços	37
Tabela 9 - Limitações Impostas pela Entidade.....	37
Tabela 10 - Verificação da Satisfação das Restrições Do Diagrama de Fogo.....	38
Tabela 11 - Verificação da Satisfação das Restrições Granulométricas.....	38
Tabela 12 - Valores limite recomendados para a velocidade de vibração	39
Tabela 13 - Distância a Estruturas Consoante seu Tipo.....	40
Tabela 14 - Carga Máxima Permitida por Furo consoante distância a Estruturas.....	41
Tabela 15 - Escolha do melhor explosivo a usar consoante sua Densidade e RWS.....	42
Tabela 16 - Parâmetros In-Situ Necessários	43
Tabela 17 - Comparação da Geometria do Diagrama de Fogo Real com a Obtida com o Modelo Criado - Desmonte 1.....	52
Tabela 18 - Comparação de Custos - Desmonte 1	52
Tabela 19 - Comparação da Geometria do Diagrama de Fogo Real com a Obtida com o Modelo Criado - Modelo 2.....	55
Tabela 20 - Comparação de Custos - Desmonte 2	55
Tabela 21 - Comparação da Geometria do Diagrama de Fogo Real com a Obtida com o Modelo Criado - Modelo 3.....	58
Tabela 22 - Comparação de Custos - Desmonte 3	58

Glossário de Siglas e Acrónimos

ANFO	Nitrato De Amónio E Combustível
Ar	Área Desmontada Por Furo
BBL	Carga De Fundo
BI	<i>Blastability Index</i>
CCL	Carga De Coluna
K_B	Constante De Afastamento À Frente Livre
NP	Norma Portuguesa
∅	Diâmetro
P_{DET}	Pressão De Detonação
Q_{max}	Massa Máxima De Explosivos Permitida Por Furo
REDOX	Ação De Reação Redução
RWS	<i>Relative Weight Strenght</i>
UCS	Força À Compressão Uniaxial
VOD	Velocidade De Detonação
Xc	Tamanho Do Grão Característico
Xm	Tamanho Do Grão Médio
ρ	Densidade
pe	Pressão De Explosão

1 Introdução

O desmorte de rocha a céu aberto com recurso a explosivos é um método mundialmente utilizado por empresas vocacionadas para o desmorte. Com o intuito de obter um produto final com determinada granulometria tendo em vista a sua comercialização, torna-se necessário efetuar um plano de lavra que consiga conciliar o volume de material pretendido por pega de fogo com a capacidade do sistema de carga e transporte e com as limitações granulométricas associadas à central de britagem. Todo este processo é conhecido pelo termo inglês “*mine to mill*”.

Num artigo publicado por Seccatore *et al* (2009) é possível observar um estudo efetuado por McKenzie (1967) no que concerne ao custo associado a cada fase do processo de “*mine to mil*” em função do incremento do grau granulométrico pretendido pós desmorte, estando este representado na figura 1.

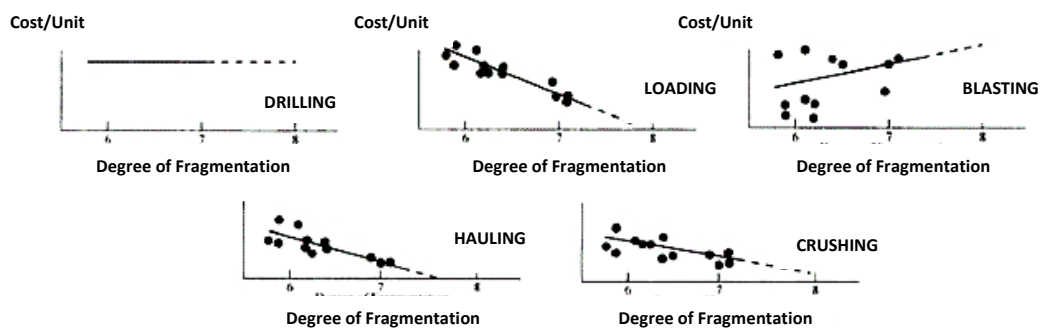


Figura 1 - Relação entre o custo e o incremento do grau granulométrico em cada fase do processo de “*mine to mill*” (Seccatore *et al* (2009))

A partir dos gráficos representados, é possível verificar que o custo associado ao processo de perfuração não sofre alterações visíveis pelo incremento do grau granulométrico, sendo o custo do processo de detonação o único que aumenta pelo incremento da granulometria gerada pelo desmorte. Esta análise é comprovada num caso de estudo efetuado por Strelec *et al* (2011) onde se tem os custos associados aos vários processos do “*mine to mil*” de dois desmorte. No primeiro desmorte, 60% do material fragmentado é inferior 40cm, enquanto que no segundo desmorte 80% do material é inferior a 40cm. Os resultados deste estudo encontram-se expressos na figura 2.

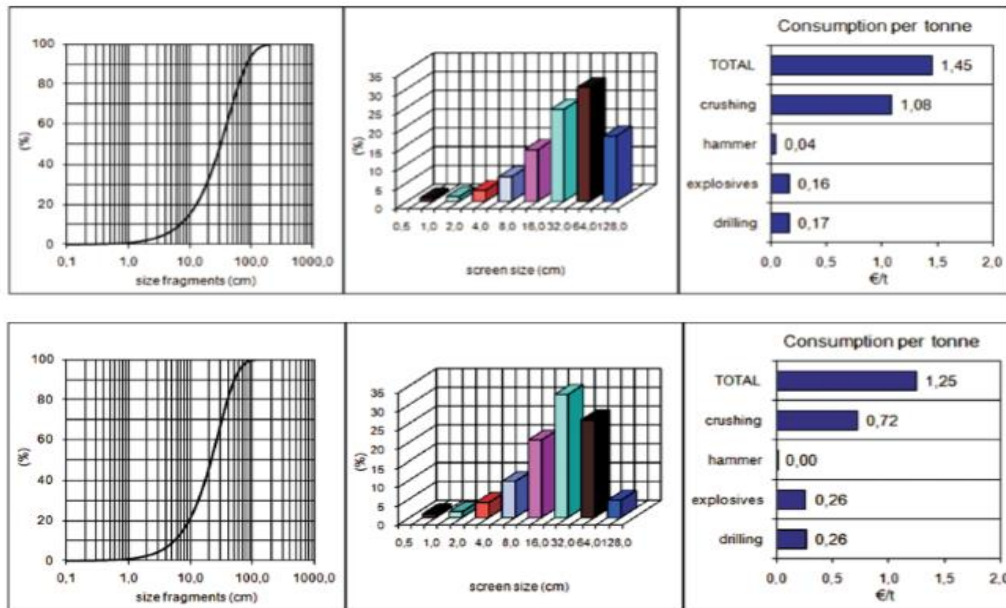


Figura 2 - Diferença de Custos associados ao incremento do grau granulométrico – Adotado de Strelec et al (2011)

Aqui verifica-se que os custos associados ao processo de britagem são os mais dispendiosos de todo o processo de “mine to mill”, pelo que deverá ser estabelecida uma granulometria pretendida pós desmorte de modo a poder otimizar o processo a nível global ao qual se deve ter atenção à obtenção de finos. Yermakov (2013) refere que granulometrias < 12mm sobrecarregam o processo de britagem e que, se este for devidamente controlado, pode gerar otimizações de 30% no circuito de britagem.

1.1 Enquadramento do Problema e Metodologia Proposta

Atendendo a que um correto investimento no processo de desmorte de rocha com recurso a explosivos poderá reduzir o custo total do processo de “mine to mill”, e que é essencial prever a granulometria obtida pós desmorte para que o projeto seja viável, a presente dissertação consiste na criação de um modelo matemático a partir do software *Microsoft Excel*, recorrendo à sua ferramenta *Solver*, o qual visando a minimização de custos associados a esta fase de projeto, permita alterar as variáveis geométricas do diagrama de fogo em função do volume e granulometria pretendidos pós desmorte. Este modelo efetua também a escolha do melhor explosivo a utilizar, tendo em consideração a vibração máxima permitida de acordo com a Norma Portuguesa 2074:2015.

Na presente dissertação, será ilustrado o funcionamento do modelo matemático criado, culminando com comparação de custos associados a desmontes reais.

2 Desmorte

Ao promover o desmorte de rocha recorrendo a um explosivo é importante perceber o modo como este interage com material constituinte do maciço rochoso para poder tirar o máximo partido da energia libertada durante a detonação e obter o volume e fragmentação desejada. A qualidade do desmorte com recurso a explosivos depende essencialmente do diagrama de fogo estabelecido, da quantidade de explosivo usada em cada furo, bem como das propriedades da rocha (densidade, características e distribuição das descontinuidades, e ainda do posicionamento espacial das frentes livres) (Sanchidrian *et al*, 2000).

Pode causar-se a fragmentação da rocha ao criar novas fraturas com a detonação, ou causar o aparecimento de novas fraturas que se juntam às já pré-existentes no maciço, sendo estas obtidas em duas fases distintas, as quais Silva (2005) distingue por Fase Dinâmica, correspondendo à propagação das ondas de choque no maciço rochoso, e Fase Quasi-Estática, a qual se refere à expansão de gases no interior do maciço através das fraturas. Na figura 3, abaixo representada, é ilustrada a formação de ondas de choque causadas pela detonação do explosivo originando as conseqüentes forças à compressão e à tração, bem como a formação de novas fraturas provocadas pela expansão de gases (Sharma, 2012)[1].

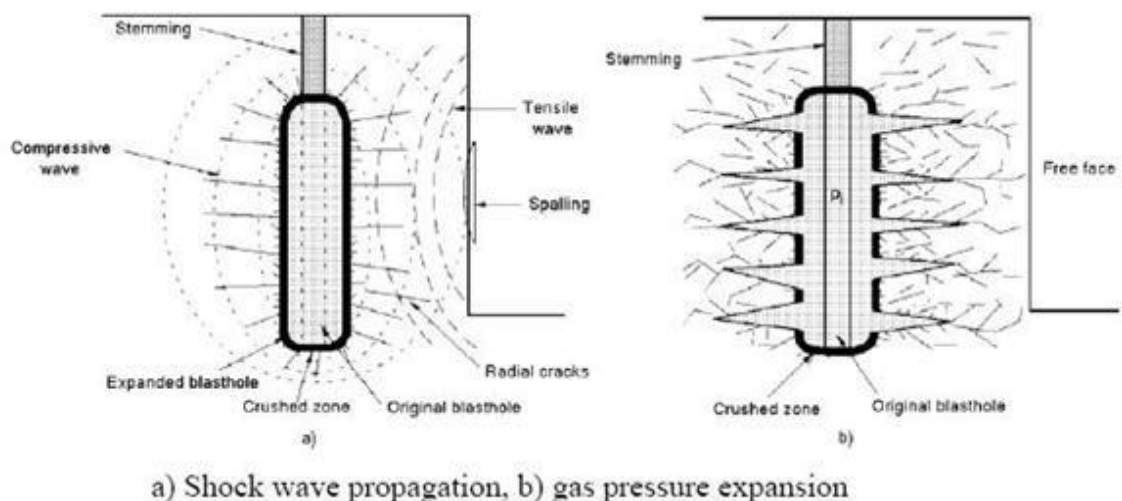


Figura 3 - Propagação das ondas de choque e expansão de gases (Sharma, 2012[1])

2.1 A Rotura da Rocha

Segundo Sanchidrian *et al* (2000), as rochas têm uma resistência à compressão 5 a 10 vezes superior à sua resistência à tração, sendo esta variável de acordo com planos de fraturas e diaclases. Quando a onda de choque atinge a parede do furo, a resistência à compressão da rocha próxima é excedida causando assim a dilatação do furo e a pulverização do material na sua envolvente. Assim que a onda atinge o maciço, a velocidade de propagação depende da velocidade acústica do próprio, iniciando-se a fragmentação quando a onda de choque é refletida na frente livre causando um efeito de tração ao qual a rocha tem menos resistência.

A existência de descontinuidades na rocha tem consequências na propagação da onda de choque, uma vez que se estas forem paralelas à parede do furo atuam como frentes livres, refletindo-a, atua em tensão, e conseqüentemente causa uma fragmentação intensa nas proximidades do furo, o que limita a formação de grandes fraturas (Jimeno *et al*, 2003).

A figura 4 ilustra a reflexão da onda de choque na frente livre (f), onde em **a)** esta atinge a frente livre, **b)** a onda é refletida e atua à tração, **c)** a força à tração supera a resistência da rocha e origina a primeira fratura tangencial (1) que irá funcionar como frente livre e causar novas fraturas (f1, f2, f3), e em **d)** a onda de choque já não tem energia suficiente para romper a rocha, dando assim por acabada a Fase Dinâmica (Silva, 2005).

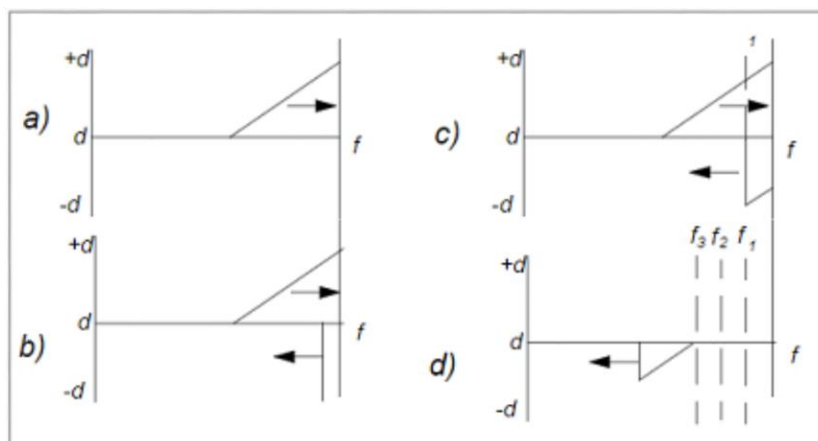


Figura 4 - Reflexão da onda de choque e formação de fraturas tangenciais (Silva, 2005)

Terminada a Fase Dinâmica, inicia-se a Fase Quasi-Estática na qual a pressão exercida pelos gases libertados pelo explosivo cria, alarga, e separa quer as descontinuidades pré-existentes no maciço, quer as criadas com a propagação da onda de choque durante a

Fase Dinâmica (Vázquez, 2011). A figura 5 mostra a pressão exercida pelos gases, onde é possível verificar a direção da sua propagação tendo como consequência a separação do material.

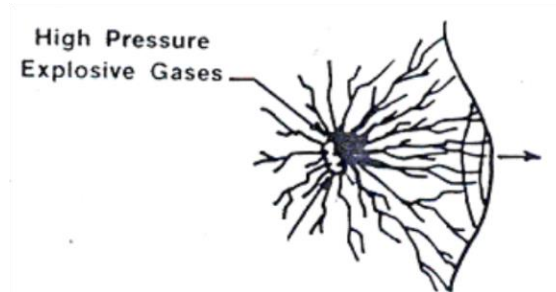


Figura 5 - Efeito da expansibilidade dos gases [1]

A figura 6 mostra uma síntese das fases da rotura da rocha, onde em:

- a) Se representa um furo que irá ser detonado;
- b) A Detonação do explosivo provoca a dilatação do furo, dando início ao fraturamento da zona envolvente;
- c) A Onda de Choque provocada pela detonação do explosivo é propagada radialmente à compressão, e alarga algumas fissuras provocadas pela etapa anterior;
- d) A Onda de Choque atinge a frente Livre, sendo refletida de volta como onda de tração, e origina planos de fratura normais em relação à direção de propagação da onda;
- e) Uma vez fissurada, a rocha sofre a ação da propagação dos gases libertados pela detonação do explosivo, alargando a rede de fraturas, e direcionando o material fragmentado em direção à frente livre.

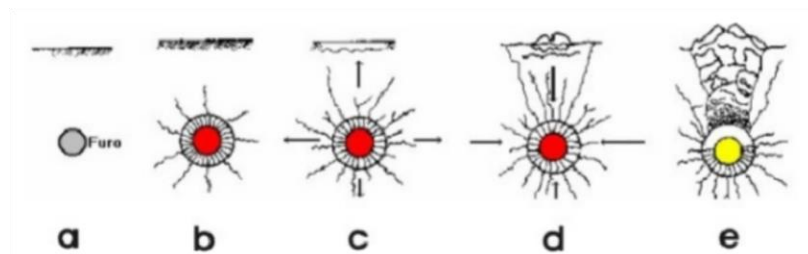


Figura 6 - Diversas fases de fragmentação da Rocha (Mendes)

Uma vez compreendida a forma como se desenrola o desmonte de rocha com recurso a explosivos, cabe ao responsável fazer o planeamento de todo o procedimento para que o desmonte ocorra de acordo com o desejável. Este planeamento envolve a escolha

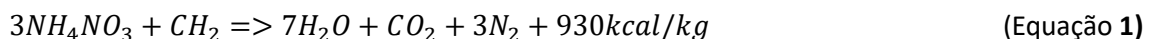
dos explosivos, o diagrama de fogo a adotar, bem como o sistema de detonação e iniciação, sendo estes os próximos temas abordados dentro do presente capítulo.

2.2 Propriedades dos Explosivos

Na escolha de um explosivo, o seu preço será um dos parâmetros a considerar quando se procura a melhoria da produtividade do processo de desmonte. Porém, há que ter em conta a eficiência energética do explosivo tendo em vista os requisitos definidos para o material desmontado, quer quanto à sua granulometria quer sobre o modo como esse material se dispersa. Assim, numa primeira abordagem, deve-se efetuar uma análise de eficiência energética do explosivo com o seu custo.

2.2.1 A Energia do Explosivo

Uma detonação é uma reação química do tipo oxidação/redução (redox) que acontece num intervalo de tempo muito curto e que tem como resultado a produção de gases a alta temperatura. Habitualmente, é usada a combinação de nitrato de amónio (AN) com combustível (FO). Apesar de ambos não serem isoladamente compostos explosivos, em determinadas condições a sua mistura pode ser usada para causar uma detonação (Hustrulid *et al*, 1999 p62).



De acordo com Bhandari (1997) a equação 1 ilustra um balanço perfeito de oxigénio. Por excesso ou carência de AN, aquele balanço de oxigénio poderá não existir, o que fará ocorrer uma reação química que emitirá gases tóxicos para a atmosfera.

Cada marca de produtos explosivos apresenta uma gama de produtos que diferem entre si quanto à sua potencia relativa (%), densidade (g/cm^3), velocidade de detonação (m/s), calor da explosão (cal/g) e outras características, sendo todas estes parâmetros tabelados nos catálogos de cada empresa produtora. Não obstante, existem relações que podem ser estabelecidas de modo a poder tirar proveito do explosivo a utilizar, por exemplo, as quantidades percentuais distribuídas de nitrato de amónio e combustível têm influência na velocidade com que a onda de choque atravessa o explosivo, sendo esta velocidade conhecida como velocidade de detonação (VOD), na energia gerada,

assim como o diâmetro de carga terá influencia na velocidade de detonação conforme ilustrado nas figuras 7 e 8 abaixo representadas (Jimeno et al, 2003).

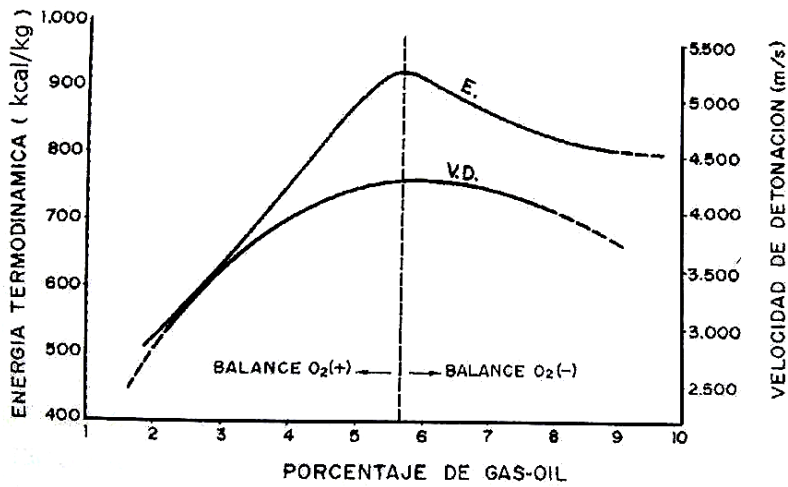


Figura 7 - Influência da distribuição de NA e FO na Velocidade de Detonação (Jimeno, 2003)

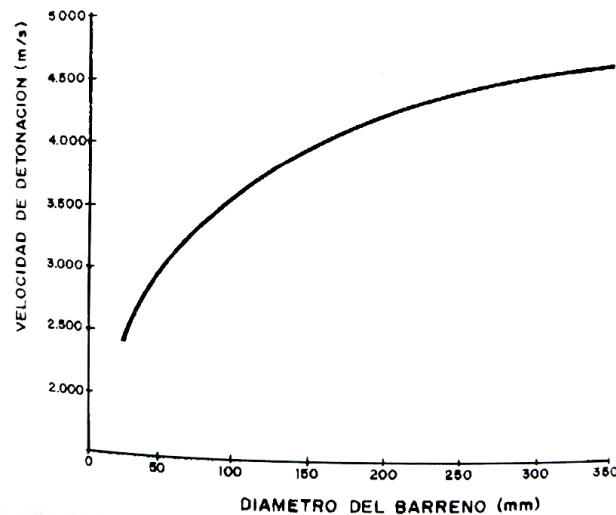


Figura 8 - Influência do Diâmetro do furo na Velocidade de Detonação (Jimeno, 2003)

Uma vez iniciada a detonação, a progressão da reação é feita ao longo do furo com uma velocidade igual à sua velocidade de detonação (VOD), tendo uma pressão de gases inicial (PDET) que diminui de acordo com o volume, originando assim as denominadas curvas de Pressão-Volume (Hustrulid *et al*, 1999 p63).

A Pressão de Detonação pode ser expressa da seguinte forma:

$$P_{DET}(atm) = 2.5\rho e(VOD)^2 \quad (\text{Equação 2})$$

Nesta equação, ρ_e representa a densidade do explosivo em kg/m^3 .

Estabelecida esta relação, pode-se construir uma outra que dá a pressão da explosão (P_e) que se exerce na parede do furo no momento da detonação, sendo esta aproximadamente metade de P_{DET} conforme ilustra a equação 3.

$$P_e \cong \frac{1}{2} P_{DET} \quad (\text{Equação 3})$$

No desmorte com recurso a explosivos, a energia libertada deve criar novas fraturas e estender as previamente existentes no maciço sem que haja efeitos secundários indesejados. Assim, a figura 9 representa um bom exemplo de como a energia pode ser otimizada permitindo a escolha do tipo de explosivo de acordo com as propriedades da rocha. Se esta já se encontrar naturalmente fraturada, interessa escolher um explosivo que tenha maior libertação de gases para que estes se estendam ao longo das fraturas existentes causando a sua fragmentação (Explosivo B). Para a situação oposta, se a rocha se encontrar muito coesa, optar-se-á por um tipo de explosivo que tenha uma maior Pressão de explosão (Hustrulid *et al*, 1999).

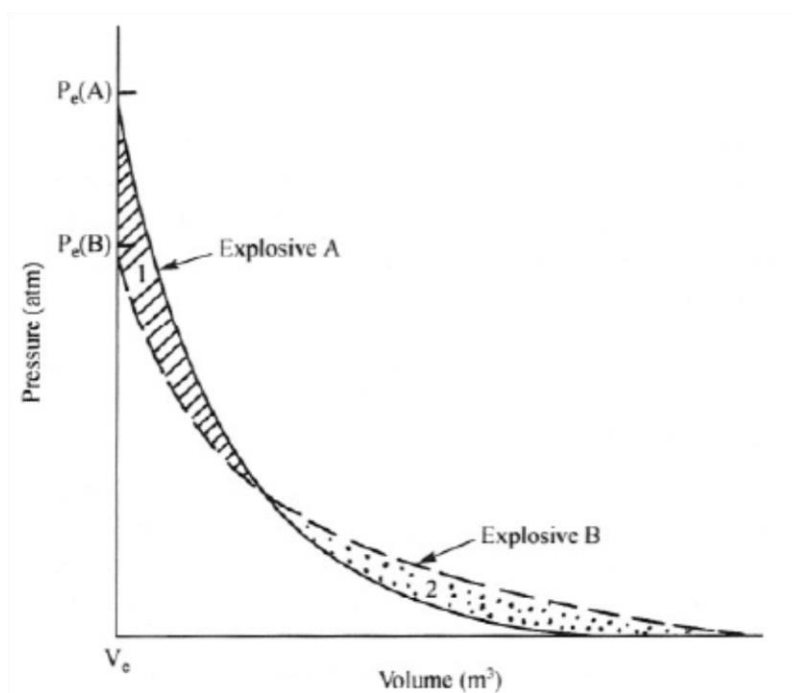


Figura 9 - Diferentes curvas de P-V em dois explosivos com a mesma energia (Hustrulid, 1999)

As propriedades dos explosivos, sejam a velocidade de detonação, densidade, volume de gases, resistência de água, pressão de detonação e calor de explosão encontram-se

tabeladas conforme se ilustra no exemplo da figura 10, onde se encontra as propriedades de um explosivo fabricado pela empresa Maxam.

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS		
	UNIDAD	VALOR
Densidad	g/cm3	1.2
Velocidad de detonación*	m/s	5000
Calor de explosión**	KJ/kg	4,165
Presión de detonación**	Kbar	120
Volumen de gases**	l/kg	918
Categoría de humos		1ra.
Resistencia al agua		Excelente

Figura 10 - Exemplo das características técnicas de um explosivo (Maxam, 2011)

A partir do calor da explosão é possível calcular o *RWS* (Relative Weight Strenght) do explosivo ao relaciona-lo com o calor da explosão de um explosivo do tipo ANFO que de acordo com Hustrulid (1999) é de 930 calorias/grama, ou 3894 Quilojoule/Quilograma conforme ilustrado na equação 4.

$$RWS = \frac{AWS_x}{AWS_{ANFO}} \times 100 \quad \text{(Equação 4)}$$

2.3 Planeamento do Diagrama de Fogo

Ao efetuar o planeamento do diagrama de fogo há que adaptar as variáveis que podem ser controladas às não controláveis, de modo a obter o produto pretendido com a melhor relação Preço/Eficácia.

Apesar de autores como Jimeno (2003) e Hustrulid (1999) considerarem que as variáveis não controláveis são a presença de água, a geologia e consequentes propriedades mecânicas do maciço, é habitual que a empresa fornecedora dos explosivos para a realização dos desmontes não seja a empresa que promove a perfuração, pelo que tanto o diâmetro do furo como a altura da bancada (H), que são parâmetros de importância no que concerne ao planeamento do diagrama de fogo, serão considerados parâmetros não controláveis aquando do planeamento do diagrama de fogo.

A figura 11 mostra um esquema das variáveis geométricas que podem ser manipuladas de acordo as exigências, sendo estas a altura de Bancada (H), afastamento (B), espaçamento (S), comprimento do furo (L), subperfuração (J), tamponamento (T) e diâmetro do furo (D). Naturalmente que a altura de bancada e o diâmetro de perfuração se encontram limitados pelo equipamento de perfuração disponível.

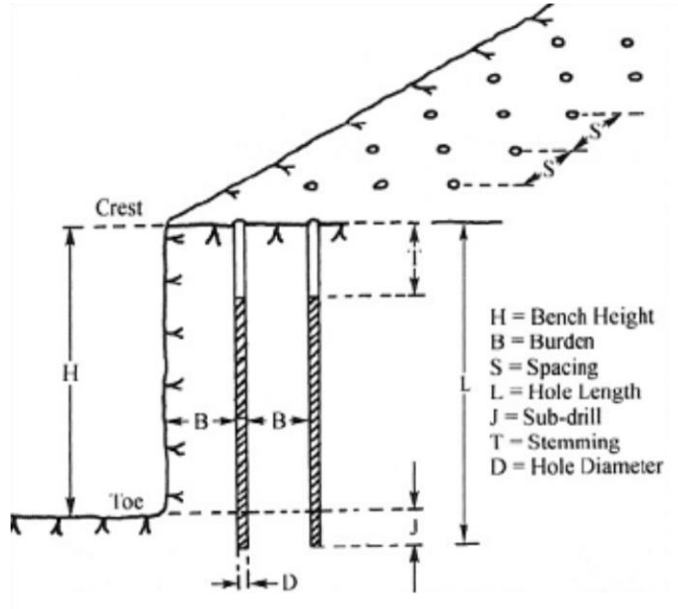


Figura 11 - Representação geométrica das variáveis controláveis do desmonte (Hustrulid, 1999)

2.3.1 Afastamento (B)

O afastamento é uma unidade de medida em metros que representa a distancia da boca do furo até frente livre e é o parâmetro mais crucial na geometria da pega de fogo (Bhandari, 1997). O cálculo do afastamento pode ser efetuado de diversas formas, mas diversos estudos de caracter empírico apontam para uma relação direta com o diâmetro do furo (mm) que terá implicações na carga explosiva por furo uma vez que quanto maior for o diâmetro maior será a carga explosiva por furo, e maior terá de ser o afastamento. Assim, Hustrulid (1999) sugere a seguinte relação entre Afastamento (B) e Diâmetro (D) representada pela equação 5.

$$B = K_B D \quad \text{(Equação 5)}$$

Onde K_B será um parâmetro calculado com base nas propriedades dos explosivos a utilizar expresso pela seguinte equação:

$$K_B = 25 \sqrt{\frac{\rho \times RWS}{0.8 \times 100}} \quad (\text{Equação 5.1})$$

Em que ρ representa a densidade do explosivo a utilizar em g/cm^3 , e RWS é obtido através da equação 4.

2.3.2 Espaçamento (S)

O espaçamento diz respeito à distancia longitudinal entre furos, à qual tem uma relação direta com o afastamento (B). Segundo Hustrulid (1999), a cada furo deverá estar associada uma área em planta denominada A_R (Equação 6) como se representa na figura 12, correlacionável com o material a desmontar por influencia da detonação do explosivo no respetivo furo.

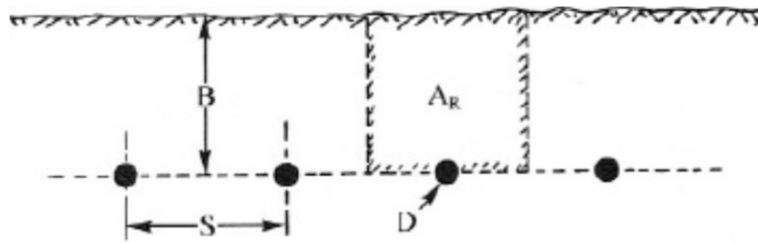


Figura 12 - Área fragmentada por furo (Hustrulid, 1999)

$$A_r = B \times S \quad (\text{Equação 6})$$

Autores como Bhandari (1997) e Hustrulid (1999) referem que o espaçamento deverá variar de acordo com o diâmetro e afastamento à frente livre. Tendo obtido o parâmetro de afastamento em função do diâmetro de carga e respetivas propriedades dos explosivos a detonar, bastará relacionar o espaçamento com o afastamento e estabelecer um intervalo de valores em que o seu rácio possa variar de modo a poder obter a obedecer a esta condição. Verifica-se que há um consenso entre Bhadari (1997), Hustrulid (1999) e Jimeno (2003) que o rácio entre espaçamento e afastamento deva obedecer ao rácio estabelecido pela equação 7.

$$1 \leq \frac{S}{B} \leq 1.5 \quad (\text{Equação 7})$$

2.3.3 Subperfuração (J)

A subperfuração é a distancia que é perfurada abaixo do nível até onde se pretende realizar o desmonte, e é feita de modo que o material que está na base da frente de

desmonte possa ser extraído de modo eficaz, dado o seu maior confinamento devido ao seu maior afastamento da frente livre conforme ilustrado na figura 13. Sánchez *et al* (2007) referem que o valor universal para a Subperfuração é de $0.3B$, e em Jimeno *et al* (2003) é referido que este valor pode ir até $0.5B$. Admite-se assim, que este valor pode variar entre $0.3B$ e $0.5B$.

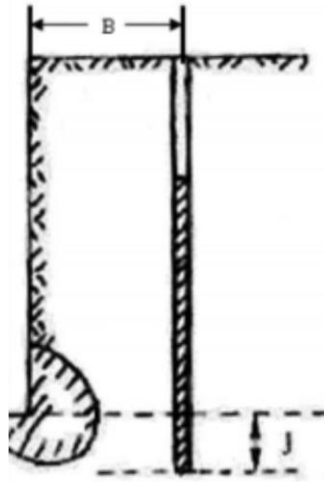


Figura 13 - Importância da subperfuração para o desmonte do material na base da frente de desmonte (Sánchez, 2007)

Jimeno *et al* (2003) fazem uma relação entre a inclinação do furo e a subperfuração de acordo com o Afastamento que é representado pela figura 14. Tal fato parece evidente, mas torna-se mais fácil de perceber a sua importância ao analisar-se a figura 15. Nela é explicita a geometria da propagação da onda de choque, em função da inclinação da frente livre. Um aumento da inclinação da frente livre aumenta a onda refletida, aumentando o efeito desta no sucesso do arranque do material da base do desmonte.

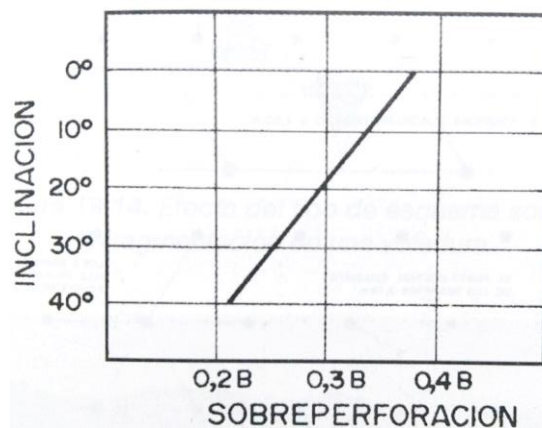


Figura 14 - Relação Inclinação do furo com a Subperfuração (Jimeno, 2003)

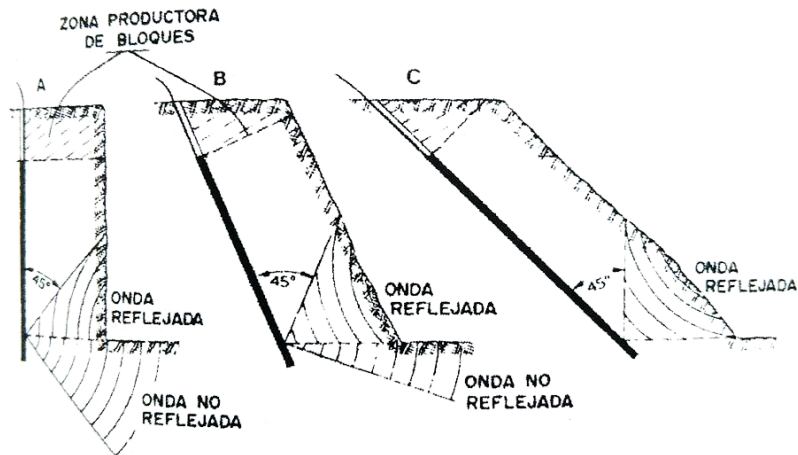


Figura 15 - Propagação da onda de Choque na parte inferior do maciço (Jimeno, 2003)

2.3.4 Tamponamento (T)

O tamponamento serve para evitar que os gases produzidos pelo explosivo se escapem direta e/ou prematuramente para a atmosfera ao longo da parte superficial do furo, sendo assim aproveitados para se propagarem através das fraturas aumentando deste modo o processo de fragmentação da rocha. O tamponamento é feito com material de granulometria suficiente para que este forneça fricção na parede do furo causando assim uma força oposta à detonação.

Bhandari (1997) e Jimeno (2003) defendem que o tamponamento deverá ter o intervalo de valores da equação 8.

$$0.7B < T < 1B \quad \text{(Equação 8)}$$

2.3.5 Rácio entre variáveis

Ao analisar todos os parâmetros geométricos mencionados, pode-se verificar que todos eles têm uma relação direta com o afastamento (B), pelo que foram propostos rácios que deverão ser obedecidos durante o planeamento do diagrama de fogo que de acordo com os autores previamente referidos, são os que se encontram na tabela 1.

Tabela 1 - Rácios a ser obedecidos na geometria do diagrama de fogo (Jimeno, 2003)

Rácio
$1 \leq S/B \leq 1.5$
$0.7 \leq T/B \leq 1$
$0.3 \leq J/B \leq 0.5$
$H/B \geq 1$

O rácio entre a altura de Bancada (H) e afastamento à frente livre (B) para desmorte a céu aberto é de ≥ 1 , mas para desmorte a céu aberto é habitual o valor ser de ≥ 1.6 (Hustrulid, 1999). Por outro lado, Jimeno (2003) defende que quando este rácio é ≥ 3 diminui substancialmente o risco de presença de blocos na pilha originada pelo desmorte.

Admitindo que o diâmetro de perfuração é igual ao diâmetro de carga e que este, juntamente com a altura de Bancada, são parâmetros fixos tendo em consideração as limitações das máquinas presentes no local de desmorte, pode estabelecer-se o seguinte diagrama de influencia entre variáveis representado pela figura 16.

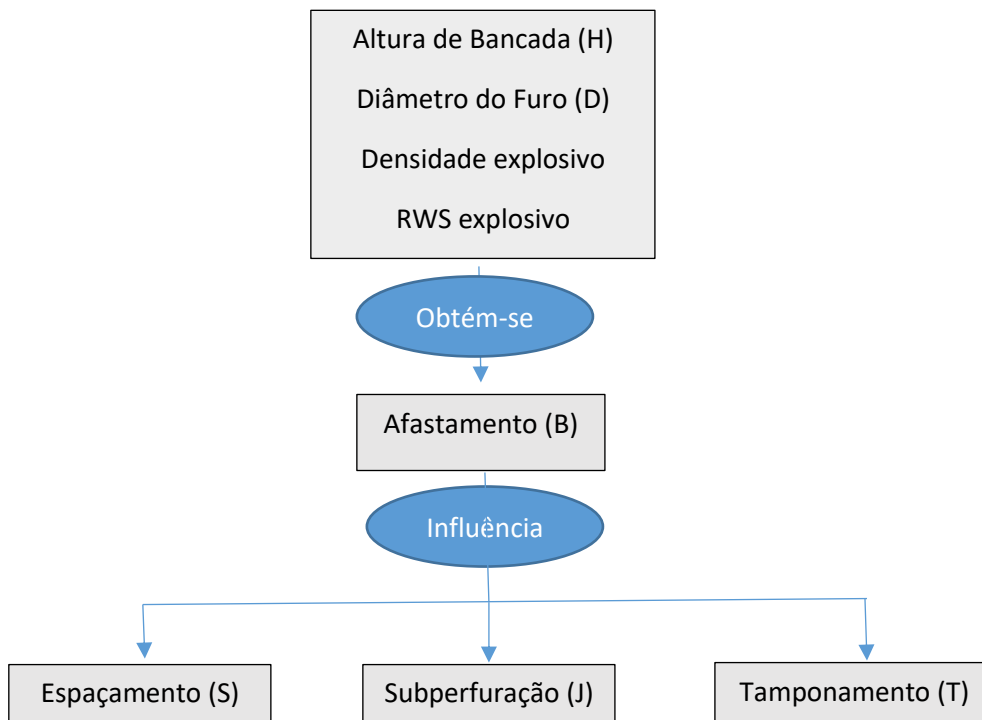


Figura 16 - Esquema Ilustrativo de Influência entre as Variáveis Geométricas do Diagrama de Fogo

2.4 Sistemas de Iniciação da Detonação

A sequenciação de detonação dos diversos furos que constituem o diagrama de fogo afigura-se importante para o controlo das vibrações, para definir a direção da projeção do material e consequentemente a forma da pilha de desmorte. Assim, o objetivo da sequenciação é que as vibrações originadas com a pega de fogo não excedam o limite

pré-estabelecido por lei no espaço envolvente a esta e que a pilha de desmonte fique disposta no sítio pretendido tomando a forma adequada para que o equipamento de carga e transporte possa realizar os seus ciclos de atividade de forma otimizada.

De acordo com Bhandari (1997), se o intervalo de detonação entre furos da mesma linha, também denominado de retardo, for de 8 milissegundos, as vibrações originadas não se acumulam, o que facilita a previsão das vibrações obtidas uma vez que o máximo de vibração que se irá gerar será aquela que ocorrerá através da detonação do furo com maior quantidade de explosivo.

O intervalo de tempo, quando a detonação passa de uma linha para a outra, deverá ser maior que o intervalo de tempo de detonação entre furos para que o material fragmentado da linha anterior se possa alojar na frente livre de desmonte, e para evitar colisões entre fragmentos de material projetado em diferentes linhas de desmonte e causar o amontoamento da pilha num só local, ou mesmo uma fragmentação excessiva. Andrews (1981), citado em Bhandari (1997), refere que este intervalo de tempo de detonação entre linhas deve ser duas a três vezes superior ao intervalo de tempo de detonação entre furos. Se tal não se concretizar ocorre o risco da projeção indesejada de material conforme ilustrado na figura 17.

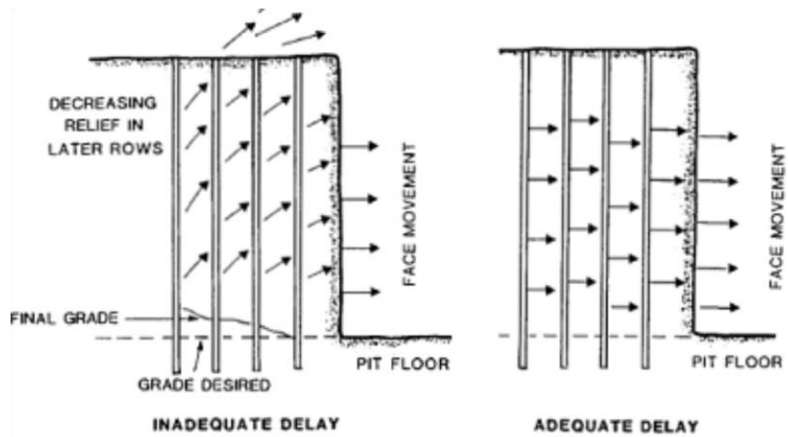


Figura 17 - Riscos de uma má sequenciação entre linhas (Bhandari, 1997)

2.4.1 Detonadores Elétricos

De acordo com Vázquez (2011), os Detonadores Elétricos podem-se distinguir consoante o seu tempo de detonação e sensibilidade elétrica.

No que concerne à sensibilidade dos detonadores, e conforme ilustrado na tabela 3, estes dependem das suas características elétricas e são classificados como: Sensíveis (S), Insensíveis (I) e Altamente Insensíveis (AI).

Tabela 2 - Características Elétricas dos Detonadores Elétricos (Adaptado de Vázquez, 2011)

Características Elétricas dos Detonadores	Tipos de Detonador		
	S	I	AI
Resistência de Ponte (Ω)	1.2 – 1.6	0.4 – 0.5	0.03 – 0.05
Impulso de Ignição (mWs/ Ω)	0.8 – 3	8 – 16	1,100 – 2,500
Corrente de Segurança (A)	0.18	0.45	4
Corrente de Ignição em Série (A)	1.2	2.5	25

Onde:

- **Resistência de Ponte** - Resistência elétrica do material semicondutor;
- **Impulso de Ignição** - Pressão exercida pela ignição por unidade de resistência;
- **Corrente de Segurança** - Máxima intensidade de corrente que atravessa a ponte do detonador sem o detonar;
- **Corrente de Ignição em Série** - Intensidade mínima que ao conectar 5 detonadores, assegura a detonação dos mesmos.

Esta classificação em função da sua sensibilidade radica no facto de haver o risco de ocorrer detonação indesejada devido a fatores externos, como fontes de comunicação por radiofrequência (emissoras de radio, telemóveis, etc) ou descargas elétricas de relâmpagos. Sendo esta a principal desvantagem deste tipo de detonadores, Vázquez (2011) implementa distâncias de segurança para o uso de detonadores elétricos sensíveis, consoante a potencia de radiotelefonos (tabela 3), e para fontes emissoras de rádio (tabela 4).

Tabela 3 - Distância de Segurança consoante proximidade de Radiotelefonos com determinada potencia (Adaptado de Vázquez, 2011)

Potencia (W)	Distancia (m)
Até 10	2
10-30	3.5
30-60	5
60-250	10

Tabela 4 - Distância de Segurança consoante proximidade de Fontes Emissoras de Radiofrequências (Adaptado de Vázquez, 2011)

Potencia Emisora	Distancia (m)
Até 25W	50
25W-100W	75
100W-500W	150
500W-1kW	300
1kW-5kW	500
5kW-10kW	750
10kW-25kW	1,200
25kW-50kW	1.700
50kW-100kW	2,350
100kW-500kW	5,000
500kW-1,000kW	7,500

Para a Classificação de acordo com o Tempo de Detonação, podem-se distinguir 3 tipos de Detonadores: Detonadores Instantâneos, Detonadores de Retardo, e Detonadores de MicroRetardo. O Detonador Instantâneo não tem retardo, o Detonador de Retardo possui um tempo de Retardo que varia entre 250 a 1000ms, enquanto que o Detonador de MicroRetardo tem um tempo de retardo que varia entre os 20 a 50ms.

2.4.2 Detonadores não Elétricos

Contrariamente aos Detonadores Elétricos, estes não apresentam o risco de detonarem devido a fontes elétricas e de radiofrequência, sendo esta uma vantagem da sua utilização. Porém, estes detonadores têm a desvantagem de não haver modo de verificar se os furos foram corretamente conectados sem ser através da confirmação visual, tornando-se o seu sequenciamento fundamental para que, mesmo que um furo

não detone, haja sempre uma frente em que o material do furo seguinte possa ser projetado. Treleaven *et al* (1995) no seu manual de detonadores não elétricos apresentam inúmeros sistemas de sequenciamento onde se ilustra como é planeada a detonação de acordo com o número de linhas e direção de propagação; a este respeito Jimeno *et al* (2003) defendem que a sequencia de detonação pode ser feita da forma que mais for favorável à acumulação da pilha, sendo a trajetória de projeção do material perpendicular às linhas criadas como mostra a figura 18.

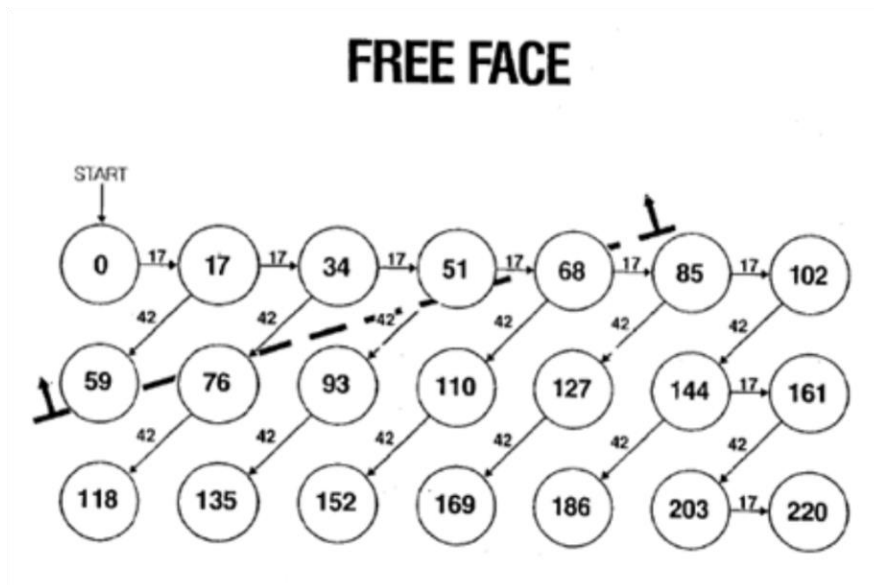


Figura 18 - Planeamento do sequenciamento de detonação (Treleaven, 1995)

2.4.3 Detonadores Eletrónicos

Os Detonadores Eletrónicos são considerados os melhores em termos de segurança e facilidade de manuseamento (Vázquez, 2011), uma vez que só respondem a um tipo de sinal elétrico que é codificado pelo detonador e podem programar-se individualmente após a inserção no explosivo, averbando diferentes tempos de detonação consoante o retardo desejado. Detonadores deste tipo de ultima geração possuem um sistema de segurança que inibe a detonação da linha seguinte caso um ou mais furos da linha anterior não tenham detonado ou detonado de forma incorreta, permitindo ao mesmo tempo saber que furos não detonaram sem ser preciso a confirmação visual pós desmonte. É assim previsível que este tipo de detonadores venham a permitir um melhor planeamento das pegas de fogo e um melhor controlo das mesmas.

3 Fragmentação

De acordo com Shim *et al* (2009), o grau de fragmentação de uma rocha por meio do uso de explosivos industriais apresenta-se como o fator mais relevante dos resultados do desmonte. Mesmo que a curva de fragmentação obtida após a realização de uma pega de fogo ainda venha a ser alterada por um processo de britagem subsequente, a granulometria após desmonte tem implicações no custo, produtividade e eficiência de todo o processo, tanto que Holmberg *et al* (2005) refere que se esta não for devidamente prevista e controlada, pode inviabilizar um projeto de exploração. Um exemplo simples de como uma má fragmentação pode causar alongamento ou mesmo paragens do ciclo de produção (e conseqüentemente o incremento de custos associados ao projeto) é o caso da geração de blocos com uma granulometria superior à boca de alimentação do britador (figura 19), o qual terá como resultado a paragem do processo de britagem com conseqüentes reflexos no ciclo de carga e transporte que a antecede.



Figura 19 - Imagem ilustrativa da geração de blocos pós desmonte com granulometria superior à boca de alimentação do britador

O esquema ilustrado na figura 20 demonstra as paragens que podem acontecer devido à geração de granulometria indesejadas.

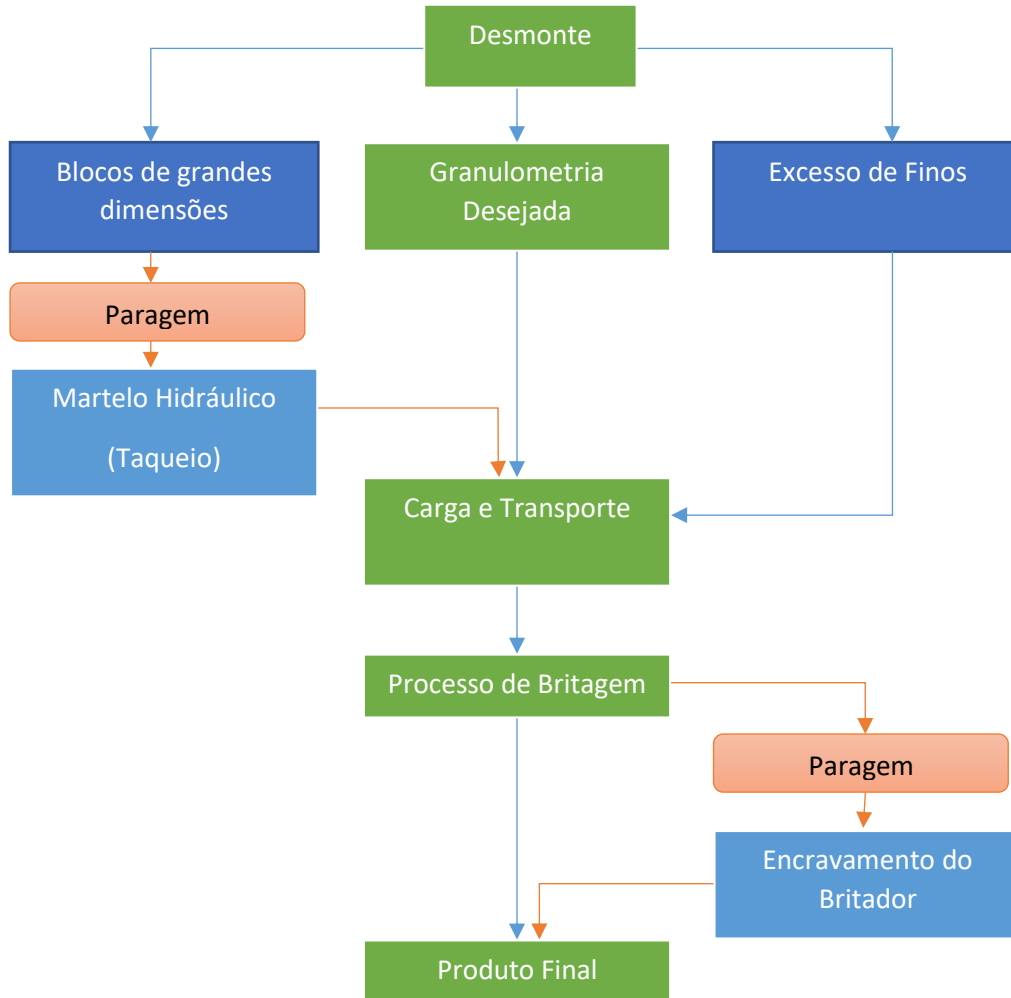


Figura 20 - Consequências da geração de granulometrias indesejadas

Podendo a geração de blocos destas dimensões acarretar custos acrescidos devido repercussões no ciclo de carga e transporte e à utilização do martelo hidráulico (ou taqueio), para a fragmentação do bloco e ao facto da ocorrência de granulometrias inferiores a 12mm sobrecarregar o processo de britagem (Yermakov, 2013), torna-se imperativo estabelecer a curva granulométrica que mais favoreça as várias fases de projeto, antes de iniciar a exploração.

É possível desenhar a geometria do diagrama de fogo de acordo com a fragmentação pretendida, mas para tal é necessário a aplicação de um modelo empírico que irá prever a granulometria gerada de acordo com as propriedades mecânicas do maciço, o próprio diagrama de fogo, bem como as características dos explosivos usados.

Um dos modelos mais conhecidos e usados, é o modelo Kuz-Ram devido à sua versatilidade. Os ajustes das curvas granulométricas reais, como as realizadas através

da análise digital de fotografias, às previstas por este modelo costumam apresentar uma boa sobreposição, como pode ser observado no exemplo da figura 21 (Cano *et al*, 2011).

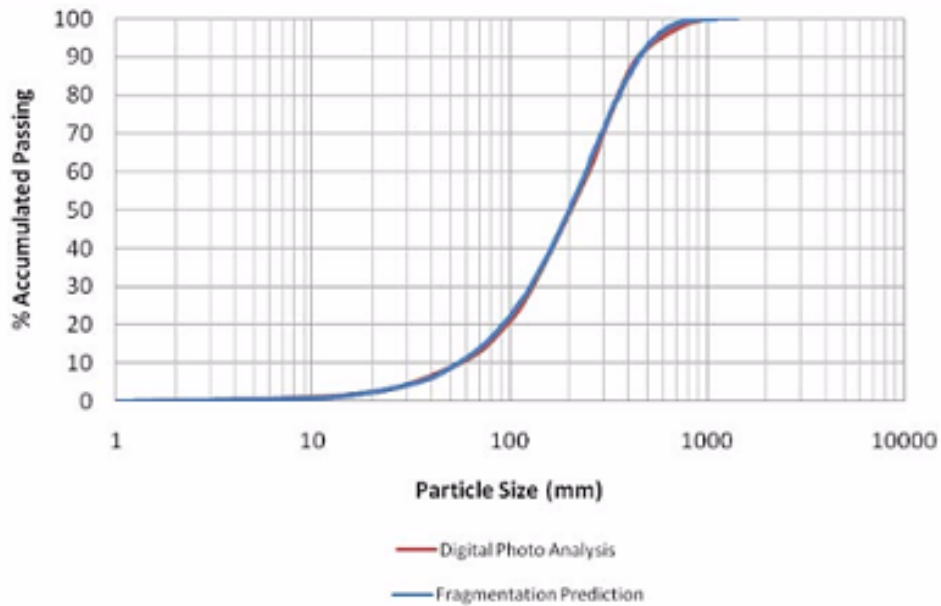


Figura 21 - Comparação da curva granulométrica prevista pelo modelo Kuz-Ram com a Análise Granulométrica por Imagem (Cano *et al*, 2011)

3.1 Modelo Kuz-Ram

O modelo de Kuz-Ram é um modelo empírico que correlaciona três conjuntos de equações, sendo estas a equação de Kuznetsov (Equação 9), a equação de Rosin-Rammler (Equação 10), e a equação de uniformidade (Equação 12) (Holmberg *et al*, 2005).

3.1.1 Equação de Kuznetsov:

$$X_m = AK^{-0.8}Q^{\frac{1}{6}}\left(\frac{115}{RWS}\right)^{\frac{19}{20}} \quad (\text{Equação 9})$$

Onde:

- **X_m** é o tamanho do grão que propicia a passagem de 50% do material;
- **A** é o *Rock Factor*, variando entre 0.8 a 22 (Holmberg *et al*, 2005). Este parâmetro é calculado através da classificação de Lilly e será explicado mais à frente no presente capítulo;
- **K** é o consumo específico de explosivos em Kg por metro cúbico;

- **Q** corresponde à massa de explosivos por furo;
- **RWS** é a "*Relative Weight Strength*" mencionado no capítulo anterior e expresso pela equação 4.

3.1.2 Equação de Rosin-Rammler:

$$Rx = \exp\left(-0.693 \frac{x}{Xc}\right)^n \quad (\text{Equação 10})$$

Esta equação é a que permite traçar a curva granulométrica, onde **x** corresponde à malha do peneiro, e **n** ao índice de uniformidade que descreve o declive da curva. Tendo o valor do **Xm** sido obtido através da equação de Kuznetsov, é possível calcular o Tamanho característico (**Xc**) através da equação 11 (Holmberg *et al*, 2005).

$$Xc = \frac{Xm}{\sqrt[n]{0.693}} \quad (\text{Equação 11})$$

Dispondo do declive da curva **n** (explicado abaixo) e dos valores da malha do peneiro (que são standardizados), tem-se todas as condições para que se possa traçar a curva prevista de fragmentação.

3.1.3 Equação de Uniformidade:

$$n = \left(2.2 - \frac{14B}{d}\right) \left(1 - \frac{W}{B}\right) \left(\sqrt{\frac{1}{2}} + \frac{S}{2B}\right) \times \left(0.1 + \text{abs}\left(\frac{BCL-CCL}{L}\right)^{0.1}\right) \left(\frac{L}{H}\right) \quad (\text{Equação 12})$$

Os parâmetros desta equação correspondem aos parâmetros geométricos do diagrama de fogo mencionados no capítulo anterior (**B** correspondendo ao afastamento, **d** ao diâmetro, e **S** ao espaçamento), onde se junta **W** que corresponde ao desvio do furo (m), **BCL** e **CCL** à carga de fundo e de coluna em metros no caso de se usar dois tipos de explosivos diferentes para um mesmo furo, e **L** ao comprimento da carga total (Gheibie *et al* 2009).

Num artigo publicado por Gheibie *et al* (2009), estes referem que valores baixos de **n** implicam uma gama de granulometrias elevada, enquanto que valores mais altos indicam uma granulometria uniforme. Conjuntamente, Kaneko *et al* (2004) referem que somente aumentando o Afastamento (**B**) e Espaçamento (**S**) poderá diminuir-se a

fragmentação uniformemente; e Jimeno *et al* (2003) defendem que o valor do índice de uniformidade deve variar entre 0.7 e 2.2.

3.1.4 Rock Factor

O *Rock Factor* é um parâmetro calculado através das propriedades geomecânicas do maciço rochoso, incluindo o estudo das descontinuidades do mesmo.

Shim *et al* (2009) referem que o *Rock Factor* pode ser determinado através do *Blastability Index (BI)* que é deduzido através da classificação de *Lilly*.

Para *Cunningham*, multiplicar o *BI* por 0.12 (conforme ilustrado na Equação 14) permite obter o *Rock Factor*.

$$BI = 0.5 \times (RMD + JF + RDI + HF) \quad (\text{Equação 13})$$

$$A = 0.12 \times BI \quad (\text{Equação 14})$$

A classificação de *Lilly* encontra-se expressa na tabela abaixo, sendo esta adaptada de acordo com Shim *et al* (2009) e Holmberg *et al* (2005). Aqui pode-se verificar que, para diferentes parâmetros geomecânicos, *BI* e o conseqüente *Rock Factor* terão um valor de acordo com o peso que cada parâmetro influente lhe atribui.

Tabela 5 - Classificação de Lilly (Adaptada de Shim (2009) e Holmberg (2009))

Parâmetros	Descrição
$RMD = 10 + 10X_i$	X_i = Tamanho do bloco "In situ"
$JF = JFs + JFo$	JFs = Espaçamento das descontinuidades; JFo = Orientação das descontinuidades
JFs = 10	Espaçamento das descontinuidades < 0.1m
JFs = 20	Espaçamento das descontinuidades entre 0.1m e 0.3m
JFs = 50	Espaçamento das descontinuidades > *P
JFs = 80	Espaçamento das descontinuidades entre 0.3m e 0.95P
$P = (B \times S)^{0.5}$	B = Afastamento; S = Espaçamento
JFo = 10	Orientação das descontinuidades < 10°
JFo = 20	Diferença entre orientação do furo e descontinuidades < 30°
JFo = 30	Diferença entre orientação do furo e descontinuidades > 60°
JFo = 40	Diferença entre orientação do furo e descontinuidades entre 30° e 60°
$RDI = 25 (SG-2)$	Onde SG é o peso específico da rocha
$HF = UCS/5$	$Y < 50\text{GPa}$; (UCS – força à compressão uniaxial)
$HF = E/3$	$Y > 50\text{GPa}$; (E – módulo elástico da Rocha)

Exemplificando, verificamos que o espaçamento das descontinuidades (JFs) tem um peso que pode variar entre 10 a 80, pelo que Holmberg *et al* (2005) refere que tal se deve ao facto de se estas poderem-se encontrar muito pouco espaçadas. Neste caso, a granulometria obtida após a detonação será fortemente condicionada pela dimensão aproximada do espaçamento entre as descontinuidades. No caso de estas se encontrarem mais afastadas, a fragmentação dependerá essencialmente das características do explosivo e do espaçamento entre furos, pois (tal como referido no capítulo anterior) se a onda de choque intercetar perpendicularmente uma descontinuidade, esta irá refleti-la gerando fenómenos compressivos e consequentemente perdas de energia durante a sua propagação, podendo assim ocorrerem blocos conforme ilustra a figura 22.

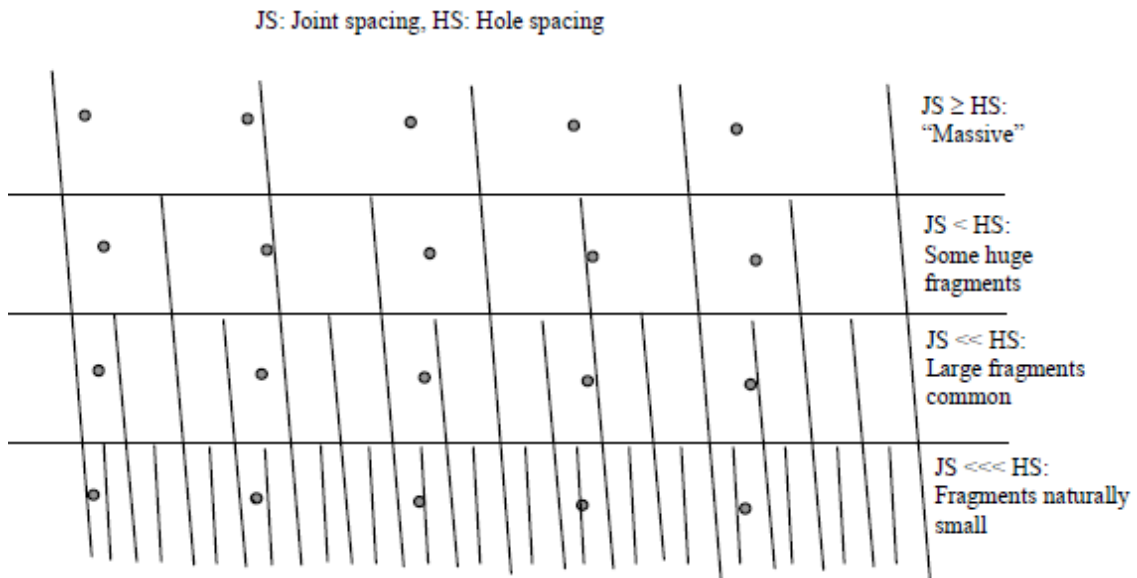


Figura 22 - Relação entre Espaçamento das Descontinuidades e Espaçamento entre Furos (Holmberg, 2005)

Percebida a forma como o material fragmentado é gerado através do desmonte de rocha com recurso a explosivos, o próximo capítulo vem dedicado à modelação matemática, sendo aí explicada a importância de um modelo matemático para a obtenção de resultados que obedeçam a critérios pré-estabelecidos perseguindo um objetivo cujo será a otimização do custo do desmonte.

4 Modelação Matemática

Um modelo matemático pode ser interpretado como um conjunto de funções, que relacionados entre si, dão origem a um espectro de soluções cujos resultados obtidos variam de acordo com as **variáveis de decisão** e **restrições** associadas (expressas por desigualdades ou equações). Deste modo, torna-se necessário impor uma **função objetivo**, para definir uma solução ótima do problema (Hillier *et al*, 2006).

As funções objetivo podem ser Lineares ou não Lineares. Wagner (1975) refere que para uma função ser linear tem-se que assumir três premissas, a da Proporcionalidade, a da Divisibilidade, e da Aditividade. A primeira premissa diz que “(...) a contribuição de cada variável ($a_j x_j$) para a função objetivo ($c_j x_j$) é proporcional ao peso de x_j (...)”, a premissa da divisibilidade diz que “(...) cada atividade é capaz de expansão ou redução proporcional continua (...)”, enquanto que a premissa da aditividade diz que “(...) para cada uma das variáveis de decisão, as quantidades totais de cada input e output associado são as somas dos inputs e outputs para cada processo individual (...)” (Wagner, 1975 p28). Querendo assim dizer que funções lineares são expressas por polinómios de grau zero ou um, e que variam proporcionalmente com os inputs inseridos, podendo aplicar-lhes um procedimento matemático de forma a determinar o, ou os pontos ótimos para a resolução do problema.

Por outro lado, para que o problema seja de origem Não Linear, basta que uma das funções, seja ela função objetivo, ou restrições impostas, seja não linear (Hillier *et al*, 2006). A Não Linearidade ocorre quando as premissas descritas acima para a Linearidade não são obedecidas, referindo ainda Wagner (1975) que normalmente as Não Linearidades obtidas num sistema ocorrem quando são estabelecidas relações entre variáveis empiricamente ou estruturalmente.

4.1 Linearidade e não Linearidade

Para uma melhor interpretação, considere-se um exemplo de aplicação proposto por Hillier *et al* (2006) em que se tem como objetivo maximizar o lucro semanal (Z) de uma produção de dois lotes (x_1 e x_2), tendo como restrições o tempo de produção por lote

de produto, consoante o tempo de produção semanal disponível na fábrica, conforme ilustrado na tabela 6.

Tabela 6 - Dados para o Problema (Adaptado de Hillier, 2006)

Fábrica	Tempo de Produção por Lote (em horas)		Tempo de Produção Disponível por Semana (em horas)
	Produto		
	1	2	
1	1	0	4
2	0	2	12
3	3	2	18
Lucro por Lote	3€	5€	

Daqui retira-se:

Variáveis de Decisão - Quantidade de Produtos do lote x_1 e x_2 que se podem produzir;

Função Objetivo – Maximizar o lucro (Z) consoante o numero de lotes produzidos;

Restrições - Limitações de tempo de acordo com o tempo de produção por lote por fabrica, sendo estas:

- $1x_1 \leq 4$;
- $2x_2 \leq 12$;
- $3x_1 + 2x_2 \leq 18$;
- $1x_1 \geq 0$;
- $1x_2 \geq 0$.

Matematicamente a função objetivo será expressa por $Z=3x_1+5x_2$, sendo tanto esta, como as restrições impostas de **origem Linear**.

Ao traçar as restrições num gráfico, este dá-nos o conjunto de soluções disponíveis para o problema, estando estas representadas no gráfico abaixo, onde a área delimitada a cor azul representa as soluções viáveis para o problema, sendo a restante área, soluções inviáveis devido às restrições impostas.

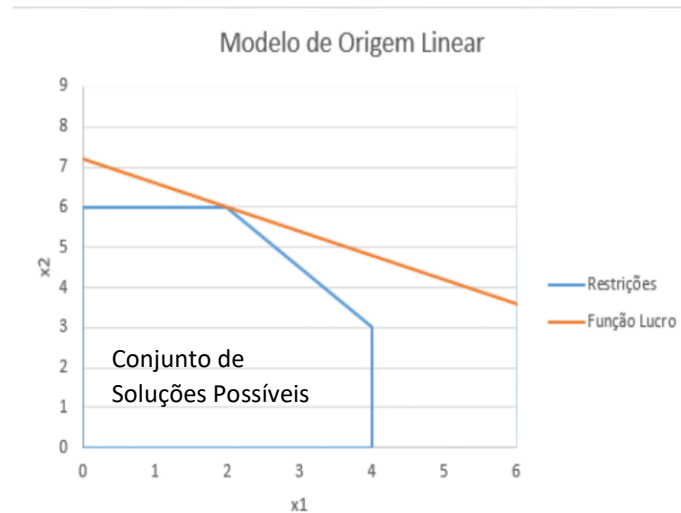


Figura 23 - Modelo de Origem Linear

As arestas que delimitam o contorno do polígono traçado representam os pontos ótimos de produção, ou seja, são os pontos de onde se tirará maior rentabilidade a nível de produção, sendo a solução ótima dependente da função lucro que interceta a área gerada pelas restrições impostas, correspondendo estes a $x_1=6$ e $x_2=2$.

Por outro lado, Hillier *et al* (2006) sugerem para o mesmo problema a substituição da restrição “ $3x_1 + 2x_2 \leq 18$ ”, pela imposição de uma restrição Não Linear, sendo esta “ $9x_1^2 + 5x_2^2 \leq 216$ ”. Ao fazer esta substituição o modelo matemático daqui originado torna-se Não Linear, sendo o seu comportamento expresso graficamente conforme ilustrado no gráfico abaixo representado.

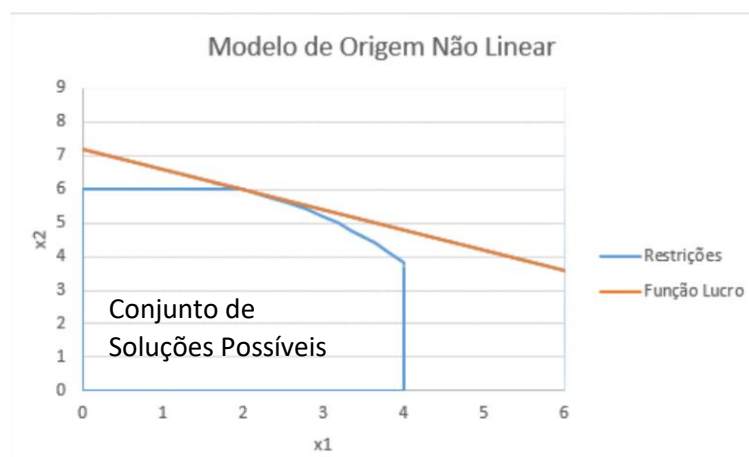


Figura 24 - Modelo de Origem Não Linear

Como se pode ver pela Figura 24, a restrição de origem Não Linear tem a forma de uma curva, sendo os pontos ótimos para a solução do problema $x_1=6$ e $x_2=2$.

Contudo, quando se tem vários conjuntos de variáveis e restrições impostas, a análise gráfica torna-se pouco viável para a determinação de pontos ótimos para problemas de otimização. Assim, o uso de uma ferramenta de otimização como a ferramenta *Solver* do *Excel* torna-se imprescindível para este tipo de problemas, sendo este o software usado para os problemas de modelação matemática da presente dissertação.

4.2 Ferramenta Excel Solver

O utilitário Excel da Microsoft possui uma ferramenta denominada Excel Solver que permite encontrar soluções viáveis tendo como inputs um objetivo (a maximizar, minimizar ou valor a encontrar), levando em consideração as restrições impostas, alternando variáveis de decisão como é evidenciado pela figura 25.

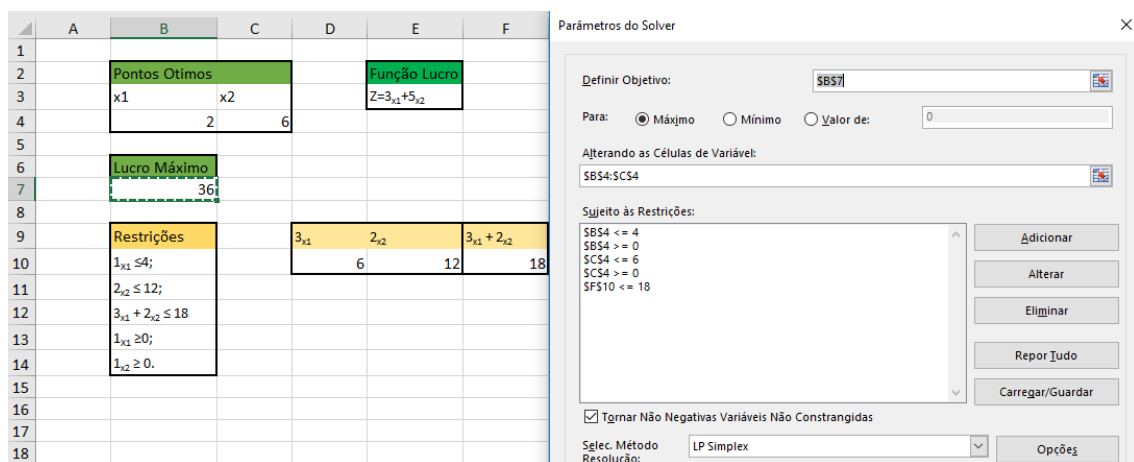


Figura 25 - Otimização Linear obtida com a ferramenta Solver

Para o presente modelo, foram inseridos os dados mencionados anteriormente no que concerne ao exemplo de modelo Linear proposto por Hillier *et al* (2006), obtendo-se os mesmos pontos ótimos que foram obtidos através da análise gráfica.

Recorrendo ao mesmo processo, mas para a obtenção de pontos ótimos com a restrição Não Linear proposta por Hillier *et al* (2006), este método origina o conjunto de soluções ilustrados pela Figura 26, sendo também estas iguais às obtidas através da análise gráfica.

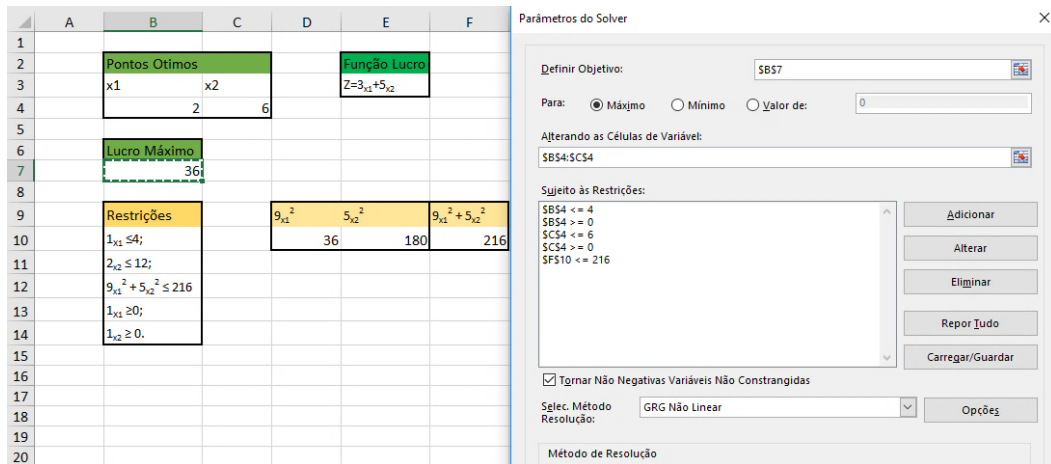


Figura 26- Otimização Não Linear obtida com a ferramenta Solver

Note-se que para a resolução do primeiro problema usou-se o método de resolução “LP Simplex”, enquanto que para a resolução do segundo problema se usou o método de resolução “GRG Não Linear”, pois no Manual da ferramenta Excel Solver [2] é referido que para a resolução de problemas com variáveis Lineares deverá ser usado o método LP Simplex. Já para a resolução de problemas com variáveis Não Lineares, o manual [2] refere que deverá ser usado o método GNR Não Linear, podendo a solução obtida ser ou ótima ou localmente ótima dependendo da complexidade do problema.

A obtenção de pontos que sejam localmente ótimos deve-se à limitação da própria ferramenta de modelação, que tratando-se da versão Standard tem uma limitação de 200 variáveis de decisão [3], combinando assim 200 conjuntos de valores que sejam viáveis para a solução do problema e dando como solução ao problema os melhores desses conjuntos de pontos encontrados, que serão localmente ótimos de acordo com os dados analisados pelo programa, mas que poderão não ser os globalmente ótimos tendo em consideração que não foram analisados todos os conjuntos possíveis. A figura abaixo ilustra um exemplo do que são pontos ótimos locais e pontos ótimos globais, muitas vezes denominados pontos ótimos absolutos.

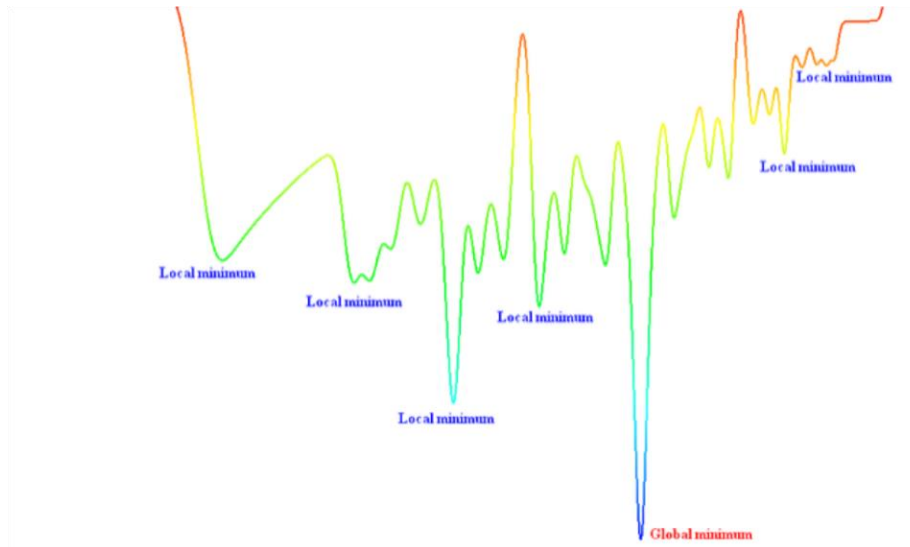


Figura 27 - Diferença entre Pontos Localmente Ótimos e Globalmente Ótimos

Nesta imagem evidencia-se que para um mesmo problema pode haver vários pontos ótimos locais diferentes, sendo assim possível que, ao usar em simulação uma ferramenta de modelação matemática várias vezes, esta nos dê pontos ótimos diferentes.

Uma vez entendida a forma como se cria um modelo matemático, no próximo capítulo será construído um modelo matemático com recurso à ferramenta *Excel Solver* que visa atingir um dado objetivo na área do desmorte com recurso a explosivos, alterando variáveis de decisão e obedecendo às suas restrições.

5 Construção do Modelo

Uma vez que o processo de desmonte tem custos acrescidos em função do grau de fragmentação desejado pós detonação, mas baixa significativamente o custo do projeto “*mine to mill*” em termos globais (Seccatore *et al* (2009), será construído um modelo matemático cujo objetivo será o de obter um dado volume de rocha que obedeça a critérios granulométricos pré-estabelecidos, tendo o menor custo possível. Para tal, será gerada uma geometria do diagrama de fogo ótima (local, ou global) através da ferramenta *Standard Excel Solver* que, obedecendo a certas Restrições no que concerne à geometria, Velocidade Máxima de Vibração e à curva granulométrica gerada, poderá facultar dados para que se possa concretizar um desmonte otimizado.

O modelo de otimização construído é dividido em secções que deverão ser preenchidas pela entidade que pretende realizar o desmonte, secções de restrições a ser obedecidas e secções que geram a geometria do diagrama de fogo que favorece, em termos de custo, o desmonte pretendido. Esta informação é explicada nos Subcapítulos abaixo descritos.

5.1 Função Objetivo

A função objetivo consistirá na minimização do custo associado aos sistemas de iniciação necessários para a detonação da carga de explosivos inseridos nas furações para que ocorra o desmonte de um dado volume de material com granulometria pré-estabelecida. Assim, estabelece-se que os parâmetros a preencher no que concerne ao objetivo do desmonte serão ilustrados da seguinte forma no modelo matemático criado:

Tabela 7 -Objetivo Do Desmonte a preencher

Objetivo do Desmonte	Valor
Volume (m ³)	
% Passante	
Passante máximo (mm)	

Nesta tabela são inseridos os metros cúbicos de material que se pretende desmontar por pega de fogo, sendo a “% Passante” e “Passante máximo” referentes a parâmetros

da curva granulométrica que se obtém através da equação da Rosin-Rammler conforme referido no capítulo 3 da presente dissertação. A título de ilustração, a figura abaixo representa um exemplo de uma curva granulométrica obtida para um desmorte onde se pretendia que 80% do material tivesse uma granulometria inferior a 500mm.

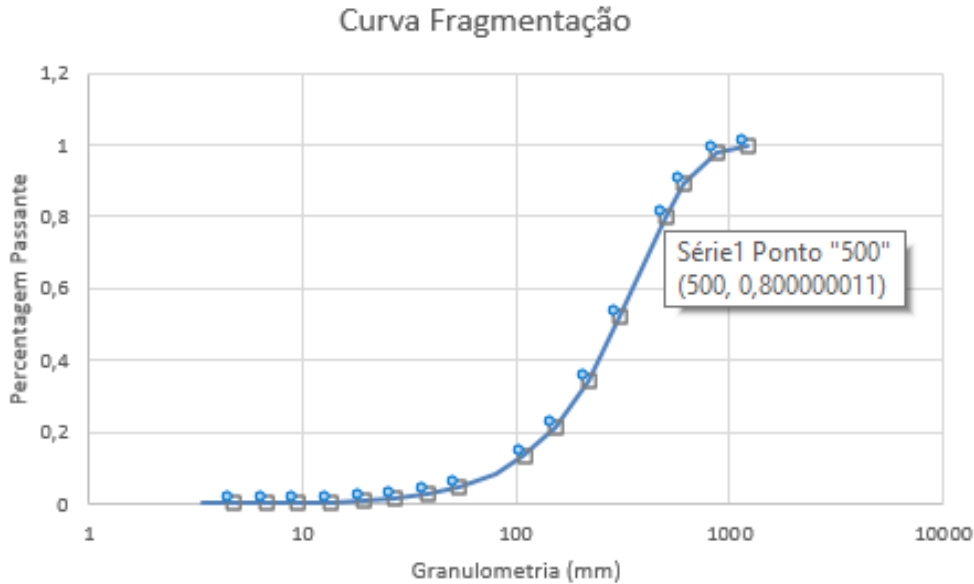


Figura 28 - Exemplo de uma Curva Granulométrica originada através de parâmetros pré-definidos

A função Custo terá a forma da seguinte equação:

$$\text{Custo Total} = (n^{\circ}\text{Furos} \times \text{Preço Sistema de Iniciação}) + (n^{\circ}\text{Furos} \times \text{Quilos Explosivos Por Furo} \times \text{Preço Por Quilo de Explosivo}) + (n^{\circ}\text{Furos} \times (\text{Altura do Banco} + \text{SubPerfuração}) \times \text{Preço Por Metro Perfurado}) \quad (\text{Equação 15})$$

Em que:

- NºFuros – Número de furos efetuados para posterior carga e detonação;
- Sistema de Iniciação - conjunto de material que inicia a detonação;
- Quilos Explosivo Por Furo – Dependerá da Densidade e da natureza do explosivo a usar, bem como do **Volume de Carga**;
- Volume de Carga – Volume perfurado que é preenchido por carga explosiva. Este pode ser calculado através da seguinte equação, no qual se admitirá que o diâmetro perfurado será igual ao diâmetro de carga:

$$\text{Volume de Carga} = \pi \left(\frac{\varnothing^2}{4} \right) \times (H + J - T);$$

(Equação 16)

- Preços – Serão parâmetros a inserir na seguinte tabela presente no modelo:

Tabela 8 - Tabela de Preços

Tabela de Preços	Preço
Preço/Sistema Iniciação	
Preço/Quilo explosivo	
Preço/Metro perfurado	

5.2 Limitações Impostas

Como Limitações Impostas assumir-se-á que no local de desmonte já existe uma altura de bancada e um numero de filas a perfurar definida. Será também presumido que no local já haverá um bit de perfuração com um dado Diâmetro de perfuração e desvio de perfuração associado, resultando assim na seguinte tabela a preencher no que concerne às Limitações Impostas:

Tabela 9 - Limitações Impostas pela Entidade

Limitações Impostas	Valor
∅ Perfuração (mm)	
Altura Bancada (H)(m)	
Nº Filas	
Desvio Perfuração (m)	

5.3 Restrições impostas

As Restrições impostas dizem respeito aos rácios entre os **parâmetros geométricos do Diagrama de Fogo** expressos pela tabela 1 no capítulo 2, **restrições granulométricas e volumétricas** impostas pelo objetivo do desmonte, declive da curva de fragmentação gerada, e **Velocidade Máxima de Vibração Permitida** de acordo com a proximidade e tipo de infraestruturas.

No Modelo criado, é possível verificar visualmente se as restrições impostas são satisfeitas através da seguinte forma:

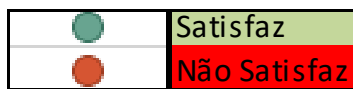


Figura 29 - Modo de Verificação das Restrições Impostas

5.3.1 Restrições do Diagrama de Fogo

Adotando os rácios expressos pela tabela 1, é criada a seguinte tabela de verificação de satisfação das Restrições do Diagrama de Fogo:

Tabela 10 - Verificação da Satisfação das Restrições Do Diagrama de Fogo

Restrições Diagrama de Fogo	Obtido		A Obedecer	
S/B	0,00	>=	1	●
S/B	0,00	<=	1,5	●
T/B	0,00	>=	0,7	●
T/B	0,00	<=	1	●
J/B	0,00	>=	0,3	●
J/B	0,00	<=	0,5	●
H/B	0,00	>=	1	●

5.3.2 Restrições Granulométricas

As Restrições Granulométricas visam satisfazer as Imposições feitas pelo objetivo do desmorte, devendo o declive da curva granulométrica gerada (índice de Uniformidade n) variar entre os valores de 0.7 e 2.2, tal como proposto por Jimeno *et al* (2003). Estas Restrições, geram a seguinte tabela no modelo criado:

Tabela 11 - Verificação da Satisfação das Restrições Granulométricas

Restrições Granulométricas	Valor Obtido		Valor a Obedecer	
n (Índice de Uniformidade)	0,00	>=	0,7	●
n (Índice de Uniformidade)	0,00	<=	2,2	●
Volume	0,00	>=	40000	●
% Passante	0,00	<=	600	●

5.3.3 Velocidade Máxima de Vibração (PPV)

A detonação gera uma onda de choque que se propaga e manifesta no terreno através de vibração. Podendo esta vibração causar efeitos negativos no que concerne à estabilidade de infraestruturas vizinhas ou áreas envolventes de valor patrimonial, a Norma Portuguesa 2074:2015 impõe Limites de Velocidade de Vibração Máxima (PPV) de acordo com o tipo de infraestrutura e frequência dominante para o dado local conforme ilustrado na tabela 12.

Tabela 12- Valores limite recomendados para a velocidade de vibração (de pico), em mm/s (NP 2074:2015)

Tipo de estruturas	Frequência dominante, f		
	f ≤ 10 Hz	10 Hz < f ≤ 40 Hz	f > 40 Hz
Sensíveis	1,5	3,0	6,0
Correntes	3,0	6,0	12,0
Reforçadas	6,0	12,0	40,0

A Frequência Dominante é a frequência na qual ocorre o valor máximo da vibração no respetivo espectro FFT (Transformada Rápida de Fourier), correspondendo à direção em que a amplitude do sinal de vibração no tempo é máxima, sendo este parâmetro obtido através de ensaios in-situ (NP 2074:2015).

Existem várias formulas para o calculo do PPV, sendo a equação 17, abaixo representada, a mais consensual.

$$PPV = k \left(\frac{R}{\sqrt{Q}} \right)^{-\beta} \quad (\text{Equação 17})$$

De acordo com Kumar *et al* (2016), os parâmetros “k” e “β” expressos na equação 17 são parâmetros de campo obtidos durante ensaios-teste, que através de uma regressão linear que relaciona o PPV com a Distância Escalada ($D = \left(\frac{R}{\sqrt{Q}} \right)$) torna possível a sua estima. Feita a regressão Linear para estimar os parâmetros de campo, e sabendo a carga de explosivos a detonar (Q), tem-se todas as condições necessárias para o cálculo da Velocidade de Vibração Máxima consoante a distância percorrida (R).

Existem outros modelos matemáticos criados por diversos autores que adotam a formula expressa pela equação 17 ou invocam uma formula alternativa a esta. Num artigo publicado por Kumar *et al* (2016), os autores criam uma nova formula para a estimação do PPV e, ao sobreporem a sua relação de PPV/D a outras formulas criadas por diferentes autores, conforme ilustrado na figura 30, aferem a validade da mesma.

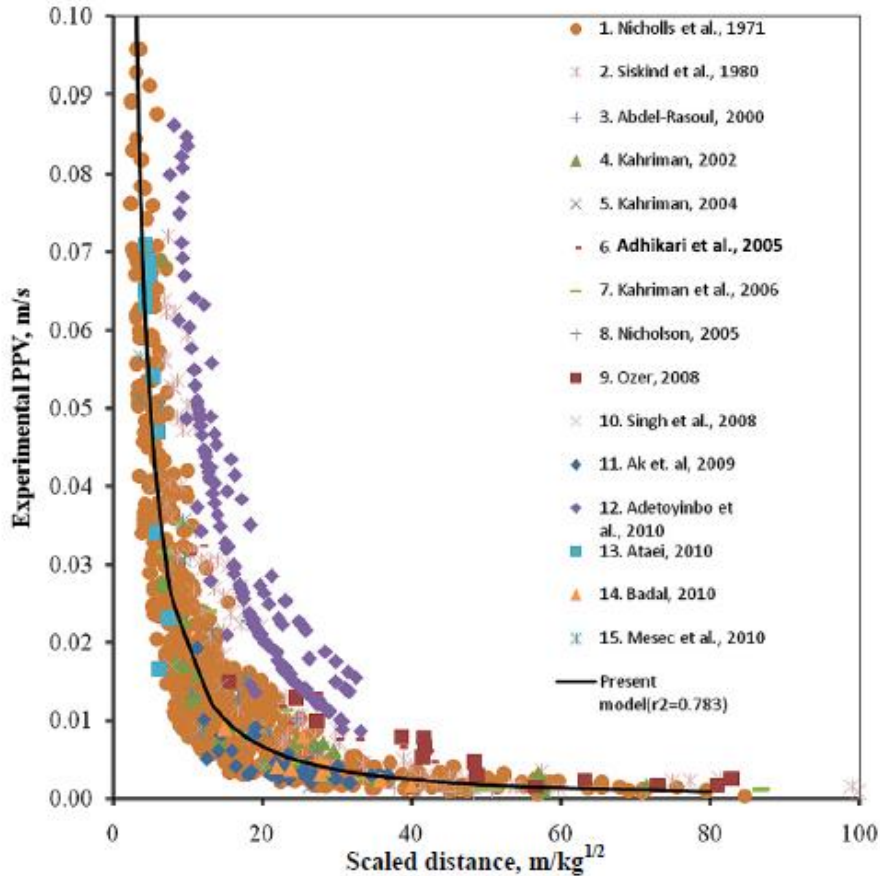


Figura 30 - PPV em função da Distância Escalada por diferentes modelos matemáticos (Kumar et al 2016)

Esta formula, expressa pela Equação 18, apresenta a vantagem dos seus parâmetros de campo corresponderem à Força à Compressão Uniaxial (UCS, expresso em MPa) e Peso Volúmico do maciço (γ , em kPa), sendo estes parâmetros normalmente conhecidos à priori do Desmorte.

$$PPV = \frac{UCS^{0.642} \times D^{-1.463}}{\gamma} \quad \text{(Equação 18)}$$

No modelo criado, é apresentada a tabela 13 onde se pode inserir a distância dos vários tipos de infraestruturas à frente de desmorte.

Tabela 13 - Distância a Estruturas Consoante seu Tipo

Tipo de Estrutura	Distância (m)
Estrutura Sensível	
Estrutura Corrente	
Estrutura Reforçada	

Ao manipular a equação 18, é possível determinar qual a máxima carga de explosivos a usar por furo, de modo a que o valor de PPV gerado não exceda o permitido pela NP 2074:2015. A respetiva formula vem representada pela equação 19.

$$Q_{max} = \left(\frac{R}{\left(\frac{PPV \times \gamma}{UCS^{0.642}} \right)^{-\left(\frac{1}{1.463} \right)}} \right)^2 \quad \text{(Equação 19)}$$

Sabendo o Qmax que se pode detonar por furo, a Frequência Dominante, e a Distância a Estruturas consoante o seu tipo, o modelo matemático diz-nos qual a Carga máxima que se pode detonar para cada tipo de infraestrutura (Tabela 14), sendo o Valor mais baixo aquele que delimita a Carga máxima permitida por furo.

Tabela 14 - Carga Máxima Permitida por Furo consoante distância a Estruturas

Restrições PPV	Distancia	PPV Gerado		Q Máx
Estrutura Sensível	0	0,00	●	0,00
Estrutura Corrente	0	0,00	●	0,00
Estrutura Reforçada	0	0,00	●	0,00

5.4 Variáveis de Decisão

As Variáveis de Decisão do Modelo Matemático Criado serão:

- Carga Explosiva a Detonar por Furo;
- Escolha do Explosivo;
- Geometria do Diagrama de Fogo.

A carga explosiva a detonar por furo dependerá do Volume de Carga (obtido através da Equação 16) e da densidade do explosivo a detonar. Assim, pode-se verificar que estas três variáveis de decisão do presente modelo matemático estão intrinsecamente ligadas, uma vez que Parâmetros Geométricos do Diagrama de Fogo como o Diâmetro, Altura de Bancada, Subperfuração, Tamponamento, e a Densidade do explosivo aquando a sua escolha, influenciam diretamente a carga a detonar por furo. Para uma melhor perceção desta constatação, verifique-se o esquema ilustrado na figura 31.

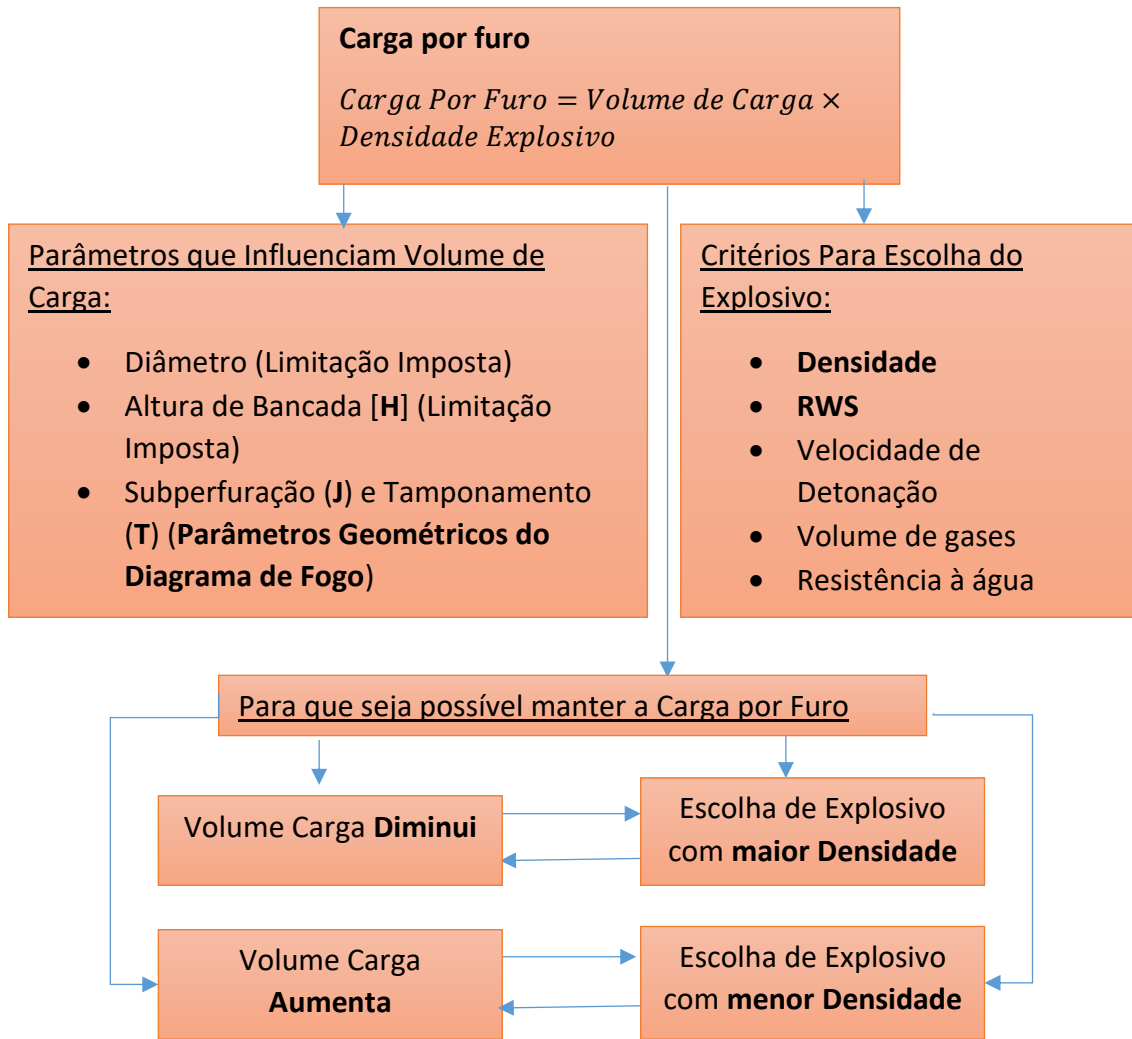


Figura 31 - Modo como as Variáveis de Decisão estão relacionadas

A seleção do explosivo no que concerne à sua velocidade de detonação, volume de gases e resistência à água deverá ser feita consoante o tipo de maciço presente (referido no capítulo 2). No entanto no modelo criado é possível inserir a Densidade e RWS de três tipos de explosivos diferentes (tabela 15), fazendo este uma seleção do melhor a usar consoante a Carga Máxima a detonar por furo e granulometria desejada pós desmorte.

Tabela 15 - Escolha do melhor explosivo a usar consoante sua Densidade e RWS

Escolha Explosivo	Densidade	RWS
exp1		
exp2		
exp3		

5.5 Parâmetros In-Situ Necessários

Para que o modelo matemático criado funcione, é preciso a inserção dos seguintes parâmetros determinados in-situ.

Tabela 16 - Parâmetros In-Situ Necessários

Parâmetros in-Situ	
Rock Factor	
UCS (Mpa)	
Peso Volúmico (kN/m ³)	
Frequência Dom (Hertz)	

Dos parâmetros descritos na tabela 16, o *Rock Factor* é o necessário para a construção da curva granulométrica e é obtido através da Classificação de Lilly (Capítulo 3). O UCS, peso volúmico e Frequência Dominante, são pré-requisitos para traçar a curva de PPV.

O Peso Volúmico e UCS, são, por norma, parâmetros da exploração conhecidos à priori. Para a sua obtenção, é recolhido um testemunho de sondagem, registado o seu peso e volume, e ao fracionar estes valores calcula-se o seu peso volúmico. Para saber o UCS, o testemunho é colocado numa prensa hidráulica que exerce força vertical até que este ceda à compressão. O valor de UCS será o máximo valor registado até a sua rotura. [4]

5.6 Modelo Gerado

Em suma, o modelo gerado funciona de acordo com o diagrama ilustrado pela Figura 32, onde é possível ver a interligação entre os vários parâmetros que serão considerados para o modelo de otimização, originando valores de Carga máxima por Furo, Melhor explosivo a usar, Valores Geométricos do Diagrama de Fogo e seu Custo total, tendo em consideração o Preço da Perfuração, dos Sistemas de Iniciação e de Quilo de Explosivo.

De salientar ainda, que sendo as Restrições obtidas empiricamente, o modelo daqui originado será obrigatoriamente Não Linear, Wagner (1975), pelo que se deverá usar o método *GRG Não Linear* da ferramenta *Standard Excel Solver* para o presente modelo de otimização.

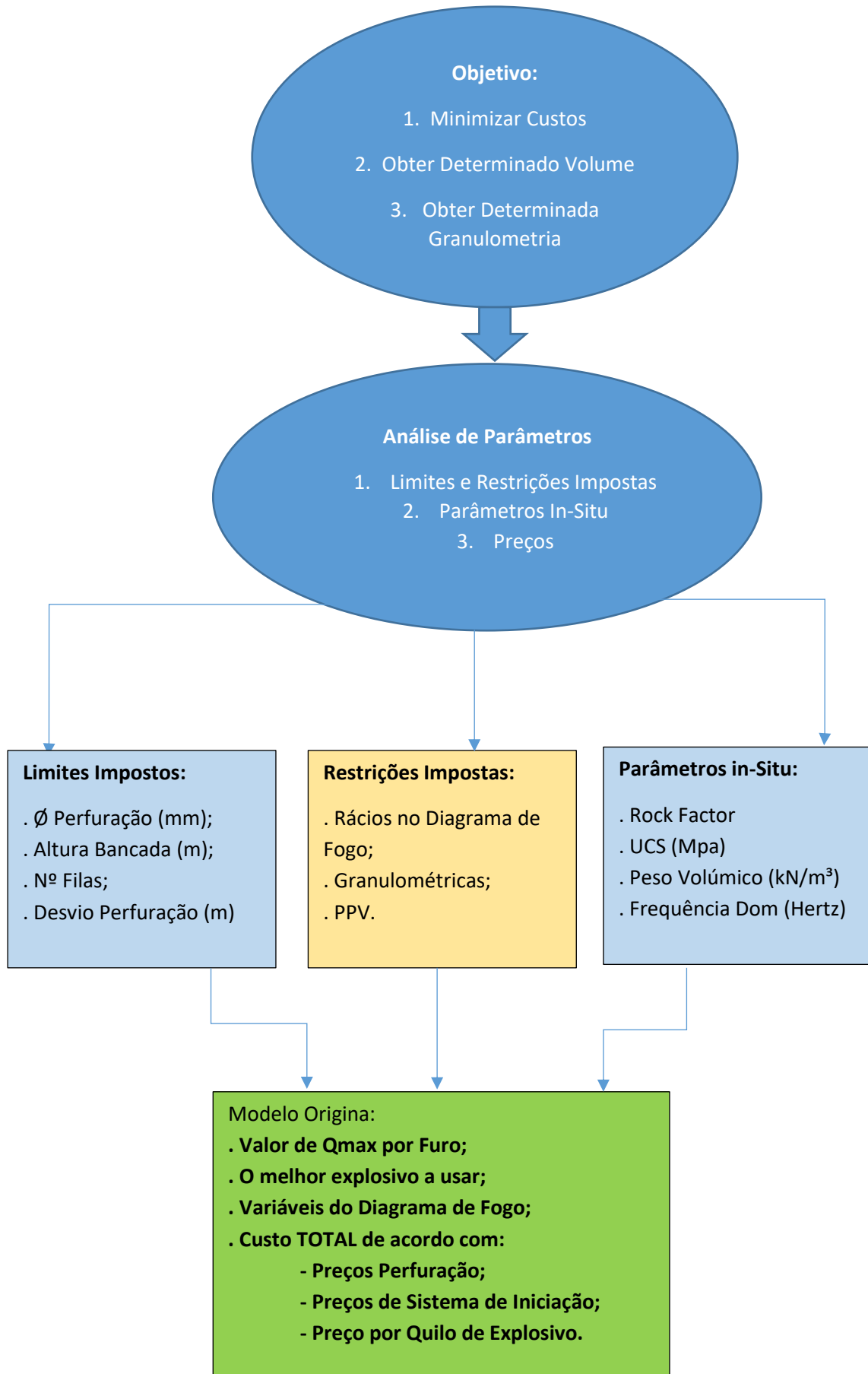


Figura 32 - Diagrama Ilustrativo do Funcionamento do Modelo Criado

5.7 Exemplo Ilustrativo

5.7.1 Objetivo do desmorte

Imagine-se que numa exploração a céu aberto se pretende desmontar com recurso a explosivos 50,000m³ de material, onde 80% do volume originado tenha granulometria inferior a 650mm.

Objetivo do Desmorte	Valor
Volume (m ³)	50000
%passante	80
passante máximo (mm)	650

5.7.2 Limitações Impostas

Nesta exploração pretende-se realizar 3 filas de perfuração, com uma altura de Bancada de 10 metros, dispondo-se de uma maquina de perfuração em que o diâmetro do seu bit é de 110mm, tendo um desvio de associado de 0.1m

Limitações Impostas	Valor
Ø Perfuração (mm)	110
Altura Bancada (H)(m)	10
Nº Filas	3
Desvio Perfuração (m)	0,1

5.7.3 Parâmetros In-Situ

Sabe-se, por testes geomecânicos efetuados anteriormente ao desmorte, que o maciço a desmontar tem uma Resistência à Compressão Uniaxial de 230Mpa, um Peso Volúmico de 26.4Kpa, uma Frequência Dominante de 11Hertz e um *Rock Factor* de 11.

Parâmetros in-Situ	Valor
Rock Factor	11
UCS (Mpa)	230
Peso Volumico (kN/m ³)	26,4
Freq Dom (Hertz)	11

5.7.4 Distância a Infraestruturas

Utilizando a Norma Portuguesa de “Avaliação da influência de vibrações impulsivas em estruturas”, detetou-se uma Estrutura Sensível a 600 metros da frente do desmorte, uma Estrutura Corrente a 800 metros e uma Reforçada a 600 metros.

Tipo de Estrutura	Distância (m)
Estrut Sens	600
Estrut Corrente	800
Estrut Reforçada	600

5.7.5 Seleção do Explosivo

Ao fazer a seleção do melhor explosivo a usar tendo em conta as suas características, chegou-se à conclusão de que aqueles que poderão originar melhores resultados tendo em consideração as propriedades do maciço, são os explosivos com densidades de 1050, 1100 e 1300 kg/m³, e RWS de 108, 110 e 110 (respetivamente).

Escolha Explosivo	Densidade	RWS
exp1	1050	108
exp2	1100	110
exp3	1300	110

5.7.6 Tabela de Preços

A análise orçamental revelou que o preço por cada Sistema de Iniciação é de 10€, o preço por Metro Perfurado de 8€ e o preço por Quilo de Explosivo de 2€.

Tabela de Preços	Preço
Preço/Sistema Iniciação	10,00 €
Preço/Quilo explosivo	2,00 €
Preço/Metro perfurado	8,00 €

5.7.7 Resultados

Ao recorrer à ferramenta *Standard do Excel Solver*, insere-se como função Objetivo a Minimização da célula referente ao Custo Total, alterando as células onde estão inseridas as Variáveis da Geometria do Diagrama de Fogo e explosivo a usar, tendo como restrições os rácios entre variáveis do Diagrama de Fogo e Carga Máxima estabelecida consoante tipo de Infraestrutura, usando o Método *GRG Não Linear*. O resultado será o Seguinte:

Objetivo do Desmonte		Valor	Restrições Diagrama de Fogo Obtido				A Obedecer	Geometria Diagrama de Fogo Gerada		Custo (€)	
Volum (m³)		50000	S/B	1,50	>=	1	●	Afastamento (B)	3,38	83 004,20 €	
%passante		80	S/B	1,50	<=	1,5	●	Altura do Banco (H)	10,00	Tabela de Preços	Preço
passante máximo (mm)		650	T/B	0,70	>=	0,7	●	Espaçamento (S)	5,07	Preço/Sistema Iniciação	10,00 €
Limitações Impostas		Valor	T/B	0,70	<=	1	●	Tamponamento (T)	2,37	Preço/Quilo explosivo	2,00 €
∅ Perfuração (mm)		110	J/B	0,35	>=	0,3	●	Subperaturação (J)	1,20	Preço/Metro perfurado	8,00 €
Altura Banco (H)(m)		10	J/B	0,35	<=	0,5	●	numero Furos	292,00		
Nº Filas		3	H/B	2,96	>=	1	●	Quilos por furo			
Desvio Perfuração (m)		0,1	Restrições Granométricas				Obtido	A Obedecer	Volume de Carga	0,084	
Parâmetros in-Situ		Valor	n (Índice de Uniformidade)	1,70	>=	0,7	●	Q máx permitido por furo	95,07	●	
Rock Factor		11	n (Índice de Uniformidade)	1,70	<=	2,2	●	Q Usado por furo	92,33		
UCS (Mpa)		230	Volume	50099,67	>=	50000	●	Propriedades dos Explosivos			
Peso Volumico (kN/m³)		26,4	Passante	650,00	<=	650	●	Densidade (kg/m³)	1100		
Freq Dom (Hertz)		11	Restrições PPV					RWS	110		
Tipo de Estrutura		Distância (m)		Distancia	PPV Gerado		Q Máx	Diamentro (mm)	110		
Estrut Sens		600	Estrutura Sensível	600	2,94	●	95,07	Consumo Especifico (K)	0,54		
Estrut Corrente		800	Estrutura Corrente	800	1,93	●	435,95	Granometria			
Estrut Reforçada		600	Estrutura Reforçada	600	2,94	●	632,53	Tamanho Característico (Xc)	490,95		
Escolha Explosivo		Densidade	RWS								
exp1		1050	108								
exp2		1100	110								
exp3		1300	110								

Figura 33 - Parâmetros Obtidos que obedecendo a suas restrições permitem obter o menor custo de desmonte

É possível verificar que todas as Restrições e Condições de Otimização Foram Satisfeitas. A Curva de Fragmentação daqui resultante e Vibração originada em função da distancia percorrida encontram-se no [ANEXO A](#).

De referir ainda que esta pode não ser a melhor Solução para o Problema tendo em consideração a complexidade e Limitação de Variáveis de Decisão do Modelo, mas que é, certamente, a melhor solução a nível Local de acordo com os vários conjuntos de variáveis analisados.

6 Avaliação Económica

De modo a validar o modelo criado sob o ponto de vista de resultados económicos, foram fornecidos dados reais de três desmontes contendo informação sobre:

- Volume e granulometria pretendidos pós desmonte;
- Altura de Bancada;
- Diâmetro de perfuração;
- Número de filas a detonar por pega de fogo com respetiva carga por furo;
- *Rock Factor*;
- Custo do Sistema de Iniciação (SI);
- Custo da perfuração por metro;
- Quilos de explosivo;
- Geometria do diagrama de fogo adotado (com respetivas restrições e custo associado), para se poder fazer uma comparação com os resultados obtidos a partir do modelo criado.

Não tendo sido fornecida informação da frequência dominante, peso volúmico e UCS do maciço, assim como da distancia a infraestruturas próximas da zona de desmonte, estas foram assumidas como invariantes e encontram-se destacadas no modelo criado a cor vermelha de modo a ser possível obter uma estimação da curva de PPV.

Sendo a densidade e RWS do explosivo utilizado um parâmetro importante para a estimação do Afastamento à frente livre e curva granulométrica gerada, foi assumido um valor de RWS de 110 para os três desmontes. Com o dado fornecido de carga por furo, é calculada a densidade do explosivo para cada desmonte manipulando a formula do volume de carga, resultando na equação **20**.

$$Densidade\ explosivo = \frac{Carga\ por\ Furo\ (Kg)}{Volume\ de\ Carga\ (m^3)} \quad (Equação\ 20)$$

6.1 Desmonte 1 - Resultados Reais Fornecidos

Na imagem abaixo é possível visualizar a azul os dados fornecidos, a amarelo os dados estimados, e a vermelho os dados que foram assumidos.

Requisitos Impostos		Geometria Diagrama de Fogo Gerada		Tabela de Preços	
Volume (m³)	95 651	Afastamento (B)	5,60	Preço/Sistema Iniciação	5,00 €
%passante	90	Altura do Banco (H)	10,2	Preço/Quilo explosivo	1,00 €
passante máximo (mm)	427	Espaçamento (S)	7,56	Preço/Metro perfurado	13,00 €
∅ Perfuração (mm)	171	Tamponamento (T)	4,90		
Altura Banco (H)(m)	10,2	Subperfuração (J)	1,68		
Nº Filas	8	numero Furos	381	Custo (€)	147 347,94 €
Desvio Perfuração (m)					
		Quilo Exp p/furo	227,3		
Parâmetros in-Situ		volume carga	0,16	Granulometria	
Rock Factor	4,71	RWS	110	Tamanho Característico (Xc)	266,11
UCS (Mpa)	230	densidade	1417,95	Granulometria a 50% (Xm)	200,34
Peso Volumico (kN/m³)	26,4			Índice Uiformidade (n)	1,29
Freq Dom (Hertz)	11				
		Restrições Diagrama de Fogo	Obtido	A Obedecer	
Distância a Estruturas (m)		S/B	1,35	>=	1
Estrut Sens	1200	S/B	1,35	<=	1,5
Estrut Corrente	800	T/B	0,88	>=	0,7
Estrut Reforçada	600	T/B	0,88	<=	1
		J/B	0,30	>=	0,3
		J/B	0,30	<=	0,5
		H/B	1,82	>=	1,6

Figura 34 - Dados Reais Fornecidos - Desmonte 1

A restrição de H/B encontra-se a vermelho pois aquando a obtenção dos dados foi referido que este rácio rondava o valor de 2. Estando este valor abaixo, assumir-se-á para este, e para outros desmontes, que este rácio deverá ser de ≥ 1.6 pois é um valor usual para desmonte a céu aberto (Hustrulid, 1999).

6.1.1 Desmonte 1 - Resultados Estimados com Modelo criado

Ao utilizar o modelo de otimização criado visando obter o mesmo volume de material com suas especificações granulométricas, obtiveram-se os seguintes dados ilustrados na figura abaixo.

Objetivo do Desmonte		Valor	
Volume (m³)		95651	
%passante		90	
passante máximo (mm)		427	

Limitações Impostas		Valor	
Ø Perfuração (mm)		171	
Altura Banco (H)(m)		10,2	
Nº Filas		8	
Desvio Perfuração (m)			

Parâmetros in-Situ		Valor	
Rock Factor		4,71	
UCS (Mpa)		230	
Peso Volumico (kN/m³)		26,4	
Freq Dom (Hertz)		11	

Tipo de Estrutura		Distância (m)	
Estrut Sens		1200	
Estrut Corrente		800	
Estrut Reforçada		600	

Escolha Explosivo		Densidade	RWS
exp1		1417	110
exp2		1417	110
exp3		1417	110

Restrições Diagrama de Fogo Obtido				A Obedecer			
S/B	1,50	≥	1	●			
S/B	1,50	≤	1,5	●			
T/B	0,70	≥	0,7	●			
T/B	0,70	≤	1	●			
J/B	0,48	≥	0,3	●			
J/B	0,48	≤	0,5	●			
H/B	1,71	≥	1	●			

Restrições Granulométricas Obtido				A Obedecer			
n (Índice de Uniformidade)	1,66	≥	0,7	●			
n (Índice de Uniformidade)	1,66	≤	2,2	●			
Volume	95651,00	≥	95651	●			
Passante	427,00	≤	427	●			

Restrições PPV				Q Máx	
Estrutura Sensível	Distancia	PPV Gerado	●	380,27	
Estrutura Corrente	800	4,43	●	435,95	
Estrutura Reforçada	600	6,75	●	632,53	

Geometria Diagrama de Fogo Gerada		Valor	
Afastamento (B)		5,97	
Altura do Banco (H)		10,20	
Espaçamento (S)		8,93	
Tamponamento (T)		4,18	
Subperfuração (J)		2,83	
numero Furos		176,00	

Quilos por furo		Valor	
Volume de Carga		0,203	
Q máx permitido por furo		380,27	●
Q Usado por furo		288,25	

Propriedades dos Explosivos		Valor	
Densidade (kg/m3)		1417	
RWS		110	
Díametro (mm)		171	
Consumo Especifico (K)		0,53	

Granulometria		Valor	
Tamanho Característico (Xc)		258,39	
Granulometria a 50% (Xm)		207,19	
Índice Uniformidade (n)		1,66	

Custo (€)		81 434,41 €	
Tabela de Preços		Preço	
Preço/Sistema Iniciação		5,00 €	
Preço/Quilo explosivo		1,00 €	
Preço/Metro perfurado		13,00 €	

Figura 35 - Resultados do Desmonte 1 com o Modelo Criado

Nesta imagem é possível verificar o cumprimento do objetivo e restrições impostas com o seu custo total associado

6.1.2 Desmorte 1 – Comparação de Resultados

Na tabela seguinte é possível visualizar a diferença entre os parâmetros da geometria do diagrama de fogo fornecida com a geometria gerada a partir do modelo criado.

Tabela 17- Comparação da Geometria do Diagrama de Fogo Real com a Obtida com o Modelo Criado - Desmorte 1

Geometria Diagrama de Fogo Gerada	Parâmetros Reais	Parâmetros do Modelo
Afastamento (B)	5,60	5,97
Altura de Bancada (H)	10,2	10,20
Espaçamento (S)	7,56	8,93
Tamponamento (T)	4,90	4,18
Subperfuração (J)	1,68	2,91
numero Furos	381	176,00

Na Figura abaixo é possível observar a curva granulométrica real e a gerada com o modelo, onde o declive da curva obtida com o modelo apresenta maior declive, e por isso menor diversidade granulométrica.

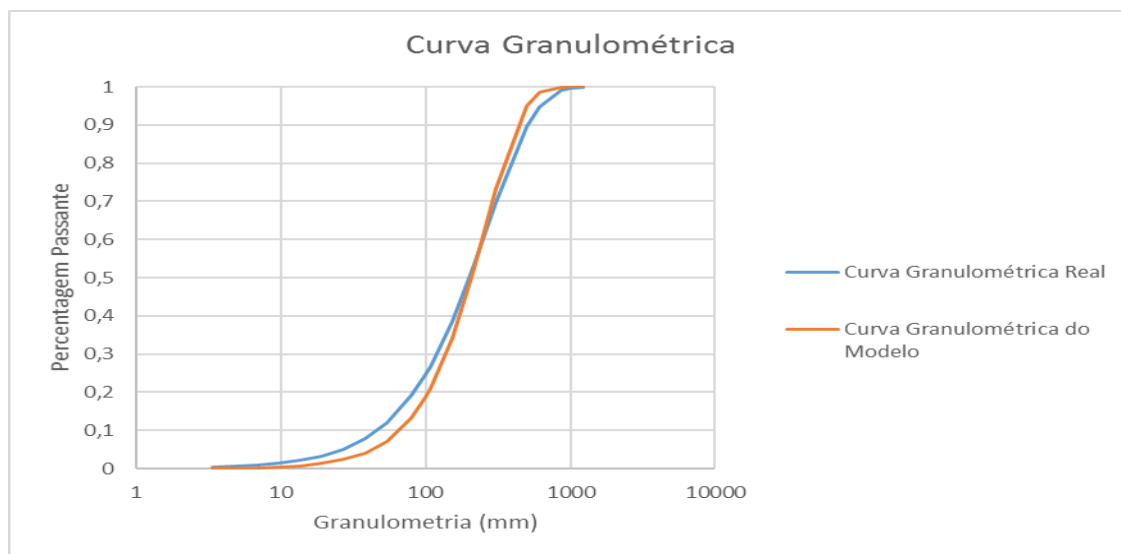


Figura 36 - Comparação das Curvas Granulométrica Pós Desmorte 1

Por fim, é possível verificar a diferença do custo total real com o custo total estimado a partir dos parâmetros obtidos com o modelo criado.

Tabela 18 - Comparação de Custos - Desmorte 1

Custo Total - Dados Reais	147 347,9 €
Custo Total - Dados Modelo	81 434,4 €
Diferença Custo	65 913,5 €

6.2 Desmonte 2 - Resultados Reais Fornecidos

Na imagem abaixo é possível visualizar a azul os dados fornecidos, a amarelo os dados estimados, e a vermelho os dados que foram assumidos.

Requisitos Impostos		Geometria Diagrama de Fogo Gerada		Tabela de Preços	
Volume (m³)	101640	Afastamento (B)	4,80	Preço/Sistema Iniciação	5,00 €
%passante	50	Altura do Banco (H)	10	Preço/Quilo explosivo	1,00 €
passante máximo (mm)	246	Espaçamento (S)	5,50	Preço/Metro perfurado	13,00 €
Ø Perfuração (mm)	171	Tamponamento (T)	3,50		
Altura Banco (H)(m)	10	Subperfuração (J)	1,6		
Nº Filas	12	numero Furos	402	Custo (€)	144 157,20 €
Desvio Perfuração (m)					
Parâmetros in-Situ		Quilo Exp p/furo		Granulometria	
Rock Factor	5	Quilo Exp p/furo	202,8	Tamanho Característico (Xc)	196,41
UCS (Mpa)	230	volume carga	0,19	Granulometria a 50% (Xm)	154,21
Peso Volumico (kN/m³)	26,4	RWS	110	Índice Uiformidade (n)	1,52
Freq Dom (Hertz)	11	densidade	1090,19		
Distância a Estruturas (m)		Restrições Diagrama de Fogo		A Obedecer	
Estrut Sens	1200	S/B	1,15	>=	1
Estrut Corrente	800	S/B	1,15	<=	1,5
Estrut Reforçada	600	T/B	0,73	>=	0,7
		T/B	0,73	<=	1
		J/B	0,33	>=	0,3
		J/B	0,33	<=	0,5
		H/B	2,08	>=	1,6

Figura 37 - Dados Reais Fornecidos - Desmonte 2

6.2.1 Desmonte 2 - Resultados Estimados com Modelo criado

Ao utilizar o modelo de otimização criado visando obter o mesmo volume de material com suas especificações granulométricas, obtiveram-se os seguintes dados ilustrados na figura abaixo.

Objetivo do Desmonte			Restrições Diagrama de Fogo				Geometria Diagrama de Fogo Gerada		Custo (€)	
Valor	Obtido	A Obedecer							80 481,98 €	
Volume (m³)	101640	1	1,49	≥	1	●	Afastamento (B)	5,24		
%passante	50	1,5	1,49	≤	1,5	●	Altura do Banco (H)	10,00		
passante máximo (mm)	246	0,7	0,92	≥	0,7	●	Espaçamento (S)	7,83		
Limitações Impostas			Restrições Diagrama de Fogo				Tabela de Preços		Preço	
Ø Perfuração (mm)	171	1	0,92	≤	1	●	Preço/Sistema Iniciação	5,00 €		
Altura Banco (H)(m)	10	0,3	0,30	≥	0,3	●	Preço/Quilo explosivo	1,00 €		
Nº Filas	12	0,5	0,30	≤	0,5	●	Preço/Metro perfurado	13,00 €		
Desvio Perfuração (m)		1	0,30	≥	1	●				
Parâmetros in-Situ			Restrições Granulométricas				Quilos por furo			
Rock Factor	5	0,7	Obtido		A Obedecer		Volume de Carga	0,155		
UCS (Mpa)	230	2,2	n (Índice de Uniformidade)	1,34	≥	0,7	Q máx permitido por furo	380,27	●	
Peso Volumico (kN/m³)	26,4	101640	n (Índice de Uniformidade)	1,34	≤	2,2	Q Usado por furo	169,10		
Freq Dom (Hertz)	11	246	Passante	101640,00	≥	101640				
				246,00	≤	246				
Tipo de Estrutura			Restrições PPV				Propriedades dos Explosivos			
Distância (m)			Distancia		PPV Gerado		Q Máx			
Estrut Sens	1200	1,66	Estrutura Sensível	1200	1,66	●	Densidade (kg/m3)	1091		
Estrut Corrente	800	3,00	Estrutura Corrente	800	3,00	●	RWS	110		
Estrut Reforçada	600	4,57	Estrutura Reforçada	600	4,57	●	Dia mentro (mm)	171		
Escolha Explosivo							Consumo Especifico (K)		0,41	
exp1	1091	110					Granulometria			
exp2	1091	110					Tamanho Caracteristico (Xc)		323,70	
exp3	1091	110					Granulometria a 50% (Xm)		245,96	
							Indice Uiformidade (n)		1,34	

Figura 38 - Resultados do Desmonte 2 com o Modelo Criado

Nesta imagem é possível verificar o cumprimento do objetivo e restrições impostas com o seu custo total associado.

6.2.2 Desmonte 2 – Comparação de Resultados

Na tabela seguinte é possível visualizar a diferença entre os parâmetros da geometria do diagrama de fogo fornecida com a geometria gerada a partir do modelo criado.

Tabela 19 - Comparação da Geometria do Diagrama de Fogo Real com a Obtida com o Modelo Criado - Modelo 2

Geometria Diagrama de Fogo Gerada	Parâmetros Reais	Parâmetros do Modelo
Afastamento (B)	4,80	5,24
Altura de Bancada (H)	10	10,00
Espaçamento (S)	5,50	7,83
Tamponamento (T)	3,50	4,82
Subperfuração (J)	1,6	1,57
numero Furos	402	248,00

Na Figura abaixo é possível observar a curva granulométrica real e a gerada com o modelo. Embora estas não se sobreponham, o critério estabelecido de 50% do passante ter 246mm de granulometria é obedecido.

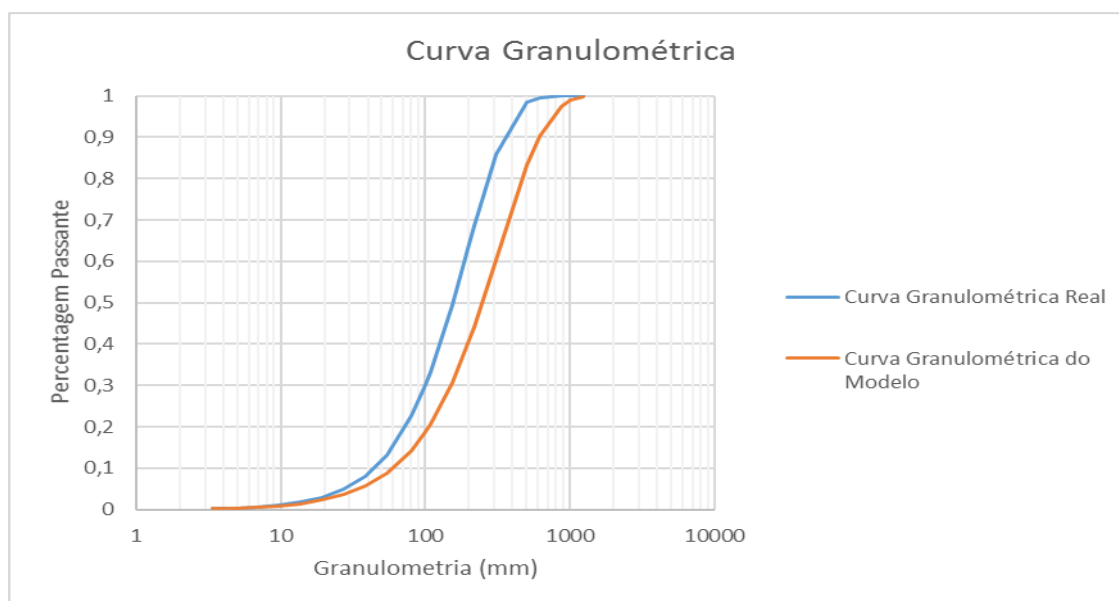


Figura 39 - Comparação das Curvas Granulométrica Pós Desmonte 2

Por fim, é possível verificar a diferença do custo total real com o custo total estimado a partir dos parâmetros obtidos com o modelo criado.

Tabela 20 - Comparação de Custos - Desmonte 2

Custo Total - Dados Reais	144 157,20 €
Custo Total - Dados Modelo	80 481,98 €
Diferença Custo	63 675,2 €

6.3 Desmonte 3 - Resultados Reais Fornecidos

Na imagem abaixo é possível visualizar a azul os dados fornecidos, a amarelo os dados estimados, e a vermelho os dados que foram assumidos.

Requisitos Impostos		Geometria Diagrama de Fogo Gerada		Tabela de Preços			
Volume (m³)	86565	Afastamento (B)	4,80	Preço/Sistema Iniciação	5,00 €		
%passante	50	Altura do Banco (H)	10	Preço/Quilo explosivo	1,00 €		
passante máximo (mm)	182	Espaçamento (S)	5,50	Preço/Metro perfurado	13,00 €		
Ø Perfuração (mm)	171	Tamponamento (T)	3,50				
Altura Banco (H)(m)	10	Subperfuração (J)	1,2				
Nº Filas	9	numero Furos	323	Custo (€)	121 008,72 €		
Desvio Perfuração (m)							
Parâmetros in-Situ		Quilo Exp p/furo		Granulometria			
Rock Factor	5	volume carga	0,18	Tamanho Característico (Xc)	186,74		
UCS (Mpa)		RWS	110	Granulometria a 50% (Xm)	144,79		
Peso Volumico (kN/m³)		densidade	1266,93	Indice Uiformidade (n)	1,44		
Freq Dom (Hertz)							
Distância a Estruturas (m)		Restrições Diagrama de Fogo		Obtido		A Obedecer	
Estrut Sens		S/B	1,15	≥	1	●	
Estrut Corrente		S/B	1,15	≤	1,5	●	
Estrut Reforçada		T/B	0,73	≥	0,7	●	
		T/B	0,73	≤	1	●	
		J/B	0,25	≥	0,3	●	
		J/B	0,25	≤	0,5	●	
		H/B	2,08	≥	1,6	●	

Figura 40 - Dados Reais Fornecidos - Desmonte 3

6.3.1 Desmonte 3 - Resultados Estimados com Modelo criado

Ao utilizar o modelo de otimização criado visando obter o mesmo volume de material com suas especificações granulométricas, obtiveram-se os seguintes dados ilustrados na figura abaixo.

Objetivo do Desmonte		Valor	Restrições Diagrama de Fogo Obtido				A Obedecer		Geometria Diagrama de Fogo Gerada		Custo (€)	
Volume (m³)		86565	S/B	1,11	≥	1	●	Afastamento (B)	5,64	93 791,45 €		
%passante		50	S/B	1,11	≤	1,5	●	Altura do Banco (H)	10,00	Tabela de Preços		
passante máximo (mm)		182	T/B	0,70	≥	0,7	●	Espaçamento (S)	6,26	Preço		
Limitações Impostas			T/B	0,70	≤	1	●	Tamponamento (T)	3,95	Preço/Sistema Iniciação		
∅ Perfuração (mm)		171	J/B	0,30	≥	0,3	●	Subperfuração (J)	1,70	Preço/Quilo explosivo		
Altura Banco (H)(m)		10	J/B	0,30	≤	0,5	●	numero Furos	245,00	Preço/Metro perfurado		
Nº Filas		9	H/B	1,77	≥	1	●					
Desvio Perfuração (m)		0,1	Restrições Granulométricas				A Obedecer		Quilos por furo			
Parâmetros in-Situ			n (Índice de Uniformidade)	1,36	≥	0,7	●	Volume de Carga	0,178			
Rock Factor		5	n (Índice de Uniformidade)	1,36	≤	2,2	●	Q máx permitido por furo	380,27			
UCS (Mpa)		230	Volume	86564,99	≥	86565	●	Q Usado por furo	225,66			
Peso Volumico (kN/m³)		26,4	Passante	182,00	≤	182	●	Propriedades dos Explosivos				
Freq Dom (Hertz)		11	Restrições PPV				Q Máx		Densidade (kg/m3)	1267		
Tipo de Estrutura			Distancia	PPV Gerado				RWS	110			
Estrut Sens		1200	Estrutura Sensível	1200	2,05	●	380,27	Dia mentro (mm)	171			
Estrut Corrente		800	Estrutura Corrente	800	3,71	●	435,95	Consumo Especifico (K)	0,64			
Estrut Reforçada		600	Estrutura Reforçada	600	5,65	●	632,53	Granulometria				
Escolha Explosivo									Tamanho Caracteristico (Xc)	238,30		
exp1	Densidade	1267	RWS	110					Granulometria a 50% (Xm)	181,97		
exp2		1267		110					Indice Uiformidade (n)	1,36		
exp3		1267		110								

Figura 41- Resultados do Desmonte 3 com o Modelo Criado

Nesta imagem é possível verificar o cumprimento do objetivo e restrições impostas com o seu custo total associado.

6.3.2 Desmonte 3 – Comparação de Resultados

Na tabela seguinte é possível visualizar a diferença entre os parâmetros da geometria do diagrama de fogo fornecida com a geometria gerada a partir do modelo criado.

Tabela 21 - Comparação da Geometria do Diagrama de Fogo Real com a Obtida com o Modelo Criado - Modelo 3

Geometria Diagrama de Fogo Gerada	Parâmetros Reais	Parâmetros do Modelo
Afastamento (B)	4,80	5,97
Altura de Bancada (H)	10	10,20
Espaçamento (S)	5,50	8,93
Tamponamento (T)	3,50	4,18
Subperfuração (J)	1,2	2,91
numero Furos	323	176,00

Na Figura abaixo é possível observar a curva granulométrica real e a gerada com o modelo. Embora estas não se sobreponham, o critério estabelecido de 50% do passante ter 182mm de granulometria é obedecido.

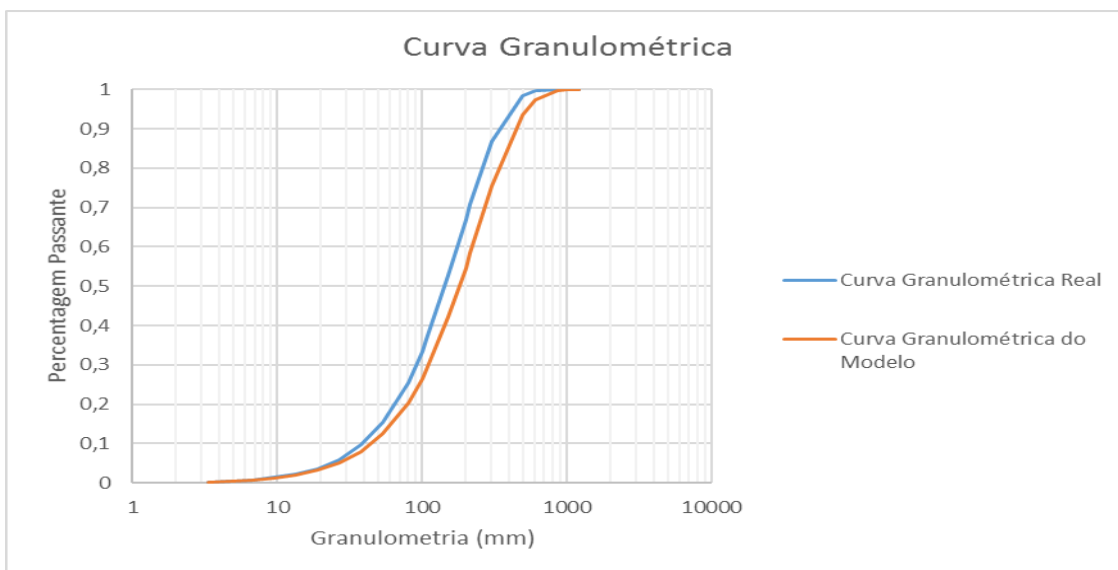


Figura 42 - Comparação das Curvas Granulométrica Pós Desmonte 3

Por fim, é possível verificar a diferença do custo total real com o custo total estimado a partir dos parâmetros obtidos com o modelo criado.

Tabela 22 - Comparação de Custos - Desmonte 3

Custo Total - Dados Reais	121 008,7 €
Custo Total - Dados Modelo	93 791,4 €
Diferença Custo	27 217,3 €

6.4 Discussão dos Resultados

Ao analisar a diferença entre a geometria do diagrama de fogo dos três desmontes com as geometrias propostas pelo modelo de otimização criado, verifica-se que nos três desmontes, o modelo gera um maior afastamento (B) e espaçamento (S) do que o afastamento e espaçamento reais. O incremento destes parâmetros faz com que a área a desmontar por furo (equação 6, capítulo 2) seja maior, reduzindo assim o número de furos necessários para a obtenção do volume de desmonte pretendido.

Com recurso à equação de Rosin-Rammler traçaram-se as curvas granulométricas geradas pelos desmontes reais e pelos desmontes gerados a partir do modelo. Uma vez que estas são semelhantes entre si, efetuou-se uma análise gráfica por classes granulométricas (representada abaixo), no qual se pode verificar que a geometria adotada pelo modelo reduz a produção de granulometrias mais finas (0-10mm).

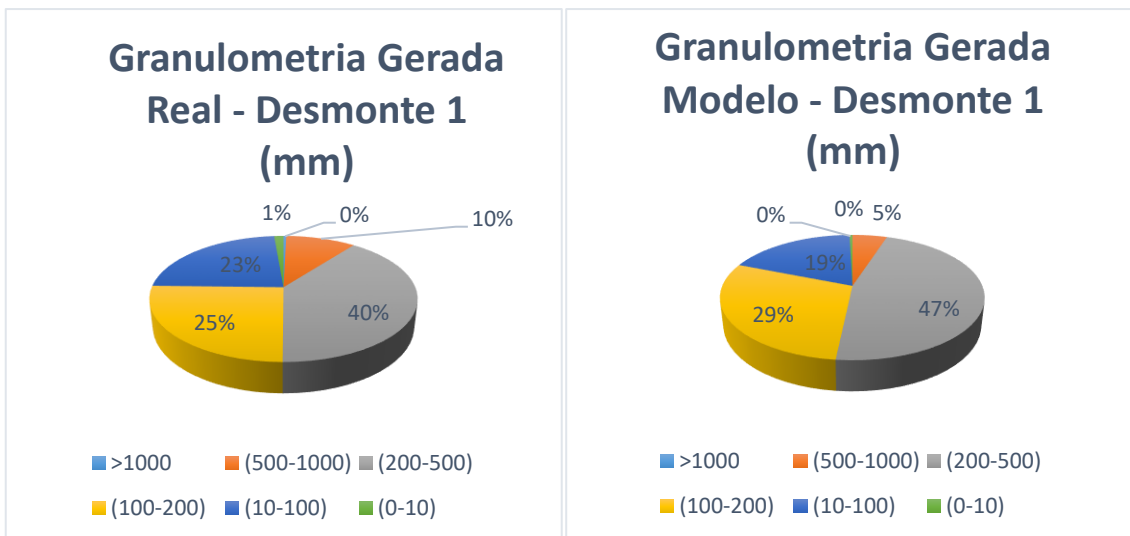


Figura 43 - Comparação Percentual Granulométrica - Desmonte 1

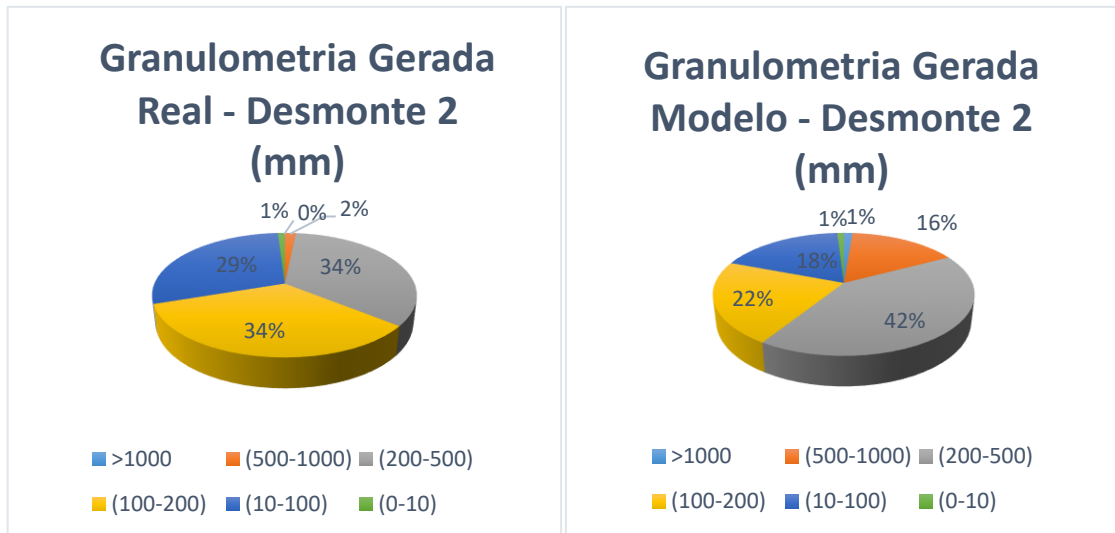


Figura 44 - Comparação Percentual Granulométrica - Desmorte 2

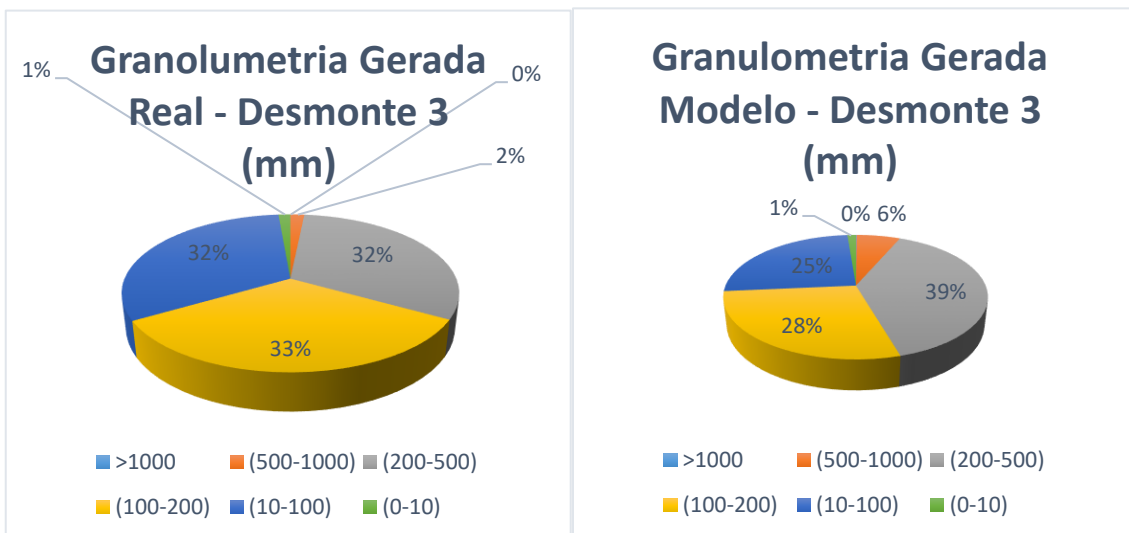


Figura 45 - Comparação Percentual Granulométrica - Desmorte 3

De salientar a diferença de custo associado a cada desmorte, sendo o custo dos desmontes efetuados com o modelo proposto significativamente menores do que os custos associados aos desmontes reais efetuados.

7 Conclusão

Com a presente dissertação demonstra-se que é possível construir modelos matemáticos que permitem gerar resultados para variáveis geométricas do diagrama de fogo com um custo associado mínimo e que obedecem às restrições impostas. Para o presente caso, assume-se que a empresa que promove o desmonte tem os parâmetros de Altura de Bancada (H) e Diâmetro de Carga (D) predefinidos, tendo estes uma influencia direta na obtenção do parâmetro de Afastamento (B), que por sua vez influencia as restrições geométricas impostas de H/B, S/B, T/B, e J/B. Posto isto, é importante que a empresa interessada em promover o desmonte faça uma escolha sensata no Diâmetro (D) do Bit de Perfuração em função da Altura de Bancada (B) adotada pela mesma.

Uma vez que o desmonte é única fase do projeto “*mine to mil*” que tem subida de custo associada com a geração de material mais fragmentado, o modelo criado teve como objetivo obter uma geometria do diagrama de fogo que tivesse o menor custo associado e que melhor se adequasse ao volume e granulometria pretendido, tendo também em consideração as vibrações causadas pela detonação. Pode verificar-se que este objetivo é concretizado quando é feita a comparação dos custos associados à geometria obtida através do modelo criado, com os dados reais fornecidos, chegando algumas destas diferenças de custo a valores na ordem dos 60,000€.

Seria interessante que os dados de desmonte real fornecidos tivessem informação no que concerne à proximidade de infraestruturas para que pudesse ter sido feita uma comparação entre as curvas de PPV real e obtidas a partir do modelo. Como tal não foi possível, apenas se fez comparação entre as curvas granulométricas.

Tendo recorrido à ferramenta da *Microsoft Excel Standard Solver* para a construção do modelo, e possuindo este uma limitação de 200 conjuntos de variáveis, é bem possível que haja uma geometria de diagrama de fogo que tenha um custo associado mais baixo do que o gerado pelo modelo. Porém, não deixa de ser uma ferramenta de otimização viável à falta de outra mais competente.

7.1 Perspetivas Futuras

Devido à limitação de tempo e de paginação impostas para a realização da presente dissertação, é proposta a seguinte lista de perspetivas futuras para complemento do trabalho aqui apresentado:

- Determinação do melhor diâmetro de perfuração a utilizar, tendo em consideração a altura de bancada e propriedades dos explosivos;
- Concretização de desmontes com os parâmetros propostos pelo modelo criado de modo a comprovar a validade do mesmo;
- Realização de um modelo matemático semelhante, mas com maior limite de leitura entre variáveis;
- Comparação de custos energéticos associados ao processo de britagem do material proveniente de desmontes reais, com a de desmontes gerados pela utilização do modelo. Determinação da curva granulométrica pós desmonte que melhor favorece as necessidades dos britadores em funcionamento;
- Análise da influência da granulometria gerada pelo modelo construído no sistema de carga e transporte. Determinação da curva granulométrica pós desmonte que melhor favorece em termos de custo/eficácia esta fase de projeto;
- Ferramenta matemática que selecione o melhor explosivo a utilizar consoante grau e orientação das fraturas presentes no maciço.

8 Bibliografia

- Bhandari, S. (1997).** *Engineering rock blasting operations*. Rotterdam, Netherlands: A.A. Balkema.
- Cano, M., Couceiro, P., Calvo, C. 2011.** Marine Blasting on the New Panama Canal, Pacific Entrance. *International Society Of Explosives Engineers*.
- Cho, S. & Kaneko, K. (2004).** Rock Fragmentation Control in Blasting. *Materials Transactions*, 45(5), 1722-1730. <http://dx.doi.org/10.2320/matertrans.45.1722>
- Gheibie, S., Aghababaei, H., Hoseinie, S., & Pourrahimian, Y. (2009).** Modified Kuz—Ram fragmentation model and its use at the Sungun Copper Mine. *International Journal Of Rock Mechanics And Mining Sciences*, 46(6), 967-973. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijrmms.2009.05.003>
- Hillier, F. & Lieberman, G. (2005).** *Introduction to operations research*. New York, NY [u.a.]: McGraw-Hill.
- Holmberg, R et al. (2005).** The Kuz-Ram fragmentation model – 20 years on. *European Federation of Explosives Engineers*.
- Hustrulid, W. (1999).** *Blasting principles for open pit mining*. Rotterdam: Balkema.
- Kumar, R., Choudhury, D., & Bhargava, K. (2016).** Determination of blast-induced ground vibration equations for rocks using mechanical and geological properties. *Journal Of Rock Mechanics And Geotechnical Engineering*, 8(3), 341-349. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jrmge.2015.10.009>
- López Jimeno, C., López Jimeno, E., & García Bermúdez, P. (2003).** *Manual De Perforación Y Voladura De Rocas*. Madrid: Carlos López Jimeno.
- NP 2074:2015.** *Avaliação da influência de vibrações impulsivas em estruturas*. Instituto Português da Qualidade.
- Ríos Vazquez, J. (2011).** *Curso Básico De Explosivos*. Oviedo: Fundación Luis Fernández de Velasco.
- Sánchez, O., Silverio, G., Pinedo, A. 2007.** *Incremento de la rentabilidad de operaciones mineras a cielo abierto por eliminación de la sobreperforación*.
- Sanchidrián, J., Muñiz, E. 2000.** *Curso de Tecnología de Explosivos*. Madrid: Fundación Gomez Pardo, 2000.
- Shim, H., Ryu, D., Chung, S., Synn, J., & Song, J. (2009).** Optimized blasting design for large-scale quarrying based on a 3-D spatial distribution of rock factor. *International Journal Of Rock Mechanics And Mining Sciences*, 46(2), 326-332. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijrmms.2008.07.006>

Silva, L. 2005. *Tema VI. A Influencia Dos Desmontes Por Explosivos na Estabilidade dos Taludes.* Córdoba, Argentina: Geomecánica aplicada a la pequena mineria, 2005.

Treleaven, T., Watson, J. 1995. *Non-Eletric Shock Tube Iniciation Systems Applications And Hookups.* USA: The Ensign-Bickford Company.

Wagner, H. (1975). *Principles Of Operations Research.* Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall.

Yermakov, D. 2013. Mine-to-mill optimisation: effect of feed size on mill throughput. No. 48 SRK Consulting's International Newsletter.

8.1 Links Consultados

[1]<https://miningandblasting.wordpress.com/2012/10/12/rock-breakage-and-blast-design-considerations-in-openpit/>

Consultado a 05/03/2016

[2]<http://www.solver.com/excel-solver-what-solver-can-and-cannot-do>

Consultado a 12/08/2016

[3]<http://www.solver.com/standard-excel-solver-dealing-problem-size-limits#Limits>

Consultado a 14/08/2016

[4] <http://inside.mines.edu/EMI-Physical-Property-Measurements>

Consultado a 04/09/2016

ANEXOS

ANEXO A – Vibração e Granulometria estimada do Exemplo de Aplicação

