

GEORGE EMILIANO RAMIREZ VILLA REAL

ANÁLISE DO PODER DISRUPTIVO DE EXPLOSIVOS CIVIS

**São Paulo
2019**

GEORGE EMILIANO RAMIREZ VILLA REAL

ANÁLISE DO PODER DISRUPTIVO DE EXPLOSIVOS CIVIS

Trabalho de Mestrado em Engenharia Geológica e de Minas desenvolvido pelo Instituto Superior Técnico (IST) na Politecnico di Torino (PoliTo) que, à luz do acordo de duplo-graduação, equivale ao trabalho de formatura apresentado à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Graduação em Engenharia

Orientadores:
Prof. Dr. Pedro A. M. Bernardo (IST)
Profa. Dra. Marilena Cardu (PoliTo)

Área de concentração:
Engenharia de Minas

**São Paulo
2019**

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Catálogo-na-publicação

Ramirez, George Emiliano

Análise do Poder Disruptivo de Explosivos Civis / G. E. Ramirez -- São Paulo, 2019.

72 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo.

1.Desmonte de Rochas 2.Explosivos em Minas 3.Rochas Calcárias (Itália) I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo II.t.

Análise do Poder Disruptivo de Explosivos Civis

George Emiliano Ramirez Villa Real

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em

Engenharia Geológica e de Minas

Orientadores:

Professor Doutor Pedro Alexandre Marques Bernardo

Professora Doutora Marilena Cardu

Júri:

Presidente: Professora Doutora Maria Teresa Da Cruz Carvalho

Orientador: Professor Doutor Pedro Alexandre Marques Bernardo

Vogal 1: Professor Doutor Gustavo André Paneiro

Vogal 2: Professor Doutor Giorgio Francesco Cesare de Tomi

Outubro, 2019

Declaração

Declaro que o presente documento é um trabalho original da minha autoria e que cumpre todos os requisitos do Código de Conduta e Boas Práticas da Universidade de Lisboa.

Agradecimentos

Aos incansáveis grandes mestres da Escola Politécnica da USP, Prof. Dra. Ana Carolina, Prof. Dra. Carina Ulsen, Prof. Dr. Giorgio de Tomi, Prof. Dr. José Renato, Prof. Dr. Maurício Bergerman e Prof. Dr. Valério da Silva, pelas conversas e recomendações que puderam guiar os sonhos de um jovem.

Aos professores do Instituto Superior Técnico: Prof. Dra. Palmira da Silva, por acreditar que podemos mudar o mundo em que vivemos; Prof. Dra. Teresa Carvalho, pela calorosa recepção desde 2017 quando o Técnico se tornou a minha única opção para mobilidade; e em especial ao Professor Dr. Pedro Bernardo, professor orientador destas palavras, por confiar no meu potencial e não medir esforços para me ajudar no desenvolvimento desse Trabalho de Conclusão de Curso em Torino.

À Professora Dra. Marilena Cardú da Politecnico di Torino pela co-orientação inigualável e tornar a Itália uma experiência inesquecível.

E, por fim, agradeço especialmente ao meu avô, Joaquin Ramirez, e a minha falecida avó, Maria del Pilar Orobio, por me ensinarem o que o amor é capaz de construir. Este meu trabalho é a singela forma que encontrei de agradecer por tudo que vocês fizeram por mim.

Resumo

A discussão do poder disruptivo é feita através dois principais pontos: verificar a ocorrência de falhas de projeto durante a aplicação do material explosivo e examinar a eficiência do explosivo. Neste contexto, as incorreções comparam e classificam os diferentes projetos que exploram o mesmo bem mineral. Já o segundo ponto é capaz de mensurar a eficiência do explosivo ao comparar a quantidade teórica com a quantidade de material explosivo realmente utilizada. Assim, a interpretação dos dois resultados indica ou não o poder disruptivo do explosivo.

Desta maneira, esta Dissertação sugere a discussão do poder disruptivo através da análise de dois principais pontos no contexto de rocha calcária:

- Fórmulas empíricas que envolvem parâmetros geométricos do diagrama de fogo foram confirmadas. Estas fórmulas possuem, como principal objetivo, a otimização da eficiência do explosivo, isto é, qualquer parâmetro fora do intervalo pode ser considerado uma eventual incorreção de projeto.
- Comparou-se a quantidade teórica de explosivos com a quantidade realmente utilizada. Esta comparação tinha como objetivo verificar a presença da quantidade eficiente de substância explosiva, para assim discutir quais foram os fatores de cada estudo de caso que culminou na maior ou menor eficiência e, conseqüentemente, no maior poder disruptivo.

Assim, ao analisar o poder disruptivo de dois explosivos, NITRAM 5 e Premex 831, aplicados em 8 diagramas de fogo distintos durante a exploração de rocha calcária: o NITRAM 5 apresentou, de acordo com a metodologia proposta por esta Dissertação, um maior poder disruptivo que o Premex 831.

PALAVRAS-CHAVE:

Poder disruptivo, eficiência de explosivos, explosivos comerciais, consumo específico

Abstract

The suggested methodology pretended to measure the level of the disruptive power of each commercial explosive. Two observations were developed to measure the disruptive power: first, the explosive manipulation should be close the perfection, so any misapplication could depreciate – by the new methodology – the disruptive power. The explosive misapplication also develops a preliminary analysis: the amount of failures could compare and classify the different types of mining exploitation with the same mineral. Finally, the second observation was the understanding of the explosive efficiency by the comparison of the theoretical and the powder factor. Both observations showed the explosive disruptive power.

Developing a discussion about the level of the disruptive power, the main observations were constrained on the limestone context:

- The geometric charging layout was checked by the empirical formulation. As the main goal, this formulation optimized the explosive efficiency suggesting a constrained interval of geometric measurements. Then, any measurement out this suggested range was tagged as a project misapplication.
- The explosive theoretical charging was compared with the amount really used. Moreover, putting both information in parallel, it was possible to clarify the efficient amount of explosive used: different types of factors could provide better efficiency and consequently, the higher disruptive power.

The main Thesis focus was analyzed and discussed the disruptive power of two explosives: NITRAM5 and Premex831 applied on 8 different charging layouts of limestone. By the suggested methodology, the NITRAM5 showed a better disruptive power than Premex831.

KEY-WORDS

Disruptive power, explosives efficiency, commercial explosives, powder factor

Índice

1.	Justificação da aplicação de explosivos em escavações de maciços rochosos.....	1
1.1	Abordagem histórica.....	1
1.2	Fatores preponderantes (menor tempo de execução e menor custo de escavação).....	3
2.	Propriedades essenciais das substâncias explosivas	5
2.1	Energia específica e mecanismos de desmonte	6
2.1.1	Fragmentação	6
2.1.2	Deslocamento	9
2.2	Velocidade de detonação	10
2.3	Pressão de detonação.....	11
2.4	Outras propriedades	13
2.4.1	Densidade crítica	13
2.4.2	Resistência à água.....	13
2.4.3	Sensibilidade ao detonador.....	14
2.5	Tipos de explosivos comercializados	14
2.5.1	Dinamites	14
2.5.2	ANFO (Amonium Nitrate e Fuel Oil).....	16
2.5.3	Hidrogéis	19
2.5.4	Emulsões explosivas.....	20
2.5.5	ANFO pesado	22
3.	Escavabilidade de maciços rochosos	23
3.1	Método de Franklin et al (1971).....	23
3.2	Método de Pettifer & Fookes (1994).....	24
3.3	Método de Tsiambaos & Saroglou et al (2009).....	25
4.	Critérios de seleção de explosivos.....	27
4.1	Fatores económicos	27
4.2	Tipo de maciço a ser explorado	28
4.3	Diâmetros de carga	29
4.4	Presença de água	31
4.5	Toxidade dos gases de detonação.....	32
4.6	Segurança de manipulação.....	32
5.	Sistemas de iniciação	34
5.1	Detonadores	34
5.1.1	Elétricos	34
5.1.2	Não-elétricos	35
5.1.3	Eletrónicos	37
5.2	Boosters	38
5.3	Cordão detonante.....	39
6.	Diagramas de fogo.....	41
6.1	Escavações a céu-aberto	41
6.2	Escavações subterrânea: túneis	43
6.3	Aplicações especiais dos explosivos.....	45
7.	Análise do poder disruptivo dos explosivos civis: método e aplicação	46
7.1	Definição de poder disruptivo	46
7.2	Metodologia proposta	46
7.3	Contextualização dos estudos de caso	47
7.3.1	Estudos de caso com afastamento de 2,5 m	49
1º estudo de caso: diâmetro de furo de 64 mm	49	
2º estudo de caso: diâmetro de furo de 76 mm	50	
3º estudo de caso: diâmetro de furo de 89 mm	52	
7.3.2	Estudos de caso com afastamento de 3,0 m	53
4º estudo de caso: diâmetro de furo de 76 mm	53	
5º estudo de caso: diâmetro de furo de 76 mm	53	
7.3.3	Estudos de caso com afastamento de 3,2 m	54
6º estudo de caso: diâmetro de furo de 76 mm	54	
7.3.4	Estudos de caso com afastamento de 3,5 m	55

7º estudo de caso: diâmetro de furo de 89 mm	55
8º estudo de caso: diâmetro de furo de 89 mm	56
7.4 Análise e desenvolvimento dos estudos de caso através dos parâmetros de Ash....	57
7.4.1 Afastamento	57
7.4.2 Espaçamento	58
7.4.3 Altura da bancada	59
7.4.4 Tamponamento	60
7.4.5 Subfuração	61
7.5 Cálculo do consumo específico de explosivos em explorações de calcário	62
7.5.1 Introdução ao cálculo teórico do consumo específico de explosivo	62
7.5.2 Desenvolvimento do cálculo	64
8. Considerações finais	67
8.1 Análise final e conclusão	67
8.2 Desenvolvimentos futuros	69
Referências Bibliográficas	70
Anexo I – Parâmetros do diagrama de fogo	74
Anexo II – Parâmetros do carregamento de explosivo.....	75
Anexo III – Parâmetros do explosivo e do detonador.....	77
Anexo IV – Parâmetros de Ash	78

Índice de Figuras

Figura 1 Tipo de fragmentação de rochas durante o século XVI. À esquerda: por efeito térmico (dilatação e contração), à direita: fragmentação por ação mecânica.....	1
Figura 2 Martelos e ferramentas de ferro mencionadas em De Re Metallica. À esquerda: exemplos de picaretas, à direita: tamanhos distintos de martelos e marretas	2
Figura 3 Ferramentas utilizadas para a detonação. Os números XIII, XV e XVI são tipos de brocas de perfuração que eram atingidas por martelos (VIII) e/ou marretas (VIII)	2
Figura 4 Minimização de custos nos desmontes com a utilização de explosivos e consequentes impactes ambientais.....	4
Figura 5 Classificação dos explosivos; em vermelho: as substâncias que serão abordadas durante este trabalho.....	5
Figura 6 Três principais fases do desmonte e as respetivas velocidades de propagação. Fase I: Expansão da onda de choque; Fase II: Fragmentação; Fase III: Deslocamento.....	6
Figura 7 Principais fases de trabalho de uma escavação a céu-aberto. Evita-se o fogo secundário representado por "C"	7
Figura 8 Sequência de eventos verificados numa detonação em rocha situada na vizinhança de uma superfície livre	8
Figura 9 Continuação da sequência de eventos verificados numa detonação em rocha situada na vizinhança de uma superfície livre	9
Figura 10 Deslocamento de material: gases em expansão e blocos acelerados	10
Figura 11 Onda de choque atravessando a coluna de explosivo	11
Figura 12 Esquema de uma detonação	12
Figura 13 ANFO	16
Figura 14 Variação da energia de detonação (kcal/kg) pela percentagem (%) de gasóleo	17
Figura 15 À esquerda: sacos 25 kg de ANFO; à direita: carregamento direto nos furos de detonação.....	18
Figura 16 Cartuchos de hidrogel.....	19
Figura 17 Microscopia e camadas da emulsão.....	20
Figura 18 Comportamento da velocidade de detonação durante o respectivo armazenamento.....	21
Figura 19 Microscopia da emulsão (à esquerda) e do hidrogel (à direita).....	22
Figura 20 Ábaco de Franklin (1971) com a classificação RMR incorporada	24
Figura 21 Ábaco Pettifer & Fookes (1994) para a avaliação da escavabilidade.....	25
Figura 22 Ábaco Tsiambaos & Saroglou (2009) para a avaliação da escavabilidade de maciços rochosos sedimentares e metamórficos ($Is_{50} \geq 3$ MPa)	26
Figura 23 Granulometria versus custos unitários.....	28
Figura 24 Efeito do diâmetro de carga na velocidade de detonação.....	29
Figura 25 À esquerda: furos de menores diâmetros; à direita: furos de maiores diâmetros	30
Figura 26 Relação entre diâmetro (Φ) versus o custo unitário (c)	31
Figura 27 Interior de um típico detonador elétrico; à esquerda: instantâneo; à direita: de retardo..	35
Figura 28 Comparação entre o funcionamento de um detonador elétrico e não elétrico	36
Figura 29 À esquerda: detonador não-elétrico de longo período de 500 ms; à direita: conectores com diferentes retardos	36
Figura 30 Comparação entre esquemas sem e com conectores de superfície.....	37
Figura 31 Composição interna de um detonador eletrônico	37
Figura 32 Sistema que compõem o detonador eletrônico	38
Figura 33 Booster do tipo Pentex.....	39
Figura 34 Diferentes tipos de cordão detonante: 10 (amarelo), 12 (vermelho) e 15 g/m (verde)....	39
Figura 35 Diferentes direções de detonação. À esquerda: utilizando um detonador na extremidade do explosivo; à esquerda: utilizando o cordão detonante	40
Figura 36 Diferença entre diagramas de fogo.....	41
Figura 37 Parâmetros de um diagrama de fogo para desmontes em bancadas a céu aberto	42
Figura 38 À esquerda: esquema de tiros paralelos em que os furos em cinza-claro não estão carregados, enquanto os de cinza-escuro estão; à direita: foto real de furos de alívio na frente de lavra.....	44
Figura 39 Série de furos num diagrama de fogo para um desmonte subterrâneo	45
Figura 40 Localização dos estudos de caso	49
Figura 41 Secção longitudinal do furo da cava "Vendoia"	50
Figura 42 Plano de fogo do segundo caso de estudo com os respetivos atrasos.....	50
Figura 43 Secção de um furo da mina de "Faraona"	51

Figura 44 Plano de fogo do terceiro caso de estudo	52
Figura 45 Secção de um furo da "Eurocava"	52
Figura 46 Esquema da detonação por NITRAM 5 com afastamento de 3 m e diâmetro de furo de 76 mm.....	53
Figura 47 Esquema da detonação por Premex 831 com afastamento de 3 m e diâmetro de furo de 76 mm.....	54
Figura 48 Secção de um furo da mina de "Santa Maria"	55
Figura 49 Esquema da detonação por NITRAM 5 com afastamento de 3,5 m e diâmetro de furo de 89 mm.....	56
Figura 50 Esquema da detonação por Premex 831 com afastamento de 3,5 m e diâmetro de furo de 89 mm.....	56
Figura 51 Distribuição prática de K_A dos estudos de caso.....	57
Figura 52 Distribuição prática de K_T dos estudos de caso.....	61
Figura 53 O primeiro diagrama utilizado para o cálculo de consumo específico.....	63
Figura 54 O segundo diagrama utilizado para o cálculo de consumo de substância explosiva	63
Figura 55 Desenvolvimento do cálculo teórico no primeiro diagrama do método italiano	64
Figura 56 Desenvolvimento do cálculo teórico no segundo diagrama do método italiano	65
Figura 57 Esquema da remoção mecânica de material.....	68

Índice de Tabelas

Tabela 1 Tipos de dinamites e informações técnicas	15
Tabela 2 Tipos de ANFOS e suas informações técnicas.....	17
Tabela 3 Tipos de hidrogéis e suas informações técnicas	19
Tabela 4 Tipo de emulsão e suas informações técnicas	20
Tabela 5 Tamanho de partículas (mm) dos explosivos e suas respectivas velocidades de detonação (m/s)	21
Tabela 6 Classificação geomecânica RMR e seus respectivos índices	23
Tabela 7 Classes geotécnicas típicas de maciços rochosos	24
Tabela 8 Características técnicas de tipos de rochas.....	29
Tabela 9 Classificação dos explosivos de acordo com o seu respectivo transporte	33
Tabela 10 Dimensionamento geométrico de diagramas de fogo segundo <i>Ash</i>	42
Tabela 11 Intervalos de variação dos parâmetros geométricos de acordo com as características do desmonte.....	43
Tabela 12 Estudos de caso analisados	48
Tabela 13 Especificações do NITRAM 5	49
Tabela 14 Especificações do Premex 831	51
Tabela 15 Comparação entre o Premex 831 e o Premex 851.....	54
Tabela 16 Relações de <i>Ash</i> do tipo afastamento	57
Tabela 17 Valores típico de K_A função do explosivo a aplicar e da rocha a desmontar	58
Tabela 18 Relações de <i>Ash</i> do tipo espaçamento.....	59
Tabela 19 Tipos de detonadores utilizados e respectivos atrasos	59
Tabela 20 Relações de <i>Ash</i> do tipo altura de bancada	60
Tabela 21 Relações de <i>Ash</i> do tipo tamponamento	60
Tabela 22 Relações de <i>Ash</i> do tipo furação abaixo do piso	62
Tabela 23 Cálculo do consumo específico por afastamento	65
Tabela 24 Parâmetros utilizados para o cálculo de consumo específico teórico.....	66
Tabela 25 Análise geral dos estudos de caso	67

Lista de Abreviaturas

As grandezas utilizadas neste trabalho obedeceram ao Sistema Internacional de Unidades (SI). A tabela a seguir tem como objetivo facilitar a consulta das abreviaturas usadas.

Abreviaturas	Significado	Unidade
H	Altura da banca	m
CC	Carga de coluna	kg
CF	Carga de fundo	kg
q	Carga específica	kg/ m ³
QT	Carga total por furo	kg
H1	Comprimento de furo	m
ρ	Densidade do explosivo	kg/ m ³
Φf	Diâmetro de perfuração	mm
A	Distância prática à frente	m
E_T	Energia total	J
E_{DET}	Energia proveniente da detonação	J
V_G	Energia proveniente do deslocamento de gases	J
S	Espaçamento entre furos	m
I	Impedância	kgm ⁻² .s ⁻¹
α	Inclinação de perfuração	graus
f	Perfuração específica	m/m ³
P	Pressão de detonação	Pa
n	Quantidade de furos	-
G	Subfuração	m
Ø	Tamanho máximo dos fragmentos relacionado com os custos unitários	mm
Ø'	Tamanho máximo dos fragmentos relacionado com os impactes ambientais	mm
T	Tamponamento	m
VOD	Velocidade de detonação	m/s
c	Velocidade de propagação	m/s
V	Volume de material desmontado por furo	m ³
V_{total}	Volume total de material desmontado	m ³

1. Justificação da aplicação de explosivos em escavações de maciços rochosos

1.1 Abordagem histórica

Durante o período entre o uso de ferramentas rudimentares de extração mineral e a aplicação dos explosivos comerciais, a humanidade, concomitantemente, aplicou e aperfeiçoou a tecnologia conhecida da época com o objetivo de conseguir extrair da natureza a matéria-prima necessária que facilitasse as tarefas do dia-a-dia. Assim, pode-se dizer que o conhecimento a respeito da manipulação destes materiais extraídos motivou o homem a entender mais a respeito da atividade de mineração.

Pode-se constatar que os nomes dados a períodos da História, muitas vezes, se confundem com o êxito dessa manipulação. A longínqua “Idade da Pedra”, por exemplo, já evidenciava a facilidade do Homem em criar e utilizar utensílios para dinamizar os ofícios da época, enquanto o período “dos metais”, o qual era composto pela “Idade do Bronze” e a “Idade do Ferro”, mostrava uma sociedade mais técnica e capaz de dominar a manipulação de ligas metálicas. Cronologicamente, o manuseio de matérias-primas como cobre, estanho – bronze, a liga desses dois elementos – e ferro foram essenciais não somente para dinamizar o quotidiano daquela sociedade, mas também oferecer um outro patamar à exploração mineral.

Georgius Agricola, autor do “*De Re Metallica*” (1556), através de sua pesquisa de campo, descreve os métodos de desmonte existentes da época (Figura 1). Percebe-se que a força de trabalho utilizada nos métodos expostos era, principalmente, a mão-de-obra humana, de animais e, raramente utilizada, meios naturais, como rios e cursos de água.



Figura 1 Tipo de fragmentação de rochas durante o século XVI. À esquerda: por efeito térmico (dilatação e contração), à direita: fragmentação por ação mecânica (Hoover & Hoover, 1912)

Inerente ao período “dos metais”, as ferramentas utilizadas eram preferencialmente constituídas de ferro (Figura 2) e, mesmo com a utilização desta tecnologia da época, não era possível fragmentar algumas rochas devido a sua elevada dureza. Nesse contexto, Agricola comenta que o fogo era capaz de romper as rochas mais duras, entretanto a sua aplicação era complexa (Hoover & Hoover, 1912).

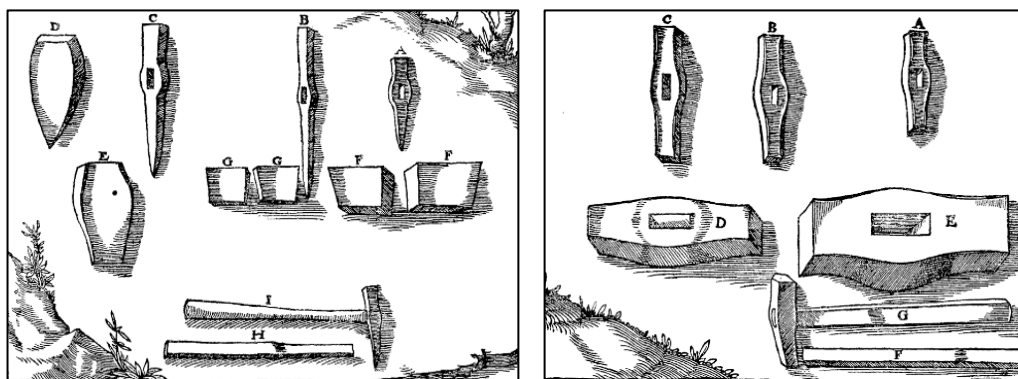


Figura 2 Martelos e ferramentas de ferro mencionadas em *De Re Metallica*. À esquerda: exemplos de picaretas, à direita: tamanhos distintos de martelos e marretas (extraído de Hoover & Hoover, 1912)

As rochas mais duras foram finalmente fragmentadas com maior facilidade ao implementar os explosivos na exploração mineral. Nesse cenário, o primeiro explosivo inventado pelo homem foi a pólvora negra. A invenção teve origem na China durante o século IX e foi usada no continente europeu no decorrer do século XIII. De acordo com Berta (1990), a primeira aplicação da pólvora negra ocorreu com objetivo estritamente militar e, antes de 1600, não há evidências que o experimento foi utilizado na mineração.

Vergani (2009) confirmou a existência do que seria a primeira exploração com o auxílio da pólvora entre as regiões de Lorraine e Alsácia, oeste francês. Nos relatos das minas de *LeMinillere* de *Le Thillot*, o “pó preto” apareceu pela primeira vez no quarto trimestre de 1617 e continuou cada vez mais presente nos anos seguintes, atingindo um consumo anual de 2000 libras em 1624. Neste contexto já havia evidências que os antigos instrumentos rudimentares, como picaretas e martelos, foram aprimorados a fim de facilitar a introdução do explosivo nos maciços a serem explorados (Figura 3).

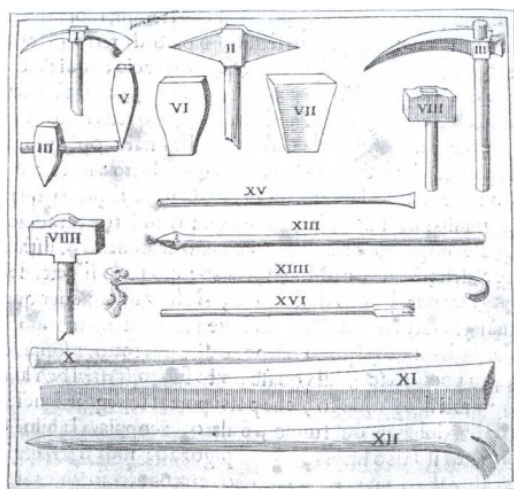


Figura 3 Ferramentas utilizadas para a detonação. Os números XIII, XV e XVI são tipos de brocas de perfuração que eram atingidas por martelos (VIII) e/ou marretas (VIII) (retirado de Della, 1678)

Até a primeira metade do século XIX, a pólvora negra foi certamente o único explosivo utilizado para a detonação (Vergani, 2009). O “Frejus”, um túnel contruído entre 1857-1871 com a extensão de 12.000 metros que cruza porção ocidental dos Alpes, representou o auge da aplicação do explosivo na Europa (Berta, 1990). Neste projeto, por exemplo, a utilização de pólvora negra adiantou a sua previsão de entrega: ao invés de se prolongar por 25 anos, o explosivo permitiu a inauguração do túnel em 14 anos. A otimização do tempo de projeto, como visto no caso do túnel “Frejus”, foi o principal fator que incentivou ainda mais a utilização de material explosivo tanto em projetos civis, quanto de exploração mineral.

Em 1847, Ascanio Sobrero consegue desenvolver uma nova substância ao misturar glicerina, ácido sulfúrico e ácido nítrico (Mancini & Cardu, 2001). De frente à conhecida nitroglicerina, o cientista italiano a nomeou como “piroglicerina”. Mesmo após um grave acidente e Sobrero atestando a respeito da periculosidade e falta de controle de seu invento, Alfred Benhard Nobel, em 1866, forneceu à nitroglicerina uma maior segurança de manipulação. Conforme Cook (1974), o desenvolvimento de Nobel marcou o início da indústria de explosivos de elevada potência.

Seguindo a descoberta da nitroglicerina e a invenção da primeira dinamite, os empreendimentos civis e de mineração começaram a adotar gradualmente explosivos que, embora diferentes composições químicas, tinham a característica comum de uma detonação extremamente rápida, com velocidades de 1800 a 7800 m/s (Lusk & Warsey, 2011). A aplicação dos explosivos em explorações, finalmente, oferece a oportunidade de os projetos de mineração serem otimizados.

1.2 Fatores preponderantes (menor tempo de execução e menor custo de escavação)

Ao entender a importância da aplicação dos explosivos no contexto histórico, percebeu-se a existência de dois fatores preponderantes. O tempo de execução e o custo de operação são fatores comumente analisados antes da escolha definitiva do uso de material explosivo.

Os empreendimentos mineiros que requerem a aplicação de explosivos são compostos por uma série de etapas que são definidas como: perfuração dos furos de produção, carregamento dos furos com explosivos, detonação e se o empreendimento for subterrâneo, ventilação, a finalizar com o transporte do material desmontado para posterior reinício do ciclo. As etapas ocorrem continuamente formando ciclos de trabalho.

A escolha definitiva do uso de material explosivo deve estar fundamentada em alguns fatores. É imprescindível, primeiramente, analisar fatores ambientais e o que concerne a salubridade da operação de detonação. O projeto deve garantir que as respectivas populações em torno da exploração não sejam prejudicadas pelas consequências (como *flyrocks*, vibrações, etc) ocasionados pelo uso de explosivos. Assim, uma vez estes fatores entendidos e as suas consequências controladas a um patamar que se permita a salubridade do ambiente, outros dois custos-benefícios são, posteriormente, analisados: o custo-benefício pelo desmonte através do uso de explosivo comparado ao custo-benefício do desmonte pela ação mecânica. Dessa maneira, para

que a opção escolhida seja o uso de explosivos, o avanço da frente de exploração tem que ser mais vantajoso que o desmonte mecânico em termos custos, de tempo e de segurança, mesmo com a série de etapas expostas anteriormente.

Em paralelo a esta escolha, recomenda-se que, para cada explosivo de possível aplicação no empreendimento, seja analisado em seu custo-benefício próprio. Atualmente, devido às diferentes substâncias explosivas comercializadas, diferentes custos e eficiências de detonação podem ser encontradas. Por isso, indica-se que as características tanto do maciço, quanto dos explosivos sejam estudadas com o objetivo de encontrar a melhor correspondência entre a eficiência da substância empregada e o empreendimento mineiro em questão.

Nesse contexto de minimização de custos do desmonte e, conseqüentemente, na escolha e posterior utilização das substâncias explosivas é importante explicar que a escolha integrada com base no custo global é uma regra importante, na medida em que qualquer tentativa exagerada de minimização de custos numa dada operação se irá refletir negativamente em operações subsequentes. Deste modo, o esforço tendente à redução do custo de operação deve ser feito considerando todas as operações (custo total) e não apenas em uma qualquer operação (Bernardo, 2004).

Como pode ser visualizado na Figura 4, a fragmentação ótima ($\emptyset$, $\emptyset'$) pode ser encontrada através de duas correlações: a primeira ($\emptyset$, à esquerda) consiste da correlação das operações unitárias que minimiza o custo total da operação, enquanto a segunda ($\emptyset'$, à direita) correlaciona os impactes ambientais das operações de desmonte que minimizam os impactes totais da exploração. Em ambas situações, a fragmentação ótima se aproxima permitindo que minimização do custo total de operação e do impacte ambiente total seja feita simultaneamente.

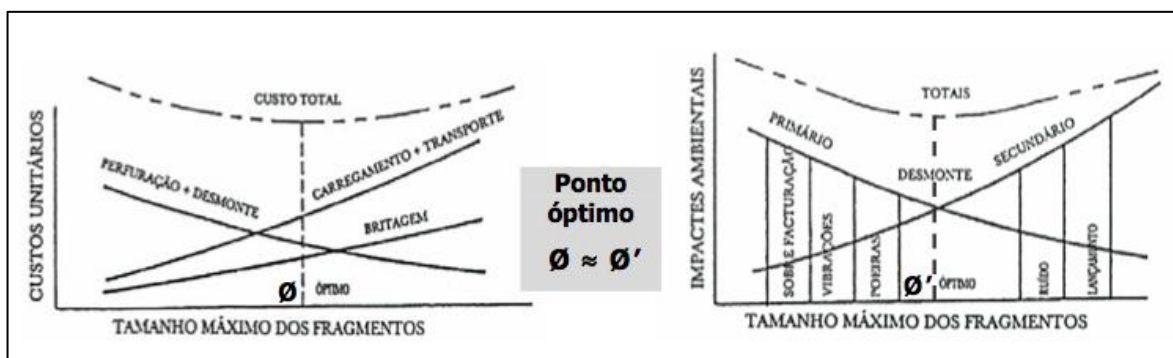


Figura 4 Minimização de custos nos desmontes com a utilização de explosivos e consequentes impactes ambientais (Dinis da Gama & Jimeno, 1993)

Conclui-se que, caso um projeto de engenharia sofra qualquer tipo de redução de orçamento ou eventuais corte de gastos, os ajustes na utilização de explosivos podem não ser o melhor caminho para diminuir os custos do projeto em questão (Bernardo, 2004).

2. Propriedades essenciais das substâncias explosivas

Este segundo capítulo inicia-se com a exposição das diferentes classificações das substâncias explosivas. Posteriormente, explicar-se-ão as suas propriedades: a energia específica juntamente com seus mecanismos de desmonte, como a fragmentação e o deslocamento, a velocidade de detonação, pressão de detonação, densidade crítica, resistência à água e sensibilidade ao detonador. Por fim, os tipos de explosivos utilizados atualmente são apresentados.

Primeiramente, entende-se que a decomposição do explosivo ocorre a partir de um estímulo energético – por calor, impacto, fricção ou descarga elétrica – gerando uma rápida reação química que libera energia e gases. Dessa maneira, as substâncias explosivas podem ser classificadas de acordo com a sua velocidade de decomposição, isto é, para velocidades subsônicas (menores de 300 m/s) o explosivo é classificado como deflagrante e para supersônicas (maiores de 300 m/s), detonante (Góis, et al., 2013).

Assim, em uma decomposição praticamente instantânea, a reação de detonação produz uma onda de choque a qual atravessa o material antes da liberação de gases a alta pressão e elevadas temperaturas (Lusk & Warsey, 2011). Enquanto que, a deflagração liberta gases a alta temperatura, sem a produção da onda de choque (Góis, et al., 2013).

A classe detonante é subdividida em explosivos primários e secundários. Os primários são substâncias que possuem a iniciação facilitada através do estímulo mecânico (por impacto) ou térmico (por aquecimento), enquanto que os secundários, para serem iniciados, necessitam do estímulo energético da detonação do explosivo primário (Mancini & Cardu, 2001).

Finalmente, os explosivos secundários podem ter aplicação em âmbito militar ou comercial. Descreve-se o âmbito comercial como o uso das substâncias explosivas em obras e projetos de Engenharia Civil e Engenharia de Minas. Nota-se pela Figura 5 que este trabalho focalizar-se-á em explosivos comerciais do tipo detonante pela sua aplicação exclusiva na Engenharia de Minas.

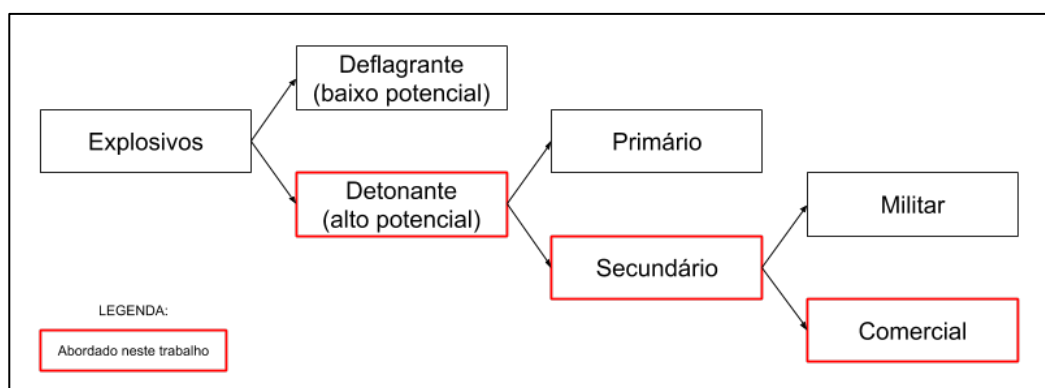


Figura 5 Classificação dos explosivos; em vermelho: as substâncias que serão abordadas durante este trabalho

2.1 Energia específica e mecanismos de desmonte

A energia libertada por uma substância explosiva pode ser dividida em duas componentes: a energia de choque (fase dinâmica) e a energia dos gases em expansão (fase quase-estática) (Bernardo, 2009). Como visto na Equação 1, a fase dinâmica representa cinco sextos da energia total, enquanto a fase quase-estática, apenas um sexto.

$$E_T = \frac{5}{6}E_{DET} + \frac{1}{6}V_G \quad (\text{Equação 1})$$

A componente de choque da energia é produzida pela elevada pressão da frente de detonação, à medida que esta progride ao longo da carga explosiva e se aplica nas paredes do furo (fase “I” da Figura 6). A sua magnitude é proporcional à densidade da carga explosiva e velocidade de detonação. Esta componente é a que primeiro contribui para a rotura do maciço (fase “II”). A energia dos gases surge devido à expansão dos gases resultado da reação química, o que acontece após a passagem da onda de choque. Esta componente exerce também uma forte pressão nas paredes do furo, principalmente, no interior das fraturas criadas na fase anterior, pela ação da onda de choque, originando o deslocamento (fase “III”) do material rochoso (Bernardo, 2009).

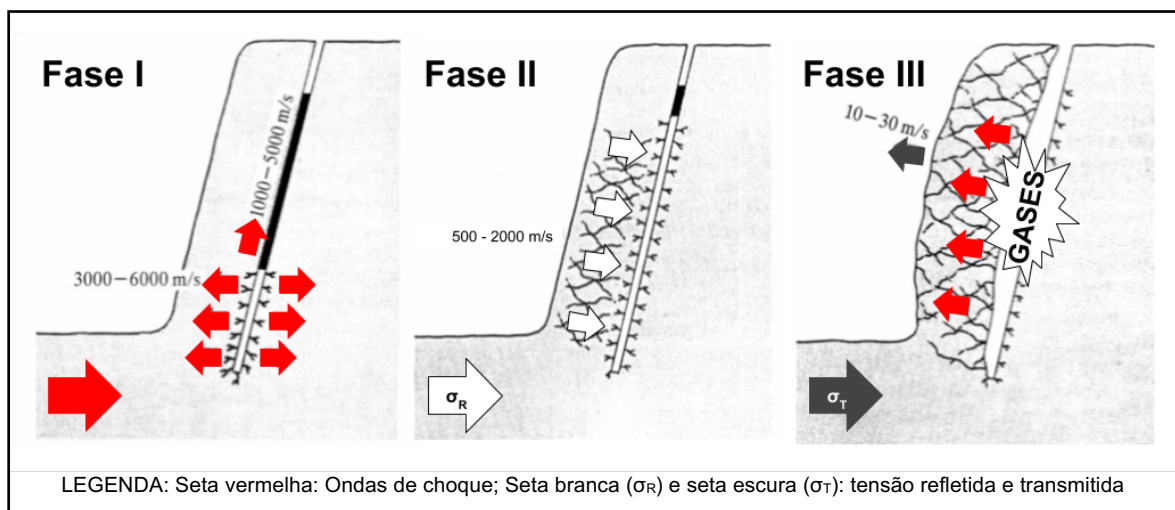


Figura 6 Três principais fases do desmonte e as respetivas velocidades de propagação. Fase I: Expansão da onda de choque; Fase II: Fragmentação; Fase III: Deslocamento (adaptado de Sanvik-Tamrock, 1999)

Assim, a energia proveniente da decomposição do explosivo, quando devidamente convertida em trabalho, ocasiona a rotura e, conseqüentemente, a fragmentação da rocha. Durante a exploração, essa energia advinda da substância explosiva é capaz de facilitar dois processos: a fragmentação e o deslocamento, que, em conjunto, constituem o desmonte.

2.1.1 Fragmentação

Segundo Hartman (1992), o desmonte por explosivos pode ser justificado através de dois fatores:

- Redução do trabalho mecânico devido à agilidade e rapidez na remoção do desmonte efetuado;
- Facilidade em fragmentar a rocha.

Nota-se que, através do resultado desta fragmentação, as tarefas posteriores – escavação, carregamento, transporte e cominuição – são simplificadas.

É nesse contexto que o desmonte com explosivos constitui a primeira etapa do processo global de fragmentação das rochas (Bernardo, 2004). Evita-se, a todo custo, qualquer tipo de repetição de trabalho, como as fragmentações secundárias (Figura 7), para que seja possível a inserção do material detonado no processo global de cominuição. Mesmo na primeira etapa da exploração – desmonte por explosivos – procura-se por uma fragmentação eficiente e que produza um material com a granulometria ideal, sem dar qualquer tipo de prejuízo ao processo global.

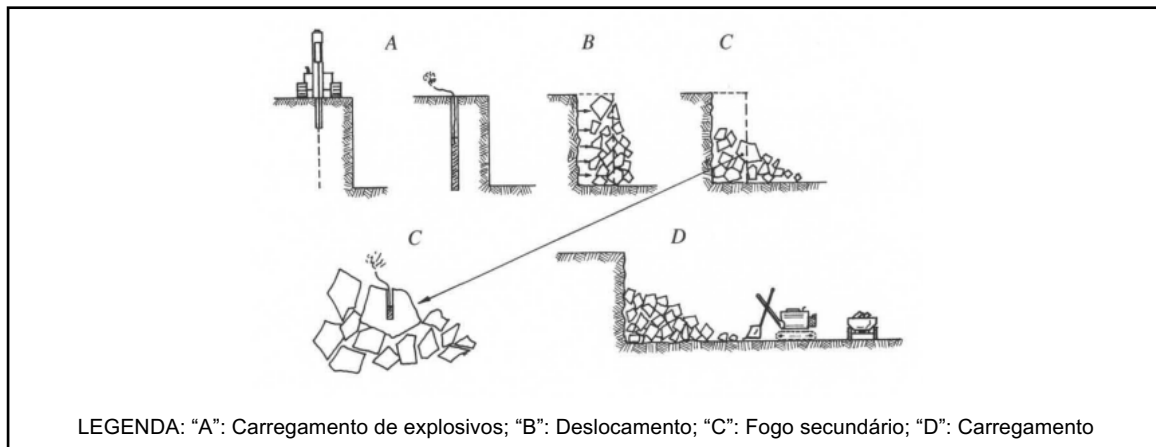


Figura 7 Principais fases de trabalho de uma escavação a céu-aberto. Evita-se o fogo secundário representado por "C" (retirado de Mancini & Cardu, 2001)

Os principais elementos do processo de fragmentação são choque, produção de gás, extensão das fraturas e deslocamento (Hartman, 1992). Inicialmente, na chamada fase dinâmica, a onda de choque proveniente da iniciação do explosivo – perturbação dinâmica – gera novas micro fraturas orientadas radialmente ao furo de detonação. A zona fragmentada, descrita como "I" na Figura 8, é a região à volta do furo de detonação que apresenta uma concentração elevada dessas micro-fracturas.

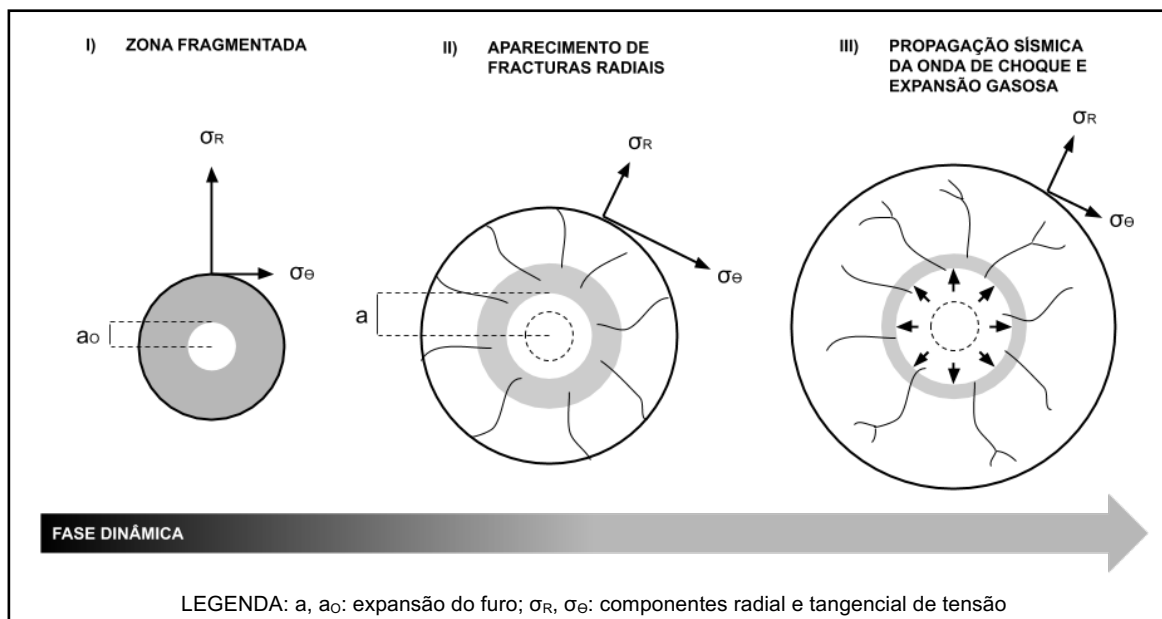


Figura 8 Sequência de eventos verificados numa detonação em rocha situada na vizinhança de uma superfície livre (adaptado de Hartman, 1992)

A onda de choque se desloca na direção radial para fora do furo de denotação e tem a velocidade paulatinamente diminuída pela distância percorrida. Apresentado por “II”, o movimento da onda de choque, que abre e afrouxa o sistema tensões de tração do maciço, também é acompanhado pela expansão do diâmetro do furo. Originalmente, o furo de diâmetro de valor “ a_0 ”, no instante II apresenta o valor de “ a ”. O processo de expansão do diâmetro do furo confere que “ a ” seja maior que “ a_0 ” (Figura 8).

Durante o instante “III”, a propagação sísmica da onda choque é acompanhada pela expansão de gases. Esta expansão é responsável pela pressurização do furo de detonação, uma vez que a sua zona de expansão possui elevadas temperaturas. O campo de tensões criado pela pressurização faz com as micro e pequenas fraturas se aglutinem e cresçam. Uma vez conectadas com o furo de perfuração, estas fraturas radiais são abertas o suficiente para que os gases de detonação as penetrem.

A explicação mais comum para as fraturas radiais consiste na existência do campo de tensões estáticas que se forma em torno de uma cavidade circular aberta num material elástico, sujeito a uma pressão interna. Tal campo de tensões é caracterizado por uma compressão radial e uma tração tangencial, sendo esta última responsável pelas roturas radialmente orientadas, quando o seu valor excede a resistência à tração do material (Dinis da Gama, 2007).

Posteriormente, à medida que as fraturas radiais se alargam, a onda de choque, refletida de uma das faces livres (instante “IV” da Figura 9), causa o desenvolvimento de outras pequenas fissuras. Conforme Hartman (1992), a largura da zona de fratura radial causada pela onda de choque é usualmente estendida em seis vezes pela pressão do gás.

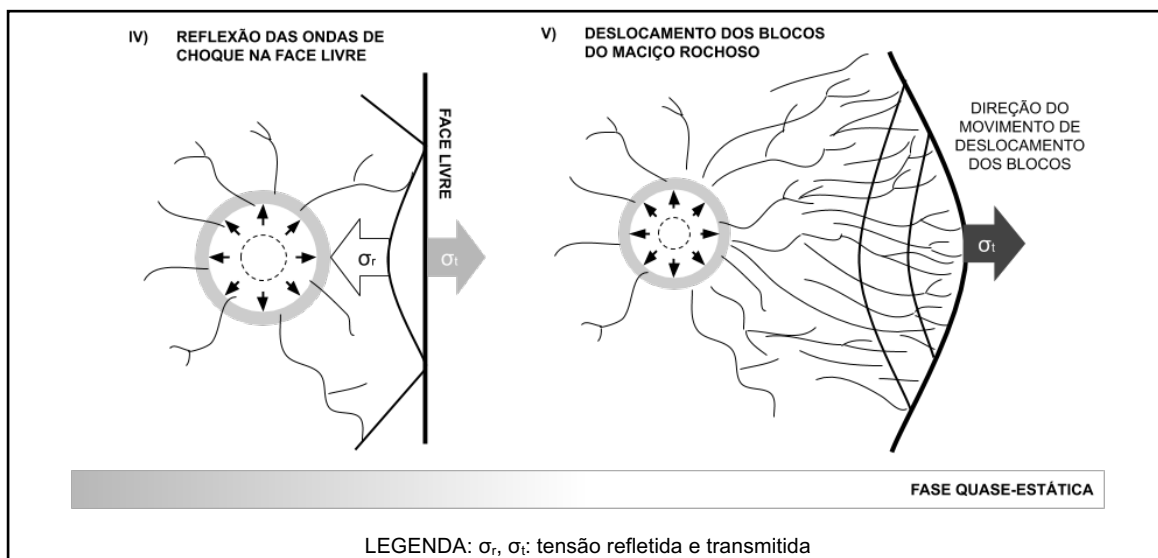


Figura 9 Continuação da sequência de eventos verificados numa detonação em rocha situada na vizinhança de uma superfície livre (adaptado de Hartman, 1992)

E, finalmente, como visto em “V”, quando as fraturas radiais atingem uma das faces livre ocorre a projeção de fragmentos de rocha. Este último instante é chamado de fase quase-estática e engloba não somente a pressurização, mas também a expansão dos gases.

É conveniente referir que a transmissão de energia da substância explosiva para o material rochoso varia com a razão entre impedâncias características – produto de sua massa volúmica pela velocidade de propagação ondulatória do meio – dos dois meios em contato (o explosivo e a rocha), as quais deverão ser da mesma ordem de grandeza, de modo a permitir uma transmissão máxima de energia. Quando existem volumes de ar entre o explosivo e a rocha (má escolha do diâmetro das cargas) a introdução desse meio de baixa impedância característica dá lugar a deficientes transmissões energéticas, inviabilizando o aproveitamento de energia para o trabalho útil de fragmentação do maciço (Dinis da Gama, 2007).

2.1.2 Deslocamento

Os gases da detonação a elevadas pressões atuam como um agente de propulsão e aceleram a rocha na direção da frente livre do maciço. Esta aceleração ocorre em um curto espaço de tempo e apenas uma parcela da energia da expansão de gases é realmente aproveitada. O pouco aproveitamento da energia da expansão pode ser explicado pelo arrefecimento dos gases e, consequentemente, rápida diminuição de sua pressão.

Enquanto a massa de rocha se move, no chamado deslocamento (Figura 10), ela também se expande. Esta expansão permite a rotação dos blocos e, consequentemente, a colisão entre fragmentos. De acordo com Hartman (1992), dependendo da forma e da distribuição do tamanho dos fragmentos, a percentagem de expansão em volume de volume pode chegar a 50%. Nota-se

que, este espaço vazio entre o material fragmentado é essencial para o carregamento, uma vez que facilita a penetração das pás carregadoras.

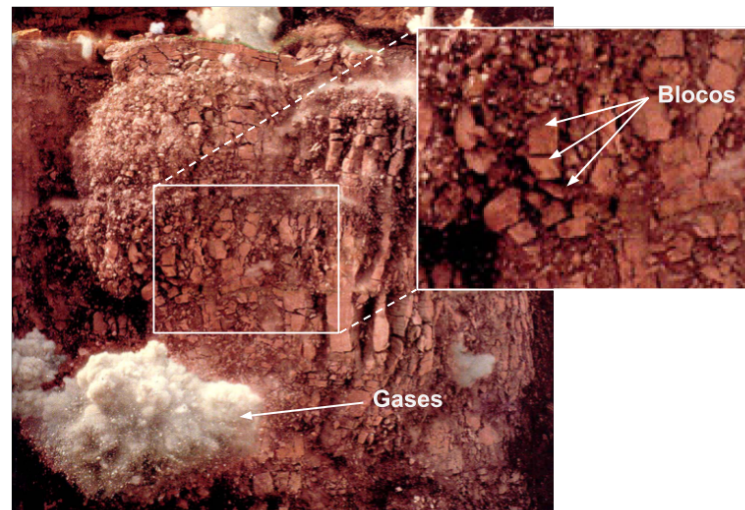


Figura 10 Deslocamento de material: gases em expansão e blocos acelerados (retirado de <https://www.youtube.com/watch?v=rKOxmXXpHj8>, acesso em 13/06/19 às 18:41)

O êxito na fragmentação pode ser atingido com a aplicação de alguns mecanismos: a diferente temporização entre a detonação dos furos carregados é uma dessas ferramentas. Isto quer dizer que, a detonação de cada furo em diferentes microintervalos de tempo permite o movimento ideal da rocha, o que auxilia a sua fragmentação. A existência de temporização também facilita na diminuição e controle de vibrações ocasionadas pela detonação, garantindo a integridade do meio ambiente ao redor da exploração com a minimização dos efeitos da detonação.

Por fim, o resultado satisfatório de um processo de fragmentação está relacionado com o estudo das fraturas já existentes no maciço rochoso. Sob a tensão emitida pela detonação e da ação das ondas de choque, ocorre uma sucessão de propagações de fraturas e respectivas intersecções, devido às reflexões e refrações dessas ondas em superfícies livres ou de diferentes impedâncias, e ainda, posteriormente, ao mecanismo quase estático de expansão dos gases. O resultado desse processo, que constitui o efeito útil da fragmentação, é a redução efetiva do espaçamento médio entre fraturas e, consequentemente, os blocos que elas definem.

2.2 Velocidade de detonação

A velocidade de detonação é a rapidez com que a onda de choque se move através de uma coluna de explosivo (Figura 11). Esta velocidade depende dos seguintes fatores: composição química do explosivo, diâmetro da carga explosiva, densidade e tamanho das partículas da substância, confinamento utilizado no desmonte e tipo de iniciação (Mancini & Cardu, 2001). Dependendo dos fatores utilizados, os explosivos comercializados assumem velocidades de detonação entre aproximadamente 1.500 m/s e 7.830 m/s (Lusk & Warsey, 2011).

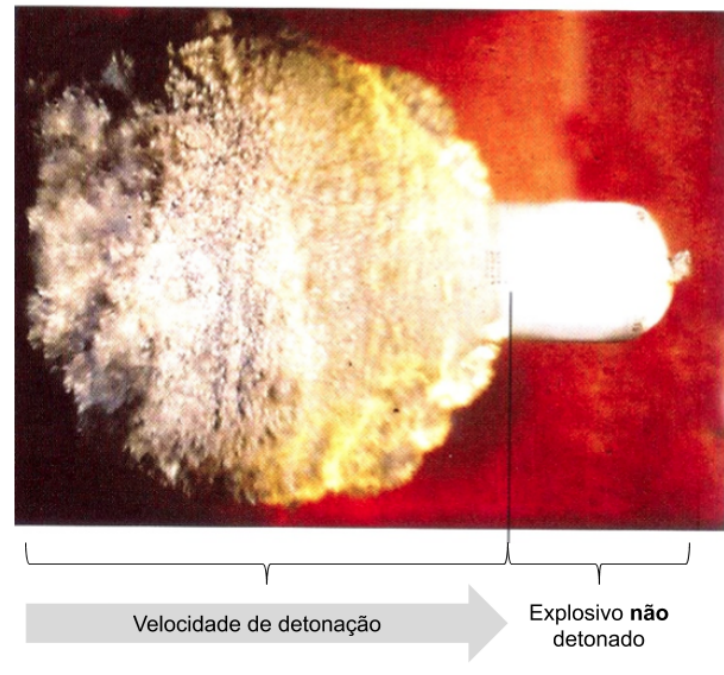


Figura 11 Onda de choque atravessando a coluna de explosivo (retirado de Atlas Powder Company, 1987)

Por fim, a velocidade de detonação é uma característica importante uma vez que, juntamente com a densidade do explosivo, pode-se determinar o valor máximo da pressão de detonação.

2.3 Pressão de detonação

Posteriormente ao início da detonação, a chamada frente de choque atravessa o explosivo em um curto espaço de tempo. A sobrepressão ocasionada pela passagem desta frente é conhecida como pressão de detonação (Persson, Holmberg, & Lee, 1994). A pressão de detonação é um indicador significativo da habilidade de um explosivo em produzir uma fragmentação desejada.

A reação química do explosivo cria elevadas pressões. Estas pressões são as responsáveis pela fragmentação e deslocamento do material na direção da frente livre do maciço. A Figura 12 ilustra um esquema das pressões criadas nos furos de detonação. A parte em que se desenvolve de fato a reação química – a zona de reação primária – ocorre entre a frente de choque do explosivo e um plano-limite conhecido como plano de *Chapman-Jouguet* (Morhard, 1987). A pressão de detonação é criada pela onda de choque que se afasta da zona de detonação, este afastamento é acompanhado pela expansão dos gases.

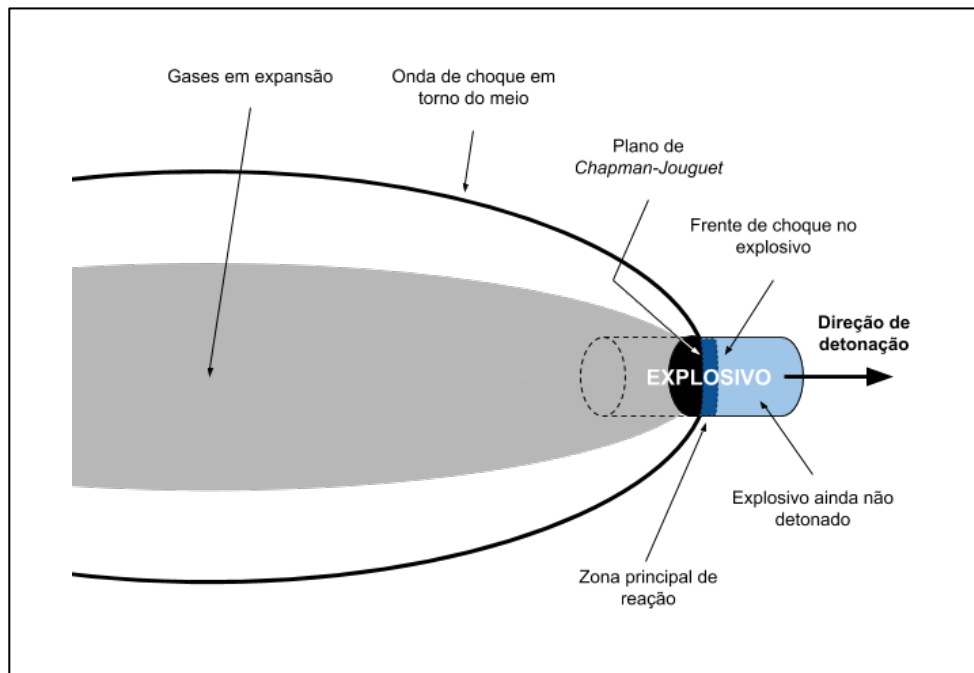


Figura 12 Esquema de uma detonação (adaptado de “*Explosives and Rock Blasting*”, 1987)

A velocidade de uma partícula no ar não pode ser diretamente medida (Persson, Holmberg, & Lee, 1994). Isto ocorre pelo fato que os gases em expansão – originados da reação química ao início da detonação – fazem com que seja impossível fotografar uma partícula em movimento. No entanto, foi possível medir a velocidade de uma partícula em um sistema controlado e submerso em água. Uma vez detonado, o experimento mensurou a velocidade da partícula da substância explosiva através da velocidade da partícula da água. Pela conservação de energia, essas velocidades seriam aproximadamente iguais e a pressão desenvolvida na água aproxima-se da Equação 2.

$$P = \frac{\rho \times VOD^2}{4} \quad (\text{Equação 2})$$

A pressão “P” desenvolvida pelo explosivo pode ser determinada pela lei de conservação de energia, na qual foi aplicada na fronteira entre o explosivo e a água do experimento. A massa volúmica da substância é referida com “ ρ ” e a sua unidade é de kg/m^3 , enquanto a velocidade de detonação por “VOD” dada em m/s.

Por fim, ressalta-se a existência uma divergência envolvendo a aplicação de explosivos de elevadas pressões de detonação em maciços de alta competência. Para alguns autores, o forte choque, gerado pela alta pressão de detonação, possui relevância em fragmentar maciços de rochas densas. Enquanto que, outros autores afirmam que esta relevância é pequena ou nula. Segundo Dick, Fletcher & D’Andrea (1986), a recomendação geral seria substituir o explosivo, que não forneceu a fragmentação adequada do maciço competente, por um outro explosivo como maior velocidade de detonação – e conseqüentemente, maior pressão de detonação.

2.4 Outras propriedades

As propriedades anteriormente examinadas possuem elevada importância em um projeto de exploração, uma vez que indicam o que a substância explosiva é capaz de fornecer em termos de pressão e energia. Entretanto, outras propriedades também devem ser conhecidas para que a seleção do explosivo seja correta e, conseqüentemente, eficiente. Estas outras propriedades são: densidade crítica, distância entre cargas, resistência à água, toxicidade dos fumos, sensibilidade ao detonador e sensibilidade ao impacto, fricção e aquecimento (Mancini & Cardu, 2001).

Não serão abordadas neste trabalho:

- As propriedades “distância entre cargas” e “sensibilidade ao impacto, fricção e aquecimento”, devido a utilização de substâncias explosivas seguras e que os cartuchos estejam próximos o suficiente para a propagação eficiente da detonação;
- A propriedade “toxicidade dos fumos”, devido o desenvolvimento em escavações a céu-aberto unicamente.

2.4.1 Densidade crítica

A densidade crítica é um determinado valor da massa volúmica em kg/m^3 , característico de cada tipo de explosivo, e que não deve ser excedido por motivos de segurança operacional (Mancini & Cardu, 2001).

Existem ocasiões que, devido à compactação excessiva do explosivo, a sua densidade crítica é ultrapassada. Neste contexto, um explosivo compactado pode ter a sua propagação da detonação comprometida, pois, para uma propagação eficiente, é necessário que o explosivo possua certa deformabilidade. Devido a esta deformabilidade, a detonação consegue extrair energia do avanço da onda de choque para a sua propagação. Assim, uma compactação excessiva não permite uma deformação admissível do explosivo e, conseqüentemente, uma propagação de detonação satisfatória.

A detonação incompleta é considerada um outro prejuízo da superação da densidade crítica – devido à compactação excessiva. Para explosivos em que o limite de densidade pode ser facilmente excedido, como o caso do ANFO, um carregamento mal controlado pode trazer perigo à operação. Em carregamentos com este tipo de explosivos, uma compactação excessiva com objetivo de fornecer mais carga nos furos de detonação – na ilusão de obter maior energia de detonação – pode culminar em uma detonação incompleta ou falha.

2.4.2 Resistência à água

A resistência à água é a capacidade pela qual um explosivo, sem a necessidade de proteção especial, não perde a sua sensibilidade e eficiência durante a exposição a um ambiente saturado em água. Conforme Mancini & Cardu (2001), o conceito de resistência à água é difícil de se

mensurar em termos quantitativos, por isso que as substâncias explosivas são caracterizadas como boa ou má resistência.

Explosivos como hidrogéis e dinamites gelatinosas possuem boa resistência à água, enquanto as substâncias explosivas que contêm nitrato de amónio seco na sua composição, como o ANFO, perdem a sua eficiência em ambientes com elevada humidade. Nesta situação, como o nitrato de amónio possui ligações iónicas, uma vez em contacto com água, estas ligações são dispersadas pela interferência das moléculas polares de água. Quando colocado em um furo húmido, por exemplo, o ANFO perde o seu nitrato e absorve água presente no meio, tornando-se rapidamente inerte.

Em contrapartida, mesmo possuindo o nitrato de amónio em sua composição, as emulsões apresentam um comportamento distinto do ANFO. A boa resistência à água, no caso das emulsões, pode ser explicada pelo fato do nitrato de amónio estar em solução com os outros componentes, não permitindo que a interferência das moléculas polares de água ocorra (Góis, et al., 2013).

2.4.3 Sensibilidade ao detonador

A sensibilidade é uma característica do explosivo que define a habilidade de uma propagação eficiente da detonação através de sua carga de coluna. (Mancini & Cardu, 2001). Neste contexto, a sensibilidade ao detonador está definida como a energia requerida por um detonador para iniciar de maneira satisfatória a detonação de um explosivo.

Conforme Berta (1990), é feita referência à escala *Sellier-Bellot* que consiste de uma série de 10 detonadores, numerados de 1 a 10, dos quais, antigamente, cada um correspondia a um peso de carga crescente de fulminato de mercúrio (II), um explosivo primário. Atualmente, os detonadores disponíveis no mercado utilizam quantidades menores de 1 g de explosivo para iniciar a detonação. Neste contexto, a pentrite (PETN) tem grande utilização como substância explosiva dos detonadores.

2.5 Tipos de explosivos comercializados

Nesta etapa deste trabalho caracterizar-se-á, de maneira aprofundada, as alternativas de explosivos utilizadas durante a exploração mineral. Em ordem cronológica de desenvolvimento, esta discriminação ocorrerá por: dinamites, ANFO, hidrogéis, emulsões explosivas – material utilizado no desenvolvimento desta Dissertação – e, por fim, ANFO pesado.

2.5.1 Dinamites

Pioneira na detonação por explosivos, a dinamite ainda é utilizada nas explorações atuais em determinados países: de acordo com Lusk & Warsey (2011), em 2008, o uso de dinamites representava 0,5% do total de explosivos utilizados nos Estados Unidos da América. A sua utilização pode ser explicada através da flexibilidade de suas propriedades explosivas, das quais podem-se

citar: alta velocidade de detonação e bom desempenho em condições adversas de ambiente como, alta pressão, baixa temperaturas e presença de água. A Tabela 1 revela os valores que os tipos de dinamites podem oferecer.

Tabela 1 Tipos de dinamites e informações técnicas (retirado do catálogo “*Dyno Nobel*”, 2016, acesso em 27/06/2019 às 8:17)

Parâmetros	UNIGEL®	UNIMAX®	DYNOMAX™ pro	Z POWDER
Densidade (kg/m ³)	1,30	1,51	1,45	1,37
Calor de explosão (kcal/kg)	1240,00	1510,00	1510,00	1351,00
Velocidade de detonação (m/s)	4300,00	6000,00	6000,00	5000,00
Resistência à água	Boa	Excelente	Excelente	Excelente

A primeira formulação da dinamite sugerida por Alfred Nobel consistia de 75% de nitroglicerina e 25% de diatomácea (ou areia fóssil). Durante os seus 125 anos, desde a sua introdução na detonação, a composição da dinamite tornou-se sofisticada e com inúmeras variações que, comumente, utilizam: nitroglicerina, nitroglicol, nitrocelulose, sais oxidantes e combustíveis. Entretanto, mesmo com as variações químicas que oferecem estabilidade à substância, as dinamites com base de nitroglicerina são consideradas os explosivos comerciais mais sensíveis (Dick, Fletcher, & D'Andrea, 1986). Esta sensibilidade é explicada pela estabilidade restrita da nitroglicerina – seu principal produto – para choques, fricções e aquecimento.

Quando armazenadas cuidadosamente, as dinamites permanecem em boas condições de uso por alguns meses, entretanto são rapidamente deterioradas se forem estocadas de maneira inadequada. A dinamite com mais tempo de armazenamento se deteriora adquirindo uma coloração castanha escurecida, devido o fenómeno da exsudação (Góis, et al., 2013). Este fenómeno ocorre pelo vazamento dos produtos da substância explosiva e torna a dinamite macia e flexível. Recomenda-se que, na condição de vazamento evidente, a dinamite deve ter o seu manuseio evitado ou feito com cautela. Em algumas ocasiões, a dinamite deteriorada pode ter a ignição falhada, em outras, a ela queima ao invés de detonar, liberando gases tóxicos (Góis, et al., 2013).

Neste contexto, já em 1922, na 8ª edição de “*Blasters’ Handbook*”, La Motte alertou a respeito da periculosidade de gases provenientes da queima e detonação incompleta da dinamite em ambientes confinados. Sabe-se que a exposição de produtos que contêm nitroglicerina provoca fortes dores de cabeça em seus operadores. Tal exposição tem efeito intensificado quando o ambiente de trabalho – uma mina subterrânea, por exemplo – não é provido de um sistema de ventilação eficiente. Nesta situação, com objetivo de assegurar a salubridade do ambiente de trabalho, países adotaram normas que garantiram o valor limite de exposição (VLE) de nitroglicerina aos operadores. Em Portugal, a Norma Portuguesa 1796 recomenda o VLE de 0,05 ppm de nitroglicerina devido aos problemas de vasodilatação causados (Norma Portuguesa NP 1796, 2014).

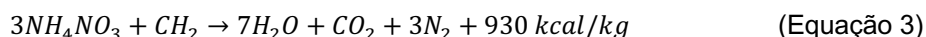
2.5.2 ANFO (*Amonium Nitrate e Fuel Oil*)

O ANFO (Figura 13) consiste de uma mistura de nitrato de amônio e hidrocarbonetos líquidos em uma proporção de 94:6 (Petes, Miller, & McMullan, 1983). Da mesma maneira que nitrato de amônio pode ser utilizado como fertilizante, ele também é essencial para a elaboração de outros explosivos comerciais como, por exemplo, a dinamite, a emulsão e hidrogéis.



Figura 13 ANFO (retirado do catálogo “*Dyno Nobel*”, 2016, acesso em 27/06/2019 às 9:23)

H. B. Lee e R. L. Akre patentearam o uso de nitrato de amônio com combustível de hidrocarboneto sólido ("Blasting Process", US2703528A, 1955) e, com êxito, demonstraram a performance do experimento como uma substância explosiva. Inicialmente, o hidrocarboneto sólido utilizado era o carvão, por sua facilidade de compra e disponibilidade no mercado. Entretanto, mais tarde, com o advento dos combustíveis derivados do petróleo, o hidrocarboneto utilizado passou a ser o gasóleo concedendo ao ANFO maior poderio disruptivo na fragmentação dos materiais. Dessa maneira, análises e experimentos indicaram que a eficiência ótima do ANFO era obtida com a utilização de 5,65% de gasóleo. Este resultado permitiria que a reação (Equação 3) balanceada tivesse todos os reagentes devidamente consumidos.



A composição comercial em proporções mássicas de 94:6 de nitrato de amônio para gasóleo está na margem aceitável de eficiência, já que a garantia de 5,65% é difícil de ser atingida sem um controle rígido de qualidade. De acordo com Petes, Miller & McMullan (1983), uma prática comum é aproximar o gasóleo a uma percentagem limite de 7%, uma vez que a energia teórica do ANFO é menos afetada com o excesso do que a falta de combustível (Figura 14). Este excesso compensa as perdas por evaporação do gasóleo quando as temperaturas da operação são elevadas.

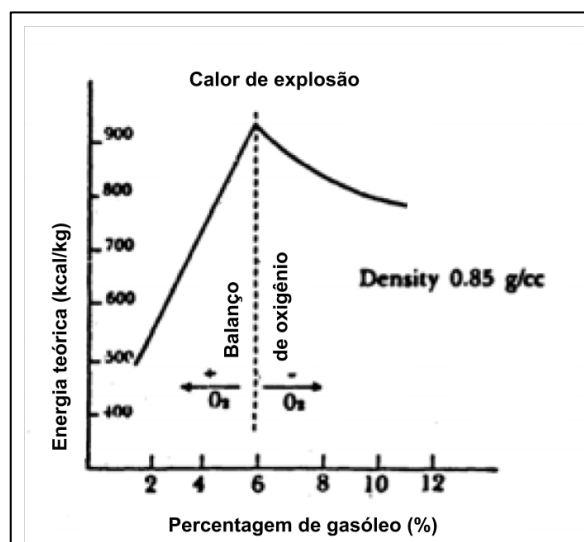
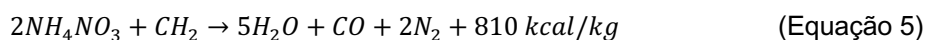
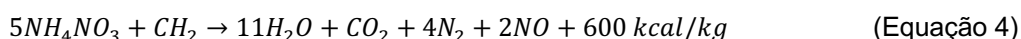


Figura 14 Variação da energia de detonação (kcal/kg) pela percentagem (%) de gásóleo (retirado de Petes, Miller & McMullan, 1983)

Nota-se também que, a composição calculada de 94:6, além de atingir a maior energia teórica, também evita que produtos nocivos sejam obtidos a partir da decomposição dos produtos. Em situações que, a percentagem em peso de nitrato de amónio é maior (96,6% de NH_4NO_3 e 3,4% de CH_2 , Equação 4), a reação rica em oxigénio, aumenta a produção de gases como NO e NO_2 . Em outras em que a percentagem de peso do gásóleo é maior (92,0% de NH_4NO_3 e 8,0% de CH_2 , Equação 5), a composição pobre em oxigénio reduz a quantidade de CO_2 em favorecimento da produção de CO . Nota-se, do ponto de vista termodinâmico, ambas as composições – pobre e rica de oxigénio – possuem menor quantidade de energia disponível quando comparada a reação perfeitamente balanceada.



Durante a década de 1960, o ANFO se tornou mundialmente conhecido e utilizado nas detonações. Este novo explosivo substituiu o uso de dinamites em furos secos – em ausência de humidade ou com água – devido principalmente ao baixo custo, aliado a uma maior segurança de operação e rápida velocidade de preenchimento. Na detonação, quando comparado aos outros explosivos, esta substância explosiva conta com uma moderada velocidade de detonação (Tabela 2).

Tabela 2 Tipos de ANFOS e suas informações técnicas (retirado do catálogo “Dyna Nobel”, 2016, acesso em 27/06/2019 às 10:03)

Parâmetros	DYNOMIX™	DYNOMIX™ WR
Densidade (kg/m^3)	0,82	0,87
Calor de explosão (kcal/kg)	880,00	880,00
Velocidade de detonação (m/s)	3900,00	3460,00
Resistência à água	Má	Má

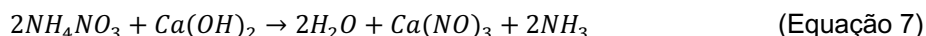
O fato deste explosivo ser solúvel em água e possuir densidade menor que 1 (entre 0,77 e 0,87), concede ao ANFO a sua maior desvantagem: baixa resistência à água. Uma vez com o menor contacto com água, o ANFO deixa de ter sensibilidade de detonação, devido a perda do nitrato de amónio e absorção de água, adquirindo resultados não satisfatórios. Por outro lado, quando se pretende desmontar rochas compactas e com elevados índices de escavabilidade, o ANFO é misturado com pó de alumínio – em percentagens mássicas que variam entre 13% e 15%. Tal mistura oferece à substância explosiva um incremento na energia libertada pela detonação.

Como observado na Figura 15, o ANFO é usualmente comercializado em sacos de 25 kg. A substância poder ser colocada diretamente em furos verticais ou através de máquinas pneumáticas no caso de furos horizontais, recorrentes em explorações subterrâneas.



Figura 15 À esquerda: sacos 25 kg de ANFO; à direita: carregamento direto nos furos de detonação (retirado de Wikipedia "ANFO", acesso em 26/06/19 às 13:31, <https://pt.wikipedia.org/wiki/ANFO#/media/Ficheiro:Anfoa.jpg>)

Ressalta-se que, o ANFO quando aplicado em desmontes subterrâneos que utilizam de betão ou betão projetado produz elevados índices de amónia, um componente irritante e corrosivo para o tecido humano exposto. O betão possui óxido de cálcio que, uma vez reagido com água produz hidróxido de cálcio (Equação 6). Posteriormente, o nitrato de amónio, que não foi denotado ou absorvido pelo meio, reage com hidróxido de cálcio gerando gás amónia (NH₃) e outros componentes (Equação 7).



Por fim, de acordo com Forsyth, Cameron & Miller (1995), a qualidade das águas subterrâneas e dos aquíferos pode ser alterada pela introdução de nitratos provenientes da dissolução de substâncias explosivas, como principalmente o ANFO, tornando-se um problema durante às explorações de maciços rochosos. É neste contexto de constante preocupação com o meio ambiente que o desenvolvimento de outras substâncias explosivas – como a emulsão – foi incentivado.

2.5.3 Hidrogéis

O hidrogel é uma dispersão de sólidos em uma solução espessa. Esta substância está constituída por água, agentes espessantes, agentes sensibilizantes (sais orgânicos e alumínio), combustível e um ou vários oxidantes como, por exemplo, o nitrato de amônio e o nitrato de sódio. Uma típica composição de hidrogel contém de 20% a 30% de peso de nitrogénio, o qual está presente em duas formas muito solúveis em água: amónio e iões de nitrato. Os hidrogéis possuem a peculiaridade de não levarem em sua composição nenhum produto que seja, por si só, de natureza explosiva.

As características mais notáveis deste tipo de explosivo são: alta pressão de detonação – valores da densidade e velocidade de detonação estão expostos na Tabela 3 – elevada resistência à água, baixa toxicidade e segurança. A elevada resistência à água é explicada pela camada insolúvel que separa os agentes oxidantes de qualquer molécula externa de água. A aplicação de agentes sensibilizantes, considerados não explosivos, conferem uma baixa sensibilidade na aplicação e transporte do material. Já os baixos índices de toxicidade dos gases produzidos durante a detonação permitem e incentivam o uso de hidrogéis em explorações subterrâneos.

Tabela 3 Tipos de hidrogéis e suas informações técnicas (retirado de *Maxam Brasil*, acesso em 27/06/2019 às 16:43)

Parâmetros	RIOFLEX®	RIOFLEX® 5000	RIOFLEX® 6000	RIOFLEX® 7000	RIOFLEX® 8000
Densidade (kg/m ³)	1100,00	1150,00	1200,00	1250,00	1300,00
Calor de explosão (kcal/kg)	748,00	855,00	855,00	823,00	798,00
Velocidade de detonação (m/s)	4300,00	4600,00	4900,00	5200,00	5500,00
Volume de gases (l/kg)	960,00	970,00	967,00	964,00	963,00

Vale ressaltar, por fim que, em ambientes inóspitos, em temperaturas inferiores a zero graus, o hidrogel não é recomendado, já que pode se tornar insensível ao detonador. Este explosivo pode ser comercializado tanto a granel, quanto em cartuchos, como visualizado na Figura 16.



Figura 16 Cartuchos de hidrogel (retirado da *Indulmil*, acesso em 27/06/2019 às 17:01)

2.5.4 Emulsões explosivas

Diferentemente das outras substâncias já citadas, as emulsões explosivas são dispersões de dois líquidos imiscíveis. Estes dois líquidos imiscíveis compõem duas fases, a primeira e maior é a oxidante, composta por uma solução de nitratos; enquanto a segunda é a orgânica, na qual se encontra os combustíveis.

Para a formação da emulsão explosiva é necessário a presença de um agente emulsificador (Figura 17). Este composto químico oferece à solução uma menor tensão superficial entre as fases oxidante e orgânica. Recentemente, de acordo com Hodgson *et al* (2015), as emulsões explosivas foram otimizadas ao utilizar éster sorbitano ($C_{24}H_{44}O_6$) como emulsificador. Ao contrário de que quando foram analisados separadamente, a adição deste componente resultou numa emulsão mais eficiente em termos de viscosidade e, conseqüentemente, mais apta a interagir com os outros componentes da reação.

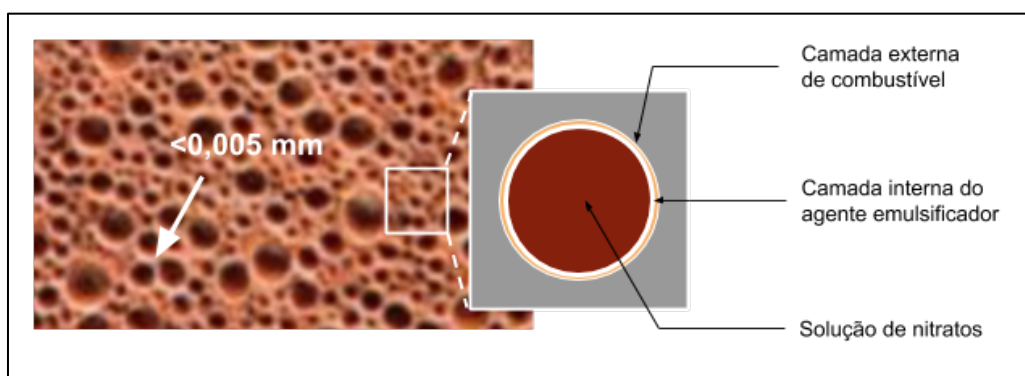


Figura 17 Microscopia e camadas da emulsão (adaptado de Bernardo, 2009)

A excelente resistência à água confere às emulsões a utilização em furos húmidos e condições mais adversas, já que a sua fluidez não se altera entre as temperaturas de -20°C e $+30^{\circ}\text{C}$. O seu manuseamento não oferece risco aos seus colaboradores, enquanto a velocidade de detonação pode alcançar até 6000 m/s. A Tabela 4 evidencia a informações técnicas deste tipo de explosivo.

Tabela 4 Tipo de emulsão e suas informações técnicas (retirado do catálogo da *Maxam Brasil*, 2017, acesso em 27/06/2019 às 20:36)

Parâmetros	VALEX®
Densidade (kg/m^3)	1,20
Calor de explosão (kcal/kg)	908,00
Velocidade de detonação (m/s)	5400,00
Resistência à água	Excelente

As emulsões explosivas possuem alta estabilidade química e quando corretamente armazenada, as suas propriedades se mantêm inalteradas por extenso período de tempo, como pode ser visualizado na Figura 18, a comparação entre a estabilidade da dinamite, hidrogel e emulsão. Depois de até 12

meses de armazenamento, este último explosivo, além de prevalecer as suas características físicas iniciais, ainda apresenta praticamente a mesma velocidade de detonação.

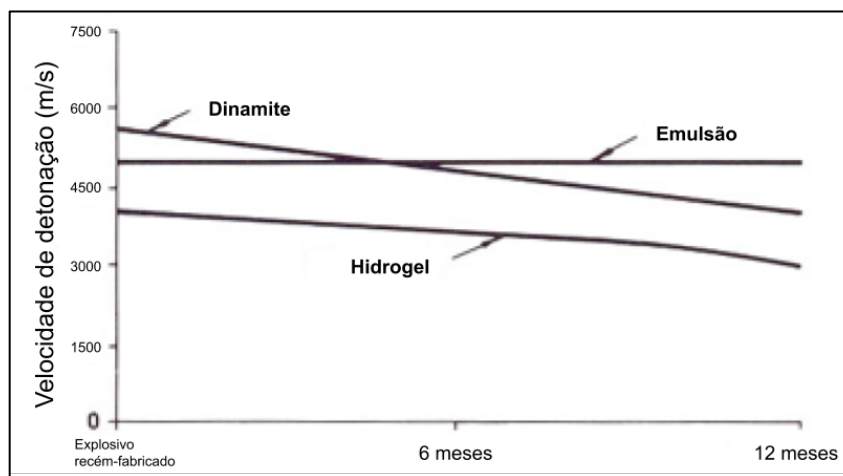


Figura 18 Comportamento da velocidade de detonação durante o respectivo armazenamento (adaptado de Atlas Powder Company, 1987)

Através de outra comparação, a Tabela 5 analisa a dimensão das partículas entre explosivos anteriormente citados com a sua respetiva velocidade de detonação. Presentes na emulsão explosiva, as partículas de micro dimensão (Figura 19) oferecem a esta substância explosiva a capacidade de possuir uma área de contacto – entre a solução de nitrato e os combustíveis – muito maior que os outros explosivos. Esta área de maior contacto é responsável pela reação plena entre os produtos e pode ser relacionado com a maior velocidade de detonação.

Tabela 5 Tamanho de partículas (mm) dos explosivos e suas respectivas velocidades de detonação (m/s) (retirado de Orica, acesso em 27/06/2019 às 21:05)

Parâmetros	ANFO	Hidrogel	Emulsão
Tamanho de partícula (mm)	2,000	< 0,200	0,001
Velocidade de detonação (m/s)	3000,000	4500,000	6000,000

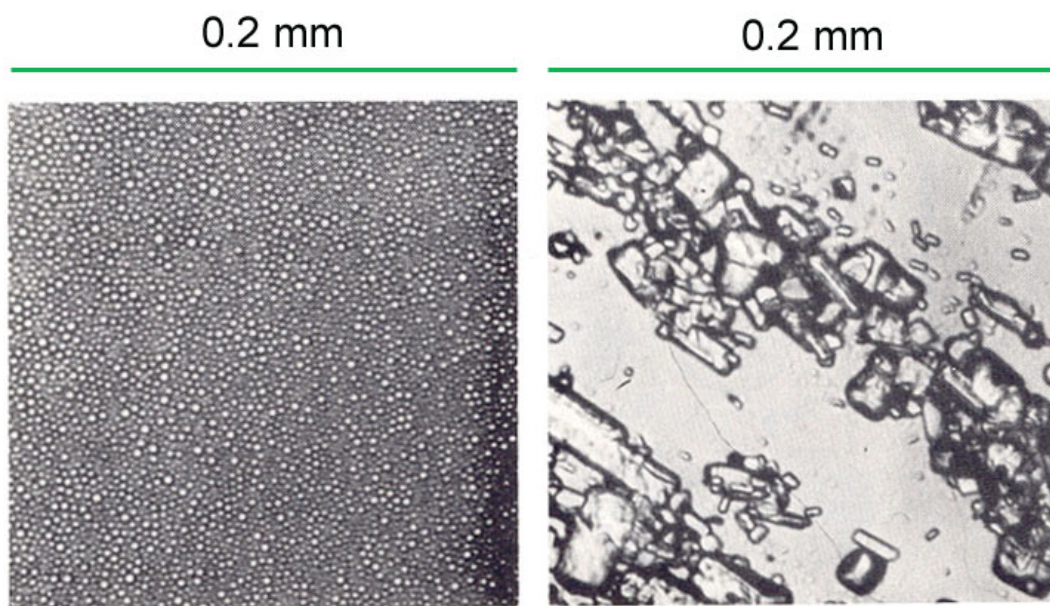


Figura 19 Microscopia da emulsão (à esquerda) e do hidrogel (à direita) (retirado de Atlas Powder Company, 1987)

2.5.5 ANFO pesado

O ANFO pesado é uma mistura entre a emulsão com o ANFO. Nesta mistura, de maneira atômica, a emulsão ocupar-se-á dos “vazios” deixados pelo ANFO e atuará como uma matriz energética.

As características de tal mistura vão depender das proporções de seus produtos. Por exemplo, uma mistura com emulsão proporcionalmente maior que o ANFO produzir-se-á um explosivo que apresenta elevada resistência à água e alta velocidade de detonação. Assim, as características da mistura apresentarão certa similaridade com as características do produto que foi colocado em maior proporção.

3. Escavabilidade de maciços rochosos

A escavabilidade é definida como uma medida da resistência que o maciço rochoso oferece à ação da escavação, decorrente da atuação dos equipamentos de escavação ou dos explosivos (Mancini & Cardu, 2001).

3.1 Método de Franklin *et al* (1971)

O conhecimento da escavabilidade dos maciços rochosos é importante para definir as respectivas técnicas ou métodos de escavação. Neste contexto, ao longo dos tempos, diversos autores têm sugerido critérios de classificação dos maciços rochosos em função da sua escavabilidade, dos quais se destaca o de Franklin *et al* (1971). Este critério classifica o maciço rochoso, do ponto de vista da escavabilidade, de acordo com dois parâmetros principais: IS_{50} (índice de resistência à carga pontual) e espaçamento médio entre fraturas. De acordo com Bastos (1998), estes parâmetros podem ainda ser correlacionáveis com outras grandezas:

- O IS_{50} com a resistência à compressão uniaxial e com o número de *Schmidt*;
- O espaçamento médio entre fraturas com o RQD – índice relativo à qualidade dos maciços rochosos, definido a partir dos testemunhos de sondagens realizadas com recuperação contínua de amostra.

Ainda utilizada atualmente, a classificação de Franklin *et al* (1971) oferece uma extensa e simples aplicação do conceito de escavabilidade. Entretanto, como esta classificação não considera todos fatores geotécnicos e geológicos, preza-se por complementá-la por intermédio de métodos de classificação geomecânica – como, por exemplo, a classificação de Barton (1974) ou a classificação por Bieniawski (1976). Nota-se também que, outras informações como, orientação das fraturas ou a influência de água subterrânea no maciço, também podem acrescentadas com o objetivo de aprimorar a análise. A partir deste enquadramento, através da classificação fundamentada no RMR, “*Rock Mass Rating*”, segundo Bieniawski (1989) é exposta pela Tabela 6, enquanto a Figura 20 ilustra a melhoria do método de Franklin *et al* (1971).

Tabela 6 Classificação geomecânica RMR (Bieniawski, 1989) e seus respectivos índices

Parâmetros	Série de condições				
	Índices de RMR				
RCU – Resistência à compressão uniaxial	> 250 MPa 15	100 – 250 MPa 12	50 – 100 MPa 7	25 – 50 MPa 4	1 – 25 MPa 1
RQD (<i>Rock Quality Designation</i>)	100 – 90% 20	75 – 90% 17	50 – 75% 13	25 – 50% 8	< 25% 3
Espaçamento médio entre fraturas	> 2 m 20	0,6 – 2 m 15	0,2 – 0,6 m 10	0,06 – 0,2 m 8	< 0,06 m 5
Condições das fraturas	Fechadas 30	Abertas < 1mm 25	Alteradas 20	Preenchidas < 5mm 10	Preenchidas > 5mm 0
Orientação das fraturas	Muito favorável 0	Favorável -2	Médio -7	Desfavorável -15	Muito desfavorável -25
Presença de água no maciço	Seco 15	Húmido 10	Molhado 7	A pingar 4	A escoar 0

A partir da soma dos índices de RMR, cinco classes de maciços são determinadas. As competências de cada classe estão presentes na Tabela 7.

Tabela 7 Classes geotécnicas típicas de maciços rochosos (CEGEO, 2002.a)

Propriedades	Classes RMR				
	I Rocha muito boa RMR = 80-100	II Rocha boa RMR = 60-80	III Rocha média RMR = 40-60	IV Rocha má RMR = 20-40	V Rocha muito má RMR < 20
Ângulo de atrito Φ (°)	> 45	35 – 45	25 – 35	15 – 25	< 15
Coesão (kPa)	> 400	300 – 400	200 – 300	100 – 200	< 100
Ângulo de taludes Φ (°)	> 75	65	55	45	< 40

As informações advindas da classificação RMR complementam o ábaco de Franklin (Figura 20). Assim, pode-se relacionar as classes RMR (I a V) com quatro zonas distintas (A a D) nas quais, segundo Franklin, são recomendados diferentes métodos de desmonte.

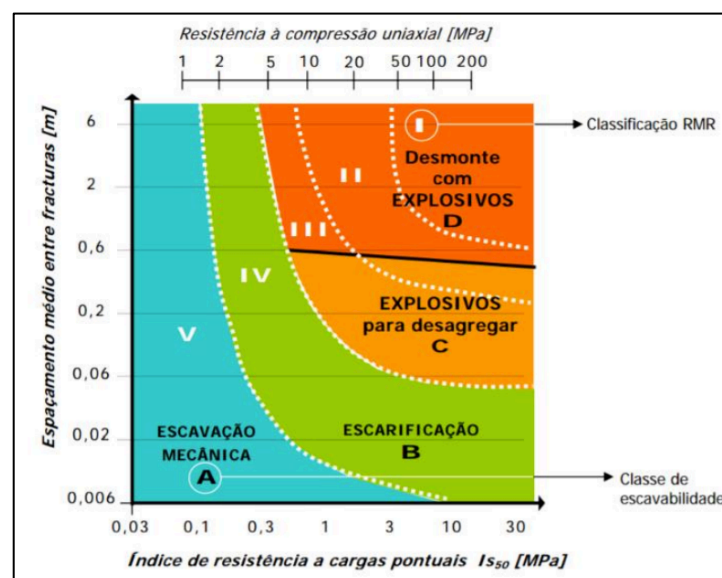


Figura 20 Ábaco de Franklin (1971) com a classificação RMR incorporada (adaptado de Franklin, 1971; citado por Bernardo, 2004)

Devido à data da sua concepção, a classificação encontra-se um tanto imprecisa, uma vez que os equipamentos de escavação e as tecnologias associadas evoluíram consideravelmente, tornando possível a expansão das áreas de escavação mecânica e escarificação para as zonas de desmonte com recurso a substâncias explosivas. No entanto, mantém-se como uma boa base de trabalho relativamente às características resistentes do maciço rochoso (Bastos, 1998).

3.2 Método de Pettifer & Fookes (1994)

A classificação de Pettifer & Fookes (1994) sugeriu uma revisão ao ábaco de Franklin (1971). Através de um estudo geológico-geotécnico de testemunhos de sondagem, o ábaco de Pettifer & Fookes (1994) correlaciona os parâmetros: IS_{50} e grau de fracturação em termos de espaçamento

médio entre as descontinuidades (Carlos Galiza *et al.*, 2011). A Figura 21 evidencia a melhoria no ábaco.

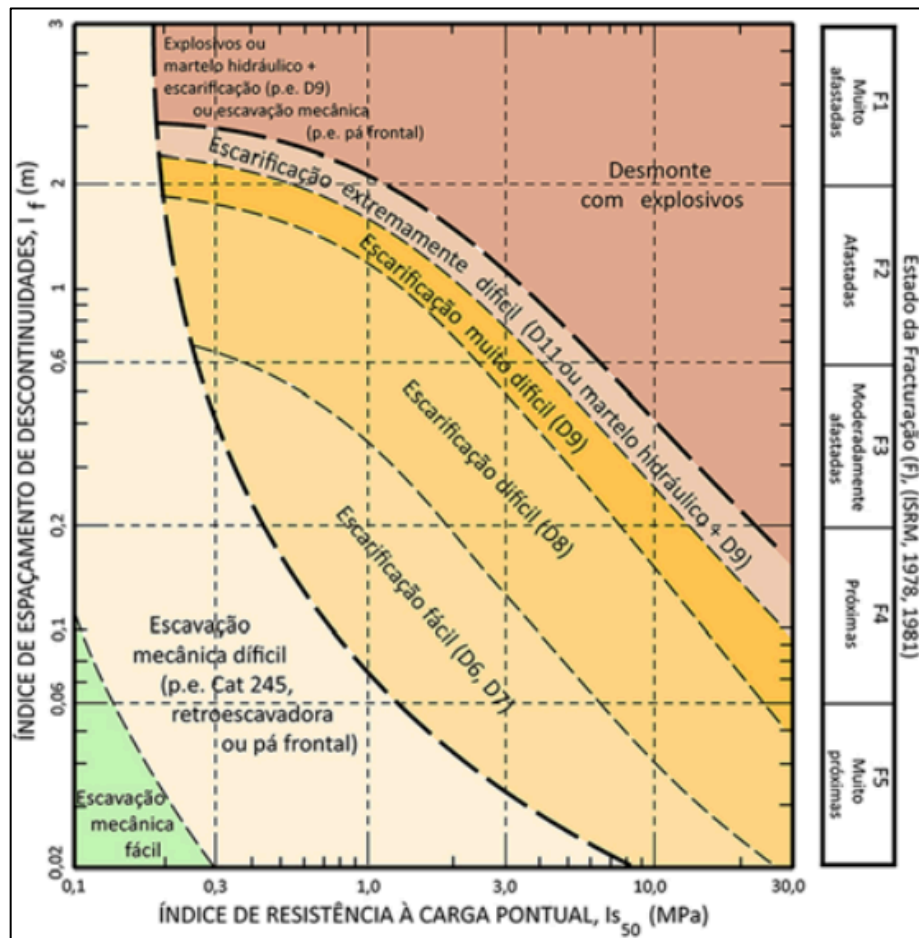


Figura 21 Ábaco Pettifer & Fookes (1994) para a avaliação da escavabilidade (retirado de Carlos Galiza *et al.*, 2011)

3.3 Método de Tsiambaos & Saroglou *et al* (2009)

Paralelamente ao conhecimento abordado por Franklin *et al* (1971) e Pettifer & Fookes (1994), a recente classificação sugerida por Tsiambaos & Saroglou (2009) é baseada no IS_{50} e “*Geological Strength Index*” (GSI). O índice GSI relaciona as propriedades dos blocos de rocha com as propriedades do maciço em questão: baseia-se em uma avaliação da litologia, estrutura e condição das descontinuidades e é estimado a partir do exame visual do maciço exposto em afloramentos, escavações de superfície, como cortes para autoestradas e abertura de túneis (Tsiambaos & Saroglou, 2009).

Dessa maneira, o método de Tsiambaos & Saroglou (2009) classificou as rochas sedimentares e metamórficas, através do GSI, em dois conjuntos: aquelas com IS_{50} maior ou igual de 3 MPa e IS_{50} menor de 3 MPa. Neste contexto, o uso de explosivos, foco deste trabalho, foi verificado para maciços rochosos em duas ocasiões:

1. Valores de GSI são maiores de 65 quando IS_{50} é maior ou igual a 3 MPa ou;
2. Valores de GSI maiores de 60 quando IS_{50} é menor a 3 MPa

Outros métodos de exploração como, por exemplo, a escarificação é observada em maciços rochosos de GSI entre 20 e 45 para IS_{50} maior ou igual de 3 MPa e GSI entre 25 e 55 para IS_{50} menor de 3 MPa. A área de transição entre o uso de material explosivo e a escarificação, recomendou-se o uso de martelos hidráulicos (Tsiambaos & Saroglou, 2009). A Figura 22 ilustra a classificação proposta para valores de IS_{50} maiores ou iguais a 3 MPa.

GEOLOGICAL STRENGTH INDEX GSI (Rochas fracturadas) (Adaptado de Hoek & Marinos, 2000; Tsiambaos & Saroglou, 2010)		ESTADO DAS DESCONTINUIDADES (D)				
		D1	D2	D3	D4	D5
ESTRUTURA (S)		MUITO BOM	BOM	RAZOÁVEL	FRACO	MUITO FRACO
		Qualidade decrescente das superfícies →				
	S1 Intacta ou maciça	Desmonte com Explosivos ("Blasting")			N/A	N/A
	S2 Compartimentada	Interligação decrescente entre blocos de rocha ↓				
	S3 Muito compartimentada					
	S4 Compartimentada / tectonizada					
	S5 Desintegrada					
	S6 Foliada / Cisalhada					
		90	85	80	75	70
		65	60	55	50	45
		40	35	30	25	20
		15	10			
		N/A	N/A			

Figura 22 Ábaco Tsiambaos & Saroglou (2009) para a avaliação da escavabilidade de maciços rochosos sedimentares e metamórficos ($IS_{50} \geq 3$ MPa)

4. Critérios de seleção de explosivos

A seleção adequada do explosivo pretende garantir uma detonação bem-sucedida e, por isso, é considerada uma parte importante do projeto de exploração. Esta seleção deve ser feita de maneira a respeitar os critérios ambientais de segurança ao mesmo que entregue a fragmentação e o deslocamento ideal do material associado ao menor custo de operação por unidade de rocha desmontada (Berta, 1990).

O mercado atual de substâncias explosivas é composto por diversas opções de produtos visando exclusivamente o êxito e o melhor rendimento dos projetos de mineração. Dessa maneira, discutirão-se os critérios e parâmetros utilizados para selecionar esses explosivos e, assim, atingir resultados satisfatórios. Ao longo deste capítulo, os parâmetros analisados para o desenvolvimento desta Dissertação são: fatores económicos, tipo de maciço a ser explorado, condição do diâmetro da carga, presença de água, toxicidade dos gases de detonação e, por fim, segurança de manipulação.

Ressalta-se que, a discussão não visa evidenciar o tipo de explosivo utilizado, mas sim os parâmetros observados para que a seleção da substância explosiva seja feita.

4.1 Fatores económicos

Sabe-se que, durante o processo de seleção de explosivos, o fator económico possui importância para a validação do projeto, entretanto este fator não deve ser levado unicamente em consideração. Com o intuito de desenvolver um orçamento mais financeiramente acessível, a escolha de uma substância explosiva de menor custo não oferece ao desmonte a sua eficiência ideal, o que encarece o custo global do processo através de retrabalho – como fragmentações secundárias.

A Figura 23 relaciona a dimensão máxima dos blocos com os seus respetivos custos unitários. Interpreta-se que, em um desmonte subdimensionado, por exemplo, a detonação pouco eficiente gera uma maior dimensão de bloco desmontado, o que aumenta os custos unitários das tarefas posteriores – como carregamento, transporte e britagem – e, consequentemente, o custo global. Da mesma maneira que, os custos de um desmonte sobredimensionado são desnecessariamente elevados. Preza-se assim, pelo desmonte bem dimensionado que vise o menor custo global da operação através da eficiência ideal do explosivo.

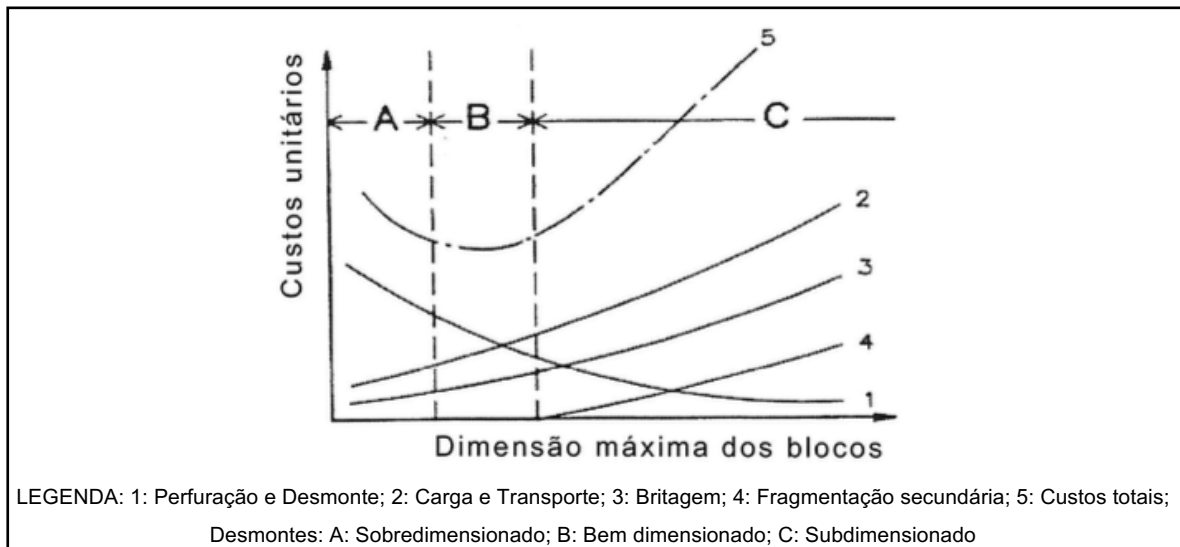


Figura 23 Granulometria versus custos unitários (Dinis da Gama, 1990)

4.2 Tipo de maciço a ser explorado

De acordo com Hartman (1987), as principais variáveis das características do tipo de maciço são:

- As propriedades geomecânica da rocha que o compõem – como densidade, velocidade de propagação das ondas, resistência à compressão e à tração dinâmica;
- O grau de fracturação do maciço.

Neste aspeto, o conhecimento da impedância se faz necessário para o entendimento da transmissão de energia entre a detonação e o maciço explorado. Conforme Kramer (1996), proveniente da detonação do explosivo, a amplitude de uma onda incidente (A_I), em uma interface entre dois meios (1 e 2) de impedâncias distintas (densidades, ρ_1 e ρ_2 , e velocidades de propagação, c_1 e c_2), pode estar relacionada com a amplitude das ondas transmitidas (A_T) e refletidas (A_R) através respetivamente das Equações 8 e 9.

$$A_T = \frac{2\rho_2 c_2}{\rho_1 c_1 + \rho_2 c_2} A_I \quad (\text{Equação 8})$$

$$A_R = \frac{-\rho_1 c_1 + \rho_2 c_2}{\rho_1 c_1 + \rho_2 c_2} A_I \quad (\text{Equação 9})$$

Assim, a melhor compatibilidade entre as impedâncias de detonação e da rocha permite a máxima transmissão de energia. Pretende-se, através desta máxima transmissão, que a energia da onda incidente seja transferida para a onda transmitida ($A_T \approx A_I$) e que a amplitude refletida possua a menor quantidade de energia possível ($A_R \approx 0$). Neste contexto, o critério de escolha deve oferecer a melhor compatibilidade entre as impedâncias da substância explosiva com o maciço a ser explorado. A Tabela 8 evidencia os valores de impedâncias (I), juntamente com as densidades e velocidades de propagação em maciços rochosos usualmente explorados.

Tabela 8 Características técnicas de tipos de rochas (retirado de Berta, 1990)

Parâmetros	Basalto	Calcário	Diábase	Granito
Impedância ($10^6 \text{ kgm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	15,66	10,40	15,50	13,50
Densidade (kg/m^3)	2900,00	2600,00	3100,00	2700,00
Velocidade sísmica no maciço (m/s)	5400,00	4000,00	5000,00	5000,00

Por fim, para a exploração de rocha de alta resistência é conveniente utilizar substâncias explosivas com elevadas velocidades de detonação. Para uma mesma rocha, o explosivo com a maior velocidade de detonação provoca a menor inclinação de duas frentes de onda: a cônica e a refletiva na superfície livre. Assim, de acordo com Bernardo (2004), a rotura de rocha por tensões de tração associadas à onda refletida é mais eficaz no caso do explosivo com maior velocidade de detonação.

4.3 Diâmetros de carga

Os diâmetros de carga dos explosivos estão relacionados com o desempenho de sua velocidade de detonação. Como observado, a Figura 24 compara 5 diferentes explosivos em um gráfico de diâmetro de carga *versus* a velocidade de detonação. Ao analisar esta relação, pode-se constatar que, para o mesmo tipo de substância explosiva e em um intervalo restrito, o aumento do diâmetro de carga é acompanhado pelo aumento velocidade de detonação. Ao observar o comportamento do ANFO, por exemplo, um diâmetro de carga de 75 mm garante 3000 m/s de velocidade de detonação, enquanto para um diâmetro de 100 mm, a mesma substância possui aproximadamente 4000 m/s. Ressalta-se que, o aumento paralelo entre o diâmetro de carga e a velocidade de detonação é restrito a determinado intervalo que dependerá do tipo de substância explosiva analisada – no caso do ANFO de 50 a 100 mm de diâmetro. Isto quer dizer que, depois de atingido o diâmetro capaz de fornecer a velocidade máxima de detonação, um aumento do diâmetro do explosivo não é acompanhado pelo aumento da velocidade de detonação.

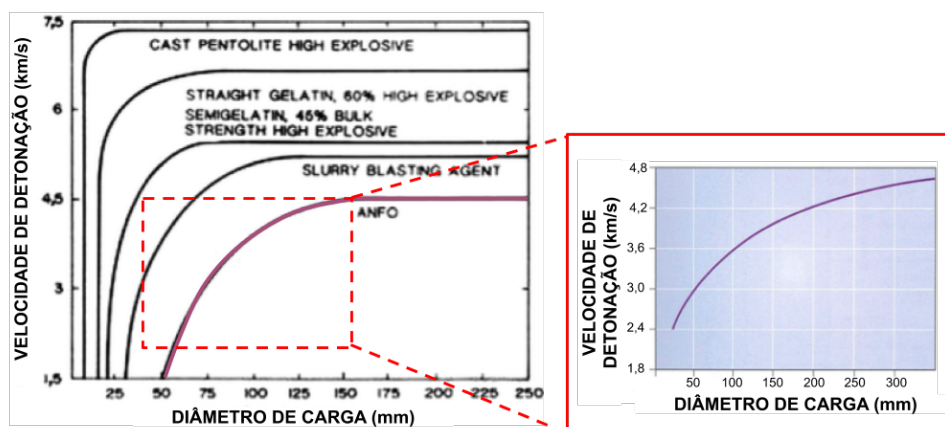


Figura 24 Efeito do diâmetro de carga na velocidade de detonação (retirado de Dick, Fletcher & D'Andrea, 1986)

A exposição da relação anterior não deve incentivar os projetistas a buscar o maior diâmetro de carga com o objetivo de obter a maior velocidade de detonação. Por isso, a análise destas dimensões deve ser feita com cautela, uma vez que, eventualmente, diâmetros de carga maiores que diâmetros de furo podem ocasionar compactação da substância explosiva e, assim, gerar uma detonação pouco eficiente. Da mesma maneira que, diâmetros maiores de carga, em furos de detonação próximos, podem acarretar projeções de blocos, colocando em risco a segurança da exploração. Assim como, finalmente, diâmetros de carga de dimensão muito menor que diâmetros de furo apresentam transmissões energéticas pouco eficientes pela elevada distância entre as interfaces (explosivo/ar, ar/rocha ou explosivo/água, água/explosivo).

Finalmente, intrínseco ao diâmetro de carga, evidencia-se a importância do diâmetro dos furos de detonação. Neste contexto, analisar-se-ão os resultados de duas situações distintas: a primeira com furos de pequeno diâmetro e a segunda com furos de maior diâmetro. A Figura 25 mostra que para a mesma bancada, é necessária uma quantidade menor de furos de maiores diâmetros (B) que de menores diâmetros (A). Nota-se que, a distância entre os furos é proporcional ao diâmetro.

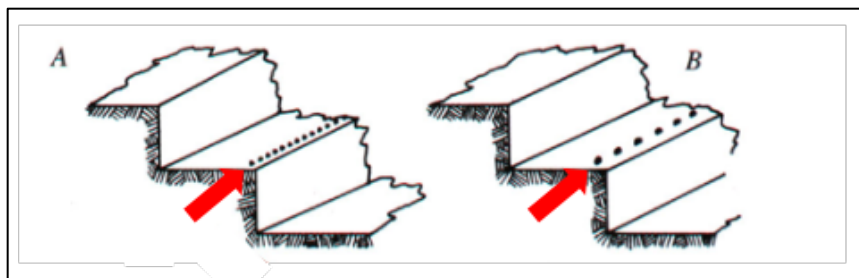


Figura 25 À esquerda: furos de menores diâmetros; à direita: furos de maiores diâmetros (retirado de Mancini & Cardu, 2001)

Neste contexto, ao comparar as situações “A” e “B” em um gráfico de diâmetro de furo (Φ_f) *versus* o custo unitário do projeto (c) constata-se:

- Durante a detonação, os diâmetros “B” permitem um investimento menor que diâmetros “A”. A diferença de orçamentos se deve a menor quantidade de furos de “B” e, consequentemente, o menor investimento em sistemas de iniciação;
- Durante o transporte e o beneficiamento, maiores distâncias entre furos “B” produziram maiores blocos e, consequentemente, para alcançar menores fragmentações necessitam de maior investimento.

Na Figura 26, a relação do custo para a detonação pode ser observada pela função “e”, enquanto a relação do custo do transporte e o beneficiamento é notada pela função “f”. A soma das funções “e” e “f”, a função “g” oferece o custo total de operação, no qual seu mínimo define o custo unitário mínimo (C_{min}) e o diâmetro ótimo (Φ_{opt}).

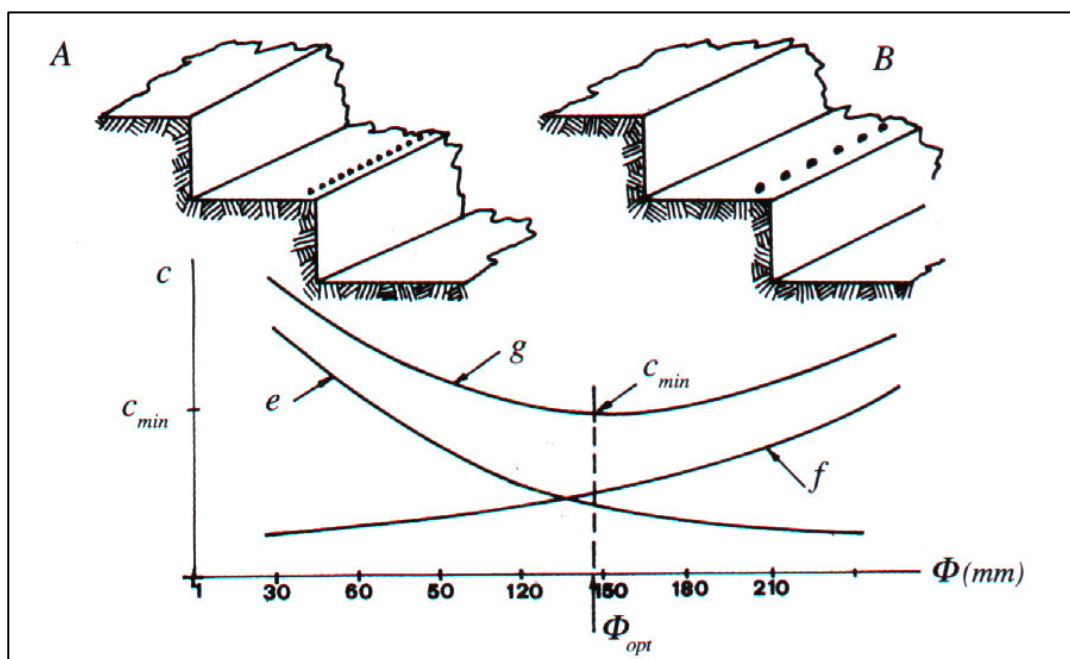


Figura 26 Relação entre diâmetro (Φ) versus o custo unitário (c) (retirado de Mancini & Cardu, 2001)

4.4 Presença de água

Como anteriormente abordado, sabe-se que a presença de água é considerada um parâmetro limitante para a seleção de substâncias explosivas. Neste contexto, ressalta-se que a aplicação de explosivos de baixa resistência à água em furos húmidos pode ser feita através de duas técnicas:

- Envolver a substância explosiva em um cartucho de poliuretano – material que apresenta elevada resistência à presença de água do meio externo. No caso do ANFO, por exemplo, além encartuchar a substância, recomenda-se que parte do explosivo seja pulverizado, assim a densidade total torna-se maior que a densidade da água o que garante o afundamento do cartucho nos furos de detonação;
- Retirar a água dos furos utilizando uma bomba submersível. Após a retirada, uma camada de impermeabilização é então colocada no furo e o explosivo de baixa resistência é carregado antes da volta da água.

Conforme Dannenberg (1973), mesmo com correta aplicação, as técnicas expostas podem não garantir a detonação eficiente, uma vez que se o cartucho de poliuretano (primeira técnica) sofrer rotura, o explosivo de baixa resistência entrará em contato com a água do meio. Da mesma maneira que, se a impermeabilização (segunda técnica) romper, a água penetrar-se-á no furo de detonação.

Após a detonação, a emissão de óxidos de nitrogénio de cor castanha frequentemente indica o a absorção de água pelo explosivo (Dick, Fletcher & D'Andrea, 1986). A alteração da composição de gases diminui a eficiência da detonação, já que, de acordo Mancini & Cardu (2001), a única contribuição da água para a reação, do ponto de vista energético, é subtrair a energia de explosão

devido ao seu aquecimento e sua vaporização. Além disso, o incremento de gases tóxicos oferece insalubridade à mão-de-obra envolvida na operação e ao meio-ambiente.

Finalmente, a aplicação de explosivos de baixa resistência à água em meios com a sua presença torna-se preocupante pela falta de garantia de uma detonação eficiente, pela possibilidade de produzir insalubridade à operação e pelos custos acrescidos de eventuais técnicas para contornar a presença de água. Recomenda-se assim, nestes tipos de contexto, que a possibilidade a aplicação de explosivos de maior resistência à água seja verificada.

4.5 Toxidade dos gases de detonação

Sabe-se que a detonação da substância explosiva produz uma determinada proporção de gases tóxicos para o meio ambiente. A maior ou menor proporção de gases tóxicos depende da composição química do explosivo, a quantidade do consumo de oxigênio e se a transformação química foi concluída integralmente ou parcialmente.

Somente em contextos de exploração subterrânea, por exemplo, explosivos que geram elevadas quantidades de gases tóxicos de detonação não são recomendados. De maneira geral, a variedade de substâncias explosivas permite a escolha de produtos mais propícios para as explorações subterrâneas e outros, mais propícios para céu-aberto.

Por fim, a toxidade também é um importante parâmetro utilizado na seleção de explosivos, já que este requisito atua intensamente no nível de insalubridade dos trabalhos desenvolvidos durante a exploração mineral. Uma seleção errônea da substância explosiva pode culminar, em um desenvolvimento subterrâneo por exemplo, em um ambiente de risco à saúde dos colaboradores daquela operação.

4.6 Segurança de manipulação

Em geral, as substâncias explosivas possuem certa sensibilidade ao choque e à fricção, o que garante a sua manipulação com segurança. Neste contexto, mesmo que o mercado atual seja dotado de explosivos de manipulação mais segura, explosivos de manuseio cauteloso ainda são utilizados dependendo da circunstância de aplicação.

Uma maneira de se verificar o nível de sensibilidade das substâncias explosivas é através de sua respectiva classificação para o seu transporte. Usada para identificar o transporte dos explosivos, esta classificação é dividida em seis partes (de 1.1 a 1.6) da Classe 1, "Materiais Perigosos". Este nível de sensibilidade pode ser relacionado com a segurança de manipulação do explosivo, isto é, quanto menor a classificação, maior a cautela de manipulação da substância. Como observado pela Tabela 9, geralmente, a indústria de mineração utiliza as subclasses 1.1, 1.4 e 1.5.

Tabela 9 Classificação dos explosivos de acordo com o seu respetivo transporte (retirado de Hartman, 1992)

Subclasse	Definição da subclasse	Exemplos
1.1	Explosivo com risco de explosão em massa	Dinamite
1.2	Explosivo com risco de projeção	Munição de armamento
1.3	Explosivo com risco de incêndio e menor risco de explosão ou menor risco de projeção, mas não ambos	Fogos de artifícios comerciais
1.4	Explosivos sem risco significativo de explosão;	Explosivos especialmente embalados para a prevenção de detonação em massa
1.5	Explosivos muito insensíveis; perigo de explosão em massas, mas com pouca probabilidade de iniciação durante o transporte	ANFO, alguns tipos de emulsão e hidrogéis
1.6	Substância extremamente insensível e sem o risco de explosão	Não existe

Entende-se que, as substâncias explosivas sensíveis à manipulação como a dinamite, por exemplo, são mais suscetíveis à detonação acidental por impacto ou faísca que outros explosivos comercializados. Entretanto, a não utilização de explosivos mais suscetíveis à detonação não garante a segurança absoluta de manipulação de outros explosivos. O transporte, armazenamento e manipulação das substâncias explosivas, de maneira geral, devem possuir constatare cautela dos operadores, independentemente da sensibilidade do explosivo.

5. Sistemas de iniciação

Os sistemas de iniciação produzem uma detonação com energia suficiente para iniciar o explosivo. Esta detonação ocorre devido à estimulação térmica ou onda de choque e é produzida por uma pequena carga de explosivo primário, juntamente com uma carga base de um explosivo secundário, geralmente a pentrite (PETN). Os sistemas de iniciação incluem uma vasta gama de produtos: detonadores, cordão detonante e *boosters*.

5.1 Detonadores

Os três tipos de detonadores disponíveis são: elétrico, não-elétrico e eletrônico.

5.1.1 Elétricos

Os tipos detonadores elétricos são: instantâneo, de retardo longo ou de retardo curto. Compostos por um tubo de alumínio e uma de suas extremidades inacessível, ambos tipos possuem três partes distintas: a parte elétrica, a parte retardadora (ausente no tipo instantâneo) e a parte explosiva.

Os detonadores elétricos são iniciados quando uma pequena quantidade de corrente é introduzida através dos fios condutores de polietileno, que correspondem pela parte elétrica, para dentro do invólucro do detonador. O intervalo de tempo entre a combustão do filamento – ocasionada pela passagem de corrente elétrica – e o estourar do detonador é o tempo de retardo gerado pela parte retardadora. Posteriormente ao elemento de atraso, o aquecimento vai de encontro à carga explosiva. Esta última parte é composta pela carga primária e secundária. A alta sensibilidade do explosivo da carga primária permite a sua detonação mediante ao contato com a combustão da parte retardadora. Enquanto que, localizada no extremo do detonador, a carga secundária também oferece à detonação a energia suficiente para iniciar a liberação de energia da substância explosiva. A Figura 27 ilustra a diferente composição entre um detonador elétrico instantâneo e um detonador elétrico com retardo.

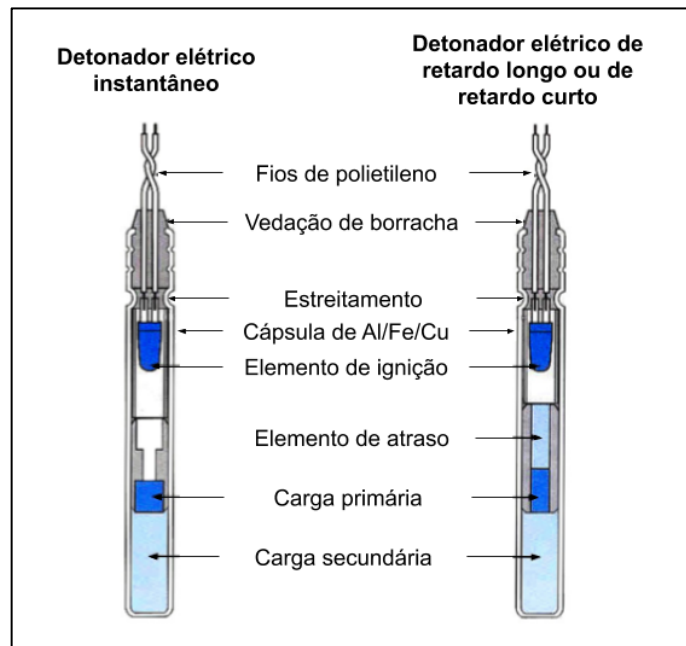


Figura 27 Interior de um típico detonador elétrico; à esquerda: instantâneo; à direita: de retardo (adaptado de Tamrock, 1988)

Todos os tempos de disparo são representados por um valor nominal que, mesmo assim, pode não exprimir precisamente o instante em que ocorre a detonação, devido a imprecisão do elemento de atraso. Neste contexto, os detonadores de curto retardo são comercializados com 20 e 25 ms de atraso enquanto os detonadores de longo retardo possuem atrasos em 100, 250, 500 ms. Por sua vez, os detonadores elétricos instantâneos detonam imediatamente quando carregados na eletricidade.

5.1.2 Não-elétricos

Este equipamento foi constituído com o objetivo de ser insensível às correntes elétricas parasitas – como eventuais descargas atmosféricas – que pudessem influenciar o disparo do detonador e consequente a iniciação do explosivo. Conhecidos como “nonel”, este tipo de detonador é o sistema de iniciação mais utilizado atualmente.

A iniciação destes detonadores ocorre através de duas maneiras: a primeira, por um detonador elétrico, enquanto a segunda, por um equipamento, chamado de *explosor*, devidamente calibrado e capaz de realizar uma iniciação segura. A substituição dos fios condutores elétricos por um fino tubo de plástico (Figura 28), recoberto internamente por uma composição reativa, permite que os detonadores não-elétricos sejam capazes de gerar uma onda de choque de aproximadamente 2000 m/s. No interior do detonador não-elétrico, essa propagação de elevada velocidade é capaz de fornecer a energia suficiente para a iniciação do explosivo, ao mesmo tempo que não é apta de alterar as estruturas internas do material, muito menos de modificar o meio externo durante a passagem da onda.

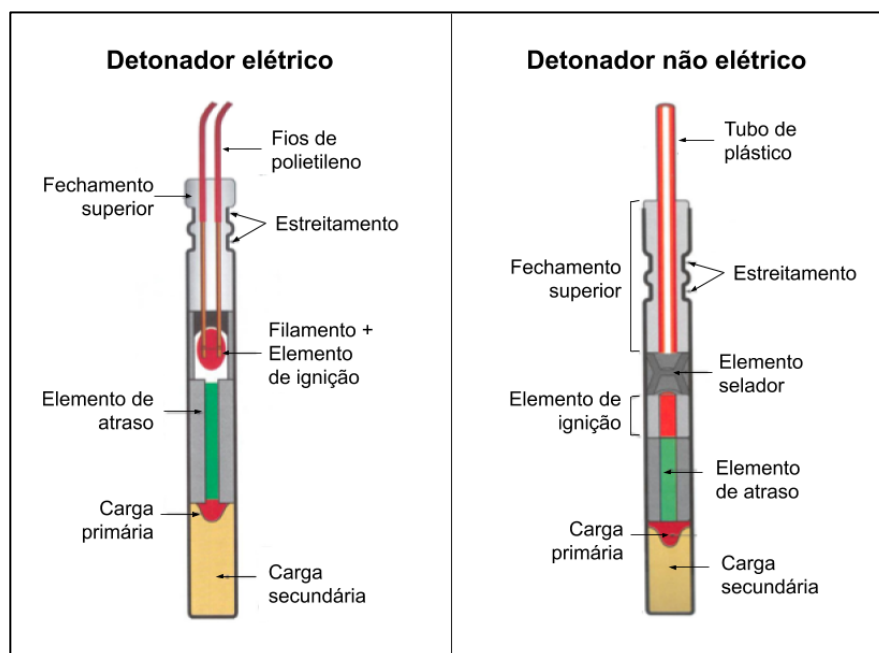


Figura 28 Comparação entre o funcionamento de um detonador elétrico e não elétrico (adaptado de ISEE Blasters' Handbook, 2011)

O diferencial do detonador não-elétrico está em poder produzir um atraso duplo: o atraso do furo em conjunto ao atraso da superfície. Diferentemente do atraso único do detonador elétrico, a vantagem do atraso duplo está em oferecer ao desmorte uma maior quantidade de intervalos de atrasos, para tal os atrasos disponíveis para do furo são de 200 a 500 ms, enquanto para o atraso de conectores de superfície de 17 a 285 ms (Figura 29).



Figura 29 À esquerda: detonador não-elétrico de longo período de 500 ms; à direita: conectores com diferentes retardos (adaptado de catálogo “Dyna Nobel”, 2016)

De acordo com Hartman (1992), o detonador não-elétrico é empregado na maioria das detonações através de uma combinação de atrasos no interior do furo e na superfície. Os conectores de superfície são simplesmente ligados em cadeia oferecendo uma gama elevada de possibilidades de atrasos. A Figura 30 compara o intervalo de retardo de dois esquemas, ambos com detonadores não-elétricos de furo de 500 ms, entretanto um sem e outro com conectores de superfície de 25 ms de retardo.

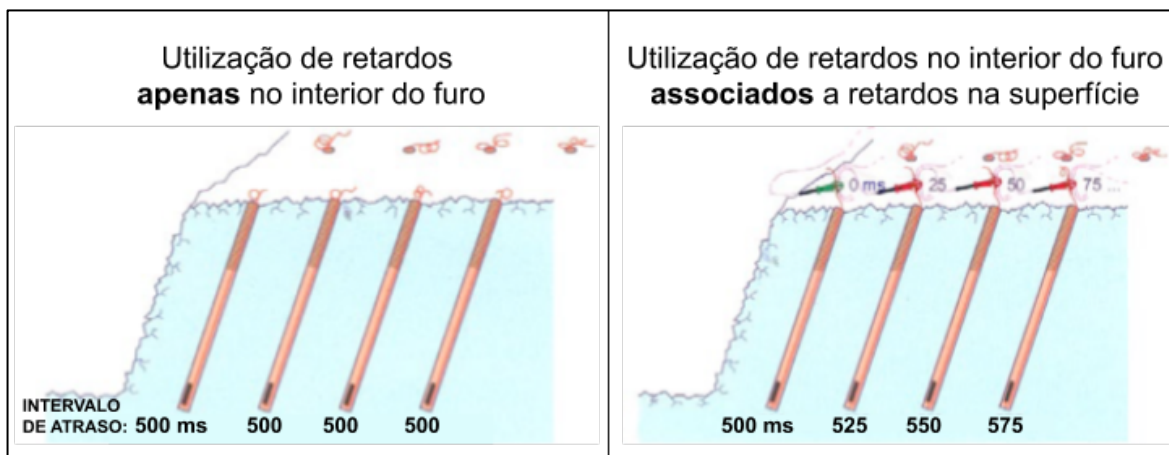


Figura 30 Comparação entre esquemas sem e com conectores de superfície (adaptado do catálogo “Dyna Nobel”, 2016)

Por fim, mesmo sendo mais robustos que o sistema anterior, os detonadores não-elétricos não permitem a visualização e inequívoca da integridade das ligações e dos próprios detonadores (Bernardo, 2014). Esta característica pode ser vista no detonador discutido posteriormente, o detonador eletrônico.

5.1.3 Eletrônicos

Estes detonadores possuem uma componente eletrônica constituída por um circuito integrado e um condensador (Figura 31), que substitui o elemento de atraso dos detonadores elétrico e não elétrico.

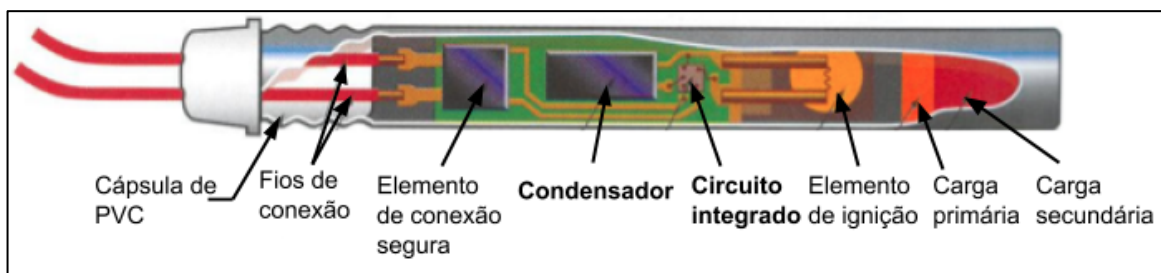


Figura 31 Composição interna de um detonador eletrônico (adaptado de ISEE Blasters' Handbook, 2011)

Mesmo o detonador eletrônico sendo constituído por um temporizador eletrônico, ele pode ser conectado da mesma maneira que o detonador elétrico. Uma vez concluída a operação de instalação do equipamento de detonação, este tipo de detonador permite que as ligações sejam verificadas em busca de eventuais falhas de operações ou ligações feitas erroneamente.

As maiores vantagens deste tipo de detonadores, em detrimento dos restantes, são a possibilidade de programação individual dos tempos de cada detonador, grande precisão do tempo de disparo

face ao programado, fácil utilização e verificação do estado das ligações do circuito e consequente, aumento da segurança do sistema como um todo. A Figura 32 ilustra equipamentos utilizados.



Figura 32 Sistema que compõem o detonador eletrônico (à esquerda: retirado da Orica, acesso em 28/06/19 às 11:13; à direita: retira do catálogo “Dyno Nobel”, 2016, acesso em 28/06/19 às 11:31)

A principal desvantagem deste tipo de detonadores pode ser o seu custo unitário se não se tirar partido da precisão para reduzir os consumos específicos – de furação e carga explosiva –, pois o custo do sistema de temporização e disparo no detonador é mais elevado quando comparado com outras alternativas mais antigas e menos precisas – pirotécnicas (Bernardo, 2014).

A iniciação múltipla dos detonadores eletrônicos oferece uma maior velocidade de detonação e, consequentemente, uma maior quantidade de colisões internas. Quando comparado aos detonadores anteriores, estas colisões internas são responsáveis por produzir um maior nível de fragmentações internas no maciço rochoso.

5.2 Boosters

De acordo com Persson, Holmberg, & Lee (1994), em detonações realizadas em maiores diâmetros é necessária a utilização de um sistema de iniciação especial conhecido como *booster*. Este sistema tem como o principal objetivo iniciar os explosivos insensíveis de Classe 1.5, como, por exemplo, o ANFO e alguns casos de hidrogéis e emulsões.

Para que se atinja o êxito na exploração em questão, o *booster* deve desempenhar duas funções primordiais: tem que ser suficientemente sensível para ser iniciado pelo detonador ao mesmo tempo de ser capaz de proporcionar a energia satisfatória para que os explosivos iniciem a detonação. Os critérios da escolha do *booster* ideal devem ser pautados de acordo com os seguintes critérios: o custo do projeto, o diâmetro do furo de detonação, o explosivo a ser iniciado, confinamento em questão, tipo de rocha explorada e entre outros.

Vale ressaltar que, a eficácia de utilização do *booster* pode não ser comprometida quando a sua aplicação for em ambientes húmidos ou em furos submersos em água. Este acessório pode ser

usado na exploração de lugares adversos, já que, usualmente, possui impermeabilizante e a anticongelante na sua composição. A Figura 33 mostra exemplos de *boosters* comercializados.



Figura 33 *Booster* do tipo *Pentex* (à esquerda retirado do catálogo “*Dyno Nobel*”, 2016, acesso em 28/06/19 às 13:08; à direita retirado da Orica, acesso em 28/06/19 às 13:23)

5.3 Cordão detonante

O cordão detonante é composto internamente por um material explosivo, geralmente PETN, envolto por uma cobertura têxtil. O revestimento de caráter plástico protege o explosivo da água e tem como objetivo permitir a flexibilidade de aplicação do explosivo, assim como assegurar a aplicação em ambientes húmidos. É possível de empregar um sistema de atraso que consiga oferecer retardo entre a detonação de diferentes cordões.

Diferente dos outros iniciadores, o cordão detonante pode chegar a velocidades de detonação de 7000 m/s. Este sistema de iniciação também difere na maneira como é comercializado, existe uma variedade de cordões detonantes que varia de acordo com quantidade de explosivos utilizados por metro linear de explosivo. A quantidade comercializada varia entre 3 g/m a 100 g/m, exemplos de produtos podem ser observados na Figura 34.

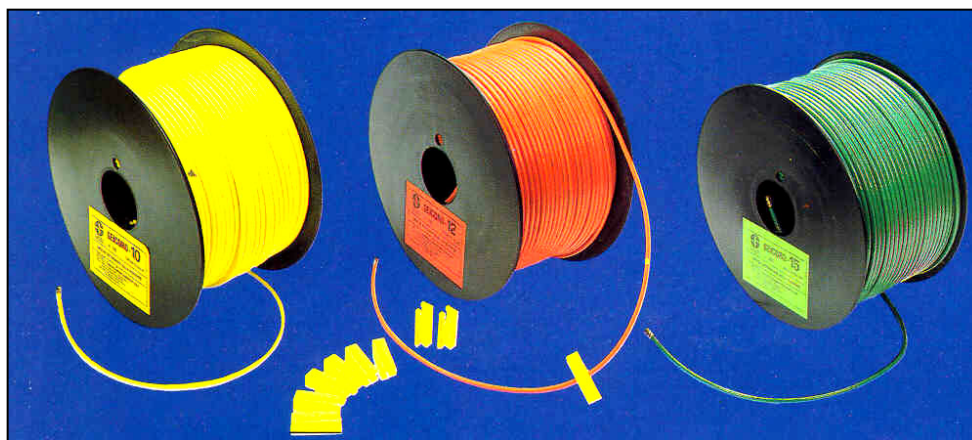


Figura 34 Diferentes tipos de cordão detonante: 10 (amarelo), 12 (vermelho) e 15 g/m (verde) (retirado do Catálogo Pravisani, 2003)

A potente onda de choque deste sistema de iniciação consegue dar início à detonação de grande parte das cargas próximas a ele. Assim, com o objetivo de assegurar a propagação da detonação, o cordão detonante é usualmente utilizado para iniciar as cargas de contextos adversos de aplicação. Entretanto, como explicado por Berta (1990) através de uma série de experimentos práticos, a iniciação radial do cordão detonante favorece o atingimento de apenas 80% da velocidade de detonação estipulada. O estudo do autor também evidenciou que a melhor performance da velocidade de detonação estava na utilização de sistemas de iniciação colocados em apenas uma extremidade do explosivo, já que a direção de detonação coincidia com a coluna de explosivos. Por outro lado, na detonação por cordão detonante, o explosivo é iniciado em todos os pontos de contacto com este detonador, permitindo que a direção de detonação acompanhe o eixo de cada um dos explosivos utilizados. A diferença entre as direções de detonação é visualizada na Figura 35.

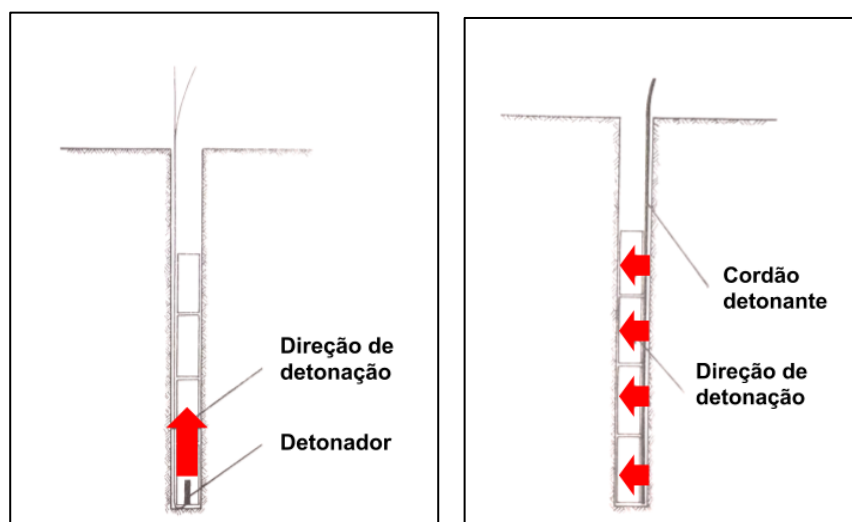


Figura 35 Diferentes direções de detonação. À esquerda: utilizando um detonador na extremidade do explosivo; à esquerda: utilizando o cordão detonante (adaptado de Berta, 1990)

Por fim, o cordão detonante tem vasta aplicação em rochas ornamentais, já que este tipo de material possibilita a detonação de furos simultaneamente que se originam de um mesmo detonador. Cordões detonantes de maior concentração linear também são utilizados em procedimentos de pré-corte ou recorte, neste caso, não de rochas ornamentais.

6. Diagramas de fogo

A aplicação de substâncias explosivas na escavação de maciços rochosos é materializada através de diagramas de fogo, nos quais são ajustados os diversos parâmetros relativos ao dimensionamento das cargas explosivas a aplicar, no que diz respeito à sua qualidade e quantidade, no espaço (volume) e no tempo (sequência). Os diagramas de fogo (Figura 36) são concebidos para os maciços rochosos mais resistentes, ou seja, aqueles que não permitem a escavação mecânica em tempo útil e a um custo aceitável, tornando-se assim recomendável a utilização de substâncias explosivas (Bernardo, 2004).

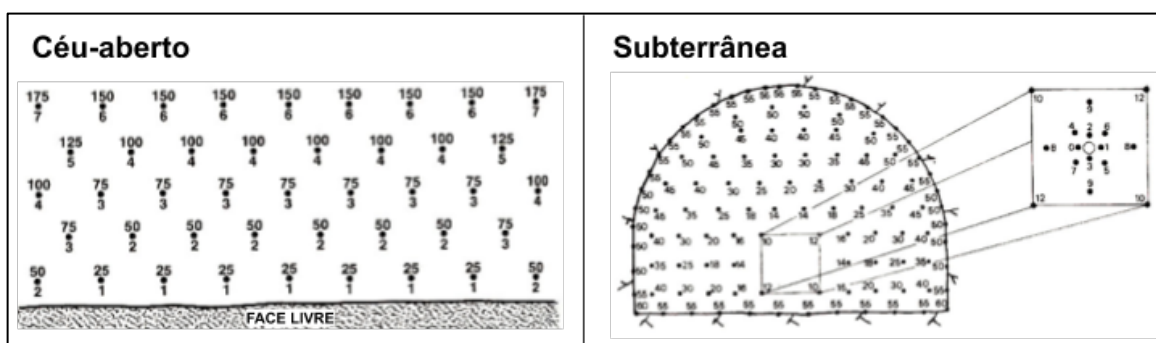


Figura 36 Diferença entre diagramas de fogo (retirado à esquerda de Dick *et al.*, 1986; à direita de Olofsson, 1990)

6.1 Escavações a céu-aberto

As relações empíricas para o dimensionamento de diagramas de fogo de desmontes em bancadas a céu aberto (Figura 37) foram inicialmente propostas por Ash, em 1963 e, posteriormente, confirmadas na prática em numerosas pedreiras a nível mundial, compreendendo variadas geometrias de escavação, várias alturas de bancada, diversos diâmetros de furo, diferentes litologias e distintos tipos de explosivo. Por essa razão, considera-se que constituem excelentes aproximações iniciais, em relação aos diagramas de fogo considerados ideais (Dinis da Gama, 1998).

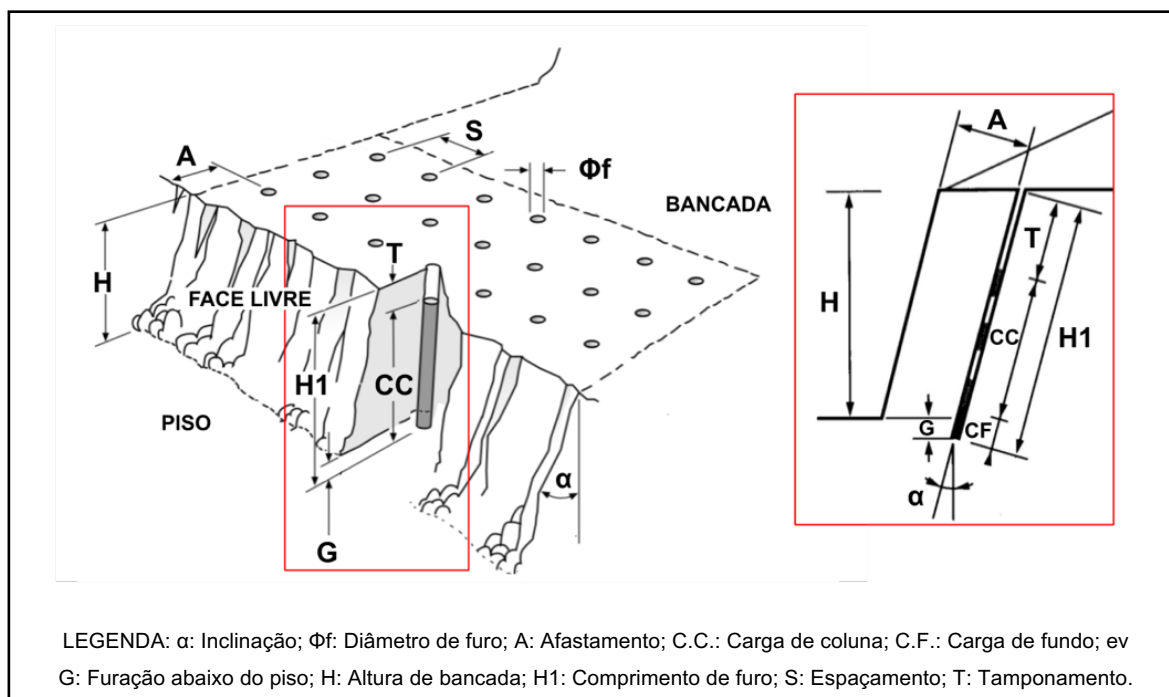


Figura 37 Parâmetros de um diagrama de fogo para desmontes em bancadas a céu aberto
(adaptado do catálogo da “Dyno Nobel”, 2016, acesso em 28/06/19 às 18:44)

Os resultados calculados por *Ash* podem ser visualizados pela Tabela 10. A distância entre as primeiras fiada de furos de detonação em relação à face livre é chamada de afastamento (A), esta distância quando dividida pelo diâmetro do furo (Φ_f) resulta na primeira constante empírica observada por *Ash*, K_A . Em diferentes equações, da mesma maneira, ao dividir o espaçamento entre furos de detonação (S), altura da bancada (H), tamponamento (T) e furação abaixo do piso (G) por A, as constantes empíricas encontradas são respetivamente, K_S , K_H , K_T e K_G .

Tabela 10 Dimensionamento geométrico de diagramas de fogo segundo *Ash* (adaptado de Dinis da Gama, 1998)

Parâmetros	Expressão	Constantes empíricas	Intervalos de variação	Condições de aplicação
Afastamento	$A = K_A \cdot \phi_f$	K_A	$25 \leq K_A \leq 40$	Densidades do explosivo e do maciço rochoso
Espaçamento	$S = K_S \cdot A$	K_S	$1,25 \leq K_S \leq 5$	Simultaneidade do disparo
Altura da bancada	$H = K_H \cdot A$	K_H	$1,5 \leq K_H \leq 4$	Produção (em volume)
Tamponamento	$T = K_T \cdot A$	K_T	$0,5 \leq K_T \leq 1$	Preocupação ambiental
Furação abaixo do piso	$G = K_G \cdot A$	K_G	$0,2 \leq K_G \leq 0,5$	Correção dos repés

Ressalta-se que, as constantes empíricas K_i são associadas a diferentes condições, desde densidade do explosivo em questão à preocupação ambiental. Neste contexto, o empirismo observado por *Ash* foi validado em diferentes disparos, sendo que as características dos valores extremos destas constantes foram reunidas na Tabela 11. Pode-se comparar, assim, a intensidade desta variação – do valor mínimo estipulado pela constante ao valor máximo.

Tabela 11 Intervalos de variação dos parâmetros geométricos de acordo com as características do desmonte

Constantes empíricas	Valores mais baixos	Valores mais altos
K_A	Para explosivo pouco denso e potente $K_A \approx 25$ para rocha muito resistente $K_A \approx 30$ para rocha pouco resistente	Para explosivo muito denso e potente $K_A \approx 35$ para rocha muito resistente $K_A \approx 40$ para rocha pouco resistente
K_S	$K_S \approx 1,25$ para cargas retardadas dentro da mesma fiada	$K_S \approx 5$ para disparo simultâneo
K_T	$K_T \approx 0,5$ se existir resistência apreciável na crista do talude	$K_T \approx 1$ para reduzir as projeções de blocos
K_G	$K_T \approx 0,2$ se existir estratificação sub-horizontal pronunciada	$K_G \approx 0,5$ para eliminar as irregularidades no piso

Finalmente, uma vez conhecido o diagrama de fogo que melhor se aplica ao contexto de exploração, é necessário realizar uma análise ambiental e economicamente do projeto. A validação de ambas as análises é imprescindível para a continuação do projeto e, conseqüentemente, a aplicação do diagrama de fogo.

A análise ambiental verificar-se-á sobre a salubridade do meio. Afastamentos muito próximos da face livre ou tamponamentos mal dimensionados podem provocar projeções de blocos, o que expõe a exploração a um ambiente nocivo. Da mesma maneira que, o cálculo de quantidade substância explosiva excessiva pode ocasionar vibrações indesejadas à população em torno, assim como ruídos maiores do que permitidos por a lei em questão.

Por outro lado, durante a análise econômica de um desmonte por explosivo é necessário calcular dois fatores: o consumo específico de explosivo (q) e a perfuração específica (f). O primeiro fator (q , Equação 10) é determinado através da razão entre o peso do explosivo utilizado em cada furo e o volume da rocha desmontada. Este volume de rocha desmontada pode ser estimado pela multiplicação entre afastamento, espaçamento entre furos e altura da bancada. Já o cálculo do segundo fator (f , Equação 11) é desenvolvido pela razão entre a comprimento total de perfuração e o volume da rocha desmontada.

$$q = \frac{(H+G-T)\pi\phi_f^2\rho_{exp}}{4ASH \sin \alpha} \quad (\text{Equação 10})$$

$$f = \frac{H+G}{ASH \sin \alpha} \quad (\text{Equação 11})$$

6.2 Escavações subterrânea: túneis

A principal diferença entre a exploração por escavações a “céu aberto” e “subterrâneas” é a quantidade de faces livres. Enquanto a primeira maneira pode possuir até quatro faces livres – o que culmina na maior liberdade de detonação e facilidade de libertação da rocha – a escavação em galeria possui, habitualmente, apenas uma única face livre.

Quatro técnicas podem ser destacadas através dos métodos classificados de acordo com a geometria da perfuração subterrânea: caldeira em V (*V cut*), caldeira em pirâmide, caldeira em leque (*fan cut*) e tiros paralelos (*burn cut*). O âmbito deste trabalho está em introduzir a respeito do método mais utilizado, isto é, o *burn cut*.

Nos tiros paralelos, a ausência de liberdade de detonação é contornada através da presença de furos não carregados – chamados de furos de alívio – e com maiores diâmetros que os furos carregados com explosivos (Figura 38). Neste contexto, para uma fragmentação adequada de um desmonte subterrâneo, a rocha detonada deve expandir o seu volume em 50%. Sendo assim, conforme Hartman (1992), para que esta expansão ocorra de maneira eficiente, a distância entre um centro de furo carregado a outro centro de furos não carregado deve apresentar 1,5 vezes o diâmetro do furo de alívio. À medida que os furos carregados disparam, o que seria a “face livre” originada dos furos de alívio é ampliada.

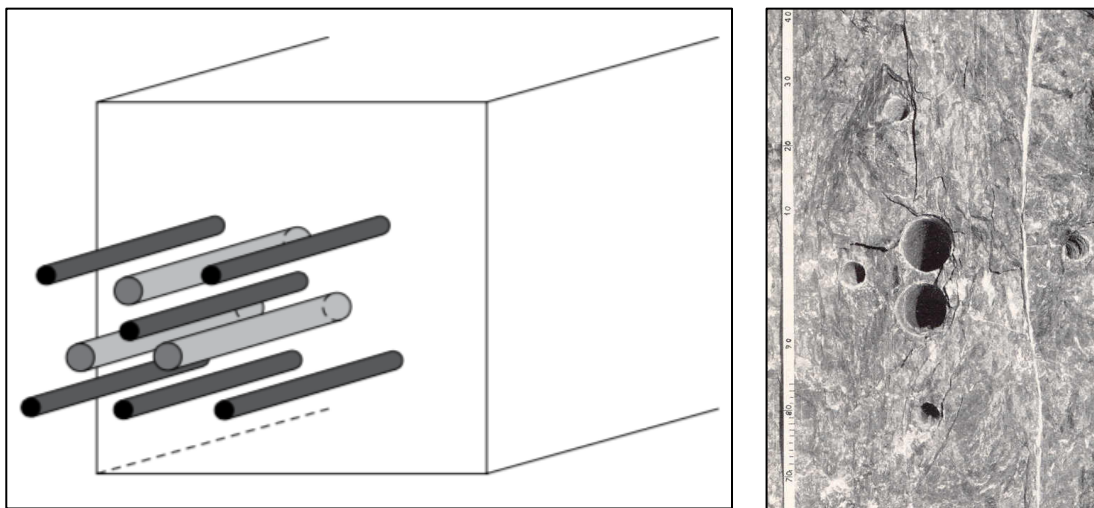


Figura 38 À esquerda: esquema de tiros paralelos em que os furos em cinza-claro não estão carregados, enquanto os de cinza-escuro estão (retirado de Hartman, 1992); à direita: foto real de furos de alívio na frente de lavra (retirado de Berta, 1989)

Os conjuntos furos são distribuídos entre três regiões: o alargamento, caldeira e contorno. Como visto na Figura 39, a soleira é considerada uma subdivisão de contorno que está localizada rés-ao-chão da operação.

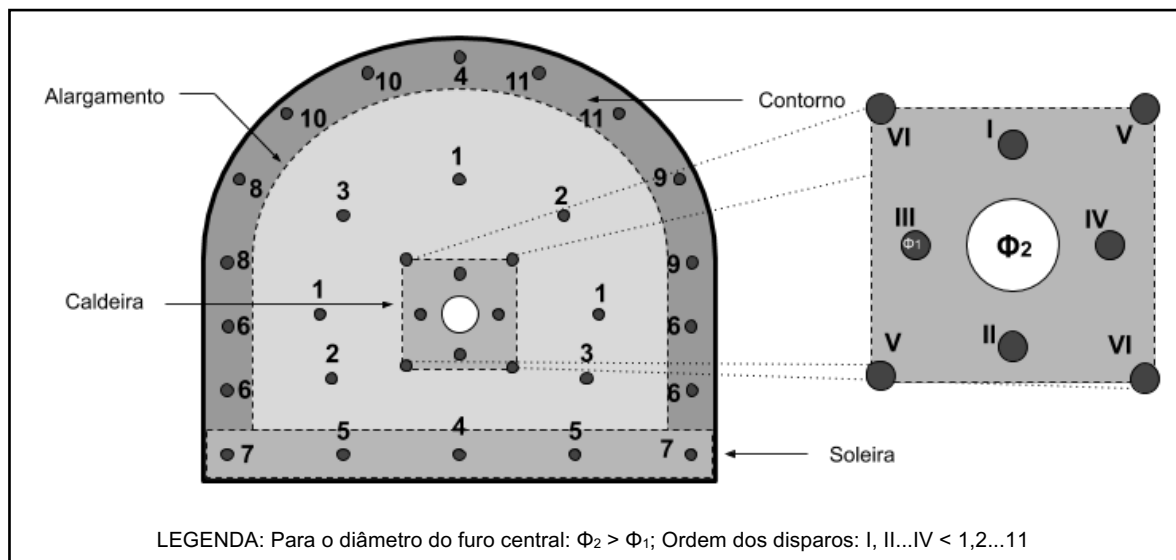


Figura 39 Série de furos num diagrama de fogo para um desmonte subterrâneo

Na caldeira, o furo de maior diâmetro, central e não carregado tem como principal objetivo a criação de mais espaço livre para que a energia de detonação consiga disseminar-se uniformemente nas primeiras temporizações. A ausência do furo de maior diâmetro central pode ocasionar acumulações de energia de detonação e, consequentemente, uma fragmentação pouco eficiente.

O alargamento, os furos de contorno e a soleira também são imprescindíveis para a uma escavação eficiente. O alargamento utiliza da face livre criada pela caldeira para desmontar o maior volume da exploração, enquanto que o contorno – incluindo a soleira – tem como objetivo a máxima aproximação o contorno produzido pela detonação daquele contorno projetado. Todos estes furos de detonação possuem diâmetros menores em comparação com o furo central vazio da caldeira. Constata-se que eficácia da exploração subterrânea também está na detonação da substância explosiva em diferentes atrasos. A diferença de tempo entre os tipos de furos resulta uma melhor fragmentação, devido a criação de faces livres suplementares.

6.3 Aplicações especiais dos explosivos

Assim como na Engenharia de Minas, projetos de Engenharia de Civil utilizaram-se das substâncias explosivas para conseguir atingir melhores performances. O dimensionamento de explosivos faz-se necessário quando, por exemplo, uma autoestrada tem de ser construída numa região montanhosa ou uma capital que necessita de novas obras para desenvolver o transporte subterrâneo em um maciço rochoso de elevada dureza.

Também intrínseco da rotina de projetos Cíveis, o uso de explosivo foi a maneira encontrada de oferecer soluções a custos baixos e com menor tempo de desenvolvimento.

7. Análise do poder disruptivo dos explosivos civis: método e aplicação

7.1 Definição de poder disruptivo

Para a discussão do tema proposto, primeiramente, foi necessário entender o que era o novo conceito a ser introduzido como “poder disruptivo” e com quais fatores este conceito se relacionava.

O poder disruptivo é interpretado como um conceito que está intrínseco à eficiência do material explosivo. Aliado à eficiência do explosivo, este conceito também é capaz de relacionar a quantidade de incorreções durante a aplicação do material explosivo. Isto quer dizer que, através desta Dissertação, o conceito “poder disruptivo” deve buscar por:

1. Uma elevada eficiência do explosivo que consiga atingir a fragmentação pretendida do maciço rochoso através de sua energia liberada pela detonação;
2. A menor quantidade de incorreções ou falhas ocorridas durante o processo de aplicação do explosivo.

Presentes em todas as etapas da aplicação do explosivo, estas incorreções podem ser definidas como qualquer situação em que a detonação produziu um malefício ao meio-ambiente (fauna e flora) ou um retrabalho para o processo. Deste modo, as incorreções são consideradas como: desde a quantidade superestimada da substância explosiva, que produziu vibrações em excesso ao ambiente que circunda a exploração, à escolha errônea de um explosivo com menor velocidade de detonação para um maciço muito competente, pelo retrabalho de eventuais fogos secundários.

7.2 Metodologia proposta

Com o objetivo de analisar o poder disruptivo dos explosivos, a metodologia proposta por esta Dissertação recomenda, primeiramente, a observação de projetos de exploração em que foram aplicados materiais explosivos. Esta observação consiste principalmente no levantamento de informações pertinentes como: o tipo de rocha explorada, condições geológicas e características do maciço rochoso, tipo e características técnicas do explosivo utilizado, se houve ou não emprego de sistemas de retardo, dimensionamento do plano de fogo, etc.

Neste caso, realizou-se a análise de 8 estudos de casos em explorações de rochas calcárias na Itália – dos quais serão especificados posteriormente. Com diferentes fatores e em contextos restritos, os diagramas de fogo foram estudados a fim de explicar, com exatidão, o que motivaria os explosivos a apresentarem maiores eficiências e quais dos projetos de exploração observados apresentariam menores quantidades de incorreções ou falhas de aplicação.

Posteriormente, a metodologia proposta por esta Dissertação recomenda discutir o grau do poder disruptivo do explosivo utilizado. Para o sucesso desta discussão deve-se desenvolver dois principais pontos:

1. Com o objetivo de verificar se houve falhas de projeto durante a aplicação do material explosivo, pede-se o entendimento de quais são os critérios ou métodos disponíveis para a rocha em questão e;
2. Com objetivo de examinar a eficiência do explosivo, é requerido o entendimento da quantidade teórica de material explosivo através de cálculos ou outros métodos.

Encontradas através do primeiro objetivo, as incorreções oferecem uma análise preliminar: comparam e classificam os diferentes projetos que exploram o mesmo bem mineral. Já o segundo objetivo é capaz de mensurar a eficiência do explosivo ao comparar a quantidade teórica com a quantidade de material explosivo realmente utilizada. Assim, a interpretação dos dois resultados indica ou não o poder disruptivo do explosivo.

No contexto desta Dissertação e almejando o desenvolvimento da discussão do grau do poder disruptivo, os dois principais pontos foram observados:

- Confirmou-se o intervalo das fórmulas de *Ash* a partir dos parâmetros extraídos de cada estudo de caso. Estas fórmulas empíricas envolvem parâmetros geométricos do diagrama de fogo e possuem como principal objetivo a otimização da eficiência do explosivo, isto é, qualquer parâmetro fora do intervalo sugerido por *Ash* pode ser considerado uma eventual incorreção de projeto. Pelo que foi introduzido anteriormente por esta Dissertação, é sabido que o poder disruptivo de um explosivo está intrínseco a esta quantidade de incorreções de projeto.
- Comparou-se a quantidade teórica de explosivos sugerida em Clerici *et al.* (1974) com a quantidade de explosivos realmente utilizada. Clerici *et al.* (1974) oferece uma maneira para se calcular a quantidade teórica de explosivos através da leitura de ábacos contruídos pela observação de diversos diagramas de fogo realizados em maciços de calcário italiano. A comparação entre o valor teórico e o valor realmente utilizado tinha como objetivo verificar a presença da quantidade eficiente de substância explosiva, para assim discutir quais foram os fatores de cada estudo de caso que culminou na maior ou menor eficiência e, consequentemente, no maior poder disruptivo.

7.3 Contextualização dos estudos de caso

O levantamento dos resultados obtidos em explorações italianas de calcário estava, principalmente, em conhecer os seguintes parâmetros:

Parâmetros do explosivo:

- Carga de coluna (CC);
- Carga de fundo (CF);

Parâmetros geométricos:

- Altura da bancada (H);
- Carga específica (q);
- Carga total (Q_T);
- Comprimento de furo (H1);
- Diâmetro de perfuração (Φ_F);
- Afastamento (A);
- Espaçamento entre furos (S);
- Inclinação de perfuração (α);
- Perfuração específica (f);
- Subfuração (G);
- Tamponamento (T).

Prezou-se também pelo conhecimento de possíveis variações de cada estudo, como as geometrias da escavação, litologia e tipos de explosivos utilizados. Estas variações foram expostas na caracterização de cada exemplo utilizado.

Por fim, para auxiliar na organização dos estudos de caso, os parâmetros inicialmente observados foram a afastamento e diâmetro de perfuração. A Tabela 12 relaciona estes valores com o número atribuído para cada caso e a Figura 40, a localização de cava exploração.

Tabela 12 Afastamento e diâmetro de furo dos estudos de caso analisados

Caso	A (m)	Φ_F (mm)
1	2,5	64,0
2	2,5	76,0
3	2,5	89,0
4	3,0	76,0
5	3,0	76,0
6	3,2	76,0
7	3,5	89,0
8	3,5	89,0



Figura 40 Localização dos estudos de caso (adaptado da Wikipedia, URL: https://pt.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:Italy_location_map.svg)

7.3.1 Estudos de caso com afastamento de 2,5 m

1º estudo de caso: diâmetro de furo de 64 mm

O projeto aplicou um plano de fogo que consistia de 52 furos com o diâmetro de 64 mm e comprimento de furo de 3,8 m. Este plano de fogo possuiu duas detonações distintas: a primeira com 27 furos de detonação dispostos em 3 filas de nove furos, enquanto que a segunda tinha 25 furos divididos em 5 filas de 5 furos. O espaçamento entre os furos de detonação e a distância prática à frente mediam 2,5 m.

A substância explosiva utilizada neste primeiro estudo de caso foi o NITRAM 5, um tipo de emulsão, do qual as características estão expostas na Tabela 13. Cada furo foi carregado com 4 cartuchos de explosivos, o que totalizou 4 kg de substância explosiva utilizada.

Tabela 13 Especificações do NITRAM 5

Parâmetros	NITRAM 5
Diâmetro (mm)	50,0
Comprimento (mm)	475,0
Massa volúmica (kg/m ³)	1200,0
Energia específica (MJ/kg)	3,5
Pressão específica (MPa)	9075,0
Velocidade de detonação (m/s)	5500,0

Além da substância explosiva utilizada, este plano de fogo também empregou os detonadores não elétricos (“*none*”). Tal sistema de iniciação ofereceu a energia necessária para a iniciação da detonação e possuía um atraso de 25/500 ms. Detonadores “*none*” foram inseridos na parte inferior de cada cartucho de explosivo e conectados por ligadores na superfície. Ainda na superfície utilizou-se o detonador do tipo “*none* starter”. A Figura 41 mostra um esquema da secção do projeto.

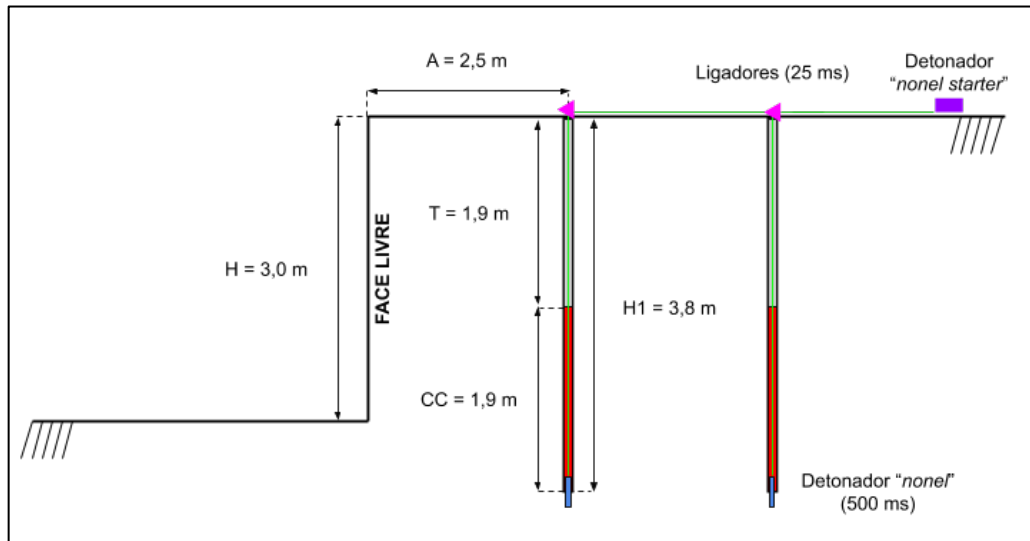


Figura 41 Secção longitudinal do furo da cava “Vendoia” (traduzido de Cardu & Giraudi, 2008)

2º estudo de caso: diâmetro de furo de 76 mm

De acordo com a análise técnica, foram abertos 23 furos com diâmetro de 76 mm e profundidade de 5,5 m. Assim como o afastamento, o espaçamento utilizado entre furos foi de 2,5 m. Um esquema do plano de fogo, e sua respetiva sequência de detonação utilizado, pode ser visualizado na Figura 42. Nota-se que, neste caso, foram utilizados detonadores não elétricos com tempo de atraso de 25/200 ms e ligadores de 17 ms para acionar as fileiras seguintes após a primeira.

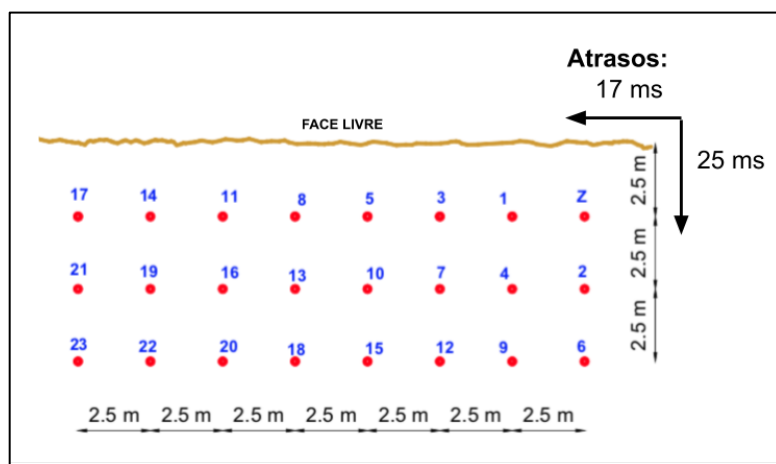


Figura 42 Plano de fogo do segundo caso de estudo com os respetivos atrasos (retirado de Cardu & Giraudi, 2009)

Pela proximidade da quantidade de furos de detonação utilizados, é possível comparar o equipamento empregado no primeiro e segundo caso. Anteriormente, para os 27 e 25 furos, foram aplicados sistemas de iniciação com um intervalo de 25/500 ms, enquanto para estes 23 furos, 25/200 ms. A escolha é explicada pelo volume total desmontado, isto é, no primeiro caso, a altura da bancada de 3 m permitiu uma detonação com intervalos mais espaçados, enquanto que, neste caso, a altura de 5,5 m necessitou de intervalos menores que permitissem a melhor dissipação da onda de choque pelo maciço. Ressalta-se também que, diferentemente do caso anterior, foi utilizado um explosivo do tipo emulsão chamado de Premex 831, cujas características podem ser notadas na Tabela 14.

Tabela 14 Especificações do Premex 831

Parâmetros	PREMEX 831
Diâmetro (mm)	60,00
Comprimento (mm)	390,00
Massa volúmica (kg/m ³)	1200,00
Energia específica (MJ/kg)	4,07
Pressão específica (MPa)	8112,00
Velocidade de detonação (m/s)	5200,00

Além da utilização dos detonadores, um cordão detonante de concentração linear de 12 g/m também foi inserido para que fosse possível a transmissão da detonação à carga de coluna. Com a iniciação radial, o cordão detonante inicia o explosivo em todos os pontos de contacto, não permitindo que a substância explosiva atinja o máximo da sua velocidade de detonação.

Nota-se também que, cada furo de detonação possuiu uma carga explosiva de 6,60 kg distribuídos da seguinte maneira: 3 cartuchos como carga de fundo, um tamponamento intermediário seguido de mais 2 cartuchos como carga de coluna, e cerca de 2,0 m de tamponamento. A Figura 43 ilustra o esquema.

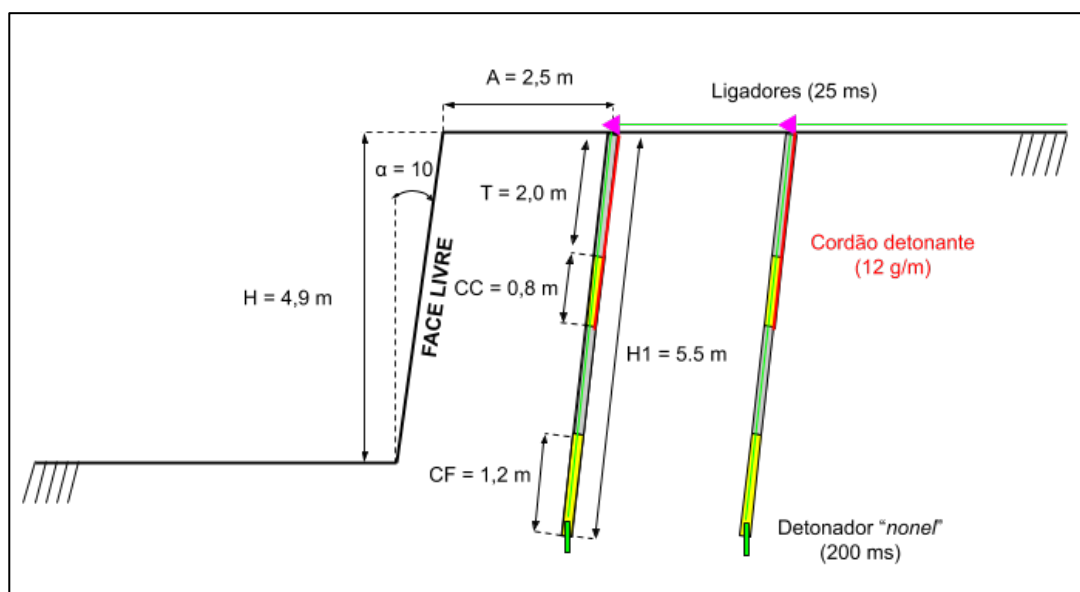


Figura 43 Secção de um furo da mina de "Faraona" (adaptado de Cardu & Giraudi, 2009)

3º estudo de caso: diâmetro de furo de 89 mm

A execução do plano de fogo consistiu de 6 furos de diâmetro de 89 mm, comprimento de furo de 10,0 m, subfuração de 0,8 m e inclinação de 10°. Dispostos em uma fila única, os furos foram espaçados em 2,5 m e carregados com a substância explosiva do tipo emulsão, NITRAM 5. O afastamento utilizado entre a os furos e a face livre da bancada também foi de 2,5 m. Um esquema do plano de fogo pode ser observado na Figura 44.

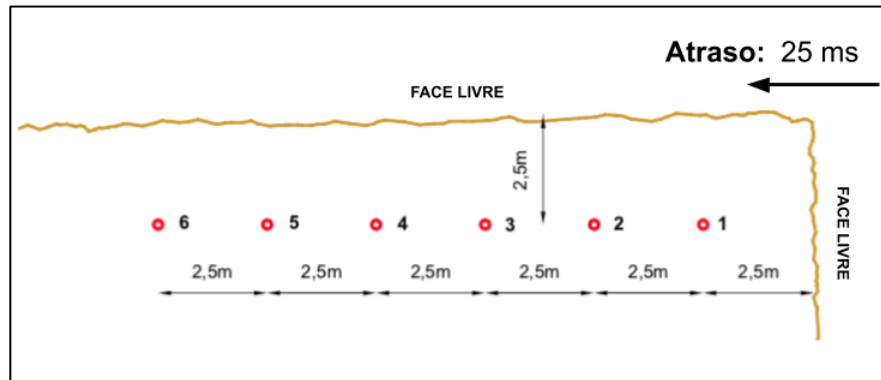


Figura 44 Plano de fogo do terceiro caso de estudo (retirado de Cardu, Lovera & Giraudi, 2006)

Cada furo foi carregado com 10 cartuchos, o que totaliza 60 kg de NITRAM 5 utilizado no plano de fogo. A distribuição de carga ocorreu pela distribuição de 7 cartuchos para a carga de fundo e 3 para a carga de coluna. O tamponamento total de 5,25 m garantiu o isolamento das cargas. Considerou-se também a aplicação de detonadores elétricos com atraso de 25 ms. Os detonadores foram conectados a um cordão detonante de pentrite de 12 g/m a fim de transmitir a detonação para toda a carga de coluna. A Figura 45 ilustra o esquema de distribuição de carga utilizado.

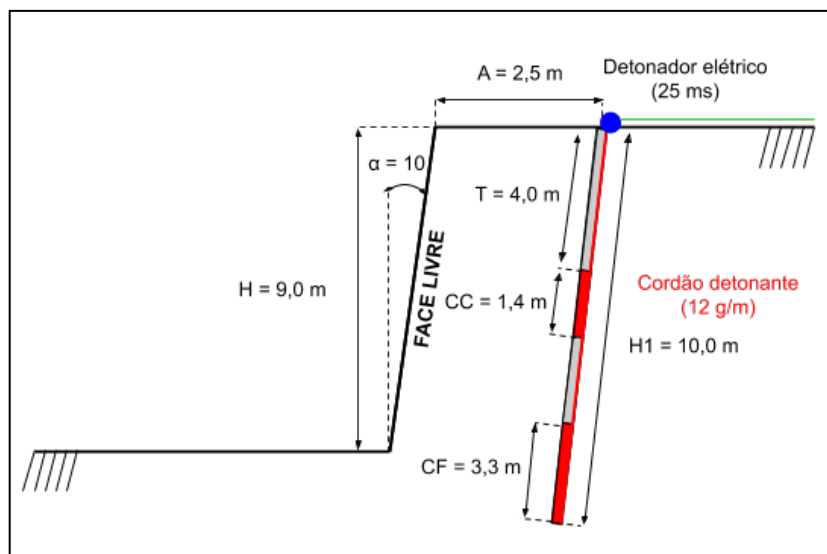


Figura 45 Secção de um furo da "Eurocava" (adaptado de Cardu, Lovera & Giraudi, 2006)

A escolha do sistema de iniciação composto pelo cordão detonante em conjunto ao detonador elétrico pode oferecer ao explosivo uma velocidade de detonação abaixo do esperado uma vez que, a iniciação radial do cordão detonante, conforme Berta (1990), resulta em 80% da velocidade de detonação do explosivo. Entretanto, apesar dos prejuízos à velocidade de detonação ocasionados pela aplicação do cordão detonante, uma possível justificativa de sua escolha seria a presença de duas faces livres no diagrama de fogo (Figura 44). Assim, a liberdade deste *layout* pela quantidade de faces livres permitiria a aplicação uma menor velocidade de detonação sem oferecer prejuízo na performance da detonação.

7.3.2 Estudos de caso com afastamento de 3,0 m

4º estudo de caso: diâmetro de furo de 76 mm

Com 80 furos de detonação, este plano de fogo apresentou diâmetro de furo de 76 mm, altura de bancada de 3 m, subfuração de 0,45 m, inclinação de 10 graus e comprimento de furo de 3,5 m. Detonadores elétricos de 20 ms de retardo e cordão detonante de concentração linear de 12 g/m foram utilizados como sistema de iniciação. O explosivo empregado foi o NITRAM 5. Devido à altura da bancada reduzida, este plano de fogo desenvolveu a detonação com apenas a carga de fundo de 1,4 m. Assim, em cada furo foi colocado três cartuchos de NITRAM 5 e posteriormente completado pelo tamponamento. Um esquema didático do corte da bancada pode ser visualizado na Figura 46.

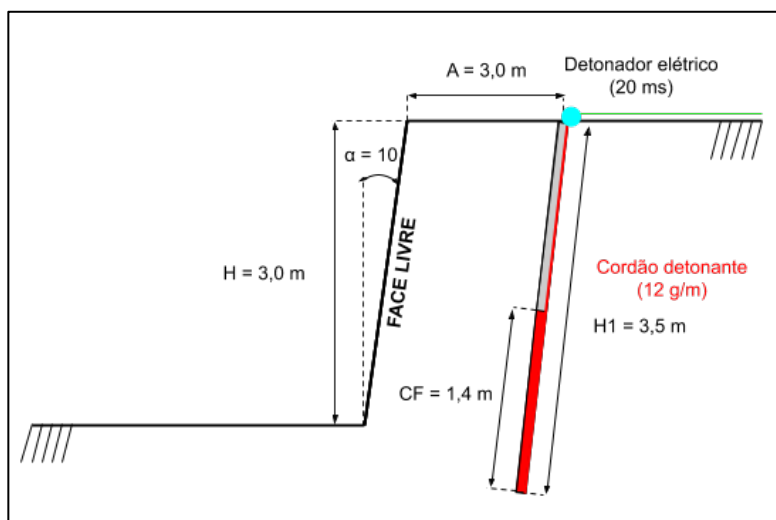


Figura 46 Esquema da detonação por NITRAM 5 com afastamento de 3 m e diâmetro de furo de 76 mm

5º estudo de caso: diâmetro de furo de 76 mm

Este estudo de caso apresentou os mesmos parâmetros que o estudo anterior. A principal diferença observada foi a utilização do Premex 831 e o detonador elétrico cujo atraso é de 25 ms. O explosivo manifesta uma carga de fundo de 1,2 m como exposto na Figura 47.

Nesta situação, a escolha por um atraso com maior espaçamento (25 ms comparado aos 20 ms do caso anterior) é explicada pela diferente performance do explosivo.

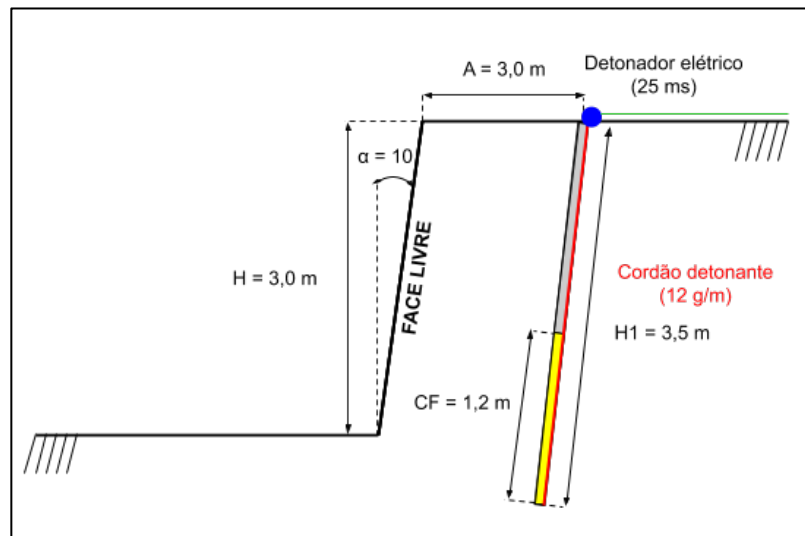


Figura 47 Esquema da detonação por Premex 831 com afastamento de 3 m e diâmetro de furo de 76 mm

7.3.3 Estudos de caso com afastamento de 3,2 m

6º estudo de caso: diâmetro de furo de 76 mm

A quantidade de furos para essa detonação foi de 50. Os parâmetros importantes para serem citados foram: comprimento de furo de 9,0 m, inclinação de furo de 10 graus, a subfuração de 0,50 m, o afastamento e o espaçamento de 3,2 m.

Essa detonação utilizou de dois tipos diferentes de explosivos. Em cada furo, foram utilizados 10 cartuchos de Premex 831 para a carga de coluna e 4 cartuchos de Premex 851 para a carga de fundo. A comparação entre os dois explosivos pode ser visualizada na Tabela 15 a seguir.

Tabela 15 Comparação entre o Premex 831 e o Premex 851

Parâmetros	PREMEX 831	PREMEX 851
Diâmetro (mm)	60,00	60,00
Comprimento (mm)	390,00	380,00
Massa volúmica (kg/m ³)	1200,00	1250,00
Energia específica (MJ/kg)	4,07	4,30
Pressão específica (MPa)	8112,00	7200,00
Velocidade de detonação (m/s)	5200,00	4800,00

Detonadores “none!” também foram utilizados a fim de iniciar os cartuchos. Entre os furos de denotação, retardo dos detonadores era de 25/350 ms. Cada furo possuía dois detonadores: o primeiro inserido ao fundo do furo para a detonação dos cartuchos de Premex 831, enquanto o segundo é ligado ao primeiro detonador e aos 10 cartuchos de Premex 851. Por furo, a carga total

foi de aproximadamente 18,5 kg. O esquema ilustrado na Figura 48 evidencia a disposição utilizada pela mina de “Santa Marta”.

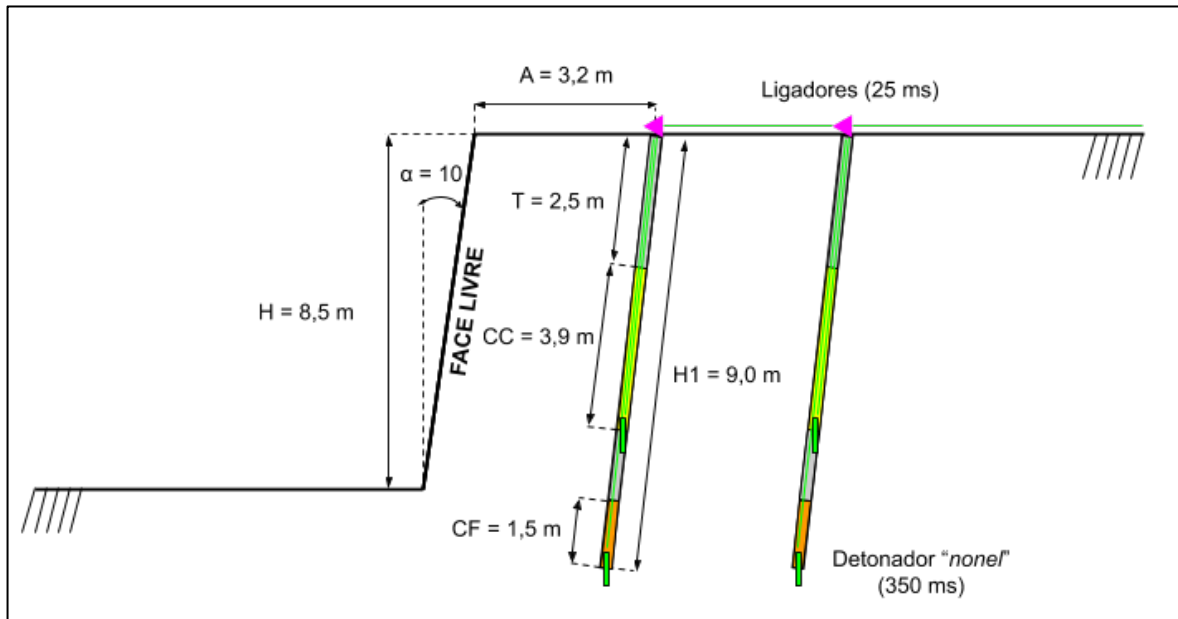


Figura 48 Secção de um furo da mina de "Santa Maria" (retirado de Cardu & Giraudi, 2009)

A utilização de dois detonadores para a iniciação da detonação tanto da carga de fundo, quanto a carga de coluna permite com que os explosivos utilizados atinjam a máxima velocidade de detonação. Tal performance pode ser explicada pela direção de detonação acompanhar a coluna de explosivos.

7.3.4 Estudos de caso com afastamento de 3,5 m

7º estudo de caso: diâmetro de furo de 89 mm

Este plano de fogo consistiu de 40 furos, altura da bancada de 5,5 m, comprimento de furo de 6,0 m, subfuração de 0,60 m e inclinação de 10 graus. Detonadores não elétricos de 25/350 ms foram utilizados como sistema de iniciação. Carregado com 7 cartuchos de NITRAM 5, o projeto não utilizou carga de coluna. O tamponamento empregado foi de aproximadamente 2,7 m. A Figura 49 ilustra um esquema de um corte do plano de fogo.

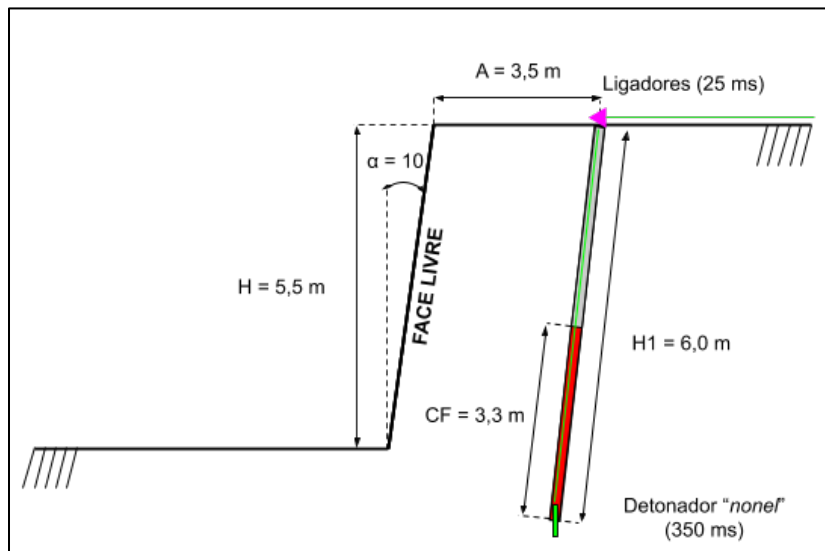


Figura 49 Esquema da detonação por NITRAM 5 com afastamento de 3,5 m e diâmetro de furo de 89 mm

8º estudo de caso: diâmetro de furo de 89 mm

O último estudo de caso apresentou o mesmo contexto que o anterior, a diferença estava na aplicação de Premex 831. Este explosivo resultou em uma carga de fundo de 3,2 m (Figura 50).

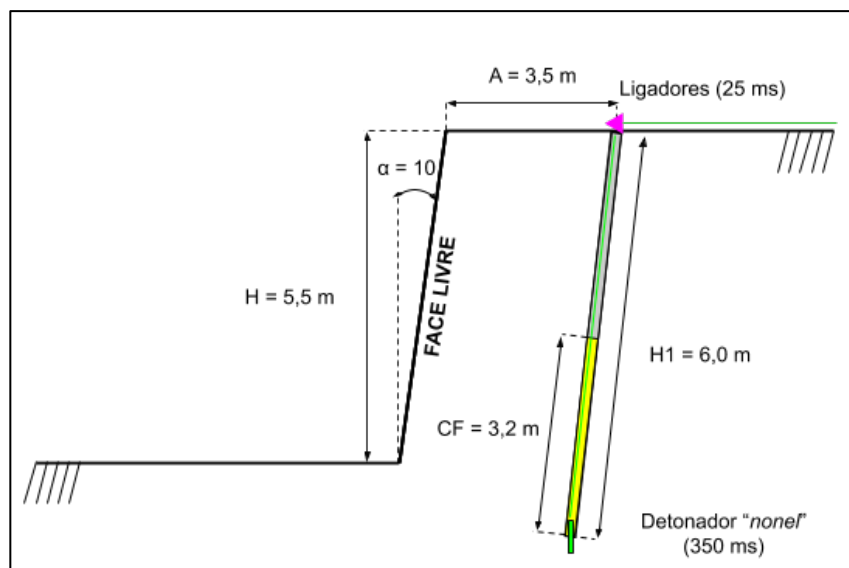


Figura 50 Esquema da detonação por Premex 831 com afastamento de 3,5 m e diâmetro de furo de 89 mm

7.4 Análise e desenvolvimento dos estudos de caso através dos parâmetros de Ash

7.4.1 Afastamento

Uma vez expostos os estudos de caso utilizados, faz-se necessário aplicar os parâmetros de Ash, anteriormente citados. Dos parâmetros expostos, a análise iniciar-se-á pelo afastamento. A Equação 12 demonstra qual é o cálculo deste parâmetro.

$$A = K_A \cdot \phi_f \quad (\text{Equação 12})$$

Os casos expostos possuem o afastamento de 2,5; 3,0; 3,2 e 3,5 m enquanto os diâmetros apresentados variam entre 64 mm, 76 mm e 89 mm. O parâmetro de Ash de afastamento (K_A) pode ser calculado através da divisão entre a distância prática à frente – ou afastamento – pelo diâmetro de furo. É recomendado que o parâmetro de afastamento calculado esteja entre o intervalo de 25 e 40. Os valores calculados do parâmetro estão na Tabela 16.

Tabela 16 Relações de Ash do tipo afastamento

Caso	A (m)	Φ (m)	K_A
1) 2,5m + 64mm	2,50	0,064	39
2) 2,5m + 76mm	2,50	0,076	33
3) 2,5m + 89mm	2,50	0,089	28
4) 3,0m + 76mm	3,00	0,076	39
5) 3,0m + 76mm	3,00	0,076	39
6) 3,2m + 76mm	3,20	0,076	42
7) 3,5m + 89mm	3,50	0,089	39
8) 3,5m + 89mm	3,50	0,089	39

Percebe-se que nas situações expostas, os parâmetros estipulados por Ash estavam de acordo com o limite de 25 a 40. Fora do intervalo, tem-se a exceção do estudo de caso “6” cujo afastamento foi de 3,2 m e diâmetro de furo de 76 mm.

De maneira geral, a análise dos estudos de caso para este parâmetro não seguiu uma distribuição normal entre o intervalo proposto. Como pode ser visto na Figura 51, percebeu-se a recorrência de valores de K_A muito próximos do limite do intervalo.

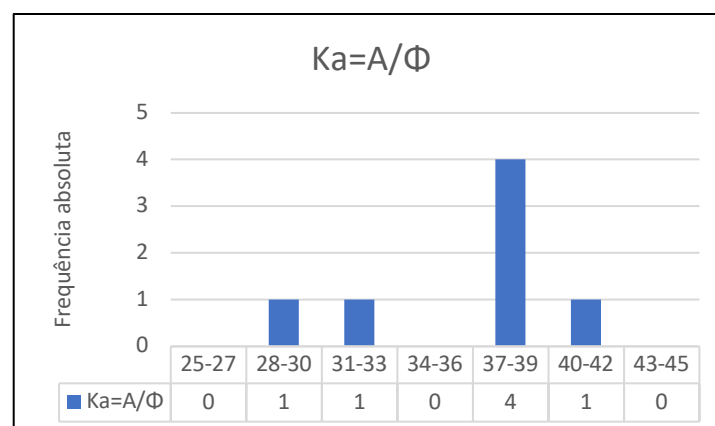


Figura 51 Distribuição prática de K_A dos estudos de caso

Para melhor entender o que motivaria resultados dessa frequência, a Tabela 17 apresenta uma hipótese de valores que o parâmetro K_A poderia assumir. O parâmetro K_A é diretamente proporcional à densidade do explosivo, ao mesmo tempo que também é inversamente proporcional à resistência mecânica do maciço rochoso. A primeira relação pôde ser explicada através da proporcionalidade entre a força do explosivo e a sua densidade. Já a segunda relação considerou, primeiramente, a proporcionalidade entre a densidade da rocha e a resistência do maciço. Neste contexto, qualquer tipo de imperfeição que deixe de influenciar a homogeneidade da resistência é inversamente proporcional a densidade da rocha.

Tabela 17 Valores típico de K_A função do explosivo a aplicar e da rocha a desmontar (adaptada de Bernardo, 2004)

		Explosivos	
		Pouco denso (800 a 1200 kg.m ⁻³)	Muito denso (1200 a 1600 kg.m ⁻³)
Rochas	Pouca densa (2200 a 2700 kg.m ⁻³)	30	40
	Muito densa (2700 a 3200 kg.m ⁻³)	25	35

Os intervalos admitidos para a densidade do explosivo, assim como a densidade de rocha foram constatados através da observação de Hustrulid (1999a). Para o autor, era raro que em explorações com uso de explosivos as densidades de substâncias explosivas apresentassem valores fora do intervalo de 800 a 1600 kg.m⁻³, ao mesmo tempo que os maciços fossem diferentes de 2200 a 3200 kg.m⁻³.

Dessa maneira, a frequência de valores de K_A entre os intervalos de 37-39 e a própria exceção de 42 foram explicadas pela sobreposição de dois fatores:

- Pelo critério apresentado, o calcário se encaixa na categoria “pouca densa”, já que a sua massa específica é de 2600 kg.m⁻³ (Berta, 1990) e;
- Os explosivos empregados foram considerados de alta densidade pelo critério apresentado. O NITRAM 5, empregado nos casos “1”, “3”, “4” e “7”, assim como o *Premex* 831, empregado nos casos “2”, “5” e “8”, possuíam 1.200 kg.m⁻³ de densidade. E, por fim, empregado juntamente com o *Premex* 831 no caso “6” – a exceção – o *Premex* 851 possuía densidade de 1.250 kg.m⁻³.

7.4.2 Espaçamento

Os resultados do parâmetro de *Ash* para o espaçamento (K_S) podem ser visualizados na Tabela 18. Esses resultados foram calculados através da Equação 13 que consistiu da divisão do espaçamento pelo afastamento.

$$S = K_S \cdot A \quad (\text{Equação 13})$$

Tabela 18 Relações de Ash do tipo espaçamento

Caso	A (m)	S (m)	K_s
1) 2,5m + 64mm	2,50	2,50	1,00
2) 2,5m + 76mm	2,50	2,50	1,00
3) 2,5m + 89mm	2,50	2,50	1,00
4) 3,0m + 76mm	3,00	3,00	1,00
5) 3,0m + 76mm	3,00	3,00	1,00
6) 3,2m + 76mm	3,20	3,20	1,00
7) 3,5m + 89mm	3,50	3,50	1,00
8) 3,5m + 89mm	3,50	3,50	1,00

No caso do espaçamento, é importante que o parâmetro (K_s) se encontre entre o intervalo de 1,25 e 5. Como pode ser constatado, nenhum dos parâmetros calculados se encontram no intervalo estipulado.

De acordo com Dinis da Gama (1993), o parâmetro K_s relaciona-se de maneira dependente à ordem dos retardos dos furos adjacentes numa mesma fiada, aumentando o seu valor com a simultaneidade do disparo. Em geral, admitem-se os valores mais baixos de K_s (entre 1,25 e 1,5) para cargas retardadas de uma mesma fiada.

A Tabela 19 relaciona cada caso de estudo com a sua respetiva quantidade de furos de detonação, o tipo de detonador utilizado e a quantidade de retardo utilizado. Pela observação dos dados, percebe-se que todos os diagramas de fogo apresentaram usufruíram de mecanismos de retardo na própria fiada.

Tabela 19 Tipos de detonadores utilizados e respetivos atrasos

Caso	Quantidade de furos	Tipo de detonador	Atraso (ms)
1) 2,5m + 64mm	52	Não elétrico	25/500
2) 2,5m + 76mm	24	Não elétrico	25/500
3) 2,5m + 89mm	6	Elétrico	25
4) 3,0m + 76mm	80	Elétrico	20
5) 3,0m + 76mm	80	Elétrico	25
6) 3,2m + 76mm	50	Não elétrico	25/350
7) 3,5m + 89mm	40	Não elétrico	25/350
8) 3,5m + 89mm	40	Não elétrico	25/350

Mesmo com a utilização de mecanismos de retardo que justificassem valores mais baixos de K_s , a igualdade entre a distância prática à frente e o espaçamento resultou em um parâmetro K_s igual a 1. Esta igualdade pôde ser explicada pelo dimensionamento de diagramas de fogo da forma quadrada em que a distância de A coincide com S.

7.4.3 Altura da bancada

Os valores de Ash para a altura da bancada (K_H) também foram analisados. Como visualizado na Tabela 20, esses valores foram calculados através da Equação 14.

$$H = K_H \cdot A \quad (\text{Equação 14})$$

Tabela 20 Relações de Ash do tipo altura de bancada

Caso	A (m)	H (m)	K _H
1) 2,5m + 64mm	2,50	3,00	1,20
2) 2,5m + 76mm	2,50	4,90	1,96
3) 2,5m + 89mm	2,50	9,00	3,62
4) 3,0m + 76mm	3,00	3,00	1,00
5) 3,0m + 76mm	3,00	3,00	1,00
6) 3,2m + 76mm	3,20	8,50	2,66
7) 3,5m + 89mm	3,50	5,50	1,57
8) 3,5m + 89mm	3,50	5,50	1,57

O parâmetro da altura da bancada possui um intervalo entre 1,5 e 4. Valores abaixo de 1,5 ou muito próximos a 4 deveriam ser evitados. Pode-se dizer que 75% dos valores obtidos nos estudos de caso estavam no intervalo estabelecido.

Constata-se que os valores menores desta constante podem provocar sobrefracturação e crateras isoladas nos furos, ao passo que valores elevados ocasionam, geralmente, problemas de desmonte ao nível do piso da bancada. Dessa maneira, os casos “1”, “4” e “5” que apresentaram valores inferiores de K_H verificam uma possível dificuldade de atingir a otimização que a detonação oferece ao projeto. Esta dificuldade pode ser explicada uma vez que o empecilho da sobrefracturação precisa ser logrado para que o processo de recuperação dê continuidade.

7.4.4 Tamponamento

Posteriormente, os parâmetros de Ash para o tamponamento (K_T) foram calculados. Este parâmetro consistiu da aplicação da Equação 15.

$$T = K_T \cdot A \quad (\text{Equação 15})$$

Os resultados podem ser visualizados na Tabela 21.

Tabela 21 Relações de Ash do tipo tamponamento

Caso	A (m)	T (m)	K _T
1) 2,5m + 64mm	2,50	1,90	0,8
2) 2,5m + 76mm	2,50	3,50	1,4
3) 2,5m + 89mm	2,50	5,25	2,1
4) 3,0m + 76mm	3,00	2,20	0,7
5) 3,0m + 76mm	3,00	2,50	0,8
6) 3,2m + 76mm	3,20	4,00	1,3
7) 3,5m + 89mm	3,50	2,70	0,8
8) 3,5m + 89mm	3,50	2,80	0,8

É suposto que o valor de K_T apresente entre 0,5 e 1. Percebe-se que a maioria dos casos estudados cumprem o intervalo estipulado, como observado pela frequência absoluta exposta na Figura 52. Nota-se que os casos “2” e “6” apresentam, respetivamente, 30% e 40% a mais do que o permitido do limite do intervalo. Já o caso “3”, 110%.

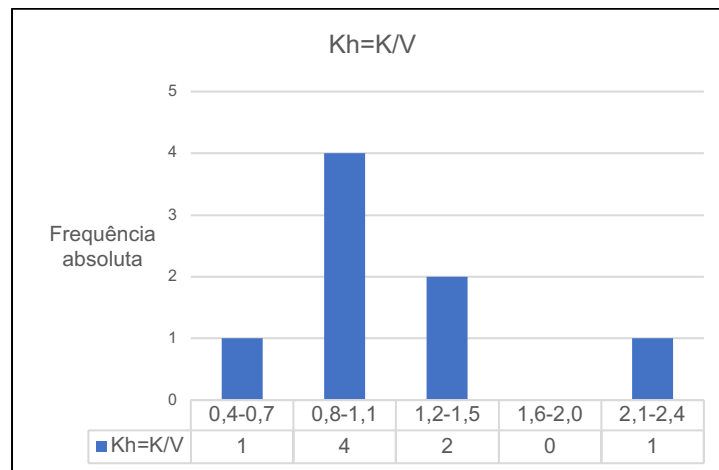


Figura 52 Distribuição prática de K_T dos estudos de caso

Durante a projeção da altura de tamponamento, deve-se levar em consideração as características do explosivo aplicado, já que uma possível variação nesta dimensão pode resultar em um melhor ou pior confinamento demandado pelos gases provenientes da detonação. Como referido por Bernardo (2004), adotam-se elevados valores de K_T , quando se pretende reduzir a quantidade e a importância de projeções de blocos.

Fora do intervalo, “2” e “3” utilizaram os explosivos Premex 831 e NITRAM 5, respectivamente, como carga de fundo e de coluna. Enquanto “6” utilizou como carga de coluna, o Premex 831, e o Premex 851 como carga de fundo. Assim, diferentemente dos outros diagramas de fogo expostos, essas três exceções ao intervalo desenvolveram detonações com cargas de fundo e de coluna. Aliado a este fator, os casos apresentaram também elevadas profundidades de furo – respectivamente: 5,5; 9,0 e 10,0 m – e pequenas distâncias prática à frente – 2,5; 2,5 e 3,2 m.

Tal exposição, obrigou os três projetos a trabalharem com o tamponamento intermediário, para evitar principalmente de projeções indesejadas, dado a pequena distância prática à frente e a elevada profundidade de furo. Vale ressaltar também que, o acréscimo dos valores do K_T pela presença do tamponamento intermediário também permitiu que a energia da elevada velocidade de detonação das emulsões (NITRAM 5, *Premex* 831 e *Premex* 851) fosse exclusivamente utilizada na fragmentação do maciço.

7.4.5 Subfuração

Por fim, os valores de Ash para a furação abaixo do piso (subfuração) foram calculados através da Equação 16 explicitada.

$$G = K_G \cdot A \quad (\text{Equação 16})$$

A Tabela 22 expõe os valores obtidos.

Tabela 22 Relações de *Ash* do tipo furação abaixo do piso

Caso	A (m)	U (m)	K_G
1) 2,5m + 64mm	2,50	0,80	0,32
2) 2,5m + 76mm	2,50	0,50	0,20
3) 2,5m + 89mm	2,50	0,80	0,32
4) 3,0m + 76mm	3,00	0,45	0,15
5) 3,0m + 76mm	3,00	0,45	0,15
6) 3,2m + 76mm	3,20	0,50	0,16
7) 3,5m + 89mm	3,50	0,58	0,17
8) 3,5m + 89mm	3,50	0,58	0,17

Recomenda-se que os resultados de K_G estejam entre o intervalo de 0,2 e 0,5. Assim, observa-se que apenas os três primeiros casos estão entre os limites estabelecidos.

A subfuração é recomendada principalmente para corrigir eventuais correções no piso. Elevados índices de K_G , por exemplo, são indicados para maciço de rochas com altos valores de densidade. Ao conhecer melhor as características geológicas do calcário, sabe-se que este tipo de rocha além de não possuir elevadas densidades, apresenta também uma boa clivagem que favorece o corte. Essas propriedades físicas permitem que a subfuração seja a mínima possível, evidenciando a otimização deste parâmetro.

7.5 Cálculo do consumo específico de explosivos em explorações de calcário

Utilizar-se-ão as informações dos estudos de caso para calcular o consumo específico teórico de cada projeto. Os valores teóricos foram comparados com o consumo específico real. Através da diferença entre o valor teórico e real, analisar-se-á o poder disruptivo dos explosivos utilizados.

7.5.1 Introdução ao cálculo teórico do consumo específico de explosivo

O procedimento foi elaborado em Clerici *et al* (1974) e o êxito da aplicação deste método foi obtido através da observação de inúmeras detonações de calcário italiano. Ressalta-se que, nestas detonações, explosivos de média potência, como ANFO e emulsões, foram empregados.

O procedimento se fundamenta em dois diagramas construídos através de empirismo. O primeiro diagrama, visualizado na Figura 53, possui no eixo das ordenadas, a percentagem de fragmentos menores que a dimensão do bloco máximo, já o eixo das abscissas oferece a razão entre o limite dos fragmentos de detonação (D) e o tamanho de bloco máximo presente na detonação (D_{MAX}). Vale ressaltar que o tamanho de bloco máximo deverá ter a mesma dimensão que a abertura do britador primário.

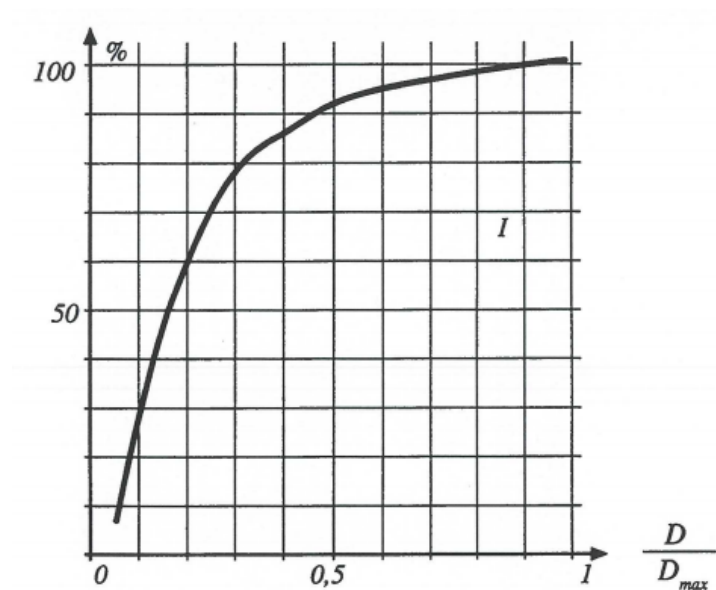


Figura 53 O primeiro diagrama utilizado para o cálculo de consumo específico (retirado de Mancini & Cardu, 2001)

Já o segundo diagrama, apresentado pela Figura 54, evidencia a correlação entre dois parâmetros adimensionais: no eixo das ordenadas apresenta-se a relação entre o consumo específico (PF) a ser adotado com o consumo específico mínimo efetivo ($PF_{\min}$). Nas abscissas salienta-se a razão entre as dimensões máximas do bloco fragmentado – encontrado no diagrama anterior – e o afastamento (A).

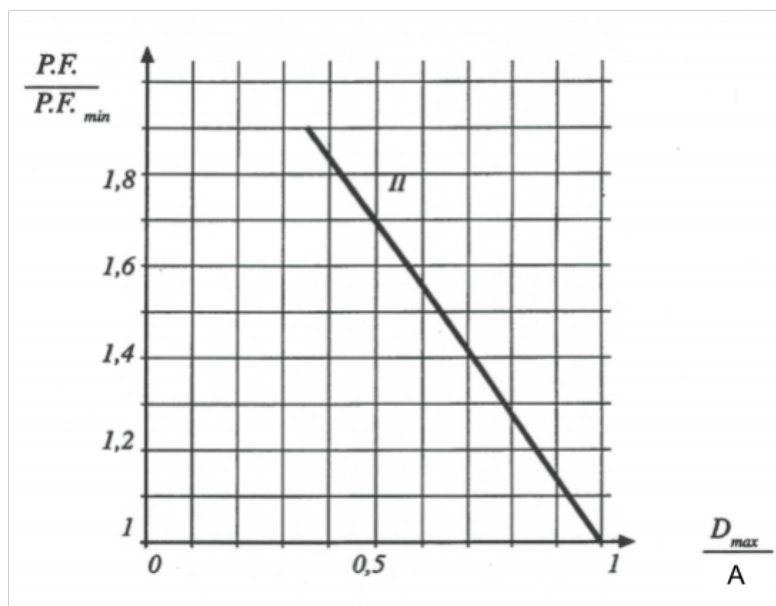


Figura 54 O segundo diagrama utilizado para o cálculo de consumo de substância explosiva (retirado de Mancini & Cardu, 2001)

Neste método, assume-se que o consumo específico mínimo de substância explosiva é apenas capaz de quebrar a rocha e não de fragmentá-la. Finalmente, através dos dois diagramas expostos, foi possível validar o consumo específico de explosivos para as explorações de calcário dos estudos de caso.

7.5.2 Desenvolvimento do cálculo

Inicialmente, foi necessário definir alguns parâmetros variáveis. Os parâmetros definidos foram:

- 95% dos fragmentos deve apresentar uma dimensão inferior a D. Tal resultado é usualmente almejado em explorações de calcário para que os problemas de acomodação entre o material explorado e o equipamento de beneficiamento sejam minimizados;
- Dimensão (D) de 0,80 m, garantindo a acomodação do material explorado em grande parte do equipamento utilizado em explorações de pequeno e médio porte e;
- Consumo específico mínimo ($PF_{\min}$) para o calcário de $0,180 \text{ kg/m}^3$ (Mancini & Cardu, 2001), a quantidade necessária para apenas quebrar a rocha.

Uma vez definido tais parâmetros, pode-se interpretar o método como o cálculo do consumo específico teórico de explosivos almejando que, pelo menos 95% dos fragmentos tenham uma dimensão inferior a 0,80 m. Assim, ao utilizar a percentagem de 95%, conseguiu-se encontrar que a relação entre as dimensões deveria ser aproximadamente 0,60. Juntamente com esse resultado e sabendo que os fragmentos devem ser menores que 0,80 m, foi possível calcular a dimensão máxima dos fragmentos que a detonação poderia gerar, neste caso, de 1,3 m. A Figura 55 oferece a visualização do diagrama com os valores calculados.

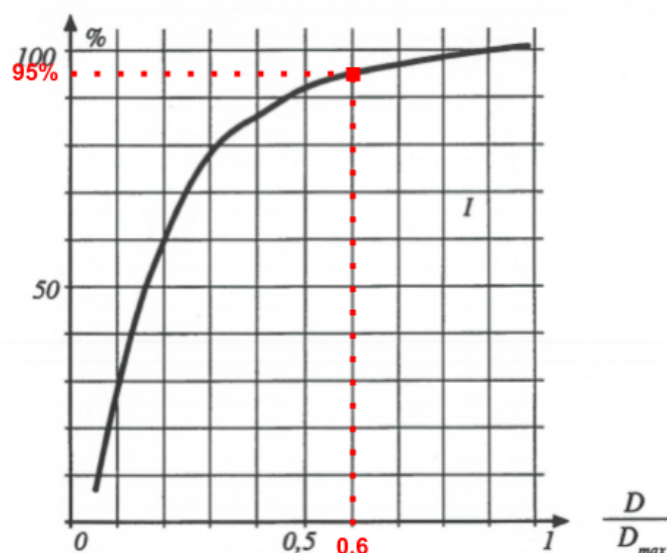


Figura 55 Desenvolvimento do cálculo teórico no primeiro diagrama do método italiano (retirado de Mancini & Cardu, 2001)

Utilizou-se o mesmo desenvolvimento do primeiro diagrama na análise de todos os estudos de caso, já que os valores das dimensões esperadas seriam as mesmas para todos os projetos de exploração. Por outro lado, diferentemente do primeiro diagrama, o segundo variou de acordo com o afastamento de cada estudo de caso. Assim, a Figura 56 evidencia os diferentes valores assumidos pela razão entre a dimensão máxima e o afastamento. Vale ressaltar que, a análise dos estudos de caso possui afastamentos que variam de 2,5; 3,0; 3,2 e 3,5 m. para uma mesma dimensão máxima – encontrada no primeiro diagrama – de 1,3 m. A divisão entre a dimensão máxima pelos diferentes afastamentos resulta, respetivamente, em 0,52 (vermelho); 0,43 (verde); 0,41 (azul) e 0,37 (rosa).

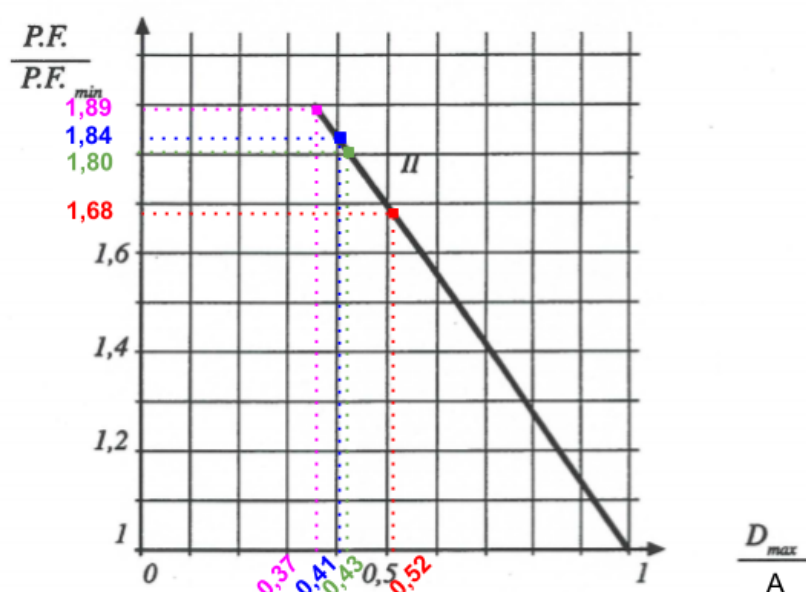


Figura 56 Desenvolvimento do cálculo teórico no segundo diagrama do método italiano (retirado de Mancini & Cardu, 2001)

Uma vez conhecida a razão entre os consumos específicos e assumindo o consumo específico mínimo do calcário de 0,180 kg/m³, o consumo específico teórico foi calculado. Através da Tabela 23 é possível visualizar a relação entre o consumo específico calculado e o seu respetivo afastamento.

Tabela 23 Cálculo do consumo específico por afastamento

A (m)	PF (kg/m ³)
2,5	0,302
3,0	0,324
3,2	0,331
3,5	0,340

Já enunciado pela Equação 10, o consumo específico real (q) equivale a razão entre a quantidade teórica de substância explosiva utilizada, em kg, pelo volume de rocha desmontada. A partir da

Tabela 24 é possível visualizar principalmente quais foram os dados utilizados para o cálculo do consumo específico teórico, assim como a comparação entre o consumo específico teórico e o real.

Tabela 24 Parâmetros utilizados para o cálculo de consumo específico teórico

	A (m)	D _{MAX} /A	PF/PF _{MIN}	PF (kg/m ³)	q (kg/m ³)	Explosivo
1	2,500	0,520	1,680	0,302	0,213	NITRAM 5
2	2,500	0,520	1,680	0,302	0,259	Premex 831
3	2,500	0,520	1,680	0,302	0,177	NITRAM 5
4	3,000	0,430	1,800	0,324	0,111	NITRAM 5
5	3,000	0,430	1,800	0,324	0,147	Premex 831
6	3,200	0,410	1,840	0,331	0,212	Premex 831 + 851
7	3,500	0,370	1,890	0,340	0,104	NITRAM 5
8	3,500	0,370	1,890	0,340	0,161	Premex 831

Para o desenvolvimento da análise do poder disruptivo do explosivo, precauções devem ser tomadas a respeito, principalmente, da percentagem de blocos abaixo determinada dimensão. Inicialmente, este parâmetro foi definido como 95%, entretanto cada projeto poderia almejar um resultado diferente. Isto quer dizer que, dependendo da comparação feita, um consumo específico real menor que um consumo específico teórico não revelaria um maior poder disruptivo do explosivo.

No entanto, a análise do poder disruptivo do explosivo pode ser feita entre casos que possuem parâmetros iguais, como por exemplo, percentagem de fragmentação, volume de detonado e quantidade de furos. Os pares de casos “4” e “5”, “7” e “8” possuem a peculiaridade de terem os mesmos parâmetros para dois diferentes explosivos: Premex 831 e NITRAM 5.

Assim, o consumo específico teórico calculado para o par “4 e 5” foi de 0,324 kg/m³ em ambos os projetos, desconhecendo o explosivo aplicado. Neste contexto, a substância explosiva do caso “4”, NITRAM 5, obteve um consumo específico real de 0,111 kg/m³, enquanto no “5”, com o Premex 831, alcançou 0,147 kg/m³. A diferença de poder disruptivo entre substâncias explosivas também foi confirmada entre o par de casos “7 e 8” em que, outra vez, o NITRAM 5 no caso “7” possuiu 0,104 kg/m³ de consumo específico real, enquanto o Premex 831 no caso “8” apenas 0,161 kg/m³.

Dessa maneira, ao comparar matematicamente estes dois explosivos, e supondo um mesmo contexto de aplicação de condições técnicas similares: concluiu-se que o NITRAM 5 obteve uma maior eficiência e, conseqüentemente, um maior poder disruptivo que o Premex 831, já que o primeiro explosivo consumiu uma quantidade inferior de substância explosiva que o segundo. Para um mesmo objetivo, o NITRAM 5 atingiu um melhor rendimento quando comparado com ao outro explosivo.

8. Considerações finais

8.1 Análise final e conclusão

Este trabalho conseguiu atingir o seu objetivo ao comparar os parâmetros de diagramas de fogo (Tabela 25) de diferentes explorações de calcário italiano. A análise do poder disruptivo destes diagramas estava em entender como seria possível encontrar a solução com maior eficiência de projeto.

Tabela 25 Análise geral dos estudos de caso

Parâmetros	Letra	1	2	3	4	5	6	7	8	Unid.
Altura da banca	H	3,0	4,9	9,1	3,0	3,0	8,4	5,5	5,5	m
Comprimento de furo	H1	3,8	5,5	10,0	3,5	3,5	9,0	6,0	6,0	m
Diâmetro de perfuração	Φf	64,0	76,0	89,0	76,0	76,0	76,0	89,0	89,0	mm
Distância prática à frente	A	2,5	2,5	2,5	3,0	3,0	3,2	3,5	3,5	m
Espaçamento entre furos	S	2,5	2,5	2,5	3,0	3,0	3,2	3,5	3,5	m
Inclinação de perfuração	α	0,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	graus
Subfuração	G	0,8	0,5	0,8	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6	m
Tamponamento	T	1,9	3,5	5,3	2,2	2,5	4,0	2,7	2,8	m
Quantidade de furos	n	52,0	23,0	6,0	80,0	80,0	50,0	40,0	40,0	-
Volume de material desmontado por furo	V	18,8	30,6	56,6	27,0	27,0	85,7	67,4	67,4	m ³
Volume total de material desmontado	Vtotal	975	704	340	2160	2160	4285	2695	2695	m ³
Perfuração específica	f	0,20	0,18	0,18	0,13	0,13	0,10	0,09	0,09	m/m ³
Carga total por furo	QT	4,00	7,92	10,00	3,00	3,96	18,48	7,00	10,83	kg
Carga de fundo	CF	4,0	4,0	7,0	3,0	4,0	5,3	7,0	10,8	kg
Carga de coluna	CC	-	4,0	3,0	-	-	13,2	-	-	kg
Carga específica	q	0,21	0,26	0,18	0,11	0,15	0,21	0,10	0,16	kg/m ³

Parâmetros como “q” e “f” foram comparados separadamente:

- Pela análise matemática, os valores extremos de “f” foram observados, primeiramente, no estudo de caso “1” com 0,203 m/m³, enquanto os casos “7” e “8” obtiveram os índices de 0,090 m/m³. Estes baixos valores de perfuração específica presentes nos últimos casos são explicados pela utilização de uma malha quadrada de tiro de elevada dimensão (3,5 m).

Ressalta-se que ambos casos “7” e “8” empregaram detonador não elétrico, sem a utilização do cordão detonante com objetivo de garantir uma detonação axial eficiente;

- Idealmente o consumo específico “q” apresenta valores entre 0,25 a 0,30 kg/m³. Valores menores que o mínimo do intervalo (0,25) evidencia que a rocha explorada dos casos “1”, “2”, “3”, “6” possui elevada quantidade fissuras que justifica menor consumo de explosivos. Entretanto, valores menores que o consumo mínimo (P_{MIN}) de 0,18 kg/m³ relevam que a detonação da substância explosiva nos casos “4”, “5”, “7” e “8” foi feita com o objetivo de realizar-se um procedimento chamado de “*pre-blasting*”, isto é, ocasionar fissuras através efeito da detonação para que, posteriormente, seja feita a remoção do material pela ação mecânica através de equipamentos de escavação (Figura 57).



Figura 57 Esquema da remoção mecânica de material (adaptado de Cardu & Giraldi, 2009)

Finalmente, ressalta-se que, a falta de acesso a dados referente a qualidade da fragmentação e o sucesso do deslocamento deixaram a análise menos complexa. Embora este percalço, realizaram-se considerações relevantes:

- A constatação dos parâmetros de *Ash* e a aplicação do cálculo teórico de explosivos para explorações de calcário foram essenciais para a análise do poder disruptivo. Através destes parâmetros foi possível encontrar aqueles diagramas que estavam com as dimensões mais próximas da ótima eficiência para a detonação estipulados por *Ash*. Da mesma maneira que, o cálculo teórico permitiu comparar dois diferentes explosivos em um mesmo contexto de aplicação;
- Como sistema de iniciação, o uso de cordão detonante oferece ao explosivo uma velocidade de detonação abaixo daquela esperada. O baixo desempenho deste sistema se deve a sua iniciação axial que detonado apenas os pontos de contato do explosivo. Assim, mesmo com a escolha das substâncias explosivos que poderiam resultar em uma performance satisfatória, os diagramas de fogo do “2”, “3”, “4” e “5” apresentam resultado aquém devido ao uso do cordão detonante.

Por fim, introduzido por esta Dissertação, o conceito “poder disruptivo” oferece à detonação uma nova percepção para se atingir uma alta performance. Ao atrelar à eficiência do material explosivo com as incorreções eventualmente ocasionadas durante a aplicação do material explosivo, o poder disruptivo, em apenas um conceito, compreende dois parâmetros importantes para o desenvolvimento da produção mineral através do uso de explosivos.

8.2 Desenvolvimentos futuros

Em termos de desenvolvimentos futuros seria importante desenvolver uma abordagem semelhante à realizada nesta Dissertação com o acréscimo de:

- Análise de uma maior quantidade de parâmetros utilizados em diferentes planos de fogo na extração de rochas calcárias com o objetivo de garantir a validação mais abrangente da ocorrência dos intervalos sugeridos por *Ash* e do método apresentado em Clerici *et al* (1974);
- Acesso a informações específicas a respeito do nível de fragmentação atingida por cada exploração para posterior comparação entre a quantidade de explosivos com o nível de fragmentação de um mesmo tipo de maciço;
- Análise financeira da utilização de consumos específicos baixos e confirmação que, a utilização de baixos consumos específicos para posterior remoção do material por ação mecânica seja mais vantajoso financeiramente que a detonação completa por explosivos.

Referências Bibliográficas

- Bastos, M. J. (1998). "A Geotecnia na Concepção, Projecto e Execução de Túneis em Maciços Rochosos", Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Georrecursos no Instituto Superior Técnico. Lisboa, Portugal.
- Bernardo. (2004). "Impactes Ambientais do Uso de Explosivos na Escavação de Rochas, com Ênfase nas Vibrações", Dissertação para obtenção do grau de Doutor em Engenharia de Minas no Instituto Superior Técnico. Lisbon, Portugal.
- Bernardo. (2009). "Escavação de Maciços Rochosos com Explosivos". 6o Curso Sobre Explosivos para Responsáveis Técnicos de Pedreiras e Obras de Escavação. Lisboa, Portugal: Organizado pelo CEGEO (Centro de Geotecnia do Instituto Superior Técnico).
- Bernardo. (2014). "Análise Comparativa das Substâncias Explosivas, Mais Usadas em Desmontes de Rocha". Belo Horizonte, MG, Brasil: 3º Curso sobre Avanços Tecnológicos no Desmonte de Rochas com Explosivos em Minas e Obras Civis.
- Berta, G. (1989). "L'esplosivo Strumento di Lavoro". Milano, Italy: Italesplosivi.
- Berta, G. (1990). "Explosives: An Engineering Tool". Milano, Italy: Italesplosivi.
- Blanco, R. (2002). Manual de Empleo de Explosivos. Madrid, Spain: Unión Española de Explosivos, S. A. (UEE).
- Brulia, J. C. (1985). "Power an Emulsion/ANFO Explosives Systems", Bulk Emulsion Products, Atlas Powder Company, Proceedings of the Eleventh Annual Conference on Explosives and Blasting Technique. San Diego, California, U. S. A. : Society of Explosives Engineers.
- Cardu, M. (2018). "Explosives", Lesson 1-1, 2018/2019. Torino, Italia: Politecnico di Torino.
- Cardu, M., & Giraudi, A. (2008). "Esecuzione, elaborazione e interpretazione di prove vibrometriche per la valutazione degli effetti indotti dalle volate di produzione nella Cava Vendoia della MA.CO. CAVE s.r.l. sita in frazione Valdottavo, Comune di Borgo a Mozzano (LU)". Torino, Italia: Politecnico Di Torino.
- Cardu, M., & Giraudi, A. (2008). "Esecuzione, elaborazione ed interpretazione di prove vibrometriche per la valutazione degli effetti indotti dalle volate di produzione nella cava di calcare "Valle Oscura" – Comune di Galbiate (LC)". Torino, Italia: Politecnico Di Torino .
- Cardu, M., & Giraudi, A. (2009). "Esecuzione ed interpretazione di prove vibrometriche per la previsione degli effetti indotti dalle volate di produzione nella fase di espansione dei lotti 5 – 6 della cava Faraona sita a Ternate (VA)". Torino, Italia: Politecnico Di Torino.
- Cardu, M., Lovera, E., & Giraudi, A. (2006). "Esecuzione, elaborazione ed interpretazione di misure vibrometriche effettuate su "tiri di prova" per la valutazione degli effetti indotti dalle volate di produzione in cava". Torino, Italia: Politecnico Di Torino.
- Cardu, M., Pennisi, N., & Oggeri, C. (2017). "Tecniche di abbattimento controllato in una cava a cielo aperto per l'ottimizzazione della profilatura dei fronti di scavo". Torino, Italia: Politecnico Di Torino.
- Carlos Galiza, A., Ramos, L., Fonseca, L., Teixeira , J., & Chaminé, H. (2011). "O Papel da Geotecnia Mineira na Otimização do Desmonte de Maciços Rochosos Fraturados". Lisbon, Portugal: Boletim de Minas, Vol. 46, Número 2, Página 107.
- Catálogo Dyno Nobel. (2016). "Nonel - Manuale per l'utente". Gyttrorp, Sweden: Dyno Nobel.
- Catálogo Pravisani. (2003). "Catalogo degli esplosivi". Italy: Pravisani.
- CEGEO - Centro de Geotecnia do IST . (2002.a). "Projecto Base da Escavação da Estação Heroísmo". Contrato DC/CS - 115 - Assessoria Técnica à Escavação de Rochas com Recurso a Explosivos nas Obras do Metro do Porto. Lisboa, Portugal: Para a TRANSMETRO (não publicado).
- Clerici, C., Colosi, G., Mancini, R., & Pelizza, G. (1974). "Le operazioni di abbattimento in cava: Mutua influenza tra abbattimento e frantumazione, e criteri di progettazione integrata Cava - Impianto di frantumazione". Torino, Italia: Atti I Conv. Internazionale sull coltivazioni di pietre e minerali litoidi.
- Cook, A. M. (1974). "The Science of Industrial Explosives", 1st Edition. Vancouver, Canada: Ireco Chemicals.
- Daniel, F. (2000). "Manual de Utilização de Explosivos em Explorações a Céu Aberto". Lisboa, Portugal: Divisão de Minas e Pedreiras do Instituto Geológico e Mineiro.
- Dannenberg, J. (1973). "Blasthole Dewatering Cuts Costs" v. 76, No. 12, pp. 66-68. Rock Products.
- Day, J. T., Thomas, M. L., & Udy, L. L. (1987). "The Importance of Explosive Energy on Mining Costs". Miami, Florida, U. S. A. : Proceedings of the Thirteenth Annual Conference on Explosives and Blasting Technique. Society of Explosives Engineers.
- Della, M. A. (1678). "Fratta et Montalbano", Pratica Minerale. Bologna, Italy.

- Dick, R., Fletcher, L., & D'Andrea, D. (1986). "Explosives and Blasting Procedures", Bureau of Mines. Minneapolis, MN, USA.
- Dinis da Gama. (1998). "Ruídos e Vibrações Ligados à Utilização dos Explosivos e Equipamentos". Comunicações do 1o Seminário de Auditorias Ambientais Internas. Lisboa, Portugal: Divisão de Minas e Pedreiras do Instituto Geológico e Mineiro.
- Dinis da Gama. (2007). "Sobre Dimensionamento e Aspectos Particulares de Desmontes a Céu Aberto". Departamento de Engenharia de Minas e Georrecursos, Secção de Exploração de Minas do Instituto Superior Técnico. Lisboa, Portugal.
- Dinis da Gama, C., & Jimeno, C. L. (1993). "Rock Fragmentation Control for Blasting Cost Optimization and Environmental Impact Abatement". A. A. Balkema. Rotterdam. Viena.: 4th International Symposium of Rock Fragmentation by Blasting.
- Forsyth, B., Cameron, A., & Miller, S. (1995). "Explosives and Water Quality". Vancouver, B.C.; Sudbury, ON; Denver, CO: Golder Associates Ltd.
- Góis, J., Vieira, A., Galiza, A., Bernardo, P., Gomes, C., & Chaminé, H. I. (2013). Manual do Operador de Produto Explosivo. Coimbra, Portugal: Associação Portuguesa de Estudos e Engenharia de Explosivos, AP3E.
- Hartman, H. (1987). "Introductory Mining Engineering". New York, U. S. A. : John Wiley & Sons.
- Hartman, H. L. (1992). "S. M. E. Mining Engineering Handbook". Chapter 7, Rock Breaking Methods. Colorado, EUA: Society for Mining, Metallurgy and Exploration Inc.
- Hodgson, N., Temple-Heald, C., H. Sarginson, C. D., Creasey, J., & Ward, C. (2015). "New range of optimised emulsifiers for emulsion explosives applications", Croda Europe Ltd . Lyon, France: Lyon Conference Proceedings. European Federation of Explosives Engineers.
- Hodgson, N., Temple-Heald, C., Sarginson, H., Davies, C., & Ward, J. C. (2015). "New range of optimised emulsifiers for emulsion explosives applications", Lyon Conference Proceedings 2015. Lyon, France: 2015 European Federation of Explosives Engineers.
- Hoover, H. C., & Hoover, L. H. (1912). "De Re Metallica" by Georgius Agricola: Translated From the First Latin Edition of 1556 with Biographical Introduction, Annotations and Appendices. London, UK: The Mining Magazine.
- ISEE. (2011). "Blasters' Handbook, 18th Edition" Chapter 13 - Explosives Products. Cleveland, Ohio, U. S. A.: ISEE.
- Joyce, D. K. (1992). "Ammonia Gas Generation from Ammonium Nitrate in Alkaline Conditions". ICI Explosives Canada.
- Kharatyan, E., Halliday, P., Kelly, C., & Wilson, L. (2015). "Effect of industrial fuel type on stability of emulsion explosives", AEL Mining Services, Ardeer Road, Modderfontein, South Africa. Lyon, France: European Federation of Explosives Engineers, Lyon Conference Proceedings 2015.
- Konya, C., & Walter, E. (1991). "Rock Blasting and Overbreak Control", Handbook of Precision Blasting Services. Montville, OH, USA: U. S. Department of Transportation, Federal Highway Administration.
- Konya, C., Britton, R., & Gozon, J. (1985). "Explosive Selection - A New Approach", The Ohio State University Mining Engineering Division, Proceedings of the Eleventh Annual Conference on Explosives and Blasting Technique. San Diego, California, U. S. A. : Society of Explosives Engineers.
- Kramer, S. L. (1996). "Geotechnical Earthquake Engineering". New Jersey, U. S. A. : Ed. Prentice-Hall, Inc.
- Krebs, H., Hasenfelder, U., Schäfer, D., & Oertzen, A. V. (2015). "Investigations of non-electric detonators and conclusions", Federal Institute for Material Research and Testing (BAM) . Lyon, France: European Federation of Explosives Engineers.
- La Motte, A. (1922). "Blasters' Handbook" Describing the Practical Methods of Using Explosives for Various Purposes. Wilmington, Delaware, USA: E. I. Du Pont De Nemours & Company.
- Langefors, U., & Kihlstrom, B. (1963). "The Modern Techniques of Rock Blasting". Nova Iorque. E. U. A.: John Wiley & Sons Inc.
- Lee, H. B., Haute, T., & Akre, R. (1955). "Blasting Process", US2703528A. Ohio, US: United States Patent Office.
- Lusk, B., & Warsey, P. (2011). "Explosives and Blasting", Chapter 7.3: S. M. E. Mining Engineering Handbook. Third Edition. Edited by Peter Darling. Colorado, US: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc. (SME).
- Mancini, R., & Cardu, M. (2001). "Scavi in Roccia gli Esplosivi". Torino: Hevelius Edizioni.
- Morhard, R. C. (1987). "Explosives and Rock Blasting". Atlas Powder Company.

- Norma Portuguesa NP 1796. (2014). - Níveis admissíveis de concentração para substâncias nocivas existentes no ar dos locais de trabalho. Lisboa, Portugal: Instituto Português de Qualidade (IPQ).
- Olofsson, S. O. (1990). "Applied Explosives Technology for Construction and Mining". Ärla, Sweden: Applex.
- Persson, P.-A., Holmberg, R., & Lee, J. (1994). Rock Blasting and Explosives Engineering. Boca Raton, Florida: CRC Press, Inc. .
- Petes, J., Miller, R., & McMullan, F. (1983). "User's Guide and History of ANFO as a Nuclear Weapons Effect Simulation Explosive", Technical Report, Defense Nuclear Agency. Alexandria, Virginia, USA: Kaman Tempo.
- Pettifer , P., & Fookes, G. (1994). "A Revision of the Graphical Method for Assessing the Excavatability of Rock". London, UK: Quarterly Journal of Engineering Geology, 27: 145-164.
- Sanvik-Tamrock. (1999). "Surface Drilling and Blasting". Painofaktorit, Finland: Tamrock.
- Tamrock. (1988). "Surface Drilling and Blasting".
- Tsiambaos, G., & Saroglou, H. (2009). "Excavability Assessment of Rock Masses Using the Geological Strength Index (GSI)". Athens, Greece: National Technical University of Athens.
- Vergani, R. (2009). "The civil uses of gunpowder: demolishing, quarrying, and mining (15th-18th centuries)", a reappraisal. Paper available on https://www.academia.edu/33464219/The_civil_uses_of_gunpowder_demolishing_quarrying_and_mining_15th-18th_centuries_.A_reappraisal.

Anexos

Anexo I – Parâmetros do diagrama de fogo

Anexo II – Parâmetros do carregamento de explosivo

Anexo III – Parâmetros do explosivo e do detonador

Anexo IV – Parâmetros de *Ash*

Anexo I – Parâmetros do diagrama de fogo

	Parâmetros do diagrama de fogo					
	Altura da banca	Comprimento de furo	Diâmetro de perfuração	Distância prática à frente	Espaçamento entre furos	Inclinação de perfuração
Estudo de caso	H (m)	H1 (m)	Φf (mm)	A (m)	S (m)	α (o)
1	3,00	3,80	64,00	2,50	2,50	0,00
2	4,90	5,50	76,00	2,50	2,50	10,00
3	9,06	10,00	89,00	2,50	2,50	10,00
4	3,00	3,50	76,00	3,00	3,00	10,00
5	3,00	3,50	76,00	3,00	3,00	10,00
6	8,50	9,00	76,00	3,20	3,20	10,00
7	5,50	6,00	89,00	3,50	3,50	10,00
8	5,50	6,00	89,00	3,50	3,50	10,00

	Parâmetros do diagrama de fogo					
	Subfuração	Tamponamento	Quantidade de furos	Volume de material desmontado por furo	Volume total de material desmontado	Perfuração específica
Estudo de caso	G (m)	T (m)	n	V (m³)	Vtotal (m³)	f (m/m³)
1	0,80	1,90	52	19	975	0,203
2	0,50	3,50	23	31	704	0,182
3	0,80	5,25	6	57	340	0,179
4	0,45	2,20	80	27	2160	0,132
5	0,45	2,50	80	27	2160	0,132
6	0,50	4,00	50	87	4352	0,105
7	0,58	2,70	40	67	2695	0,090
8	0,58	2,80	40	67	2695	0,090

Anexo II – Parâmetros do carregamento de explosivo

Parâmetros do carregamento do explosivo						
Estudo de caso	Carga de fundo		Quantidade de cartuchos na carga de fundo	Comprimento real da carga de fundo	Densidade por metro da carga de fundo	Carga de fundo
	m (kg)	l (m)	nCF (-)	Hcf real (m)	oCF (kg/m)	CF (kg)
1	1,00	0,475	4	1,90	2,11	4,00
2	1,32	0,390	3	1,20	3,38	3,96
3	1,00	0,475	7	3,30	2,11	7,00
4	1,00	0,475	3	1,40	2,11	3,00
5	1,32	0,390	3	1,20	3,38	3,96
6	1,32	0,380	4	1,50	3,47	5,28
7	1,00	0,475	7	3,30	2,11	7,00
8	1,32	0,390	8	3,20	3,38	10,83

Parâmetros do carregamento do explosivo						
Estudo de caso	Carga de coluna		Quantidade de cartuchos na carga de coluna	Comprimento real da carga de coluna	Densidade por metro da carga de coluna	Carga de coluna
	m (kg)	l (m)	nCC (-)	Hcc real (m)	oCC (kg/m)	CC (kg)
1	-	-	-	-	-	-
2	1,32	0,390	3	0,80	3,38	3,96
3	1,00	0,475	3	1,40	2,11	3,00
4	-	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-
6	1,32	0,390	10	3,90	3,38	13,20
7	-	-	-	-	-	-
8	-	-	-	-	-	-

Estudo de caso	Carga específica	Carga total por furo
1	$q \text{ (kg/m}^3\text{)}$	$Q_T \text{ (kg)}$
2	0,213	4,00
3	0,259	7,92
4	0,177	10,00
5	0,111	3,00
6	0,147	3,96
7	0,212	18,48
8	0,104	7,00

Anexo III – Parâmetros do explosivo e do detonador

	Informações técnicas do explosivo		
	Densidade do explosivo	Diâmetro do explosivo	Explosivo utilizado
Estudo de caso	ρ_E (kg/m ³)	Φ_E (m)	Nome
1	1200,00	0,05	NITRAM 5
2	1200,00	0,06	Premex 831
3	1200,00	0,05	NITRAM 5
4	1200,00	0,05	NITRAM 5
5	1200,00	0,06	Premex 831
6	1225,00	0,06	Premex 851 + 831
7	1200,00	0,05	NITRAM 5
8	1200,00	0,06	Premex 831

Estudo de caso	Parâmetros do detonador			
	Quantidade de furos	Tipo de detonador	Atrasos t (ms)	Observações
1	52	Não elétrico	25/500	nonelstarter
2	23	Não elétrico	25/200	cordão 12g/m
3	6	Elétrico	25	cordão 12g/m
4	80	Elétrico	20	cordão 12g/m
5	80	Elétrico	25	cordão 12g/m
6	50	Não elétrico	25/350	-
7	40	Não elétrico	25/350	-
8	40	Não elétrico	25/350	-

Anexo IV – Parâmetros de Ash

	Parâmetros do diagrama de fogo					
	Diâmetro de perfuração	Distância prática à frente	Espaçamento entre furos	Altura da banca	Tamponamento	Subfuração
Estudo de caso	Φf (mm)	A (m)	S (m)	H (m)	T (m)	G (m)
1	0,064	2,50	2,50	3,00	1,90	0,80
2	0,076	2,50	2,50	4,90	3,50	0,50
3	0,089	2,50	2,50	9,06	5,25	0,80
4	0,076	3,00	3,00	3,00	2,20	0,45
5	0,076	3,00	3,00	3,00	2,50	0,45
6	0,076	3,20	3,20	8,50	4,00	0,50
7	0,089	3,50	3,50	5,50	2,70	0,58
8	0,089	3,50	3,50	5,50	2,80	0,58

Estudo de caso	Parâmetros de Ash				
	$Ka=A/\Phi f$	$Ks=S/A$	$Kh=H/A$	$Kt=T/A$	$Ku=U/A$
1	39	1	1,20	0,76	0,32
2	33	1	1,96	1,40	0,20
3	28	1	3,62	2,10	0,32
4	39	1	1,00	0,73	0,15
5	39	1	1,00	0,83	0,15
6	42	1	2,66	1,25	0,16
7	39	1	1,57	0,77	0,17
8	39	1	1,57	0,80	0,17
mín.	25	1,25	1,50	0,50	0,2
máx.	40	5,00	4,00	1,00	0,5

Legenda
Parâmetros justificados
Dentro do range de ASH