

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE MINERAÇÃO E GEOLOGIA
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS**

**APLICAÇÃO DA ESPOLETA ELETRÔNICA NO DESMONTE DE
ROCHAS COM EXPLOSIVOS**

GILDÁCIO JOSÉ DE LIMA ARAÚJO

CAMPINA GRANDE/PB

2003

GILDÁCIO JOSÉ DE LIMA ARAÚJO

**APLICAÇÃO DA ESPOLETA ELETRÔNICA NO DESMONTE DE
ROCHAS COM EXPLOSIVOS**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia de Minas na Universidade Federal de Campina Grande, em cumprimento às exigências para obtenção do grau de mestre.

Área de Concentração: Lavra de Minas

Orientador: Prof. Eduardo Jorge Lira Bonates, PhD

CAMPINA GRANDE - PB

2003



FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCC

A659a

2003 Araújo, Gildácio José de Lima.

Aplicação da espoleta eletrônica no desmonte de rochas com explosivos / Gildácio José de Lima Araújo. — Campina Grande, 2003.

92f. : il. Color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia.

Referências.

Orientador: Prof. PhD. Eduardo Jorge Lira Bonates.

1. Esopoleta Detonadora. 2. Esopoleta Eletrônica. 3. Explosivos (Desmonte de Rochas). 4. Lavra de Minas. 5. Engenharia de Minas. I. Título.

CDU – 662.46(043)

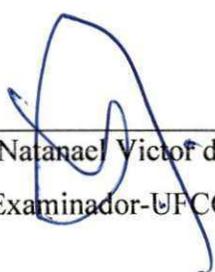
**ESTUDO SOBRE A APLICAÇÃO DA ESPOLETA ELETRÔNICA
NO DESMONTE DE ROCHAS COM EXPLOSIVOS**

BANCA EXAMINADORA

Prof. Eduardo Jorge Lira Bonates, PhD
Orientador-UFCG

Prof. Dr. Sérgio Médici de Eston
Examinador-USP

Prof. Dr. Natanael Victor de Oliveira
Examinador-UFCG



DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a Deus e à minha família, especialmente aos meus pais, Afonso Alves Araújo e Maria de Lourdes de Lima Araújo, e aos meus irmãos: João Dácio, Gil Afonso, Adriano, Fabio, Luciana e Fabiana.

AGRADECIMENTOS

Meus agradecimentos primeiramente a Deus, pois sem Ele nada teria sentido.

A todas as pessoas que colaboraram direta e indiretamente na realização desse trabalho, o meu reconhecimento.

Ao Professor Dr. Eduardo Jorge Lira Bonates pela confiança e apoio dispensados na realização dessa dissertação.

Ao Professor MSc. Arlindo Bazante pelas constantes e preciosas sugestões, e pelo estímulo e apoio.

À empresa Orica do Brasil S.A., nas pessoas dos Engenheiros José Silvio Corsini, Osmerivaldo de Sá Alves e todos os demais funcionários, por permitir acompanhar a realização dos trabalhos de campo, e por disponibilizar os dados para a realização dessa pesquisa, bem como pela amizade e auxílio constantes.

À pedreira Cantareira, do grupo Holcin, na pessoa do Sr. Valter Resende, pelo apoio e disponibilidade da área para realização dos trabalhos de campo.

A todos os integrantes do Departamento de Engenharia de Minas da UFCG, e à secretária de Pós Graduação de Engenharia de Minas da UFCG, Maria do Carmelo Coutinho.

A Sheila Soraia Araújo Medeiros e ao meu amigo Carlos de Sá Alves, assim como a todos os colegas, pelas sugestões, oportunidades e conselhos.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....	01
1.1 - Objetivos.....	01
1.2 - Justificativa.....	02
1.3 - Histórico.....	02
1.3.1 - Explosivos.....	03
1.3.2 - Iniciadores.....	04
1.4 - Observações de Campo.....	06
1.4.1 - Geologia.....	07
1.4.2 - Método de Lavra.....	08
1.4.3 - Britagem.....	09
CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	12
2.2 - Objetivos do Desmonte.....	18
2.2.1 - Fragmentação.....	18
2.2.2 - Características da Pilha.....	20
2.3 - Teorias da Detonação e Fragmentação.....	21
2.3.1 - Conceitos Básicos.....	21
2.3.1.1 - Explosivos.....	21
2.3.1.2 - Energia de ativação.....	21
2.3.1.3 - Combustão.....	21
2.3.1.4 - Deflagração.....	21
2.3.1.5 - Detonação.....	22
2.3.2 - Ondas Sísmicas.....	22
2.3.2.1 - Ondas Primárias (P).....	23
2.3.2.2 - Ondas Secundárias (S).....	23
2.3.2.3 - Ondas Rayleigh.....	24
2.3.2.4 - Ondas Love.....	24
2.3.3 - Teorias de Fragmentação por Explosivo.....	25
2.3.4 - Fases das Feições no Processo de Ruptura da Rocha.....	26
2.4 - Condições de Influência di Plano de Fogo.....	28
2.4.1 - Ponto de Iniciação na Coluna Explosiva.....	29

2.4.2 - Influência dos Afastamentos.....	30
2.4.3 - Aspectos geológicos e o posicionamento das bancadas.....	31
2.4.4 - Distribuição e Seqüência dos Furos.....	33
2.5 - Impactos Ambientais Incidentes.....	34
2.6 - Conclusão.....	35
CAPÍTULO 3 - SISTEMA DE INICIAÇÃO.....	36
3.1 - Sistema Pirotécnico.....	37
3.2 - Sistema Elétrico.....	38
3.3 - Sistema Não Elétrico (“Nonel”).....	39
3.4 - Sistema Eletromagnético.....	40
3.5 - Sistema Eletrônico.....	41
CAPÍTULO 4 - MONITORAMENTO E AVALIAÇÕES DO DESMONTE.....	43
4.1 - Perfilagem da Bancada.....	43
4.2 - Medição da Orientação dos Furos.....	45
4.3 - Monitoramento Sismográfico.....	47
4.4 - Medição da Velocidade de Detonação.....	48
4.5 - Pressão de Detonação.....	49
4.6 - Medição dos Tempos Reais de Retardo.....	50
4.7 - Monitoramento de Trincas em Estruturas Próximas ao Desmonte.....	51
4.8 - Fotografia de Alta Velocidade e Vídeo de Alta Definição.....	52
4.9 - Análise Granulométrica de Fragmentação.....	54
CAPÍTULO 5 - APLICAÇÃO DA ESPOLETA ELETRÔNICA.....	57
5.1 - Componentes do Sistema Eletrônico.....	57
5.1.1 - Detonador.....	57
5.1.2 - Programador Logger.....	58
5.1.3 - Acionador Blaster.....	59
5.1.4 - Software ShotPlus™.....	59
5.2 - Características e Aplicação do Sistema.....	60
5.2.1 - Características.....	60
5.2.2 - Aplicações.....	61
5.2.2.1 - Aplicações potenciais.....	61

5.2.2.2 - Aplicações no Brasil.....	61
5.3 - Procedimentos de Campo na Aplicação do Sistema de Iniciação Eletrônica.	62
CAPÍTULO 6 - ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	72
6.1 - Vibração.....	73
6.2 - Fragmentação.....	79
CAPÍTULO 7 - CONCLUSÕES E RESULTADOS.....	84
7.1 - Sugestões.....	84
CAPÍTULO 8 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	86

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	Mapa de localização.....	6
Figura 1.2	Mapa Geológico.....	7
Figura 1.3	Usina de britagem da Pedreira Cantareira.....	10
Figura 2.1	Distribuição de Energia.....	18
Figura 2.2	Tipos de pilhas formadas pelo desmonte.....	20
Figura 2.3	Ondas P.....	23
Figura 2.4	Ondas S	23
Figura 2.5	Ondas R	24
Figura 2.6	Ondas L.....	24
Figura 2.7	Ignição da carga explosiva e comportamento da onda de propagação.....	25
Figura 2.8	Curva típica de variação de pressão sobre as paredes do furo com o tempo após a detonação.....	26
Figura 2.9a	Seqüência esquemática das feições da rocha sendo fragmentada e os mecanismos de ruptura nas fases I, II e III	27
Figura 2.9b	Seqüência esquemática das feições da rocha sendo fragmentada e os mecanismos de ruptura nas fases IV, V e VI.....	28
Figura 2.10	Croquis da análise energética qualitativa na escolha do ponto de iniciação.....	29
Figura 2.11	Influência do afastamento.....	30
Figura 2.12	Posição do banco em relação às feições estruturais	32
Figura 2.13	Redistribuição dos furo nas malhas.....	33
Figura 2.14	Verticalização do lançamento em função do aumento do número de linhas.....	34
Figura 3.1	Sistemas de Iniciação	36
Figura 3.2	Espoleta simples.....	37
Figura 3.3	Espoleta elétrica.....	38

Figura 3.4	Equações usadas para cálculo da corrente necessária a detonação de um sistema elétrico de iniciação.....	38
Figura 3.5	Sistema Nonel de Iniciação.....	40
Figura 3.6	Sistema Magnadet.....	40
Figura 3.7	Painel de Controle do Explosor para Detonador Magnadet.....	41
Figura 3.8	Espoleta Eletrônica de Nitro Nobel.....	42
Figura 4.1	Operação de Perfilagem de Bancadas.....	44
Figura 4.2	Modelagem da face livre em 3 dimensões e análise do perfil vertical em uma das seções da face livre.....	45
Figura 4.3	Medidor de desvio de perfuração.....	46
Figura 4.4	Avaliação de desvio de furação.....	46
Figura 4.5	Sismógrafo de Engenharia.....	47
Figura 4.6	Medidor de velocidade de detonação do sistema SLIFER.....	48
Figura 4.7	Modelo de gráfico para verificar a Vod.	49
Figura 4.8	Instrumentação para monitorar pressão de gás.....	50
Figura 4.9	Teste de espalhamento dos tempos de retardos.....	51
Figura 4.10	Monitoramento de Fraturas.....	52
Figura 4.11	Seqüência de tempo dos perfis após a detonação.....	53
Figura 4.12	Câmera Fotográfica de Alta Velocidade.....	53
Figura 4.13	Fotografia da pilha para análise granulométrica.....	55
Figura 4.14	Sistema Wipfrag.....	56
Figura 5.1	Detonadores Ikon TM	58
Figura 5.2	Programador Logger.....	58
Figura 5.3	Acionador Blaster.....	59
Figura 5.4	Notebook com Software SHOTPLUS TM	60
Figura 5.5	Perfuratriz Hidráulica.....	63
Figura 5.6	Frente de Lavra do Maciço Rochoso.....	63
Figura 5.7	Verificação dos Furos.....	64

Figura 5.8	Carregamento das escorvas detonador/booster.....	64
Figura 5.9	Verificação e ajuste da densidade da emulsão bombeada.....	65
Figura 5.10	Carregamento da mina com unidade móvel de emulsão bombeada...	65
Figura 5.11	Forma de carregamento	66
Figura 5.12	Acessórios usados no carregamento de cada mina.....	66
Figura 5.13	Conexão dos fios na linha tronco.....	67
Figura 5.14	Definição dos tempos de retardo dos iniciadores com o programador Looger.....	68
Figura 5.15	Área no topo da bancada a ser desmontada.....	68
Figura 5.16	Blaster conectado ao Looger para iniciar a detonação.....	69
Figura 5.17	Levantamento Sismográfico.....	69
Figura 5.18	Detonação com iniciador eletrônico.....	70
Figura 5.19	Feição da face livre remanescente.....	70
Figura 5.20	Pilha formada pelo desmonte.....	71
Figura 6.1	Sismograma 1.....	74
Figura 6.2	Seqüência de detonação pelo software Holancim-B1040 L 12/07/02	75
Figura 6.3	Posicionamento dos bancos 1000 e 1017 da Pedreira de Cantareira (2002).....	79
Figura 6.4	Posicionamento das bancadas 1000L, 1017L e 1040L.....	83

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 6.1	Comportamento da Velocidade de Partícula (PPV).....	76
Gráfico 6.2	Comportamento da PPV sem o valor atípico.....	76
Gráfico 6.3	Comportamento da PPV com geofones instalados no ponto “B”	77
Gráfico 6.4	Comportamento da PPV com geofones instalados no ponto “D”	77
Gráfico 6.5	Comportamento da PPV com geofones instalados no ponto “C”	78
Gráfico 6.6	Índice de matação gerado pelos desmontes feitos de fevereiro a agosto de 2002, na Pedreira Cantareira, sem aplicação de iniciadores eletrônicos.....	80
Gráfico 6.7	Índice de matação gerado pelos desmontes feitos de fevereiro de a agosto de 2002, na Pedreira Cantareira, com iniciadores eletrônicos.....	81
Gráfico 6.8	Gráfico comparativo do índice de matações gerados pelos desmontes feitos de fevereiro a agosto de 2002, na Pedreira Cantareira, com e sem os iniciadores eletrônicos.....	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1	Produtos e aplicações de agregados para construções civis.....	10
Tabela 2	Comparação do detonador não-elétrico x cordel detonante.....	13
Tabela 2.1	Efeitos indesejáveis na fragmentação de rocha com explosivos.....	19
Tabela 2.2	Relação entre o afastamento e os demais parâmetros do fogo.....	31
Tabela 6.1	Resultados da velocidade de partícula versus retardo por cargas.....	73
Tabela 6.2	Evolução da PPV (Velocidade de Partícula) nos bancos 1000 e 1017	78
Tabela 6.3	Levantamento de desmonte feito com e sem a espoleta eletrônica.....	80

LISTA DE SÍMBOLOS, ABREVIATURAS E UNIDADES

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANFO	Ammonium Nitrate Fuel Oil Explosives
TNT	Trinitrotolueno
MDL	Measurement Devices Limited
Vod	Velocidade de detonação
PPV	Velocidade de Partícula
\varnothing_{ex} ou D	Diâmetro do explosivo
\varnothing_f	Diâmetro do furo
ξ	Energia de fragmentação
A	Afastamento
μc	Capacidade da caçamba em jarda cúbica
$l c^3$	Comprimento da carga
H	Altura do Banco
L	Comprimento do furo
ρ_e	Densidade do explosivo
ρ_r	Densidade da rocha
I	Corrente elétrica
CETESB	Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental, ligada à Secretaria do Meio Ambiente do Governo do Estado de São Paulo
C.I.	Circuito integrado
F_{ep}	Fator de empolamento
V_{solto}	Volume de rocha desmontada
V_{insitu}	Volume de rocha “insitu”
ETR	Elemento de terras raras
ICI	Imperial Chemical Industries

RESUMO

O processo de desmonte de rochas com explosivos, apesar de sua complexidade e do pouco aproveitamento da energia na realização de trabalho útil, assim como, atenuação dos impactos ambientais incidentes, tem alcançado progressos com a aplicação de explosivos e acessórios de alta tecnologia. As novas técnicas, equipamentos e softwares de monitoramento são ferramentas que também podem ajudar para um melhor desempenho do desmonte e, conseqüentemente, da fragmentação, lançamento do material, formação da pilha, modelagem do talude remanescente e mitigação dos incômodos causados.

O ajuste dos tempos de iniciação e a seqüência de detonação das cargas explosivas representam alguns dos parâmetros de grande relevância dentro do processo de desmonte de rocha. Atualmente existem vários tipos de iniciadores, sejam instantâneos ou com elemento de retardo. Entre eles podemos citar, além de outros, o pirotécnico, o elétrico, o eletromagnético, o não-elétrico, e o eletrônico.

O sistema eletrônico de iniciação, apesar de já estar na sua segunda geração, só a partir de 2002 vem sendo aplicado no Brasil. Trata-se de um sistema que permite maior flexibilidade nos ajustes dos tempos (de 1 a 15.000 milissegundos) e uma menor dispersão que outros iniciadores, permitindo, assim, um melhor controle da detonação.

A seqüência de detonação e os tempos de iniciação das cargas explosivas têm participação significativa no controle da velocidade de partícula, assim como da fragmentação resultante do desmonte de rocha. O controle desses dois parâmetros pode viabilizar áreas antes interditadas ou mesmo permitir a continuidade de outras, satisfazendo as normas ambientais vigentes e a viabilidade econômica da lavra.

A aplicação da espoleta eletrônica provou que o controle dos parâmetros precitados apresenta resultados positivos no controle de vibração e fragmentação no desmonte de rocha com explosivo. Com isso vem melhorar e ampliar os horizontes da mineração.

ABSTRACT

Rock blasting using high technology explosives and accessories has progressed, despite its complexity and the small fraction of the energy effectively used in fragmentation and the environmental impacts and risks of accidents. New techniques for monitoring are tools that may help to improve fragmentation, rock throw, muck pile shape, and slopes stability, and control undesirable impacts.

Tuning of initiation timing and sequencing represents parameters of great relevance in rock blasting process. Presently there are several types of initiators, both instantaneous and with delay elements. Among the initiators types one may cite the following: pyrotechnic, electric, electromagnetic, non-electric and electronic.

The electronic initiation system, despite being in its second generation, has been employed in Brazil only after 2002. That system allows greater flexibility in the adjustment of timing (1 to 15,000 milliseconds) and a smaller dispersion, as compared with other types of initiators. Those features allows for a better control of blasting operations.

The sequence of detonation and the timing for initiation of explosives charges have an effective participation in the particle velocities and in the fragmentation the results form blasting. The control of those two parameters may turn viable blasting in areas previously interdicted, or even allowing continuity of blasting works in other areas, by attending environmental norms in economically viable ways.

The use of electronic detonators has proved that the control f the above mentioned parameters presents positive results in controlling vibrations and fragmentation in rock blasting with explosives. That fact will enhance the horizon for the mining industry.

CAPÍTULO 1

1 - INTRODUÇÃO

É recente o estudo dos mecanismos do processo de desmonte de rochas com explosivos, e como não existiam instrumentos suficientemente confiáveis para quantificá-los, a explicação desses fenômenos como esforços dinâmicos e mecanismos de ruptura eram meramente especulativos (SILVA, 1998). Vários estudos foram realizados, porém, muitos pesquisadores, como LANGEFORS (1963) e LADEIRA (1976), consideram cada estudo geomecânico como representativo de uma situação de campo, isto é, cada região do maciço rochoso reage de forma diferente na interação explosivo/rocha.

Existem dois aspectos de grande importância no desmonte de rocha com explosivos, a fragmentação e o meio ambiente. A maioria das pedreiras, para produção de brita, fica cada vez mais próxima aos centros urbanos, tornando-se cada vez maior a necessidade de informações que permitam fazer um planejamento não apenas para atender à produção, mas, também, para reduzir os impactos ambientais incidentes.

A fragmentação da rocha, com uso de explosivo, é vista, principalmente, com base na avaliação de alguns parâmetros, tais como: a velocidade de detonação (Vod) e a expansão de gases (LANGEFORS e KIHSTRON, 1979). Entretanto, existem outros parâmetros que devem também ser considerados, como, por exemplo, a onda de choque que não gera trabalho útil e é absorvida pelo maciço, gerando vibrações no terreno, provocando com isso, perturbações à circunvizinhança. A verificação normatizada para essas vibrações é medida pela velocidade de partícula (PPV) na ordem de milímetros por segundo.

Com base nos conhecimentos científicos já desenvolvidos e utilizando as novas tecnologias disponíveis, assim como a experiência de campo dos profissionais da área, é possível elaborar um plano de fogo que atenda os objetivos do desmonte de rocha com explosivos (ROLIM FILHO, 1993).

1.1 - Objetivo

Esta pesquisa tem como objetivo principal, mostrar como a aplicação da espoleta eletrônica (com melhor controle da precisão e dos tempos de retardo) vem contribuir para controlar os níveis de vibração do terreno gerado pelo desmonte. E isso, sem comprometer a

fragmentação, mantendo a velocidade de partícula (PPV) dentro das normas em setores da lavra considerados críticos na pedreira Cantareira.

Pretende-se, assim, contribuir para a difusão das novas tecnologias de monitoramento aplicadas no processo de desmonte de cinologia pode ajudar no processo de fragmentação e na atenuação dos danos ambientais.

1.2 - Justificativa

A evolução histórica dos explosivos industriais é tratada genericamente por diversos autores, como CURT HERMAN (1968), LANGEFORS & KIHLSSTROM (1976), PERSSON (1983), DA GAMA (1986), HARTMAN (1992), VALDIR (1997), ESTON (1998) e CROSBY (1998). Alguns aspectos que justificam o desenvolvimento deste estudo são apresentados a seguir, como:

- O uso de explosivos no processo de fragmentação de rocha tem um vasto campo de aplicação e seus fundamentos têm sido apresentados em diversos trabalhos, além dos aspectos práticos apresentados nos levantamentos de campo e em catálogos de fabricantes de perfuratrizes, explosivos e acessórios;

- O avanço tecnológico ocorrido nos últimos anos permitiu o desenvolvimento da espoleta eletrônica, possibilitando um maior controle da detonação, se comparada com outros tipos de iniciadores;

- A precisão e a flexibilidade da espoleta eletrônica, possibilitando obter maior conhecimento sobre como fazer ajustes na iniciação das cargas explosivas, para se ter um melhor controle sobre parâmetros que envolvem o processo de desmonte de rocha, tais como: a velocidade de partícula e a fragmentação.

1.3 - Histórico

A origem e a evolução histórica dos explosivos e acessórios apresentam uma cronologia com algumas dispersões. Mas é evidente que evoluem constantemente, acompanhando as mais novas tecnologias, buscando otimizar requisitos importantes, dentre os quais se destacam o poder de fragmentação das rochas, a facilidade no manuseio, a redução de custos dos produtos e, principalmente, a qualidade e a segurança.

1.3.1 - Explosivos

A engenharia de explosivos passou por diversos processos evolutivos, desde a pólvora negra, passando pela nitroglicerina e chegando aos explosivos amoniacaís e nucleares (CINTRA, 1993).

A pólvora negra foi o marco inicial no processo de desenvolvimento dos explosivos. Os chineses foram os primeiros a utilizá-la, inicialmente para fins pirotécnicos, passando, logo após, a ser empregada para fins bélicos. A pólvora só foi descrita, em termos científicos, no século XVI, entre os anos de 1214 e 1292, por Roger Bacon (MORHARD, 1954).

A nitrocelulose foi descoberta em 1838 pelo químico Pelouze, contudo, suas propriedades explosivas só foram obtidas por Schonbein e Bottger, em 1846 (CINTRA, 1993).

Em 1847, o italiano Ascanio Sobrero descobriu um explosivo com um poder de explosão maior do que o da pólvora e da nitrocelulose, denominado, a princípio, de piroglicerina, e, posteriormente, de nitroglicerina. Entretanto, tratava-se de um explosivo muito instável, representando grande perigo, não apresentando condição de segurança em seu manuseio, impossibilitando, assim, sua aplicação industrial (ROLIM FILHO, 1993).

Em 1875, após o sueco Alfred Nobel diminuir a sensibilidade da nitroglicerina, adicionando o diatomito, desenvolveu as dinamites nitroglicerinas, misturando a nitrocelulose com a nitroglicerina. Em 1885, Wilbrand descobre o trinitrotolueno (TNT), que passou a ser industrializado a partir de 1901 (ROLIM FILHO, 1993).

Em 1923, na Alemanha, quando se tentava fragmentar nitrato de amônio, que estava aglutinado pela umidade, utilizando dinamite, ocorreu o primeiro acidente que deu origem industrial a outro membro da família dos explosivos, causando a destruição de parte da cidade (CINTRA, 1993). Ainda assim, passou despercebida a capacidade explosiva do nitrato de amônia. Porém, outro acidente em 1947 fez surgir o ANFO (*Ammonium Nitrate Fuel Oil*), mistura de nitrato de amônio com óleo diesel, quando o choque entre dois navios carregados de nitrato de amônio e petróleo respectivamente, resultou em incêndio seguido de violenta explosão destruindo o porto e parte de uma cidade no Texas, USA (MORHARD, 1954).

A partir de 1950, são desenvolvidos outros explosivos amoniacaís que, ao contrário do ANFO, apresentavam resistência razoável à água, às lamas explosivas (*slurry*) e emulsões. Esses explosivos apresentavam uma alta resistência à água, boa consistência e segurança com relação ao atrito, e choque. Sua base principal é o nitrato de amônio. Na sua composição, contêm quantidades substanciais de oxidantes dissolvidos em pequenas gotas de água, que, por sua vez, são envolvidas por uma substância combustível (CINTRA, 1993). As emulsões são produtos similares às lamas, em inúmeros aspectos, diferindo-se apenas pelo fato de serem constituídas por duas fases líquidas - as lamas são constituídas por duas fases líquidas e uma sólida (ROLIM FILHO, 1993). Atualmente, no Brasil, os explosivos mais usados em empreendimentos civis são os ANFOs e as emulsões, com suas variações.

1.3.2 – Iniciadores

Ao longo do tempo, os acessórios de detonação que constituem os iniciadores da massa explosiva também vêm passando por vários aperfeiçoamentos. Eles também são controladores do tempo de iniciação das cargas e da seqüência de detonação. A princípio, a iniciação de explosivos à base de pólvora negra era feita com penas de ganso, canudos de papel, palha e tubos de madeira, com seu miolo preenchido com pólvora (MUNARETTI, 1997). Como os intervalos de tempo dos iniciadores eram altamente irregulares e proporcionava pouco ou nenhum controle da iniciação, tornou-se necessário desenvolver métodos mais seguros.

Inicialmente, o Dr. Watson da *Royal Society of England*, desenvolveu a iniciação da pólvora negra através de faísca elétrica, em 1745, sendo aperfeiçoada em 1750, por Ben Franklin, e patenteada por Moses Shaw, em 1930. Entre 1830 e 1832, o cientista americano Dr. Robert Hare desenvolveu a ponte elétrica para iniciação elétrica, porém só foi introduzida, com sucesso, por H. Julius Smith, em 1870 (CINTRA, 1993).

William Bickford, em 1831, desenvolveu, na cidade de Cornwall, na Inglaterra, o primeiro método seguro de iniciação, colocando um núcleo contínuo de pólvora em um cabo de juta e cordões, denominando-o de estopim (MUNARETTI, 1997).

Em 1863 Alfred Nobel, percebendo que a energia potencial da nitroglicerina era muitas vezes desperdiçada por meios insatisfatórios de iniciação, desenvolveu o primeiro iniciador pirotécnico que constitui hoje a espoleta simples; constituída por uma cápsula de vidro, contendo, a princípio, pólvora negra concentrada, e sendo iniciada por um rastilho com

um núcleo contendo também a pólvora negra (MUNARETTI, 1997). Em 1865, aperfeiçoou este método, reduzindo o tamanho da cápsula e substituindo a pólvora negra pelo fulminato de mercúrio, amolgando o estopim, ou rastilho, na parte aberta de uma cápsula de cobre, denominado e patenteado como detonador (PERSSON *et al.*, 1993).

No ano de 1870, H. Julius Smith desenvolveu o primeiro explosor - que era uma máquina detonadora portátil do tipo gerador, com a finalidade de acionar a espoleta elétrica. Em 1895, Smith utilizou o estopim como retardo na espoleta elétrica (HOPLE, 1993).

Entre 1900 a 1922, o fulminato de mercúrio foi substituído pela azida de chumbo, e surgiram, integralmente, os primeiros detonadores elétricos, sendo com elemento de retardo interno o “*verted*”; e tendo ainda como carga principal, logo após a II Guerra Mundial o PETN (pentaeritritol tetranitrato), seguindo o Tetryl, ou RDX/TNT (PERSSON *et al.*, 1993).

Seguindo os primeiros elementos iniciadores, o francês Louis L'heure apresentou, em 1907, o cordel detonante, que consistia em um tubo de chumbo, com um núcleo tri-nitrotolueno (TNT), que, associado aos outros iniciadores, promove a iniciação de cargas explosivas. O cordel detonante teve o tubo de chumbo substituído por um revestimento de tecido, e o núcleo, pelo PETN, em 1935 (HOPLE, 1993).

No ano de 1946, as espoletas elétricas, com elemento de retardo, passaram da ordem de segundos para milissegundos. Em 1950, foram utilizados os primeiros retardos de precisão para cordel detonante (CINTRA, 1993).

Em 1969, foi patenteado o sistema não elétrico da Nitronobel, o “*NoneP*”, na Suécia, e, em 1980, um dos seus acessórios mais importantes, a espoleta eletrônica. Em 1982, a Cia. Imperial Chemical Industries PLC (ICI) lançou o sistema eletromagnético de iniciação denominado “*Magnadet*”, e, em 1983, a espoleta eletromagnética Nissan (HOPLE, 1993).

Nos anos 90, surgiram iniciadores eletrônicos, sistemas de iniciação por ondas de rádio de baixa frequência (ULF), e retardos eletrônicos iniciados por meios não elétricos como o “*Digidet*” da *Ensign Bickford Co.* (MUNARETTI, 1997).

Hoje, destaca-se a enorme quantidade de elementos iniciadores com retardo existentes no mercado, com seus usos determinados por fatores econômicos, segurança e tipos de aplicações. Esses sistemas podem ser ou não associados entre si, ao cordel detonante, ou mesmos aos reforçadores (*Booster's*).

As atividades produtivas (mineração, construção civil, etc.) que utilizam explosivos contam, atualmente, com o recente desenvolvimento dos iniciadores eletrônicos,

muito embora o sistema pirotécnico associado ao não-elétrico e ao cordel sejam os mais utilizados. O sistema eletrônico de iniciação garante mais segurança, versatilidade e precisão, nos tempos de retardo, que os demais sistemas iniciadores.

1.4 – Observações de Campo

Foram realizadas algumas visitas à Pedreira Cantareira, na Região de Mairiporã-SP, onde se observaram a geologia, o plano de fogo, a fragmentação, o tipo de pilha, os equipamentos utilizados e os impactos ambientais.

A Pedreira Cantareira faz parte da divisão de agregados do Grupo Holcim, em atividade há 57 anos, com duas unidades operacionais - Mairiporã e Sorocaba. Possui um quadro de 103 funcionários, com capacidade atual de produção de 2,46 milhões de toneladas de brita por ano.

A unidade Mairiporã está localizada na Rodovia Fernão Dias, Km 67, na cidade Mairiporã, Estado de São Paulo (figura 1.1).

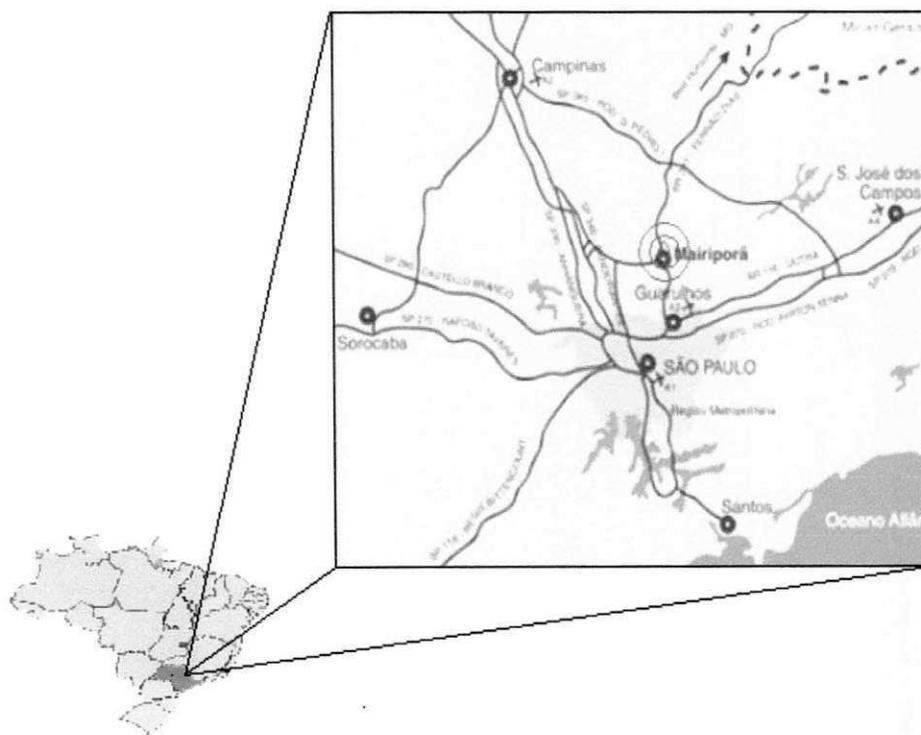


Figura 1.1 - Mapa de localização da pedreira em Mairiporã.

1.4.1 - Geologia

A Pedreira Cantareira faz parte da formação dos granitos crustais, como exposto no mapa ilustrado na figura 1.2, representados pelos granitos porfiróides aluminosos Mairiporã, Cantareira, Taipas e Morro do Perus, aos quais se associam granitos equigranulares, microgranitos, aplitos e pegmatitos tardios/residuais, em parte portadores de turmalina. São intrusões múltiplas, plurifaciais, compostas principalmente por biotita granodioritos/monzogranitos, cujo mineral acessório marcante é a titanita que em seções losangulares atinge até 1 cm de comprimento (WERNICK *et al.*, 1996).

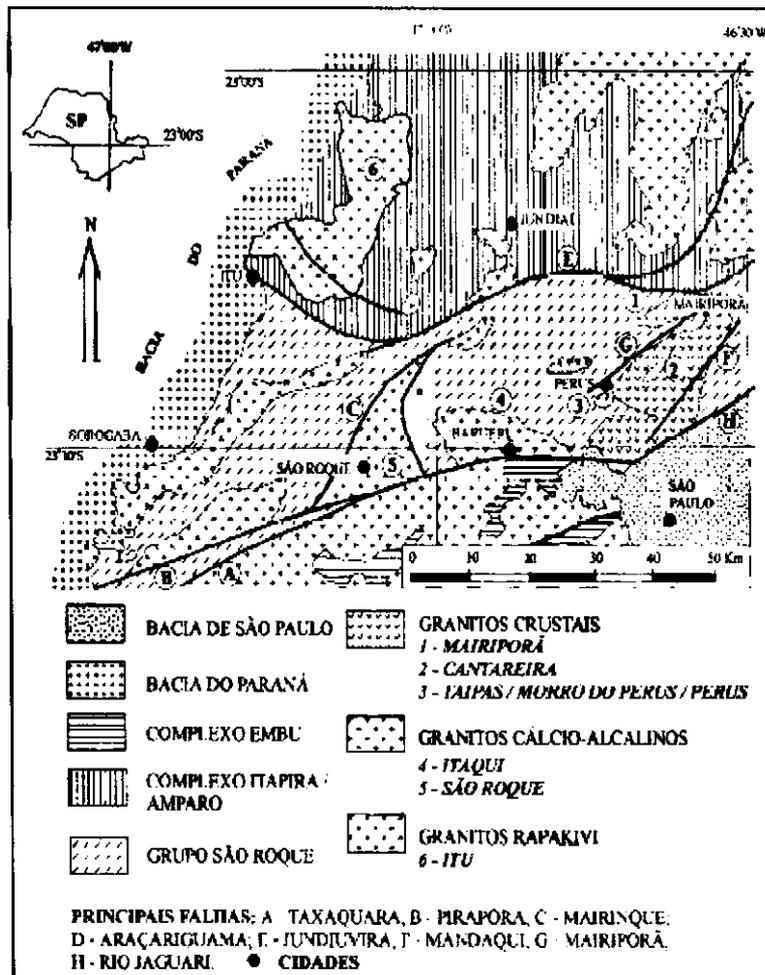


Figura 1.2 - Mapa Geológico (WERNICK *et al.*, 1996).

Cada um dos mencionados granitos mostra diferenciação interna e a seqüência dos granitos porfiróides aluminosos, representando estágios progressivos na evolução do magma Pirituba (WERNICK *et al.*, 1996).

Trata-se, então, de uma rocha de natureza ígnea, mais especificamente de um granito porfirítico, com as características técnicas abaixo discriminadas.

- Abrasão "Los Angeles": 23%.
- Cor: cinza médio.
- Formação: Feldspato (c/ Fenoscristais), Mica (biotita) e Quartzo.
- Absorção de água: 0,15%.
- Porosidade aparente: 0,40%.
- Massa específica aparente seca: 2,71.
- Massa específica aparente saturada: 2,72.
- Perda pelo impacto Treton: 10%.
- Composição mineralógica: Plagioclásio (oligoclásio) = 30-40%; Microclínio (pertítico) = 20-30%; Biotita = 20%; Quartzo = 15-20%; Anfibólio (hornblenda) = 0-5%.
- Perda ao ataque de sulfato de sódio: 0,50%.

1.4.2 - Método de Lavra

A lavra é desenvolvida pelo método a céu aberto em meia encosta (flanco), com desmonte de rocha por explosivo e mecanizada.

No processo de remoção do capeamento ou cobertura estéril, para a liberação da rocha, o material retirado é depositado ordenadamente no bota-fora, onde posteriormente será drenado e revegetado, atendendo os requisitos técnicos e do meio ambiente.

As operações de desmonte de rocha envolvem a perfuração, carregamento das cargas explosivas e a detonação. O plano de fogo é elaborado a partir dos dados levantados através de avaliações preliminares das condições das frentes de lavra, levando em consideração o que foi estabelecido pelo planejamento. Esse plano consiste em adequar a carga explosiva aos requisitos de segurança, qualidade e meio ambiente, assim como aos parâmetros geométricos da frente, de forma a obter a fragmentação e os contornos desejados nos processos subseqüentes.

Os furos são executados em pontos demarcados com o auxílio de mapeamento das faces do banco com um teodolito a laser (MDL), e tem suas orientações medidas posteriormente com um inclinômetro. A partir daí, são verificados e avaliados seus possíveis

desvios. Os dados obtidos são analisados com o auxílio de programas (*softwares*), de forma a definir o melhor plano de carga de explosivos. A operação de perfuração é executada por perfuratrizes hidráulicas ou pneumáticas, com sistemas de abatimento de pó. Os furos são executados com diâmetros de 3 e 3½" e extensão variando de 10 a 20 metros.

Na operação de carregamento, assim como na execução do desmonte são previstos e utilizados seqüência de detonação, cargas por espera, diâmetro, comprimento, inclinação dos furos, tampão, malha de furação e, conseqüentemente, a razão de carga (kg/m). O planejamento do desmonte ainda utiliza programas para prever níveis de vibração, fragmentação e lançamento do material desmontado. Baseando-se nessas informações a equipe de desmonte utiliza explosivos de alta qualidade (emulsão bombeada) e acessórios como: espoletas eletrônicas, retardos, sistema nonel (linha silenciosa), reforçadores, cordel detonante, dentre outros.

As operações de carregamento e transporte implicam no despacho do material desmontado da lavra para unidade de britagem primária. O carregamento na unidade Mairiporã é realizado por uma escavadeira hidráulica e pás carregadeiras, todas com capacidade de 4,0 m³ na caçamba. A operação de transporte é executada por caminhões fora-de-estrada, com capacidade de carga de 25 e 35 toneladas, que transportam o material desmontado por vias de acesso descendentes, despejando diretamente na grelha do alimentador vibratório do britador primário, dando início ao processo de britagem.

1.4.3 - Britagem

O processo de cominuição é realizado através de um conjunto de operações de redução de tamanho dos blocos, de modo controlado, executado por operações de britagem e classificação granulométrica, em peneiras vibratórias. O processo de beneficiamento da Unidade Mairiporã é composto por 02 etapas de redução e uma instalação de classificação por peneiramento via seca (figura 1.3).

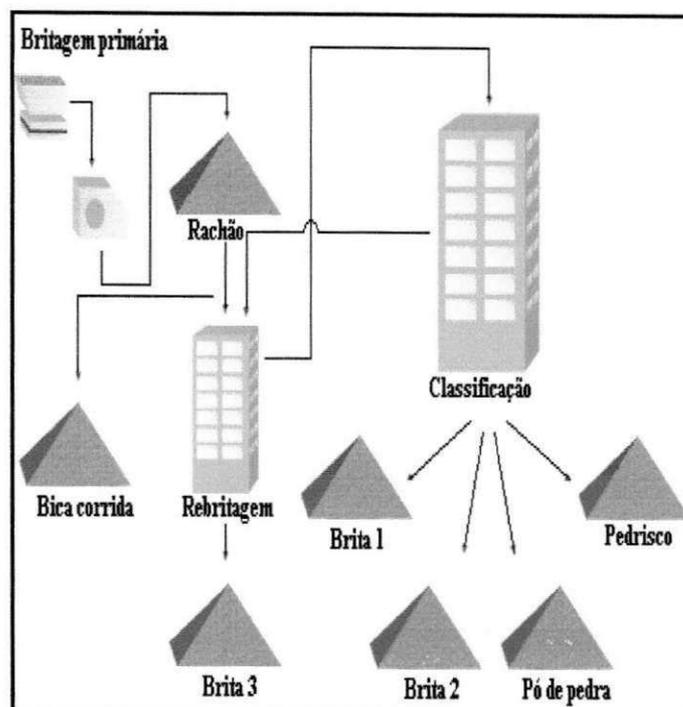


Figura 1.3 - Usina de britagem da Pedreira Cantareira (Pedreira Cantareira, 2002).

Na britagem primária são utilizados britadores de mandíbulas, com alimentadores vibratórios. O produto britado é transportado por correias transportadoras, de 42" de largura, e depositado em uma pilha intermediária (pilha pulmão), para ser retomada para o estágio de rebitagem.

Na britagem primária, são admitidos blocos de até 800 mm de diâmetro, provenientes do desmonte de rocha, onde são reduzidos a uma granulometria abaixo de 300 mm de diâmetro, adequados às operações subseqüentes, até chegar ao produto final, como o demonstra a tabela 1.1.

PRODUTOS E APLICAÇÕES				
MATERIAL	MALHA DE CORTE (mm)		DENSIDADE	APLICAÇÕES
	Mairiporã	Sorocaba	Mairiporã	
Bica corrida	Variável	Variável	1,751	Pavimentos.
Bica Graduada	Conforme especificação	Conforme especificação	1,802	Pavimentos.
Brita 1	+9,5 - 23	+10 - 24	1,416	Concreto estrutural, pavimentos e pré-moldados.
Brita 2	+23 - 30	+24 - 30	1,441	Concreto estrutural, pavimentação e drenos

Brita 3	+30 - 50	+30 - 50	1,445	Pavimentação, tubulões, drenos e lastros ferroviários.
Brita 1/2	-	+7,5 - 10	-	Concreto estrutural, pavimentos e pré-moldados.
Macadame Hidráulico	Variável	-	1,471	Pavimentos.
Pedrisco	+5,5 - 9,5	+4,76 - 10	1,332	Blocos, pré-moldados, pavimentos simples, concreto asfáltico e estrutural.
Pedrisco Misto	- 9,5	-10	1,605	Blocos, pré-moldados e concreto.
Pó de Pedra	- 5,5	-4,76	1,550	Blocos, pré-moldados, pavimentos simples, concreto asfáltico e estrutural.
Rachão	Variável	Variável	1,502	Concreto ciclópico (tubulões de estrutura) , muros de contenções de encosta (arrimo, contenção de talude, contenção de margens) , gabiões, troca de solo e pavimentos.

Tabela 1.1 - Produtos e aplicações de agregados para construções civis

(Pedreira Cantareira, 2003).

CAPÍTULO 2

2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O estudo sobre aplicação da espoleta eletrônica no processo de desmonte de rocha com explosivo, como apresentados nos levantamentos bibliográficos, é, ainda, muito recente, embora já se tenha alguma publicação sobre o tema. Será apresentada, aqui, a princípio uma breve revisão de estudos, acerca de aplicações de explosivos, sistemas de iniciação e monitoramento sismográfico, e, em seguida, algumas fundamentações teóricas dos diversos fenômenos e processos envolvidos.

Através de relatórios técnicos e experiências, CINTRA (1993) demonstrou, de forma mais prática, as influências da interação explosivo/rocha. No seu trabalho, fez, inicialmente, um levantamento histórico da evolução dos explosivos, desde a pólvora negra, aos nucleares. Em seguida fez um enfoque prático da influência das características físicas da rocha, bem como das condições geológicas no desmonte de rocha com explosivos. Seguindo essa linha, foi feita uma abordagem sobre as características dos explosivos, os mecanismos de detonação, morfologia, seqüência da detonação e demonstração de alguns testes de explosivos. E, finalmente, fez-se uma abordagem prática de aspectos ambientais como ultralancamento, vibração, gases, poeiras, danos à rocha remanescente, além de uma análise de acidentes, com discussão de casos reais.

CUDZILO *et al.* (1995) investigaram a influência da massa e do tamanho do detonador sobre a iniciação e o desenvolvimento da detonação nas misturas do nitrato de amônia, trinitrotolueno e alumínio. A velocidade média de detonação foi medida em profundidades diferentes, numa carga de explosivo. A execução de uma análise numérica da iniciação, onde a massa ativa do detonador foi determinada em um modelo unidimensional proposto. Para determinar cada um dos três termos, foi usada a equação de *Macrokinetic*, para descrever a decomposição do explosivo. Os resultados experimentais, para as misturas iniciadas por detonadores de RDX, foram comparados com os de uma simulação de computador, com a apresentação das interpretações físicas e químicas dos resultados.

No trabalho de SMIT e PISTORIUS (1998) foi feita uma abordagem sobre as implicações do projeto dominante, com a aplicação do sistema eletrônico de iniciação na indústria de mineração da África do Sul, através de um modelo cíclico de mudanças

tecnológicas. O trabalho consistiu em uma análise do surgimento de uma nova tecnologia, com uma abordagem conceitual, apresentado o sistema de iniciação como um desafio aos sistemas tradicionais, particularmente o pirotécnico e o não-elétrico (*NONEL*). De um ponto de vista estratégico e tecnológico, mostra-se que o desafio é determinar a natureza das decisões gerenciais a serem direcionadas. Através do modelo de inovação de *Utterback-Abernathy*, é feita a avaliação da evolução dessa nova tecnologia, uma vez que sua aplicação encontra-se ainda em seu início e que o projeto dominante ainda não emergiu. Desde que o projeto seja um marco promissor muito importante no envolvimento do produto, no que diz respeito aos aspectos técnicos e econômicos, o foco gerencial imediato deve estar na avaliação dos fatores que podem influenciar no seu surgimento. O surgimento de um projeto dominante é, entretanto, um processo complexo que depende da interação entre muitos estudos, incluindo os aspectos tecnológicos, de mercado, sociais, econômicos e relacionados. Os autores anteciparam, em seu estudo, as previsões dessa inovação tecnológica, explorando os fatores que podem influenciar no projeto dominante dos sistemas de iniciação eletrônica, e os molda encontrando um formato que seja útil para a sustentação da decisão gerencial.

ROLIM (1998), discutiu a possibilidade e a forma de redução de custos, substituindo o cordel detonante por detonadores não-elétricos, expondo as vantagens e desvantagens entre os dois sistemas de iniciação, conforme é mostrado na tabela 2. O sistema não-elétrico mostrou-se bastante satisfatório, em termos de se evitar perdas de energia, principalmente trabalhando com pequenos diâmetros de furação, além de reduzir os impactos ambientais.

CARACTERÍSTICAS	CORDEL DETONANTE	DETONADOR NÃO-ELÉTRICO
Velocidade de propagação	7.000 m/s	2.000 m/s
Ruído	Extremamente forte	Mínimo
Sistema de iniciação	Exige estopim/espoleta	Pode ser manual
Ponto de iniciação	Ao longo da coluna	Pontual
Retardo	Exige colocação de elementos extras de retardo	Já vem com retardos embutidos
Perda de energia	Sim, pode provocar consideráveis perdas	Não

Tabela 2 - Comparação do detonador não-elétrico x cordel detonante (ROLIM, 1998).

MUNARETTI (1999), por sua vez, realizou um estudo sobre a performance do ANFO aplicado no desmonte de pequenas pedreiras, empresas que, segundo ele, constituem a maior parte das operações mineiras do estado. A análise técnica e econômica da utilização dos explosivos em pedreiras de calcário, foi feita utilizando-se um estudo de caso feito na pedreira Cerro do Cabelo, na cidade de Vila Nova do Sul-RS. Nesse trabalho, foi observada a preparação e características dos ANFOs, comparando-se os preparados na pedreira com aqueles industrializados no país. Na análise, os AA. consideraram dois aspectos: o ambiental, no controle da vibração (Velocidade de Partícula), e o econômico, na relação custo-benefício, buscando uma pilha do material fragmentado no tamanho desejado.

No seu trabalho, SILVA (2000), fez, a princípio, uma abordagem dos mecanismos de fragmentação em desmonte de rocha convencional com explosivos, e do desmonte baseado no princípio eletrohidráulico, fazendo também um estudo geomecânico acerca do fraturamento e da ruptura de rochas. Ele desenvolveu e aplicou a tecnologia eletrohidráulica na fragmentação de pequenos blocos de calcário, retirados da Cia. de Cimentos de Portugal (CIMPOR), na cidade de João Pessoa-PB. Abordou, ainda, parametrizações geomecânicas e ensaios associados, para chegar à parametrização do princípio eletrohidráulico. Esse princípio trata de uma forma alternativa de desmonte de rocha, que se apresenta menos agressiva ao meio ambiente. O método consiste em gerar uma descarga elétrica de alta tensão no interior dos furos, em blocos de rocha calcária, tamponados e contendo substância eletrolítica. A partir daí, é gerado um plasma em altíssima velocidade, promovendo o surgimento de ondas de choque, fragmentando o bloco.

Um dos primeiros testes realizados, no Brasil, com espoletas de retardo eletrônico, foi apresentado por NOJIRI *et al.* (2002), no seu relatório técnico. Foram realizados testes com o sistema de iniciação eletrônica da Daveyfire, nas Minas da CVRD, em Itabira-MG, e na Embu S.A. Engenharia e Comércio, em Mogi das Cruzes-SP. Os testes tiveram como finalidade, a implantação das espoletas eletrônicas no mercado brasileiro, avaliando as vantagens de sua aplicação.

Segundo NOJIRI *et al.* (2002), os resultados demonstraram seus benefícios em práticas no campo, como descritas a seguir.

- Para o caso da CVRD, por intermédio da avaliação da produtividade do equipamento de carregamento, foi verificado uma melhora na fragmentação e um formato de pilha mais adequado, permitindo uma disposição de pilha mais favorável para controle dos teores do material. Isso resultou numa redução de custos significativa.

- Para o caso da pedreira da Embu, a verificação visual da fragmentação e lançamento do material, mostrou uma melhor performance dos retardos com o sistema eletrônico, assim como no controle dos parâmetros ambientais, reduzindo, em quase metade, os índices de vibração.

BAZANTE *et al.* (2002) utilizaram, por sua vez, um modelo de simulação probabilística, para estimar a possibilidade da interferência dos tempos de detonação entre pares de furos nos desmontes executados na mina. Esse modelo verifica como a variabilidade de espera pode ocasionar superposição dos tempos de retardo e detonações instantâneas dos furos. Com isso, pode ser testada a integridade do tempo de iniciação e da seqüência de detonação das espoletas. A simulação usada foi baseada no processo de Monte-Carlo, cujo princípio operacional, bem como os fundamentos do algoritmo foi baseado no trabalho desenvolvido por RHOLL e STAGG (1988). Foram apresentados dois exemplos de aplicação do programa. O primeiro exemplo demonstrou como é feita a entrada dos dados no programa e, a partir daí, foi feita uma comparação da probabilidade de superposição entre duas espoletas, com um desvio padrão de 12 e 9 milissegundos, respectivamente. No segundo exemplo, foram avaliados 15 detonadores, com diferenças de tempo nominais de 25ms e desvio-padrão de 4% e 6%, respectivamente. Foi também discutida a influência da fragmentação na iniciação das espoletas na malha de furação, onde os estudos sobre a variabilidade do tempo de iniciação demonstram que detonadores mais precisos melhoram significativamente a fragmentação.

Já IRAMINA (2002) mostrou o uso do mapa de iso-velocidades como ferramenta de controle ambiental e de planejamento, possibilitando uma convivência menos tensa entre a sociedade e a mineração, incluindo os fabricantes, usuários de explosivos e os profissionais que atuam nessa área. Através do monitoramento efetuado na Pedreira Riuma, no município de São Paulo, propôs-se proposto um método gráfico envolvendo os conceitos de curvas de iso-velocidade, equações carga-distância, frequência, e um possível limite de 8 mm/s que envolva dano e desconforto. Em outro trabalho, IRAMINA *et al.* (2003) elaboraram uma coletânea que apresenta e reúne as normas européias mais importantes, oferecendo um panorama atual sobre essa área de conhecimento.

LEWIS e PEREIRA (2003), apresentando experiências realizadas na pedreira McCook da *Vulcan Materiais e Cia*, situada a, aproximadamente 27km da cidade de Chicago, Estados Unidos, afirmam que, a partir do início de 2002, foram feitos testes com os detonadores eletrônicos, como meio de controlar a vibração do terreno, em áreas críticas do ponto de vista do controle da vibração e da produção da Pedreira. Segundo eles, até dezembro

de 2001, somente era empregado o sistema de iniciação não-elétrico. Uma situação nova surgiu da necessidade de se lavrar próximo a áreas habitadas, ao sul-sudoeste da pedreira. Incidentalmente, uma dessas áreas críticas foi selecionada, em 2002, para produzir, aproximadamente, 25% de toda a produção da pedreira. Para resolver esse problema, seria necessário mudar o plano de lavra, causando um aumento nos custos operacionais. Os detonadores eletrônicos foram aplicados, para permitir a redução dos custos operacionais da lavra nessas áreas críticas. Dos detonadores eletrônicos analisados, disponíveis no mercado, foi selecionado pela pedreira, o *i-konTM Digital Energy Control* da ORICA, devido às suas características de flexibilidade operacional, que tornava seu uso mais fácil e seguro. A normas do estado de Illinois estabelecem que o limite para PPV de pico é de 25,4 mm/s, e a Vulcan estabeleceu 12,7 mm/s nas três componentes, mas nenhum limite foi estabelecido para a frequência. Para a sobrepressão, o limite de pico foi de 130dB. No monitoramento, foram colocados 10 sismógrafos nos arredores da pedreira, posicionados com auxílio de GPS. Atualmente, aproximadamente 50% das detonações estão a 152-213 metros das estruturas, 25% estão a 122-152 metros, e 25% estão a mais de 213 metros.

LEWIS e PEREIRA (2003) concluem afirmando que o uso dos detonadores eletrônicos reduziu custos, eliminando as multas emitidas pelos órgãos ambientais, trazendo ainda outros benefícios, como: aumento da altura dos bancos, de 15,24 metros para 30,5 metros; redução do número de detonações por ano; eliminação da necessidade de furos com água; redução da necessidade de armazenamento de explosivos; redução da distância escalonada ao redor da pedreira, e aumento da produtividade do britador primário. Os resultados dos custos operacionais mostraram, ainda, que, apesar do acréscimo no custo, pelo uso dos detonadores eletrônicos, o valor do lucro líquido global através de seus benefícios ultrapassou as despesas anteriores em 24%.

Uma outra pesquisa discutiu o sucesso do uso de um sistema eletrônico de desmonte em operações de pedreira, com o objetivo de minimizar reclamações de vizinhos e perturbação no controle das vibrações induzidas pela detonação. Segundo seu autor, STIRLING (2003), as experiências mostraram que os sistemas eletrônicos permitiram fazer detonações maiores, controlando as vibrações induzidas em termos das velocidades de partícula de pico (PPV) e frequências. Ele afirmou que os desmontes maiores também promovem benefícios, tais como aumento da produtividade, melhor fragmentação e redução no número de detonações exigidas para manter os níveis de produção. Limitando a frequência das detonações, reduz-se o número de exposição às perturbações para os vizinhos. Isto

propicia um melhor controle das detonações, reduzindo as reclamações e melhorando as relações com a comunidade circunvizinha.

O detonador eletrônico programável representa, historicamente, o maior avanço das novas tecnologias de desmonte de rocha com explosivos, atualmente. O sistema eletrônico, quando usado junto com as novas tecnologias de mistura de explosivos bombeados, como emulsão/ANFO, permite, aos produtores de agregado, um controle maior do explosivo usado, e uma iniciação das cargas altamente precisa, alcançando melhores resultados globais.

2.1 – Objetivos do Desmonte

O planejamento do desmonte com explosivos tem vários objetivos que devem ser avaliados de forma quantitativa e qualitativa, para possibilitar uma melhor eficiência nas etapas subseqüentes. Entre os parâmetros de avaliação da eficiência do desmonte, podemos destacar:

- Fragmentação e distribuição granulométrica;
- Características da pilha do material desmontado;
- Distribuição de teores (para minerais metálicos);
- Danos causados a rocha remanescente;
- Custos;
- Impactos ambientais.

2.1.1 - Fragmentação

A fragmentação do maciço constitui um dos principais objetivos do desmonte de rocha. Uma boa fragmentação terá influência direta nas operações posteriores ao desmonte, como: carregamento, transporte, manuseio e beneficiamento (CROSBY, 1998).

Como podemos observar na figura 2.1, apenas 20 % da energia desprendida numa detonação realiza trabalho útil, sendo 15% na fragmentação.

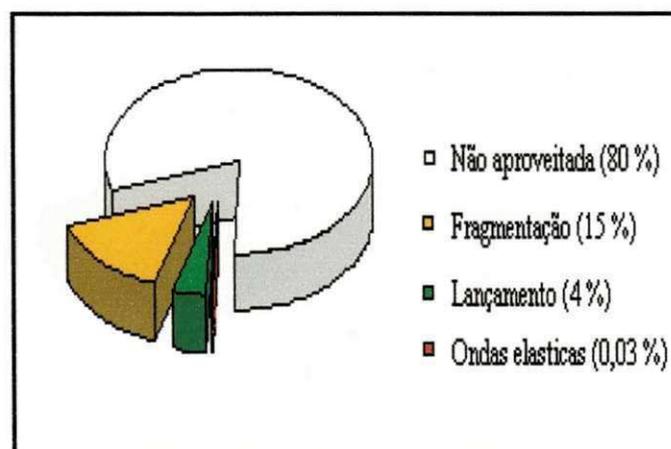


Figura 2.1 - Distribuição de Energia (ESTON, 1998).

ESTON (1998) afirmou que o desempenho do desmonte de rocha com explosivo tem relação com a distribuição granulométrica dos blocos formados, e pode ser expresso em:

- Blocos de tamanho acima do desejado;
- Quantidade de finos;
- Facilidade de escavar a pilha e carregá-la;
- Fatores associados ao transporte;
- Requisitos de operações subseqüentes.

A tabela 2.1 mostra como a distribuição granulométrica, proveniente da fragmentação, terá relação com o desempenho do desmonte, tanto nos custos de lavra, como nos processos subseqüentes.

EFEITOS INDESEJÁVEIS NA FRAGMENTAÇÃO	
GRANULOMETRIA	PROBLEMAS GERADOS
Blocos de tamanho superior ao desejado	<ul style="list-style-type: none"> • Exigem desmonte secundário • Dificultam o carregamento, transporte e a britagem • Aumenta o custo de manutenção dos equipamentos • Exigem equipamento de grande porte para blocos grandes • Geram problemas ambientais
Quantidade de finos	<ul style="list-style-type: none"> • Aumentam a razão de carregamento e os custos no desmonte primário • Aumentam o custo de manutenção na britagem • Geram problemas ambientais (poeira excessiva)

Tabela 2.1 - Efeitos indesejáveis na fragmentação de rocha com explosivos.

2.1.2 - Características da Pilha

O plano de fogo aplicado no desmonte de rocha com explosivos define o avanço da frente e a geometria da lavra, assim como o lançamento do material desmontado e a conseqüente formação da pilha. O tipo de pilha formado terá influência na produção desejada e na escolha dos equipamentos de carregamento (figura 2.2).

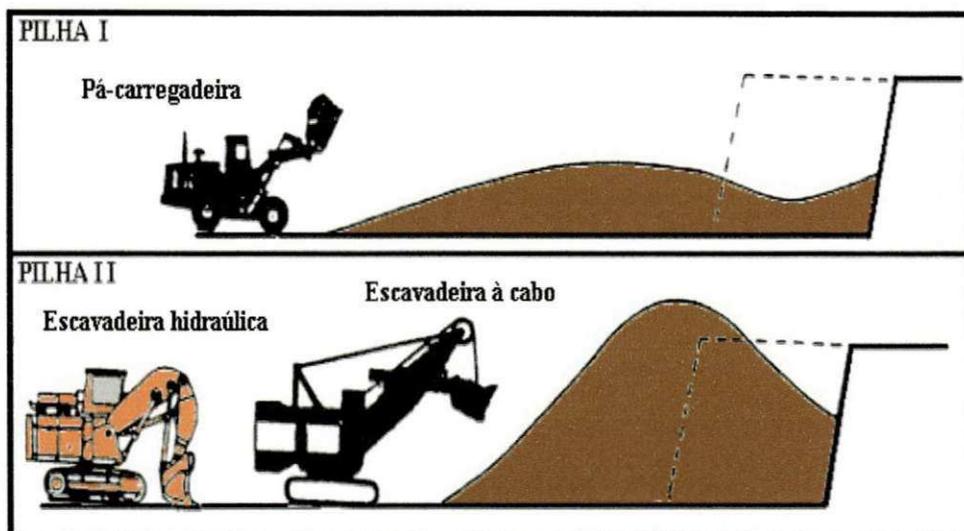


Figura 2.2 - Tipos de pilhas formadas pelo desmonte (adaptada de SILVA, 1998).

Outro aspecto importante da pilha é o fator de empolamento (Equação 2), em que o volume de material produzido é diretamente proporcional ao empolamento, isto é, quanto maior a fragmentação, maior será o volume da pilha em relação ao volume *insitu*. Quando se aumenta a fragmentação, aumentam os vazios entre os blocos liberados, onde a mesma massa de rocha ocupará um maior volume, somando-se a esses vazios.

$$V_{insitu} = F_{ep} \times V_{solto} \quad (2)$$

Onde :

F_{ep} – Fator de empolamento

V_{solto} – Volume de rocha desmontada

V_{insitu} – Volume de rocha *insitu*

2.2 – Teorias da Detonação e Fragmentação

A reação química de decomposição do explosivo é função das características da substância e das condições de iniciação e confinamento, ocorrendo de três formas: combustão, deflagração e detonação (ROLIM FILHO, 1993).

2.2.1 - Conceitos Básicos

2.2.1.1 - Explosivos

Os explosivos industriais são substâncias ou misturas de substâncias químicas, que possuem a propriedade de, ao serem convenientemente iniciados, sofrerem transformações químicas exotérmicas violentas e de altíssima velocidade, transformando-se em gases, que resultam na liberação de grandes quantidades de energia em reduzido espaço de tempo (ROLIM FILHO, 1993). Essa geração de energia ocorre em milésimos de segundos, e geram ondas de choque, conferindo, aos explosivos, um grande poder de ruptura (HERMANN, 1968).

2.2.1.2 - Energia de ativação

A energia de ativação é a energia mínima necessária, a partir da qual o explosivo alcança a sua velocidade estável de detonação. A estabilidade de um explosivo garante a segurança contra uma detonação acidental (CROSBY, 1998).

2.2.1.3 - Combustão

É uma reação química de oxidação de baixa velocidade, em que, o elemento combustível sofre uma volatilização em sua superfície, até atingirem o ponto de fulgor. Para que haja combustão, há necessidade de oxigênio externo, como, por exemplo, a queima de combustíveis - gasolina, carvão, dentre outros (ROLIM, 1993).

2.2.1.4 - Deflagração

É um processo de decomposição da substância explosiva por condução térmica sucessiva e simultânea das partículas, até atingirem a temperatura de explosão, com uma velocidade da reação superior à combustão, chegando a 1.000 m/s. Nessa reação, há participação não só do oxigênio do ar, mas também daquele intrínseco à substância. É o caso

da decomposição das pólvoras, ou, ainda, de explosivos mais potentes, quando submetidos a condições desfavoráveis de iniciação e confinamento (MUNARETTI, 1997).

2.2.1.5 - Detonação

É uma reação de decomposição da substância explosiva, cuja propagação acontece por onda de choque de alta velocidade (variando de 1.500 m/s a 9.000 m/s), promovendo, na frente de detonação, uma elevada pressão dinâmica, com enorme poder de ruptura. Nesse processo, há apenas a participação exclusiva do oxigênio intrínseco à substância explosiva (PERSSON *et al.*, 1993).

2.2.2 - Ondas Sísmicas

Sabe-se que a liberação repentina de grande quantidade de energia química gera um campo dinâmico de tensões na rocha circundante ao furo. Esse campo de tensões, por sua vez, gera deformações elásticas, que se propagam, afastando-se do furo, na forma de ondas sísmicas.

Como a detonação, num maciço, é feita por fontes não esféricas, e o meio não é contínuo e heterogêneo, são gerados vários tipos de ondas sísmicas (PERSSON *et al.*, 1993). No caso de uma única fonte sísmica esférica, locada num meio contínuo, homogêneo e isotrópico, são geradas apenas ondas compressivas, o deslocamento das partículas do meio ocorre apenas na direção de propagação da onda (DOMINGOS, 2002).

Os tipos de ondas mais importantes, geradas pela detonação, são as ondas primárias (P) e as secundárias (S). Essas ondas são denominadas de ondas de volume. Existem ainda as ondas de Rayleigh (R) e as ondas Love (L), denominadas ondas superficiais. Cada onda tem características próprias, com peculiares velocidades de propagação, frequência, taxa de atenuação, deslocamento das partículas do meio, dentre outros (IRAMINA, 1997).

As ondas P e S têm participação mais significativa no processo de desmonte de rocha com explosivo, e seus mecanismos de atenuação, segundo ESTON (1993), são:

- Espalhamento geométrico - a mesma energia é gradualmente espalhada numa superfície cada vez maior, esférica, e centrada na origem da vibração.

- Amortecimento friccional - o consumo de energia deve-se a fricção interna do material e à presença de descontinuidades no maciço

2.2.2.1 - Ondas primárias (P)

As ondas primárias são caracterizadas por uma série de deslocamentos de compressão e tração no meio, com o movimento das partículas ocorrendo na mesma direção da propagação (figura 2.3).

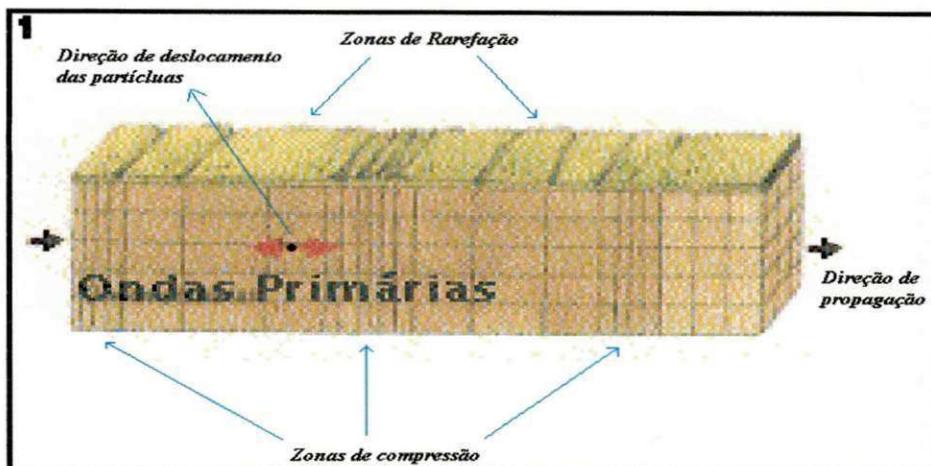


Figura 2.3 - Ondas P (adaptada de DOMINGOS, 2002).

2.2.2.2 - Ondas secundárias (S)

As ondas secundárias caracterizam-se pelo deslocamento das partículas numa, direção ortogonal, a propagação da onda, sendo, por isso, denominadas ondas de cisalhamento ou transversais, como ilustra a figura 2.4 (IRAMINA, 2002).

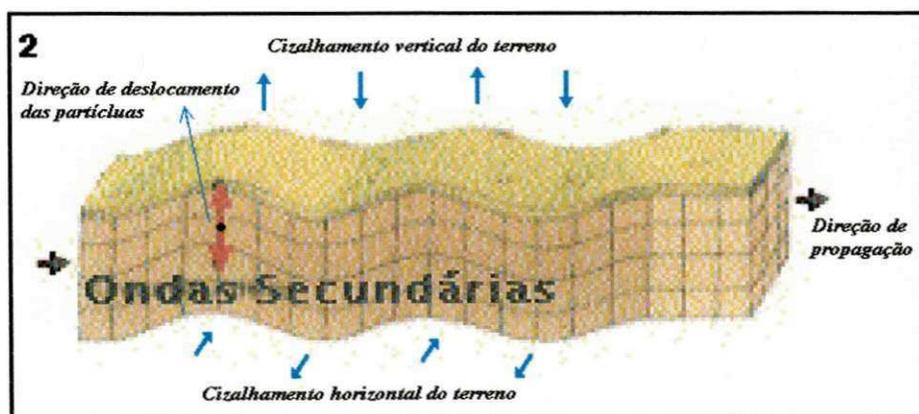


Figura 2.4 - Ondas S (adaptada de DOMINGOS, 2002).

2.2.2.3 - Ondas Rayleigh (R)

As ondas de RAYLEIGH (figura 2.5) são geradas pela excitação das ondas P e S, ocorrendo, junto à superfície do terreno, com o deslocamento elíptico das partículas (PERSSON *et al.*, 1998).

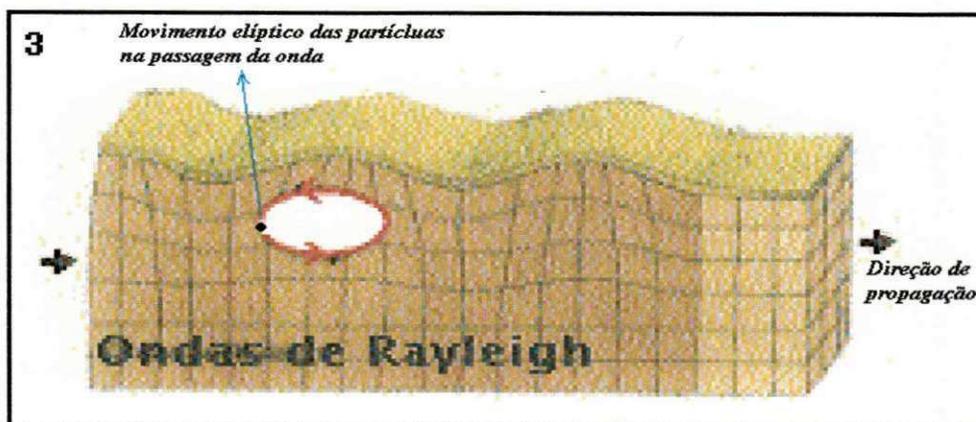


Figura 2.5 - Ondas R (adaptada de DOMINGOS, 2002).

2.2.2.4 - Ondas Love (L)

As ondas Love ocorrem também junto a superfície e estão associadas a vibrações de baixas frequências (ESTON, 1998). As partículas do meio deslocam-se num plano horizontal, como ilustrado na figura 2.6.

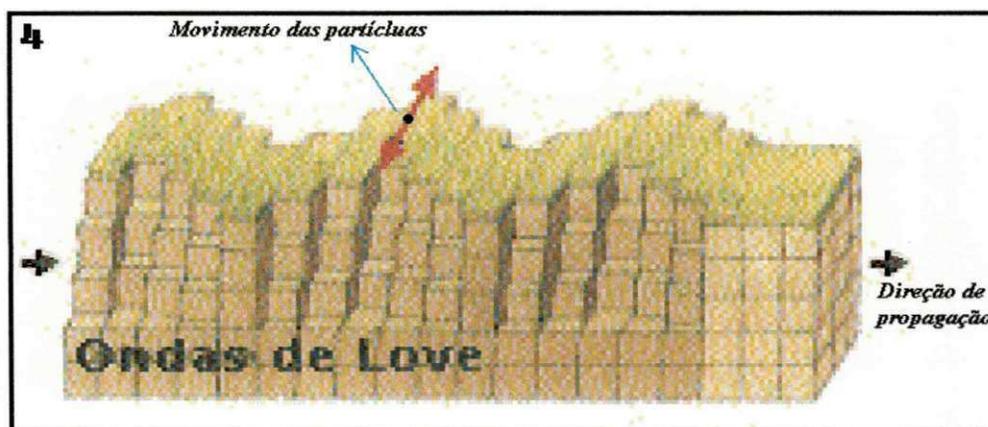


Figura 2.6 - Ondas tipo L (adaptada de DOMINGOS, 2002).

2.3.3 - Teorias de Fragmentação por Explosivo

Com a aplicação de técnicas, tais como a da fotoelasticidade em modelos físicos, interpretação por modelos matemáticos e testes de campo, verifica-se que o fenômeno de fragmentação dá-se em duas fases distintas: a *fase dinâmica*, correspondente à ação das ondas de choque, e a *fase semi-estática*, correspondendo à ação dos gases (LANGFORS, 1976; ROLIM, 1993; SILVA, 2000; JIMENO *et al.*, 1995; PERSSON *et al.*, 1993).

A fase dinâmica ocorre logo após à deflagração, com a reação de decomposição da carga explosiva confinada no interior do furo, nos primeiros 5ms. Após a ignição do explosivo, tendendo a atingir um regime estacionário segundo o plano de CHAPMAN – JOUGUET (SILVA, 2000). A partir da perturbação desse meio (figura 2.7), é transmitida, à parede do furo, uma onda de choque de compressão (esférica, cilíndrica ou tronco-cônica) extremamente forte, que se desloca expandindo-se, de forma axial e radial, através do maciço rochoso até atingir a face livre da bancada, ou um meio de impedância diferente (ROLIM, 1993).

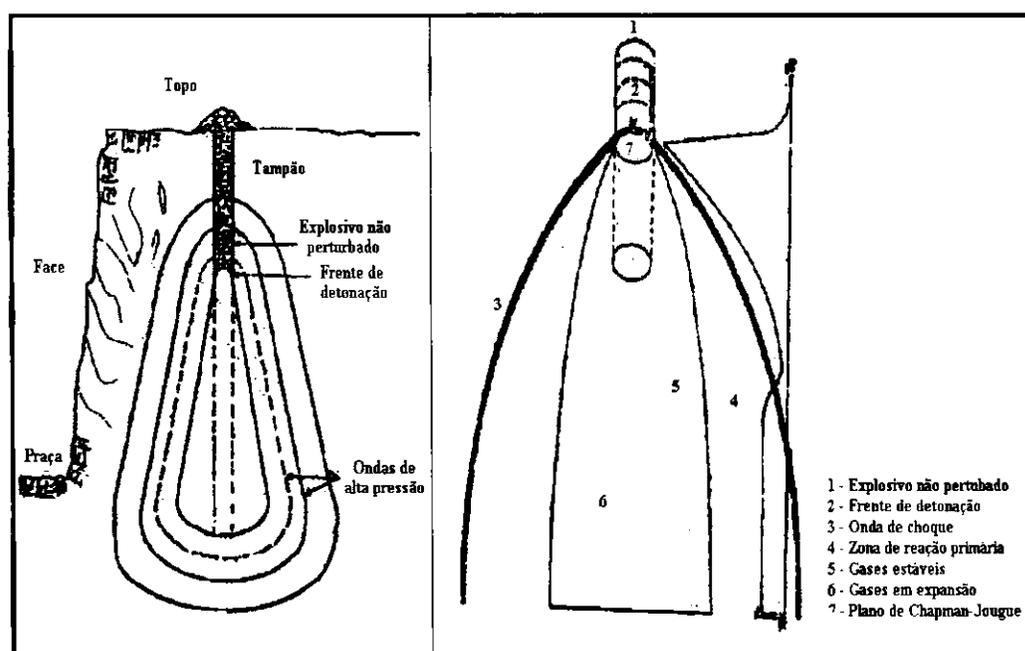


Figura 2.7 - Ignição da carga explosiva e comportamento da onda de propagação (PERSON *et al.*, 1993).

Devido à diferença de densidade entre a rocha e o ar (face livre), e a conseqüente impedância entre os meios, uma parte da onda é refratada como onda compressiva no ar e

outra é refletida como pulsos de tração na rocha (ROLIM FILHO, 1993; PERSSON, 1993; SILVA, 2000; ESTON, 1998).

Na fase semi-estática, a expansão dos gases gerados pela detonação percorrem as fendas e microfissuras resultantes da fase dinâmica, agindo como ação de cunhas, provocando a extensão das fraturas radiais, e particionando os blocos, separando-os do maciço. Normalmente, esse evento ocorre após os 50 milissegundos da ignição (figura 2.8). À medida que os gases são liberados ocorre o lançamento dos blocos, promovendo novas fraturas por choque entre blocos, consumando-se o desmonte de rocha propriamente dito (SILVA, 1993).

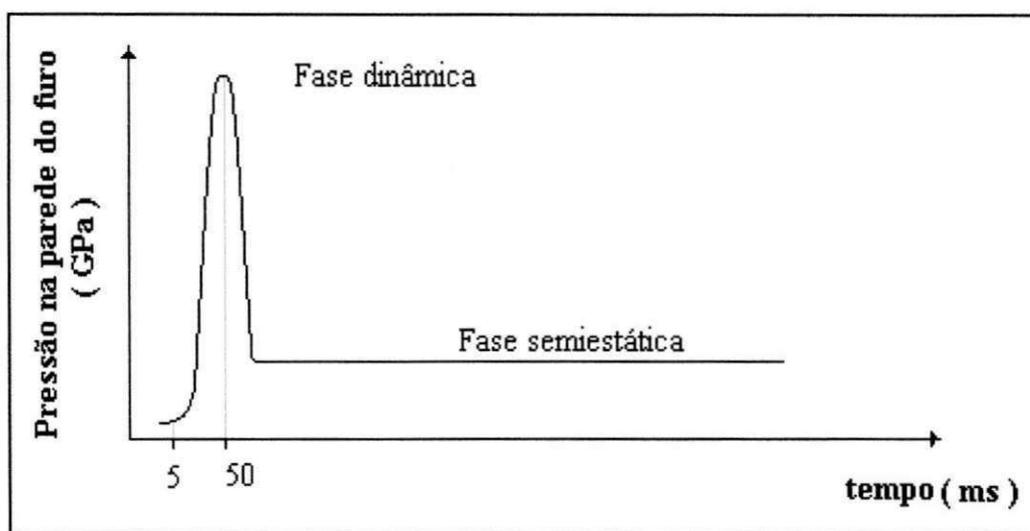


Figura 2.8 - Curva típica de variação de pressão sobre as paredes do furo com o tempo após a detonação (ROLIM FILHO, 1993).

2.3.4 - Fases das Feições no Processo de Ruptura da Rocha

Nos primeiros instantes da detonação, a energia é transmitida para o maciço rochoso, na forma de uma onda de compressão, ou uma onda de choque, que se propaga a uma velocidade de 2.000 a 6.000 m/s (Eston, 1998). A pressão da frente da onda de choque expande-se até atingir valores acima de 18.000 atm, superando a resistência dinâmica da compressão da rocha, provocando a destruição de sua estrutura inter-cristalina e inter-granular, na região das paredes do furo (SILVA, 2000).

O processo de desmonte de rocha pode ser representado por seis fases. Nas figuras 2.9a e 2.9b é ilustrado a seqüência esquemática das feições da rocha sendo fragmentada.

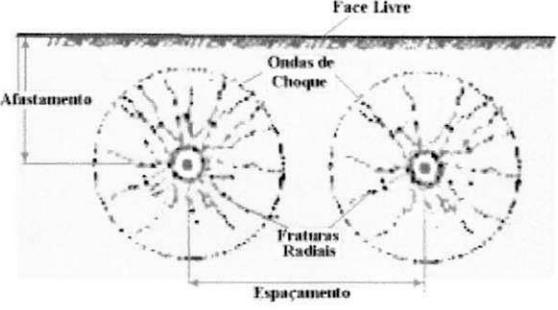
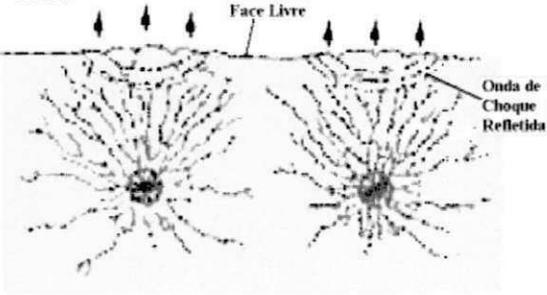
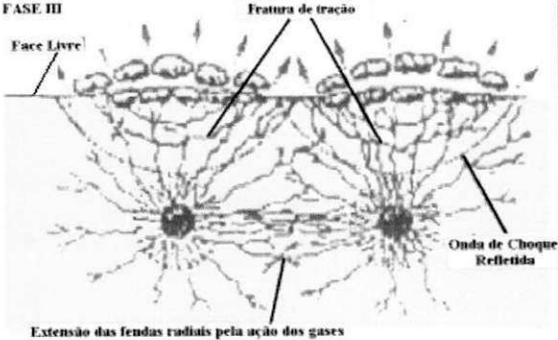
FASES	OCORRÊNCIAS
<p>FASE I</p>  <p>Face Livre</p> <p>Ondas de Choque</p> <p>Afastamento</p> <p>Fraturas Radiais</p> <p>Espaçamento</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Iniciação da carga explosiva gerando uma alta pressão; • Alargamento e microfraturamento das paredes do furo; • Começam as primeiras trincas radiais; • Surgem ondas compressivas radiais do centro do furo para todas as direções.
<p>FASE II</p>  <p>Face Livre</p> <p>Onda de Choque Refletida</p>	<ul style="list-style-type: none"> • A onda de choque atinge a face livre; • Inicia-se a reflexão da onda de tração; • Surgem deslocamentos na face livre.
<p>FASE III</p>  <p>Face Livre</p> <p>Fratura de tração</p> <p>Onda de Choque Refletida</p> <p>Extensão das fendas radiais pela ação dos gases</p>	<ul style="list-style-type: none"> • A rocha sofre roturas pela ação da onda de tração; • Extensão das fendas radiais pela ação dos gases.

Figura 2.9 a - Sequência esquemática das feições da rocha sendo fragmentada e os mecanismos de ruptura nas fases I, II e III (adaptada de JIMENO et al, 1995).

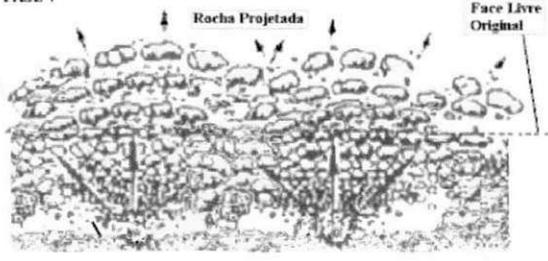
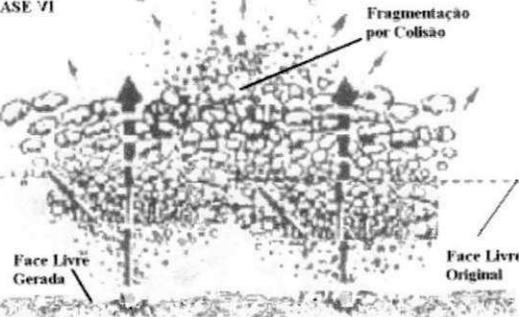
FASES	OCORRÊNCIAS
<p>FASE IV</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Inicia o deslocamento da rocha pela ação dos gases; • Ruptura da rocha por flexão.
<p>FASE V</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Os blocos soltos começam ser separados pela ação dos gases nas suas interfaces; • Os blocos começam ser deslocados pela alta pressão dos gases; • Pode surgir quebras dos blocos por cisalhamento quando a rocha adjacente se desloca em tempos diferentes.
<p>FASE VI</p> 	<ul style="list-style-type: none"> • Toda rocha desmontada é lançada; • Os blocos lançados podem ainda sofrer fragmentação por colisão; • Formação da pilha da rocha fragmentada.

Figura 2.9b - Seqüência esquemática das feições da rocha sendo fragmentada e os mecanismos de ruptura nas fases IV, V e VI (adaptada de JIMENO et al, 1995).

2.4 – Condições de Influência do Plano de Fogo

A elaboração de um plano de fogo, assim como os elementos que o compõem, é apresentada por modelos e equações, mas precisa de ajustes, conforme os resultados práticos e as condições de influência.

2.4.1 - Ponto de Iniciação na Coluna Explosiva

No estudo desenvolvido por ROLIM FILHO (1993) foi feita a análise energética qualitativa da escolha do ponto de iniciação. A figura 2.10 apresenta 5 casos de furos com carregamento uniforme de explosivo em toda a extensão da coluna de furação, exceto na região do tampão, indicando 03 pontos de iniciação.

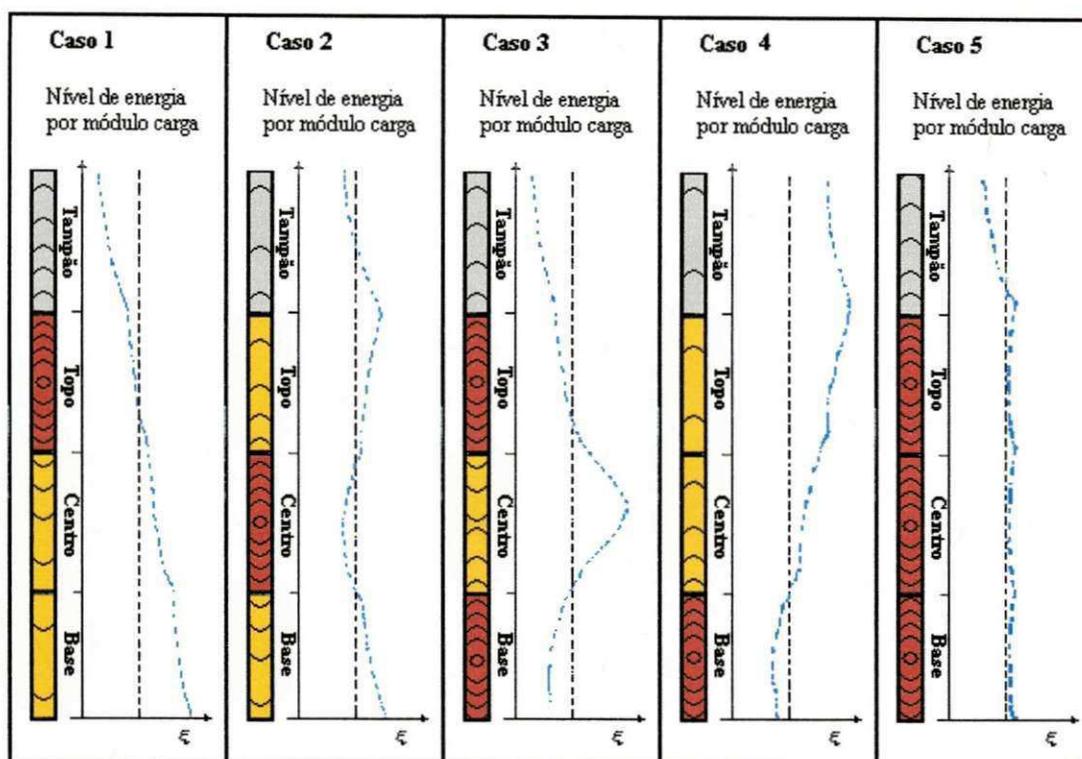


Figura 2.10 - Croquis da análise energética qualitativa na escolha do ponto de iniciação (modificado de ROLIM FILHO, 1993)

Caso 1 - A iniciação feita no topo da coluna carregada tende a promover uma distribuição da energia de fragmentação ξ linear e crescente, do início até a base do furo, quando, então atinge o máximo.

Caso 2 - Na iniciação feita no centro da coluna carregada, a energia de fragmentação ξ será variável, sendo menor nas regiões do tampão e no centro, aumentando na base e no topo da coluna.

Caso 3 - A iniciação feita simultaneamente no topo e na base do furo tende a promover uma maior energia de fragmentação ξ no centro da coluna carregada, com perdas no topo e base.

Caso 4 - Quando a iniciação se dá na base do furo, a energia de fragmentação ξ será mínima nesse ponto, e máxima no topo, tendo uma pequena queda na região do tampão.

Caso 5 - Na iniciação instantânea em toda a coluna, o nível de energia de fragmentação ξ é homogêneo, exceto na região do tampão. Isso é possível, utilizando o cordel detonante (ROLIM FILHO, 1993).

2.4.2 - Influência do Afastamento

Normalmente o afastamento (A) está relacionado com o diâmetro do furo (ϕ_f). Dependendo dessa relação, pode-se ter 04 situações quanto aos resultados da detonação, no que se refere a fragmentação do maciço. Essas situações estão qualitativamente ilustradas na figura 2.11. Casos em que foi assumido que a razão de acoplamento R estava próxima da unidade, ou seja, que o diâmetro do furo é aproximadamente igual ao do explosivo $\phi_f \approx \phi_{ex}$ (ESTON, 1998).

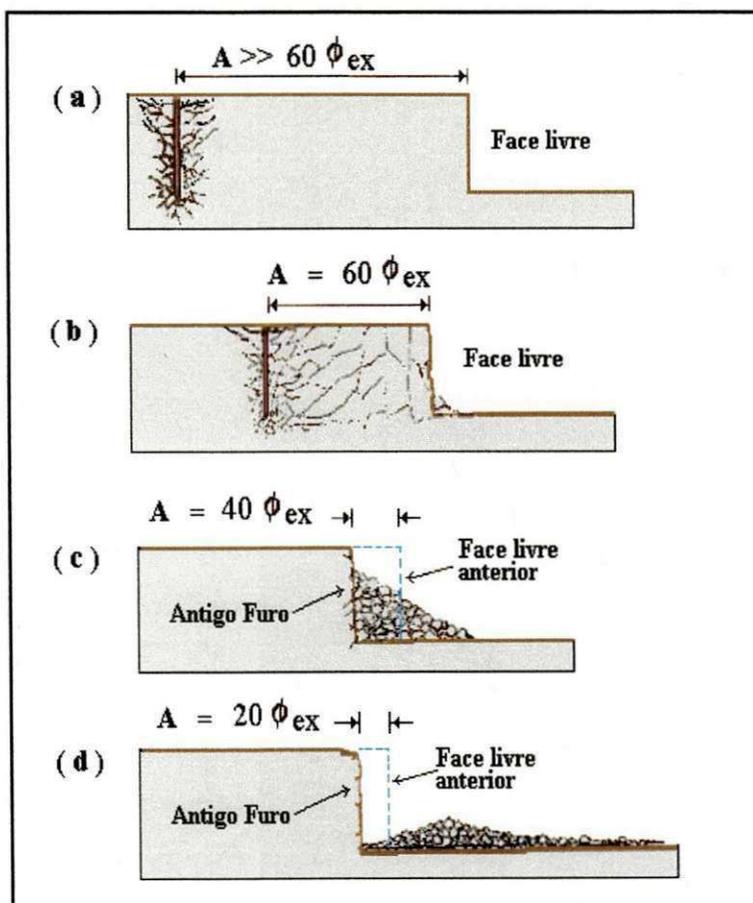


Figura 2.11 - Influência do afastamento (ESTON, 1998)

Observações feitas por alguns fabricantes de equipamentos de carregamento identificaram que a relação máxima entre o afastamento e o volume da caçamba obedece à relação da equação A, na tabela 2.2. As demais relações para afastamento, sugeridas por diversos pesquisadores, dependem do tipo de rocha, explosivo e diâmetro do furo. Todas elas visam, indiretamente, à formação de blocos numa determinada faixa granulométrica.

CLASSE	EQUAÇÃO	AUTOR	ANO
A	$A \leq 1,85 (\mu c)^{1/2}$	Herrmann	1972
B	$A \leq (2 l c^3)^{1/2}$	Langefors	1963
C	$A \leq 65,5 * \varnothing_f$	Bergman	1973
D	$25 \varnothing_f \leq A \leq 45 \varnothing_f$	Herrmann	1972
E	$20\% H \leq A \leq 50\% H$	Langefors	1963
F	$A \leq \frac{\varnothing_f [(Ga * S)^{1/2}]}{35 [C * f(E/A)]}$	Langefors	1963
G	$A \leq (\varnothing_f * L)^{1/2}$	Andersen	-
H	$A \leq 3,15 * \varnothing_f (\rho_e / \rho_r)^{1/3} D$	Konya	-

Tabela 2.2. Relação entre o afastamento e os demais parâmetros do fogo (ROLIM FILHO, 1993)

- A – Afastamento; μc – Capacidade da caçamba em jarda cúbica; $l c^3$ - comprimento da carga; \varnothing_f - Diâmetro do furo; H – Altura do Banco; L - comprimento do furo; ρ_e – Densidade do explosivo; ρ_r – Densidade da rocha; D – Diâmetro do explosivo.

2.4.3 - Aspecto Geológico e Posicionamento das Bancadas

Segundo ROLIM FILHO (1993) e DESSUREAULT (2003), entre os dados geológicos de relevância, que dão suporte técnico para a elaboração do projeto de desmonte, destacam-se:

- Dimensão da escavação;
- Feições litológicas e estruturais;
- Grau de coerência e alteração;
- Nível freático;

- Resistência da rocha;
- Densidade da rocha;
- Módulo de elasticidade;
- Anisotropia;
- Energia de fragmentação.

A escolha das frentes de desmonte são estabelecidas no planejamento uma vez que o posicionamento das bancadas com relação às feições geológicas estruturais (falhas, juntas, fraturas, etc.) têm influência nas condições de segurança e perdas energéticas (ROLIM, 1993; CINTRA, 1993; DESSUREAULT, 2003).

A figura 2.12 ilustra 06 condições representativas dos possíveis limites para escolha do posicionamento da bancada em relação as feições geológicas.

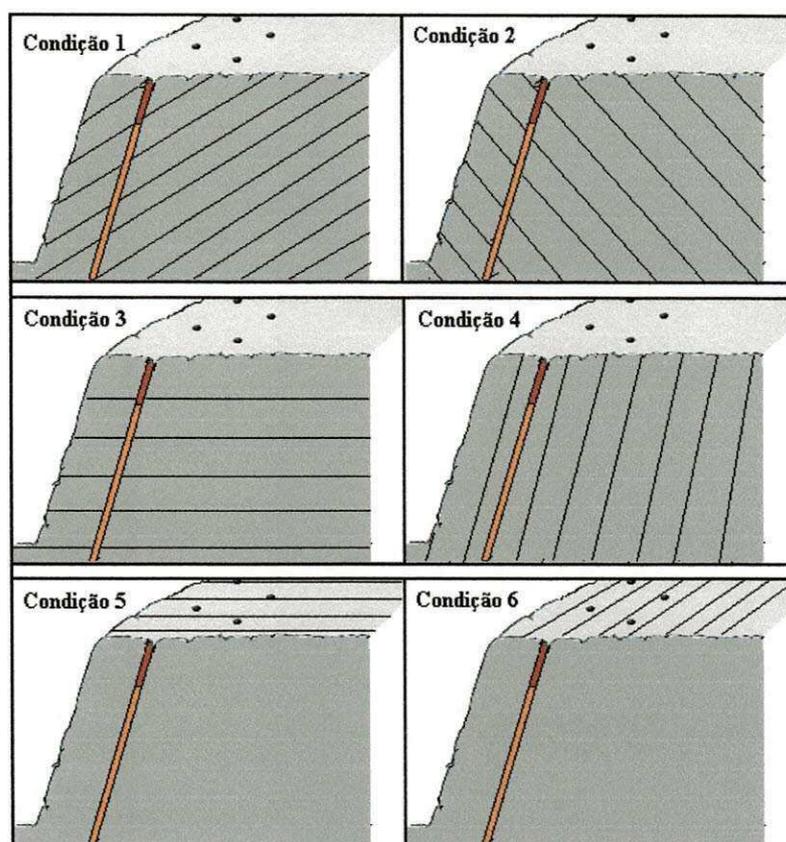


Figura 2.12 - Posição do banco em relação às feições estruturais (modificado de ROLIM FILHO, 1993).

- **Condição 1:** é considerada desfavorável, pois possui paredes instáveis com propensão a rupturas planares, provocando possíveis falhas em furos adjacentes, ultralancamento, overbreak e, conseqüentemente, formação de matacões (CINTRA, 1993).

- **Condição 2:** apresentado ótimo nível de segurança e uma transmissão de ondas satisfatória, porém, essa condição tende a produzir repé (ROLIM FILHO, 1993).

- **Condição 3:** ilustra fraturas horizontais ou sub-horizontais, permitindo uma boa transmissão de ondas, tendo em vista que a sua propagação se dá paralelamente aos planos de descontinuidades, permitindo que a mesma alcance a face livre com reflexões intermediárias mínimas. Ainda nessa condição, pode-se obter pisos regulares, desde que haja um ajuste entre o pé da bancada e o nível de uma das descontinuidades.

- **Condição 4:** a segurança aspira cuidados no ângulo do talude, pois pode ocorrer ruptura por tombamento; por outro lado, pode-se tirar proveito mantendo as faces do talude remanescente em condições excepcionais com excelente nível de segurança. Nesse caso, pode ocorrer pequenas reflexões intermediárias da onda de choque, antes de chegar a face livre, sofrendo atenuações e provocando perda da energia na fase dinâmica de ruptura de rocha na proximidade da face livre (DESSUREAULT, 2003).

- **Condição 5:** as feições não são muito favoráveis ao desmonte, provocando grandes perdas de energia (ROLIM FILHO, 1993).

- **Condição 6:** as feições podem ser associadas as condições 1, 2 ou 4.

2.4.4 - Distribuição e Seqüência dos Furos

O dimensionamento da malha de furação tem grande influência na distribuição da energia. A figura 2.13 ilustra duas possíveis condições de projeto de plano de fogo. Quando a elaboração de um plano de fogo leva em consideração o grau de fraturamento, é, conseqüentemente, necessário que se faça uma análise para se determinar a adequada distribuição da energia de cada furo (DESSUREAULT, 2003).

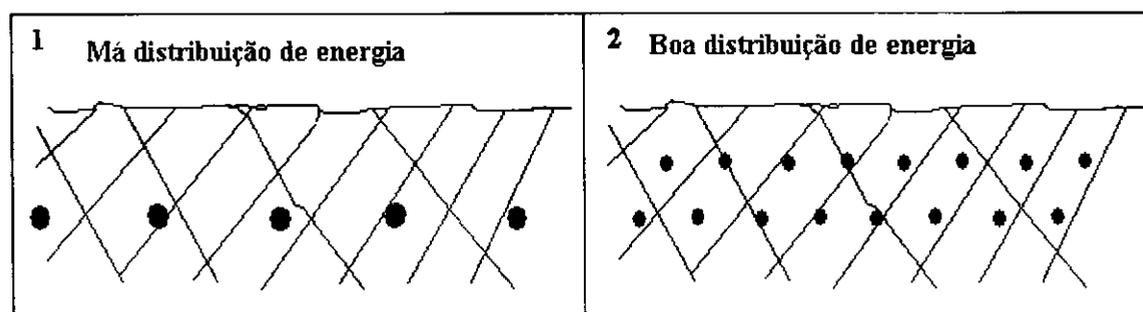


Figura 2.13 - Redistribuição dos furos nas malhas (modificado de CINTRA, 1993).

Segundo CINTRA (1993), para uma pedreira onde o afastamento é da ordem de 4,5 m, o movimento inicial da face ocorre após 10 a 12 ms. Quando se aumenta o número de linha de saída, o movimento da massa que era horizontal começa a se verticalizar (Figura 2.14). Isso contribui para geração de repés, pilhas altas e compactas, deformidade do maciço remanescente, etc.

A correção dessas anomalias é feita pelo sequenciamento da iniciação utilizando-se de elementos de retardos (DESSUREAULT, 2003).

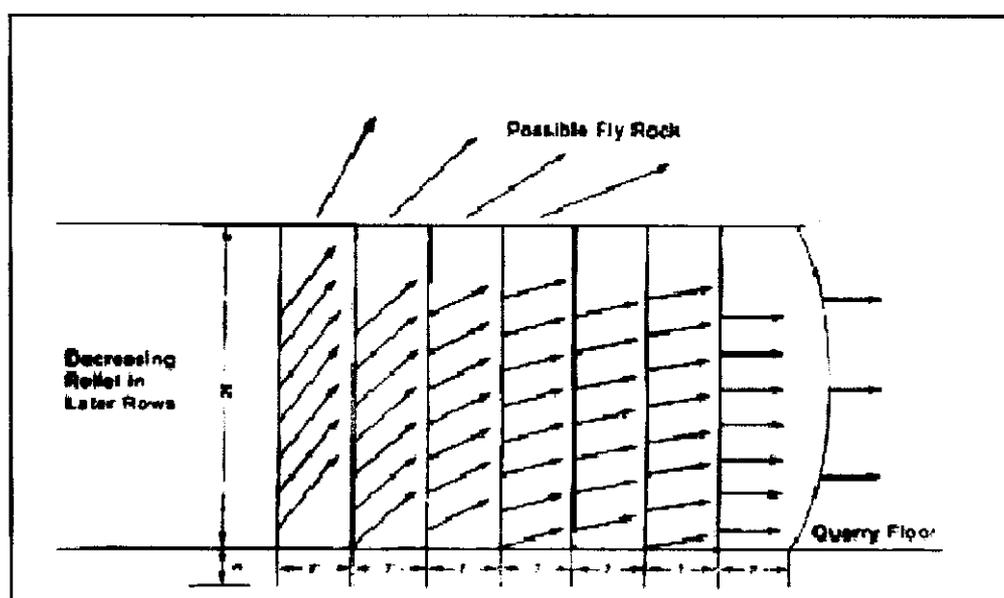


Figura 2.14 - Verticalização do lançamento em função do aumento do número de linhas (DESSUREAULT, 2003).

2.5 – Impactos Ambientais Incidentes

Um dos principais parâmetros que devem ser levados em consideração no projeto do plano de fogo são os efeitos nocivos causados ao meio ambiente. Os efeitos causados pela detonação podem ser de dois tipos: produtivos ou improdutivos. O primeiro representa o trabalho útil provocado pela energia dos explosivos, e o segundo está relacionado aos danos ambientais causados pela energia não aproveitada.

Entre os impactos ambientais causados pelo desmonte de rocha em pedreiras podemos destacar:

- a) **Ultralaçamentos** – São fragmentos lançados a distâncias além da área de segurança prevista.
- b) **Sopro do ar (Sobre-Pressão)** – Trata-se do deslocamento de ar promovido durante o desmonte.
- c) **Vibração do terreno** – Está relacionado com as ondas de choque que não realizam trabalho útil no desmonte e que são absorvidas pelo terreno, podendo afetar estruturas na região circunvizinha.
- d) **Ruído** – Perturbação sonora que se propaga na atmosfera.
- e) **Gases tóxicos** – São os gases gerados tóxicos gerados pela detonação dos explosivos
- f) **Particulado** – Poeira (partículas sólidas) em suspensão produzida pela detonação.

Para redução desses impactos é necessário que se faça monitoramentos contínuos com objetivo de verificar os níveis de vibração, de particulado, poluição sonora, ultralaçamentos, dentre outros, e ajustados segundo as normas vigentes.

Para os casos em que tais impactos se encontrem acima dos níveis permitidos pelas normas devem ser tomadas medidas tais como, reajuste da malha, utilização de elementos de retardos, construção de cinturões verdes, montagem de filtros de ar, e outros.

2.6 - Conclusão

Este estudo mostrou que a busca de uma boa fragmentação e disposição do material depende do conhecimento de muitas variáveis. Variáveis como as características dos explosivos, os mecanismos de detonação, morfologia, seqüência da detonação, etc.

Além do produto gerado pela detonação ter que atender as especificações dos processos seguintes tem que está dentro das normas ambientais e de segurança. Para isso é também necessário mais estudos e aplicação de novas tecnologias.

CAPÍTULO 3

3 - SISTEMAS DE INICIAÇÃO

A necessidade de se iniciar a detonação das cargas explosivas, com segurança, levou ao desenvolvimento dos sistemas de iniciação (PERSSON *et al.*, 1993). Atualmente, os explosivos são elaborados ou fabricados com uma menor sensibilidade à iniciação, objetivando aumentar sua segurança no transporte e manuseio (CROSBY, 1996). Esses sistemas de iniciação têm também outras finalidades, tais como: melhorar a fragmentação, seqüenciar a detonação e atenuar impactos ambientais (CINTRA, 1993).

Atualmente os principais sistemas de iniciação utilizados no Brasil são: o pirotécnico, o nonel e o elétrico (Figura 3.1). Mas, também são aplicados os sistemas eletrônico e eletromagnético. Esse trabalho teve como objetivo principal o estudo do sistema de iniciação com espoleta eletrônica.

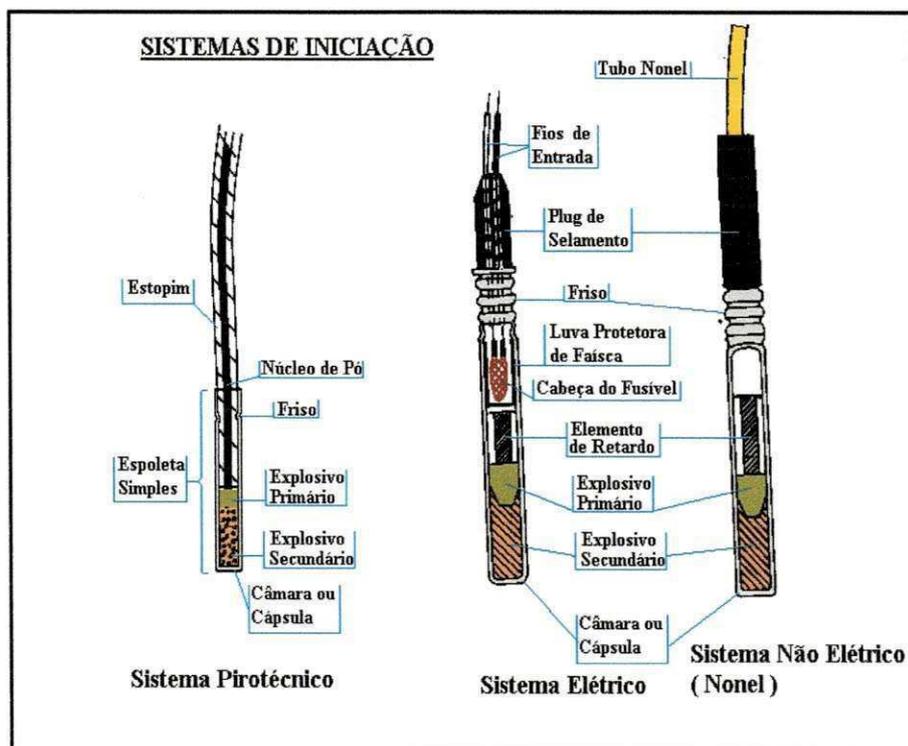


Figura 3.1 - Sistemas de Iniciação (modificado de PERSSON *et al.*, 1996).

A espoleta deve ser escorvada, em um cartucho do explosivo, a um reforçador (*booster*), ao cordel detonante ou ao tubo *nonel*. Uma vez iniciada as escorvas, o restante da seqüência de detonação das cargas explosivas ocorre por simpatia. A seqüência de detonação pode ser retardada por outros acessórios tais como elementos de retardo.

3.1 – Sistema Pirotécnico

O sistema pirotécnico é considerado o método mais simples de iniciação de cargas explosivas, sendo precursor dos sistemas de iniciação, e ainda muito utilizado na mineração e operações afins. Compõe-se de uma espoleta simples associada ao estopim através de amolçamento (figura 3.2). O estopim é constituído por um núcleo calibrado de pólvora, envolvido por um tecido, e coberto com camada impermeável. Já a espoleta, é constituída por uma capsula metálica, contendo uma carga primária de azida de chumbo, e uma carga secundária de Nitropenta (PERSSON *et al.*, 1993).

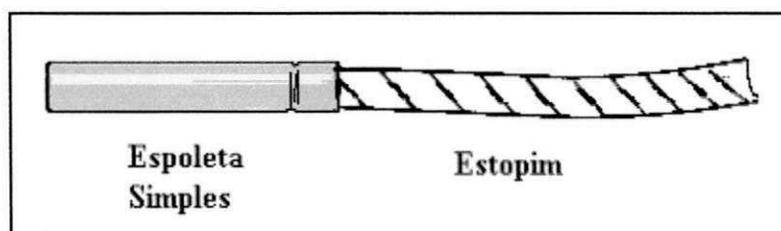


Figura 3.2 - Espoleta simples.

O sistema pirotécnico é acionado por uma fonte de calor no estopim, provocando uma queima em toda sua extensão, a uma velocidade constante de aproximadamente, 2,3 s/m, até chegar à espoleta. A espoleta tem sua carga primária detonada pela ação da chama do estopim, que, por simpatia, detonará sua carga principal, iniciando finalmente a escorva.

Esse sistema pirotécnico pode ser associado ao cordel detonante, que amplia a capacidade de iniciação para vários furos carregados. Normalmente, essa associação exige retardos de superfície para seqüenciar as cargas explosivas. O cordel detonante é um acessório explosivo similar ao estopim, porém é mais flexível, resistente e impermeável,

sendo constituído com núcleo de nitropenta, cuja energia de detonação propaga-se a uma velocidade de, aproximadamente, 7000 m/s.

3.2 – Sistema Elétrico

Nesse sistema de iniciação, a espoleta (figura 3.3) é acionada pela corrente elétrica emitida por um gerador (explosor, bateria, etc.), através de dois fios condutores isolados, conectados a ela por um selamento na extremidade aberta da cápsula. No interior da espoleta, as extremidades dos fios são fechadas por uma ponte resistiva, que ao receber a corrente, se funde gerando calor suficiente para deflagrar uma carga primária.

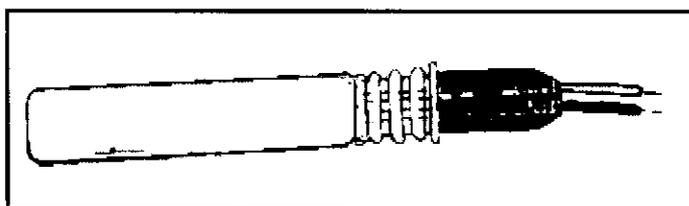


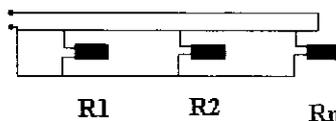
Figura 3.3 - Espoleta elétrica.

Entre o fusível e a carga primária pode existir ou não um elemento de retardo, para atuar na detonação na ordem de milissegundos.

O sistema elétrico é formado por um circuito elétrico resistivo. As espoletas escorvadas dentro do furo são ligadas, na linha tronco, em série ou em paralelo. A corrente (I) fornecida pelo explosor é calculada com as equações de circuito elétrico resistivo e de acordo com a especificação da espoleta usada, conforme a figura 3.4.

Para circuito paralelo:

$$I_p = I_1 + I_2 + \dots + I_n \quad (\text{Equação 1})$$



R1 R2 Rn

ou

Para circuito em série:

$$I_s = I_1 = I_2 = \dots = I_n \quad (\text{Equação 2})$$

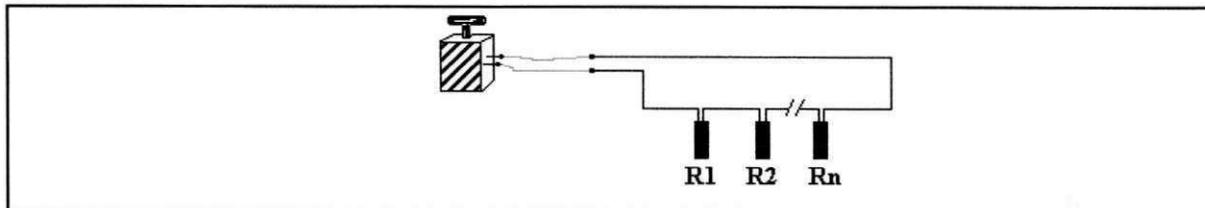


Figura 3.4 - Equações usadas para cálculo da corrente necessária à detonação de um sistema elétrico de iniciação.

Onde :

I_p - corrente gerada pelo explosor para acionar circuito paralelo;

I_s - corrente gerada pelo explosor para acionar circuito em série;

R - resistência de cada espoleta;

n - número de espoletas

Esse sistema de iniciação requer normas mais rigorosas de segurança na sua aplicação.

3.3 – Sistema Não-Elétrico (Nonel)

Consiste em um sistema silencioso (Figura 3.5), que permite um acionamento pontual das cargas explosivas. O sistema é acionado, inicialmente, através de um tubo plástico, revestido internamente com 8 a 20 mg/m de ciclo-tetra-metileno-tetranitrato (HMX) e alumínio, que propaga interiormente uma energia de alta velocidade (na ordem de 2000 m/s) provocado pelo fenômeno chamado de "efeito canal" (SEN, 1995).

A energia propaga-se pelo tubo, sem afetar sua área externa até a espoleta, contendo ou não o elemento de retardo. A partir daí, o processo é igual às demais espoletas.

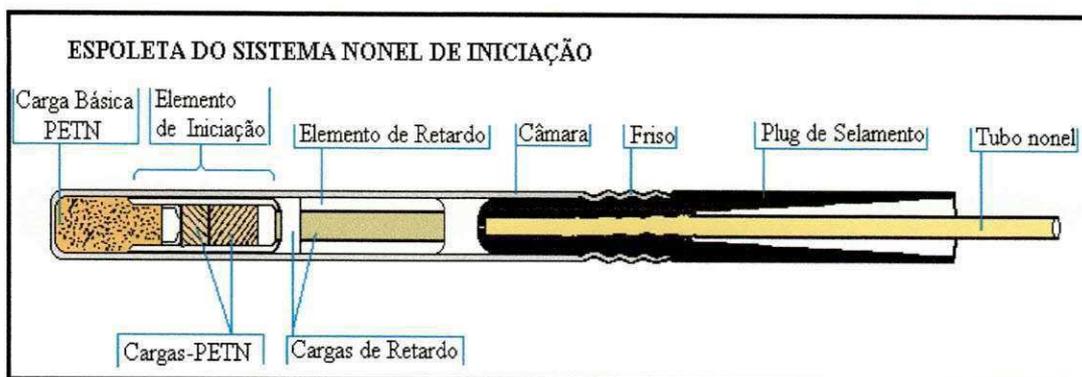


Figura 3.5 - Sistema Nonel de Iniciação (adaptado de PERSSON et al, 1996).

A carga explosiva que reveste o tubo é iniciada por um acionador apropriado ou por outro sistema de iniciação.

3.4 - O Sistema Eletromagnético (Magnadet)

O sistema de iniciação eletromagnético (Figura 3.6) foi desenvolvido a partir do aperfeiçoamento da espoleta elétrica convencional, porém a transferência da energia elétrica se dá, indiretamente, por indução eletromagnética entre o enrolamento primário e secundário de um pequeno transformador, que acionará uma espoleta idêntica à elétrica (PERSSON *et al.*, 1996).

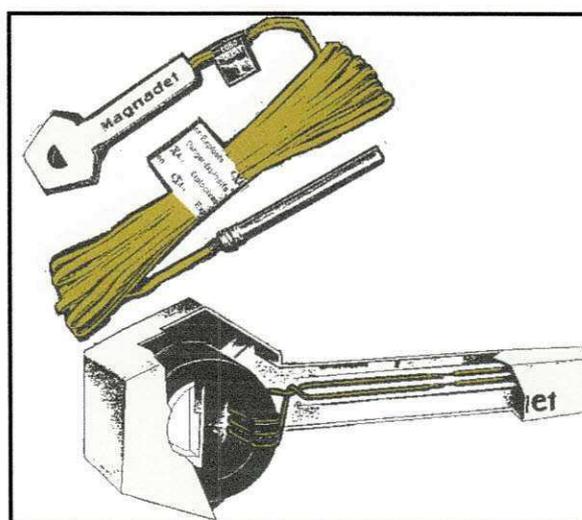


Figura 3.6 - Sistema Magnadet (modificado de CROSBY, 1998).

Esse sistema utiliza uma frequência mínima de 15 kHz, fornecida por um aparelho especial, que pode acionar até dez linhas programadas em intervalos de tempo diferentes (CROSBY, 1998). A combinação desses intervalos, em conjunto com os retardos das espoletas, fornece uma grande variedade de opções de tempos de iniciação, que são controlados no painel de um explosor apropriado (Figura 3.7).

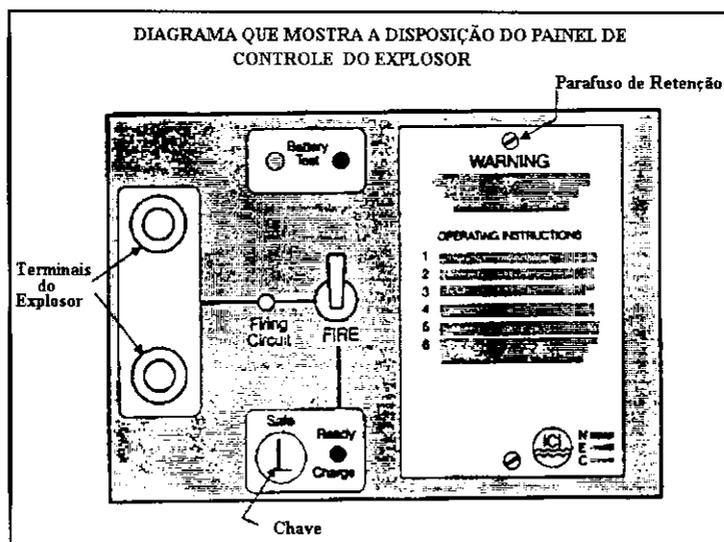


Figura 3.7 - Painel de controle do explosor para detonador magnadet (CROSBY, 1998).

Como esse sistema trabalha com frequências muito acima das correntes elétricas normalmente encontradas no campo (de 50 e 60 Hz), oferece mais eficiência, precisão e segurança na sua aplicação. A voltagem utilizada (de 1 a 2 volt) também é considerada segura, por ser diferente das voltagens normalmente encontradas nas proximidades de uma operação mineira (KONYA,1995).

3.5 – Sistema Eletrônico

O sistema de iniciação desenvolvido pela Nitro Nobel com a espoleta eletrônica (Figura 3.8), é constituído por dois componentes distintos: a espoleta eletrônica e os mecanismos computadorizados de acionamento para o desmonte (PERSSON *et al*, 1993).

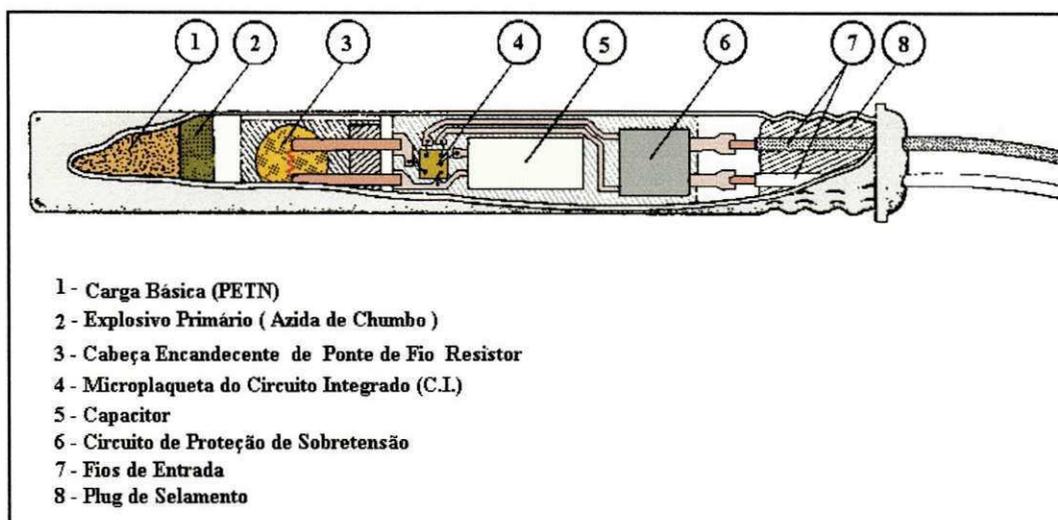


Figura 3.8 - Figura da Esopoleta Eletrônica de Nitro Nobel (adaptado de PERSSON *et al.*, 1998).

Trata-se de um sistema similar ao elétrico, porém possui dispositivos eletrônicos que proporcionam maior segurança, versatilidade e precisão, nos ajustes de tempo, se comparado aos demais sistemas de iniciação. Normalmente, é aplicado em situações especiais, que exigem um controle rigoroso nos ajustes dos tempos de retardo.

O sistema eletrônico de iniciação já se encontra em sua segunda geração. Nos capítulos posteriores serão feitas abordagens mais específicas sobre a espoleta eletrônica.

CAPÍTULO 4

4 - MONITORAMENTO E AVALIAÇÕES DO DESMONTE

Como as propriedades de um maciço rochoso variam espacialmente, cada rocha reage de maneira diferente na interação explosivo/rocha, de acordo com a localização dos pontos de aplicação da energia transferida, pelo explosivo, no maciço rochoso (LANGFORS, 1963). Daí a necessidade de estudar, classificar o maciço e adotar um plano de fogo que se adapte a cada situação específica, procurando atingir a fragmentação desejada e causando menos danos ao meio ambiente.

Alguns equipamentos, softwares e outras tecnologias disponíveis, são utilizados para gerar dados e fornecer informações, com a finalidade de se obter um método mais adequado na operação de desmonte para cada condição de campo.

Entre os métodos de monitoramento e avaliação do desmonte de rochas utilizados atualmente no Brasil, destacam-se:

- Perfilagem da bancada;
- Medição da orientação dos furos (*boretrack*);
- Monitoramento sismográfico;
- Medição de velocidade de detonação;
- Verificação da pressão de detonação;
- Medição dos tempos reais de retardo;
- Monitoramento de trincas nas estruturas próximas;
- Fotografia de alta velocidade e vídeo de alta definição;
- Análise granulométrica da fragmentação.

4.1 – Perfilagem da Bancada

Existe a necessidade de fazer o mapeamento da face livre, assim como a perfilagem da bancada, criando um modelo tridimensional, a partir do qual se pode traçar seções. Para isso, pode-se empregar a estação total que gera pulsos de raios laser nas faces da

bancada e outras estruturas, criando uma malha de pontos em três dimensões (3D), sem a necessidade dos cristais refletores no objetivo. A figura 4.1 mostra o posicionamento do equipamento, frente da bancada, na operação de perfilagem.



Figura 4.1 - Operação de perfilagem das bancadas (NOJIRI *et al.*, 2002).

Com a bancada já mapeada, são feitas análises tridimensionais da regularidade superficial da face livre, verificando a existência de depressões, saliências, repés, desníveis, etc.

Existem vários softwares utilizados para fazer análise dos perfis em cada furo, por toda sua extensão, verificando a persistência do afastamento, pois, nessas condições, tende a haver uma redução por sobre-escavação e aumento na presença de repés, conforme mostra a figura 4.2. Tais saliências provocam uma redução local nos elementos do plano de fogo, como do afastamento, promovendo, assim, um aumento no fator de carregamento nessa região da face, podendo, conseqüentemente, ocorrer ultralançamentos e perda da energia de detonação dos furos locados na mesma seção.

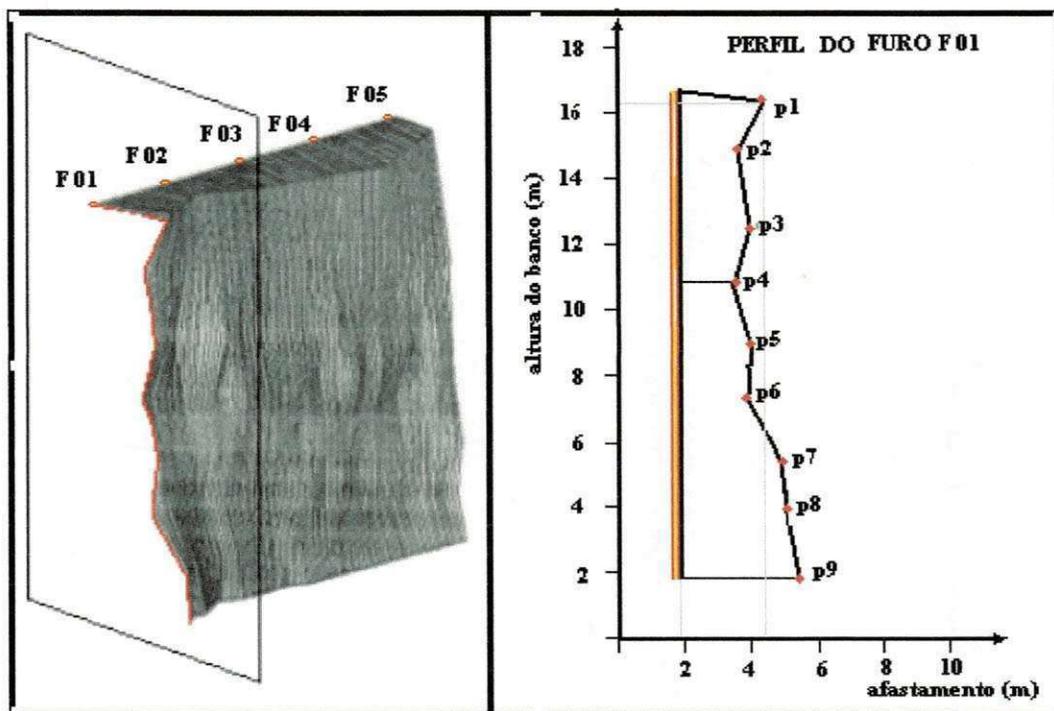


Figura 4.2 - Modelagem da face livre em 3 dimensões e análise do perfil vertical em uma das seções da face livre (modificado de BROWN, 1997).

Uma vez identificado e localizado o problema, pode-se corrigi-lo ou atenuá-lo relocando os furos, fazendo um controle adequado da programação de iniciação dos furos, alterando o fator de carregamento, entre outras ações.

4.2 – Medição da Orientação dos Furos

Um método usado para se verificar e avaliar os possíveis desvios dos furos consiste em se utilizar um medidor de desvio de perfuração, conforme figura 4.3, com o qual se faz um levantamento contínuo de possíveis desvios em toda a extensão dos furos. Com esse sistema, são medidos os desvios frontais e laterais ocorridos por ocasião da perfuração.

O medidor de desvio de perfuração é composto por um conjunto de hastes rígidas e pivotadas com 01 m (um metro) de comprimento, para a descida de um sensor (inclinômetro) em toda a extensão do furo, que faz leitura metro a metro, levando, em média, 3 segundos para cada registro. Os dados são armazenados em uma unidade de controle portátil e visualizado no display (NOJIRI *et al.*, 2002).

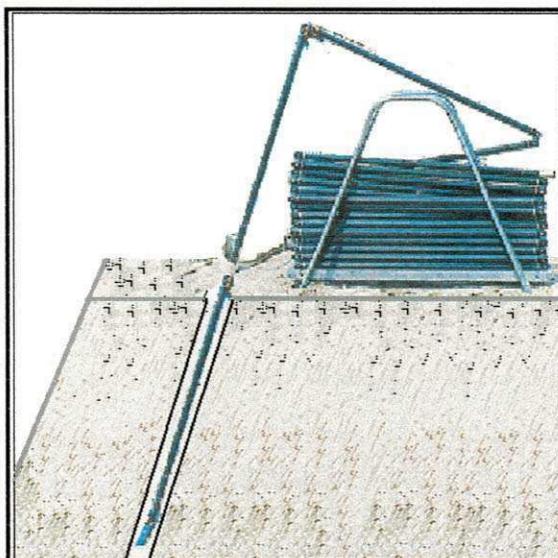


Figura 4.3 - Medidor de desvio de perfuração boretrack.

Com o auxílio do programa Winprof 32 bit, obtém-se a projeção da orientação espacial de cada furo, sendo logo após associados ao levantamento anterior da projeção espacial da face livre, para posterior análise.

Com os dados da perfilagem, com seu posicionamento real em relação à face livre, é apresentado: o perfil com vista frontal e em planta. Sendo possível fazer a correção do carregamento de explosivo em cada furo. Segundo critérios de adequação do explosivo ao afastamento real obtido, e definido pelo plano de fogo previamente estabelecido, conforme figura 4.4.

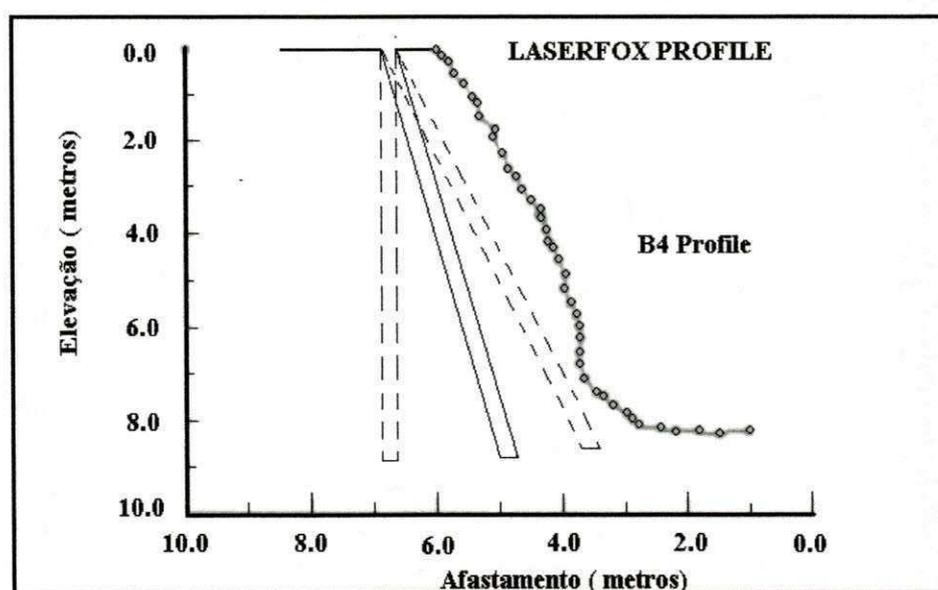


Figura 4.4 - Avaliação de desvio de furação (modificado de KONYA, 1997).

4.3 – Monitoramento Sismográfico

Para controle e monitoramento das vibrações e sobrepressão acústica ocasionadas pelas detonações, são utilizados sismógrafos, aplicados na engenharia (figura 4.5).

Como grande parte das pedreiras, para produção de agregado estão situadas próximas aos centros urbanos, há a necessidade de se ter um controle mais rígido das vibrações promovidas pela ação dos explosivos usados no desmonte (ESTON, 1998). As ondas de choque provocadas pelo desmonte, que não geram trabalho útil (fragmentação e lançamento da rocha desmontada), são absorvidas pelo maciço, gerando perturbações sísmicas (vibração do terreno).

Apesar da velocidade e a frequência da onda serem fatores importantes em termos de danos ambientais, no Brasil, as normas consideram somente a velocidade de partícula (da ordem de milissegundos).

Os sismógrafos de engenharia são utilizados para monitorar a velocidade de partículas, em suas três componentes: transversal (PPVt), longitudinal (PPVl) e vertical (PPVv). A partir das três componentes obtém-se a velocidade de partícula resultante (PPVr) através da equação $PPVr = \sqrt{[(PPVt)^2 + (PPVl)^2 + (PPVv)^2]}$, com o objetivo de se adequar aos parâmetros das normas da NBR.



Figura 4.5 - Sismógrafo de engenharia.

4.4 – Medição de Velocidade de Detonação (Vod)

Um dos sistemas utilizados para monitorar a Velocidade de Detonação (Vod) é denominado SLIFE (*Shorted Location Indication by Frequency of Electrical Resonance System*), e mede a velocidade de detonação contínua de explosivos ao longo do furo. Esse sistema baseia-se na variação de frequência de ressonância num cabo coaxial convencional, colocado no interior do furo, e que é consumido durante a detonação, variando seu comprimento (figura 4.6). É aconselhável o uso de iniciador pontual que atinja os sensores a partir do início da detonação, como, por exemplo, os iniciadores nonel e os detonadores eletrônicos.

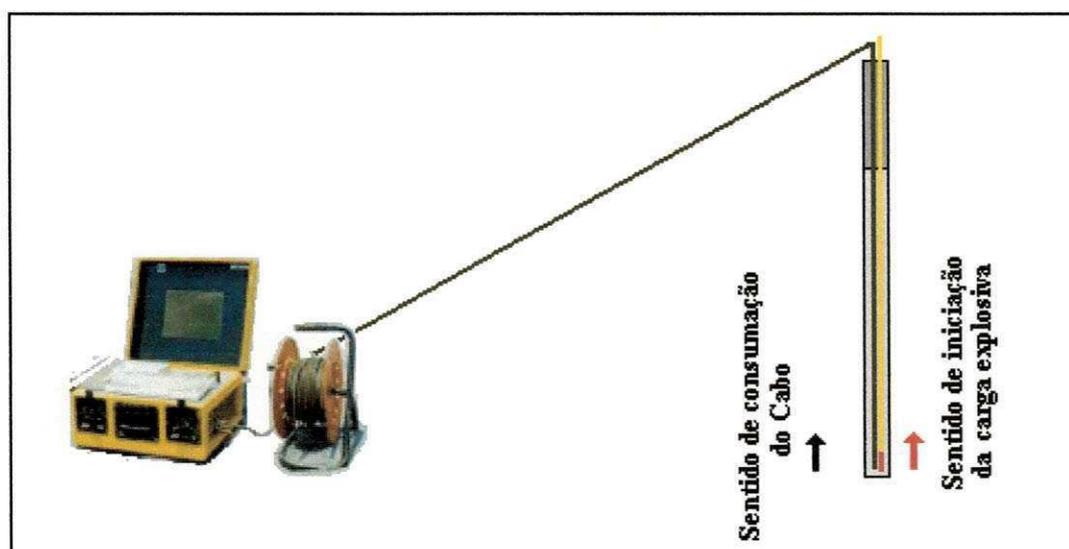


Figura 4.6 - Medidor de Velocidade de Detonação do Sistema SLIFER.

A partir de softwares associados pode-se analisar os resultados obtidos através de um gráfico de distância de explosivo detonado na coluna (m) x tempo (ms) (Figura 4.7). Isso permite manter e verificar o controle entre a Vod especificada pelo fabricante e a real.

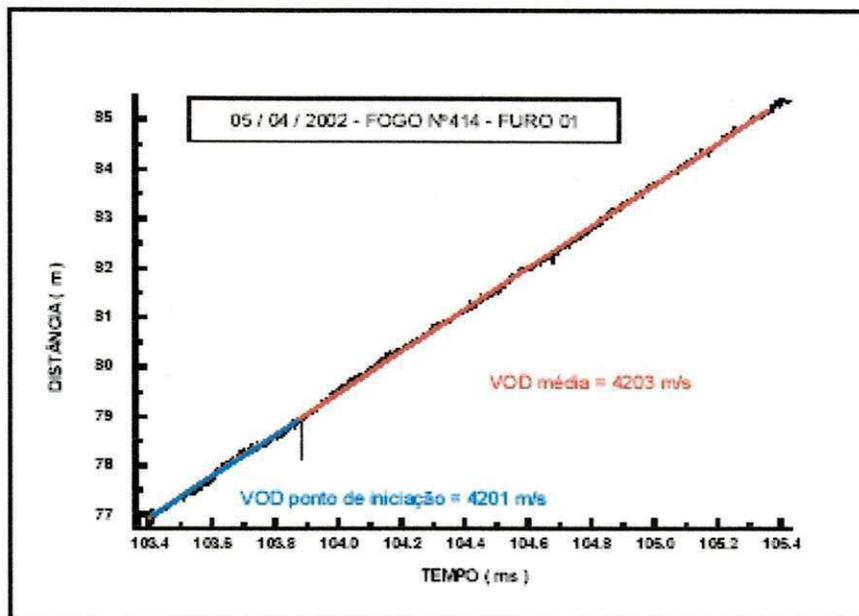


Figura 4.7 - Modelo de gráfico para verificação da Vod.

Existem vários outros métodos para registrar a Vod de um explosivo, como, por exemplo, os sistemas de sondas resistivas, fibras óticas, cabos paralelos, etc.

A Vod tem importância no processo de fragmentação, e, de acordo com CROSBY (1998), tem relação direta com a fase dinâmica na qual a onda de choque gerada promove tensões de tração e compressão, promovendo o fraturamento do maciço rochoso. Explosivos com alta velocidade de detonação têm mais eficiência em rochas mais competentes e pouco fraturadas (SILVA, 1998).

4.5 - Pressão de Detonação

Na fase semi-estática de uma detonação, na operação de desmonte de rocha com explosivo, é gerado gás de alta pressão. Esse gás pulveriza as paredes dos furos e penetra nas fendas e/ou descontinuidades, fazendo com que estas sejam reabertas. Essa ação também promove a fragmentação do material, fazendo ainda com que haja deslocamento e lançamento do maciço rochoso desmontado (ROLIM FILHO, 1993).

Existem várias formas de monitorar a pressão de detonação. Uma delas consiste em um dispositivo constituído de um tubo de PVC, conectado a um sensor de pressão de gás (piezelétrico). Esse dispositivo é preparado e introduzindo, previamente, em um furo paralelo

e adjacente ao furo carregado (Figura 4.8). Os registros de leitura são gravados fora do furo, em um receptor/gravador.

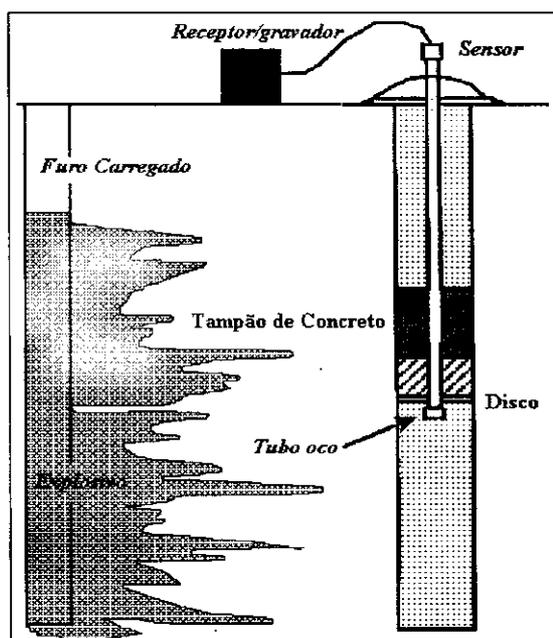


Figura 4.8 - Instrumentação para monitorar pressão de gás (MUNARETTI, 1998).

4.6 - Medição de Tempos Reais de Retardo

Com o sistema Slife é possível também verificar os tempos reais dos retardos utilizados em uma detonação. Para isso, usa-se um equipamento com mais de um canal. O SpeedWave, por exemplo, é um equipamento de 4 canais, que permite medir até quatro tempos de iniciação.

Pode-se ainda utilizar outros métodos, como, por exemplo, o sistema de testes, por amostragem, para controle de dispersão do tempo de retardos (Figura 4.9). As medidas são feitas usando-se uma combinação simples de circuitos elétricos, gravadores e relógios de alta precisão. A precisão da medida é função do tempo de retardo e da taxa de amostragem do gravador (CAMERON *et al.*, 1990).

A precisão e o ajuste dos tempos de retardo são fatores importantes no processo de fragmentação e no controle das vibrações (CINTRA, 1993). Essa precisão é expressa pelo desvio padrão entre o tempo fornecido pelo fabricante (ideal) e o medido.

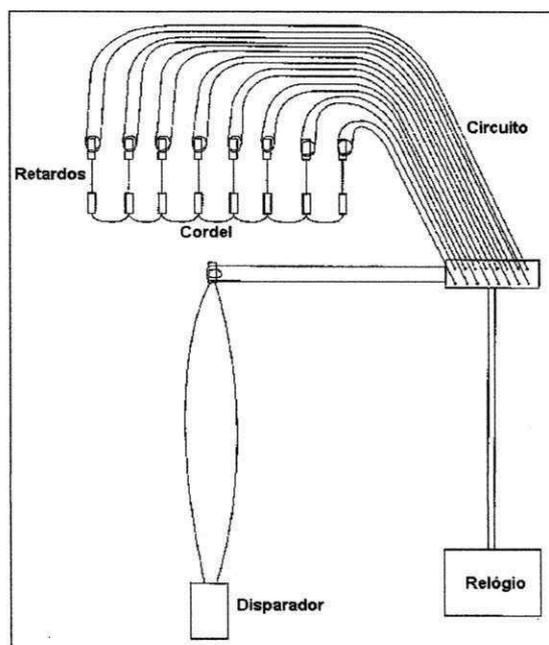


Figura 4.9 - Teste de dispersão dos tempos de retardos (CAMERON *et al.*, 1990).

A medida de dispersão dos tempos de espera é um problema que afeta a detonação, quando se necessita usar muitos retardos. Medidas feitas por CAMERON *et al.*, (1990), demonstraram uma dispersão nos tempos de até 14%, em retardos de 65 ms. (MUNARETTI, 1997).

Com conhecimento da dispersão nos tempos de retardos, pode-se evitar possíveis problemas, principalmente ao se elaborar um plano de fogo. Para o desmonte em que se requer o uso de um grande número de linhas e furos por malha, torna-se mais difícil o seu planejamento e execução.

As cargas explosivas dos furos devem detonar de modo que sempre tenham uma face livre temporária entre cada linha, suficiente para lançar e armazenar o material desmontado. Se os retardos não fornecerem o tempo suficientemente precisos para criar um afastamento “dinâmico”, diversos problemas podem ocorrer, tais como: má fragmentação, ultralancamento, perda de furos e vibrações (CINTRA, 1993).

4.7 - Monitoramento de Trincas em Estruturas Próxima ao Desmonte

Para monitorar as trincas em estruturas próximas à área de desmonte existem, basicamente, dois métodos de leitura direta. O primeiro é com uma régua graduada ou

escalímetro, o segundo é composto de um conjunto de réguas (em resina) que é fixada ortogonalmente às trincas, conforme apresentado na figura 4.10. O objetivo da medição é verificar se a possível evolução da trinca está diretamente relacionada com os níveis de vibração gerados pelos desmontes com explosivos (NOJIRI *et al.*, 2002).

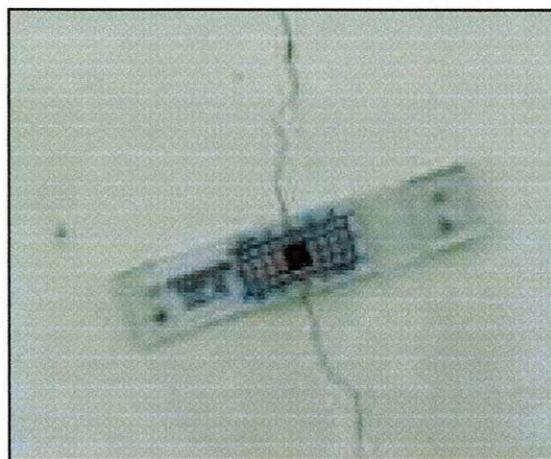


Figura 4.10 - Monitoramento de fraturas (NOJIRI *et al.*, 2002).

Os efeitos provocados nas estruturas são analisados, para verificar se houve influência das operações de desmonte próximas, efetuando-se medidas antes e após o momento da detonação.

4.8 - Fotografia de Alta Velocidade e Vídeo de Alta Definição

Como os eventos audiovisuais da detonação ocorrem numa velocidade que os torna de difícil interpretação, à olho nu (KONYA, 1996d), há a necessidade de se fazerem registros fotográficos e audiovisuais (em vídeos) dos eventos ocorridos durante a detonação. Essa técnica vem permitir uma análise visual mais minuciosa dos eventos enquadrados em intervalos de tempos regulares, construindo modelos, como o mostrado na figura 4.11. Os intervalos de tempo, entre um quadro e outro, variam entre 500 ms. a 0,025 ms., segundo MURANETTI (1997).

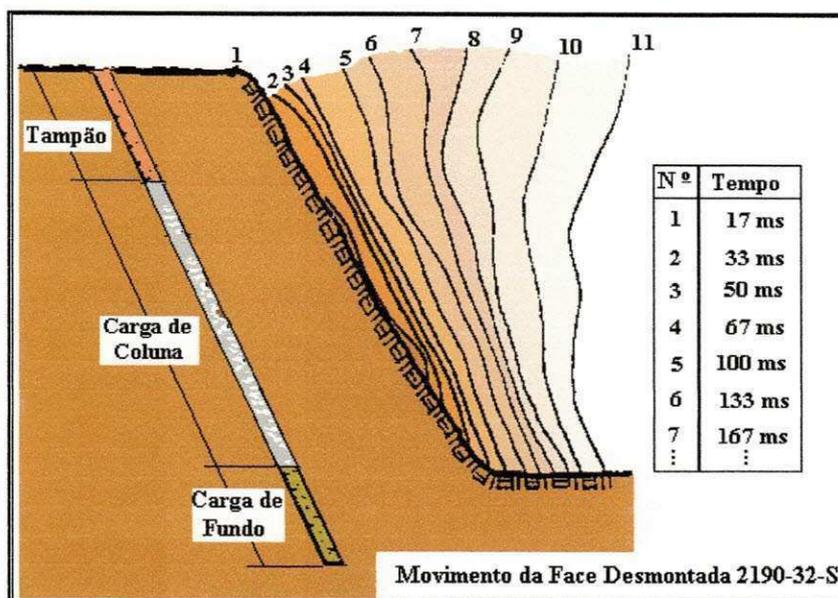


Figura 4.11 - Seqüência de tempo dos perfis após a detonação (modificado de CROSBY,1998).

Para realização dos registros dos eventos, durante a detonação, podem ser usadas câmeras fotográficas de alta velocidade e definição, ou câmeras de vídeo (figura 4.12). Entretanto, as câmeras de vídeo do tipo VHS são recomendadas por apresentar um menor custo operacional.

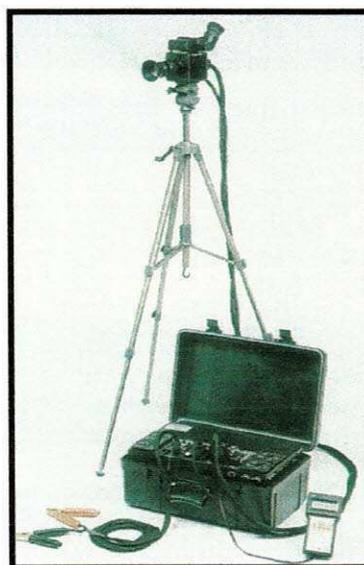


Figura 4.12 - Câmera fotográfica de alta velocidade (MURANETTI, 1997).

Segundo SCOTT e CAMERON (1988), algumas das informações observadas permitem um acompanhamento das seguintes ocorrências:

- a) Seqüência da detonação e performance dos retardos de superfície;
- b) Velocidade e trajetória da face;
- c) Escapamento de gases;
- d) Eficiência do tampão;
- e) Ocorrência de detonação instantânea;
- f) Perda de furos;
- g) Movimentação do topo da bancada e ultralançamento;
- h) Geração de crateras;
- i) Avaliação prévia da pilha.

4.9 - Análise Granulométrica da Fragmentação

As observações de fragmentação da rocha na pilha, em conjunto com o mapeamento de fraturas no maciço, fornecem informação sobre o poder de quebra do explosivo. Essa quebra é melhor definida em termos do diâmetro médio da partícula. A medida da fragmentação permite, também, calibrar o modelo, que pode ser usado para controlar e prever os efeitos em diferentes geometrias do plano de fogo (CAMERON, 1990).

A obtenção da fragmentação desejada constitui-se no principal problema do desmonte, em virtude da dificuldade de se descrever as diversas variáveis do processo. Entre as variáveis, incluem-se a estrutura e a propriedade do maciço rochoso, variabilidade da performance dos explosivos, assim como a seqüência real dos eventos que ocorrem em grandes velocidades (SCOTT, 1995).

Uma regra prática diz que, de modo geral, um explosivo de alta energia de choque é necessário para que uma rocha competente atinja a distribuição granulométrica desejada. Por outro lado, um explosivo com alta energia de gás é usado em rocha muito fraturada.

Para se medir a fragmentação produzida pela detonação, utilizava-se, anteriormente, apenas a observação visual do número de matações com diâmetro acima da abertura do britador. Essas observações são importantes, porém, imprecisas.

Entre os vários métodos envolvidos, usa-se a análise estatística por peneiramento e a análise digital de fotografias. O processo de peneiramento deve ser evitado devido ao seu

alto custo quando feito em escala de produção. Atualmente, o processo digital de imagem é a melhor técnica para avaliação da fragmentação (NOY, 1997).

Este procedimento consiste na digitalização das fotos realizadas durante a remoção das pilhas, com objeto marcador da escala (Figura 4.13), sendo que cada quadro captura entre 150 e 250 fragmentos (MUNARETTI, 1998).

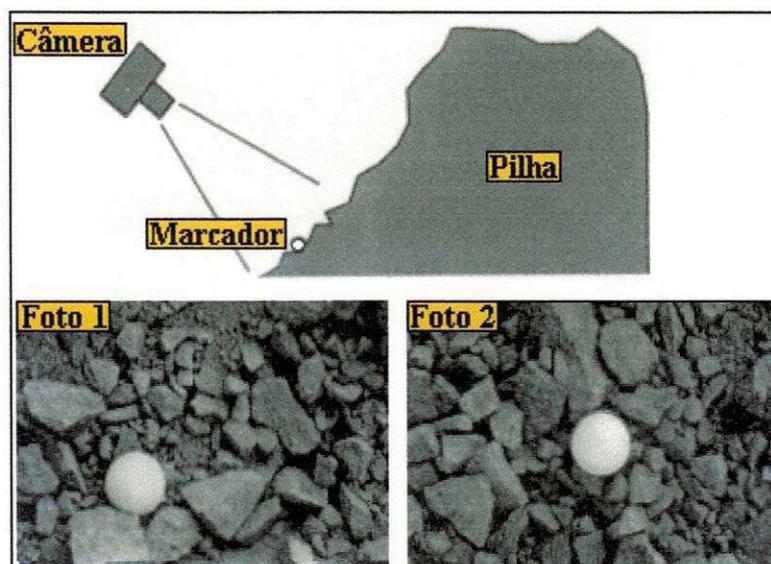


Figura 4.13 - Fotografia da pilha para análise granulométrica (NOY, 1997).

Os dados são processados por softwares do tipo JKMRC, SIROGRAF e EPFRAG, que permitem conhecer os contornos dos blocos, possibilitando posteriormente a realização de uma análise estatística, fornecendo uma curva granulométrica, além de histogramas, conforme ilustra a figura 4.14 (NOY, 1997; MUNARETTI, 1998; SILVA, 1998).

Todos esses sistemas de foto-análise medem o tamanho dos blocos, a sua uniformidade, quantidade de matações e finos, cujas dimensões são determinadas previamente e os dados tratados geralmente pela equação de Rosin-Ramler (SILVA, 1998).

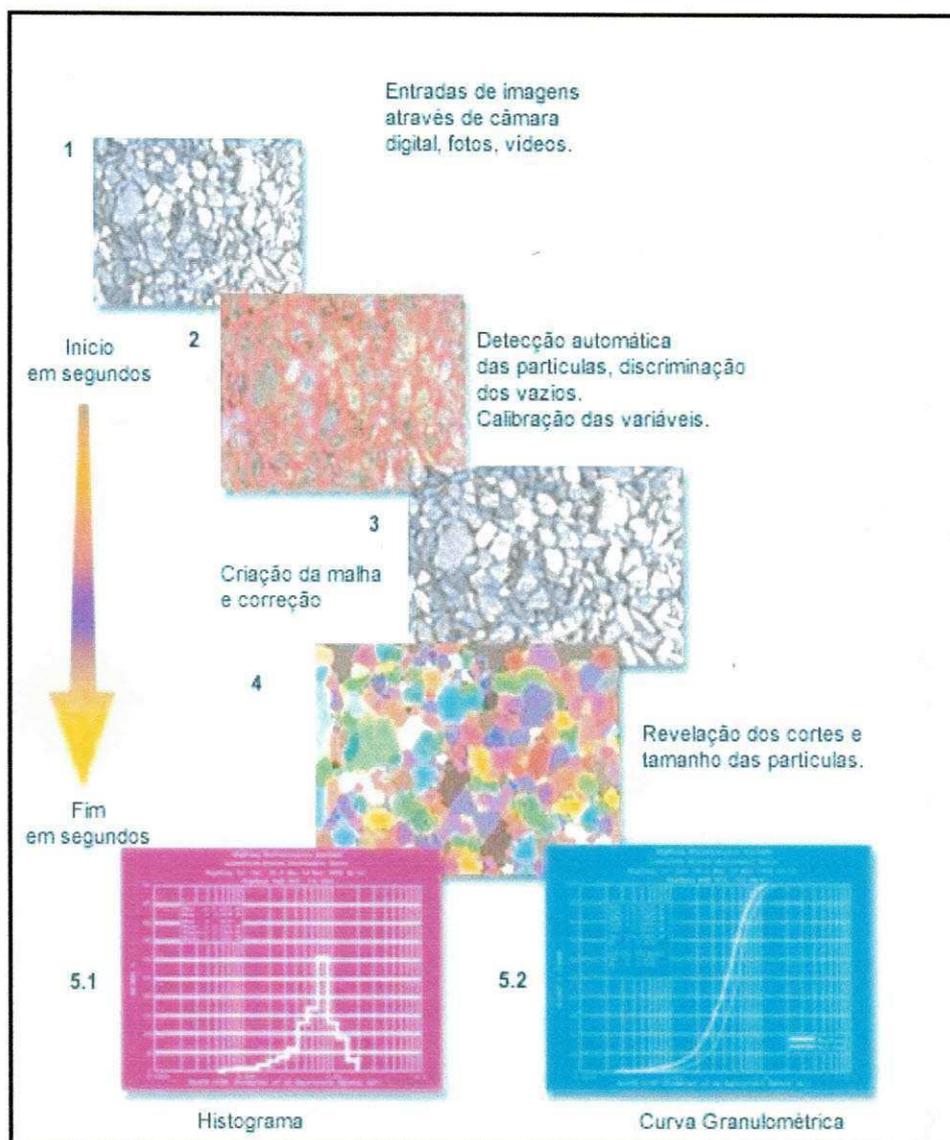


Figura 4.14 - Sistema Wipfrag (SILVA, 1998).

CAPÍTULO 5

5 - APLICAÇÃO DA ESPOLETA ELETRÔNICA

A espoleta eletrônica representa um grande avanço tecnológico nos sistemas de iniciação de cargas explosivas. Entretanto, apesar de ser uma tecnologia recente, já se encontra na sua segunda geração.

Para alcançar melhores resultados na aplicação da espoleta eletrônica é necessário realizar estudos preliminares, de forma a obter dados referentes aos diversos parâmetros que afetam a perfuração e o desmonte. Com a análise e a avaliação desses dados é possível otimizar projetos, procedimentos e resultados, objetivando eliminar desperdícios e efetuar, antecipadamente, possíveis correções de procedimentos.

5.1 - Componentes do Sistema Eletrônico

O sistema de espoleta eletrônica desse tipo é composto por um programador *Logger* e do ignitor *Blaster*, cuja finalidade é iniciar a carga explosiva. Esse tipo de espoleta permite um maior controle do desmonte através de sua precisão e flexibilidade.

5.1.1 - Detonador

O detonador ou espoleta eletrônica, ilustrado na figura 5.1, é composto por fios paralelos de alimentação, por onde são transmitidos pulsos elétricos entre ele e programador *Logger* e/ou ignitor *Blaster*, conectados à espoleta por um *plug* de selamento ligado a uma pequena plaqueta, contendo um circuito constituído por dois capacitores e um processador eletrônico. Este último dispositivo tem a capacidade de processar, armazenar, enviar e receber as informações e comandos do *logger* e do *blaster*. Inicialmente, o primeiro capacitor é alimentado, servindo também como dispositivo de segurança. Porém, quando o circuito integrado está devidamente programado é que o segundo capacitor é carregado e está pronto para ser descarregado, acionando a ponte de fio resistor que inicia a carga primária (azida de chumbo), que, por sua vez, dá início à detonação da carga base (Nitropenta).



Figura 5.1 - Detonadores eletrônicos Ikon™ (ORICA, 2002).

5.1.2 - Programador Logger

O programador logger, ilustrado, na figura 5.2, tem como objetivo, definir os tempos de retardo dos detonadores. Esse dispositivo, ainda pode testar e simular a seqüência de iniciação do desmonte, ou alterar e corrigir possíveis erros, mesmo depois dos furos estarem carregados.



Figura 5.2 - Programador Logger (ORICA, 2002).

5.1.3 - Acionador Blaster

O acionador blaster (figura 5.3) tem capacidade de iniciar até 1600 detonadores, dependendo do modelo usado. É um dispositivo de alta segurança que aciona a iniciação da carga explosiva. É usado em associação com o *logger*, contendo uma chave de segurança.



Figura 5.3 - Acionador Blaster (ORICA, 2002).

5.1.4 - Software SHOTPlus™

Além dos dispositivos eletrônicos relacionados anteriormente, o sistema de espoleta eletrônica, também inclui o software “SHOTPlus™” para projetos de desmonte, aplicado pela Orica do Brasil Ltda., podendo ser utilizado um computador portátil, como mostrado na figura 5.4.

Com esse *software* pode-se elaborar planos de fogo, programar os retardos e realizar simulações da detonação. As seqüências de iniciação das cargas podem ser visualizadas em diferentes velocidades, podendo assim, fazer, antecipadamente, as devidas correções ou mudanças no sistema de iniciação escolhido, e rever os possíveis erros do projeto.

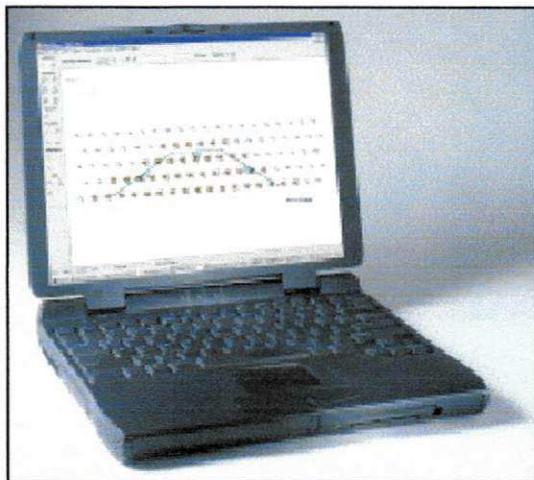


Figura 5.4 - NoteBook com o Software SHOTPlus™ (ORICA, 2002).

Há ainda muitos outros elementos de projeto, análise e conectividade, com sistemas utilizados, atualmente em desenvolvimento.

5.2 - Características e Aplicações do Sistema

5.2.1 - Características

Entre as várias características do sistema eletrônico, podemos citar:

- É um sistema de detonação eletrônico de segunda geração, usando a última tecnologia em projetos de processadores e com fabricação totalmente automatizada;
- A espoleta é totalmente programável no furo, com tempo variando entre 0 - 8.000 ms, em incrementos de 1 ms e com dispersão inferior a 1/10 ms;
- A conexão é segura, feita através de conectores;
- Possui comunicação bidirecional entre o equipamento de controle e os detonadores, possibilitando a avaliação do sistema antes da detonação.
- É de fácil manuseio e programação;
- Tem capacidade máxima de iniciação para até 1.600 detonadores;
- Possui recursos como planos de detonação digitais facilmente projetados com o software;

- Apresenta detonador de tamanho único e padronizado que se adapta a todos os boosters convencionais;
- O detonador oferece resistência à pressão dinâmica de até 100 MPa (14,700 psi);
- Todo detonador possui um único número de identificação rastreável, que é gravado no chip e impresso em etiqueta;
- O sistema de hardware & software é autotestável.

5.2.2 - Aplicações

5.2.2.1 - Aplicações Potenciais

O sistema de detonadores eletrônicos é aplicado potencialmente em situações que exigem um desmonte, com um controle rígido, levando em consideração o aspecto da segurança, técnico e ambiental. Algumas de suas aplicações são:

- Situações de controle de vibrações, próximos a estruturas e a ambientes sensíveis;
- Desmontes complexos, de programação difícil de ser realizada com detonadores convencionais;
- Aplicações que exigem controle rígido da parede remanescente, com máximo de estabilidade e segurança, e “*overbreak*” mínimo;
- Minimização da diluição do minério;
- Otimização do lançamento da pilha.

5.2.2.2 - Aplicações no Brasil

A espoleta eletrônica está começando a ser aplicada nas empresas de mineração nacionais, onde o controle do tempo de retardo é mais rígido, visando não só melhorar a eficiência e a rentabilidade do processo, como também viabilizar áreas sob restrições das normas vigentes.

A Orica Brasil Ltda. e a Joule Comercial Ltda. são empresas que estão implantando as espoletas eletrônicas no Brasil, atendendo a uma demanda da mineração, por um contínuo aumento da produtividade, associada a custos operacionais decrescentes.

O Brasil foi um dos primeiros países da América do Sul a fazer experiências com a espoleta eletrônica. Dentre algumas empresas que a utilizam, podemos citar: a CVRD (Companhia Vale do Rio Doce), em Itabira-MG, Pedreira Cantareira do Grupo Holcim e as de Embu S. A. etc.

5.3 – Procedimento de Campo na Aplicação do Sistema de Iniciação Eletrônico

Para se obter uma melhor aplicação desse sistema, são necessários alguns estudos preliminares, conforme descrito no capítulo 4. Após esses estudos, é definido o plano de fogo, que pode ser dividido em 04 fases: elaboração do plano de fogo; locação e perfuração do furo; carregamento e programação dos furos; detonação e avaliação dos resultados.

1ª Fase - Elaboração do plano de fogo.

Com base nos dados da perfilagem, dos desvios de furo (“*bore track*”), da geologia, dos equipamentos, da altura da bancada, das restrições ambientais, etc., é feita a elaboração do plano de fogo.

Para se determinar o plano de fogo, utilizam-se ferramentas auxiliares como *softwares* para projetos de desmonte, planilhas, etc. A Orica do Brasil Ltda. fez uso, na pedreira Cantareira, do *software* “SHOTPlusTM” para elaboração dos planos de fogo, determinando, assim, a malha, a forma de carregamento e a iniciação de cada detonador.

2ª Fase - Locação e perfuração dos furos.

Nessa fase, foram locados os furos de acordo com o plano de fogo, com o auxílio de um teodolito. Logo após, é iniciada a perfuração, com sua orientação também já estabelecida, utilizando perfuratrizes pneumáticas, com furos de diâmetro de 3 polegadas e extensão variando entre 14 e 18 metros (Figura 5.5).

A etapa de perfuração não se conclui, até que os furos sejam avaliados com o auxílio de um inclinômetro, onde são verificados, previamente, os possíveis desvios para posteriores medidas corretivas.

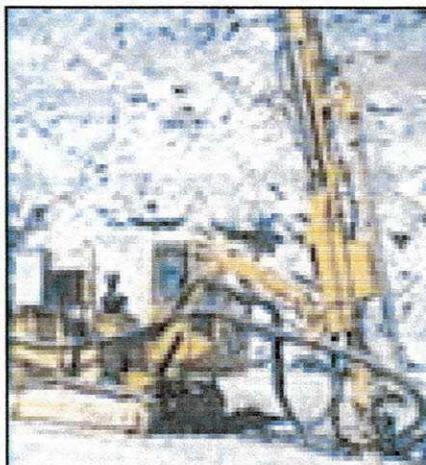


Figura 5.5 - Perfuratriz hidráulica (PEDREIRA CANTAREIRA, 2003).

3ª Fase - Carregamento dos Furos e Programação do Iniciador.

Nessa fase, os furos já estão prontos para operação de carregamento com explosivos. O carregamento é feito de acordo com a situação de cada furo, e adequado à sua disposição espacial e às condições do maciço rochosos (figura 5.6).

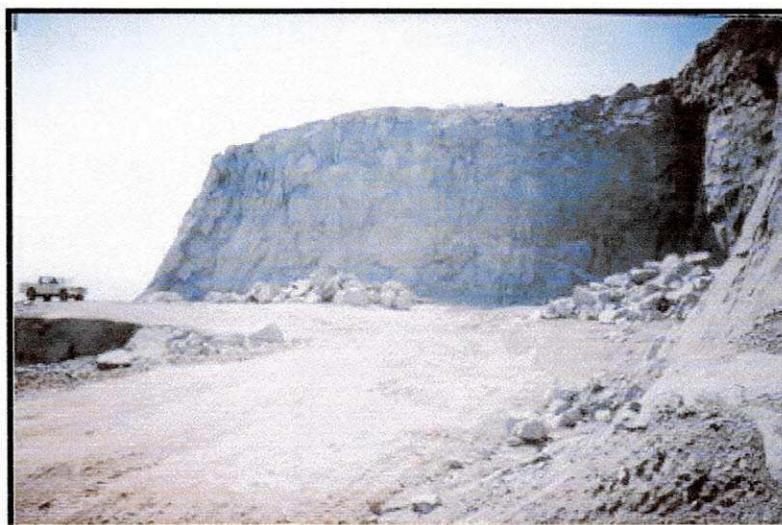


Figura 5.6 - Frente de lavra do maciço rochoso (2002).

Inicialmente, faz-se uma nova verificação da extensão e de possíveis obstruções nos furos, assim como observa-se a existência de água em seu interior. A figura 5.7 ilustra essa operação.

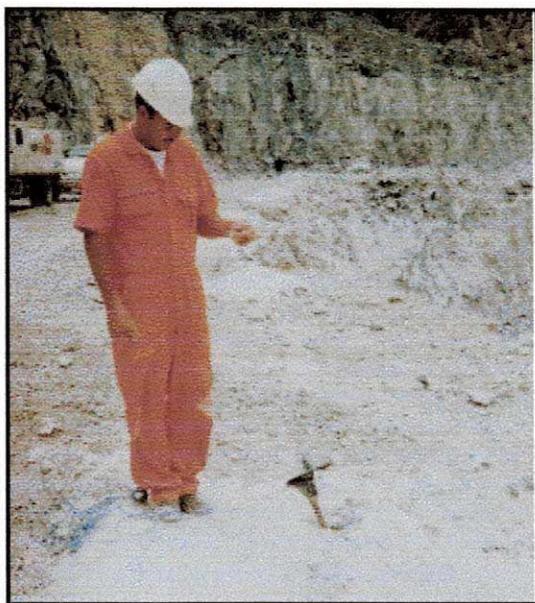


Figura 5.7 - Verificação dos furos (2002).

Após a verificação dos furos, são escorvados dois reforçadores (boosters) com os detonadores, e é iniciado o carregamento de cada mina, com as respectivas escorvas (figura 5.8).

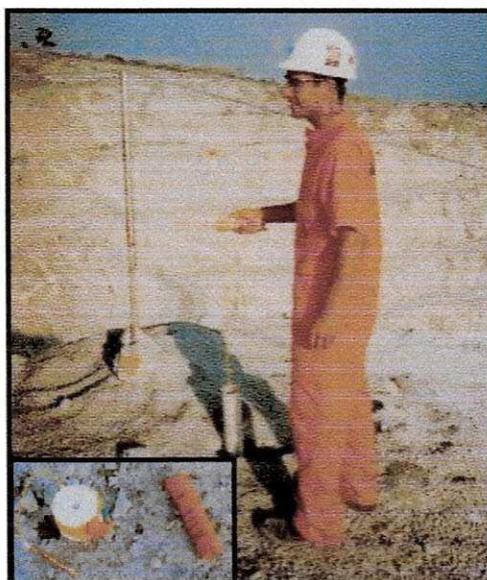


Figura 5.8 - Carregamento das escorvas detonador/booster (2002).

Antes de iniciar o carregamento com o explosivo principal (emulsão bombeada), a densidade do explosivo é verificada, e, se preciso, ajustada de acordo com a

situação. Esses ajustes são possíveis, pelo fato de ser utilizada uma unidade móvel de emulsão bombeada, que permite o ajuste da mistura explosiva no momento do carregamento, como ilustrado na figura 5.9. O objetivo dessa operação é ajustar a densidade da carga.

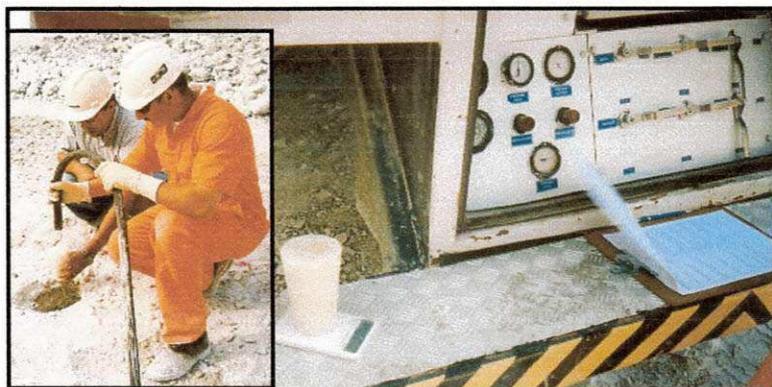


Figura 5.9 - Verificação e ajuste da densidade da emulsão bombeada (2002).

Logo após o ajuste da densidade da emulsão, é feito o carregamento do furo, com uma unidade móvel (Figura 5.10).

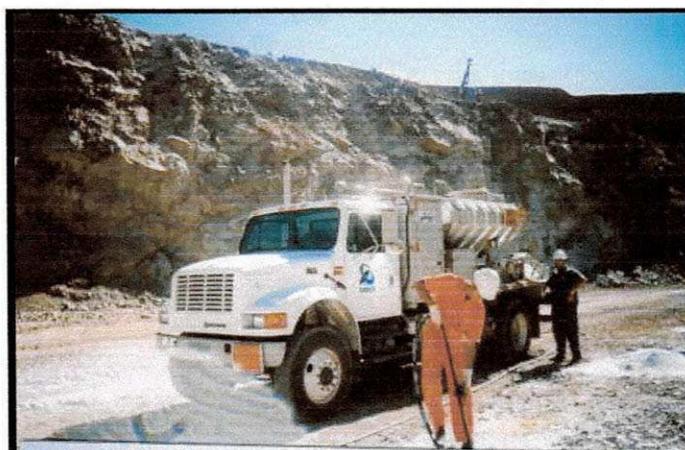


Figura 5.10 - Carregamento da mina com unidade móvel de emulsão bombeada (2002).

Para a operação de carregamento dos furos considerados muito extensos, acima de 10 m, utilizou-se um separador (*deck*), no meio da coluna carregada, para promover dois pontos de iniciação por furo, sendo um, na base, e outro, no centro da coluna carregada do furo (figura 5. 11).

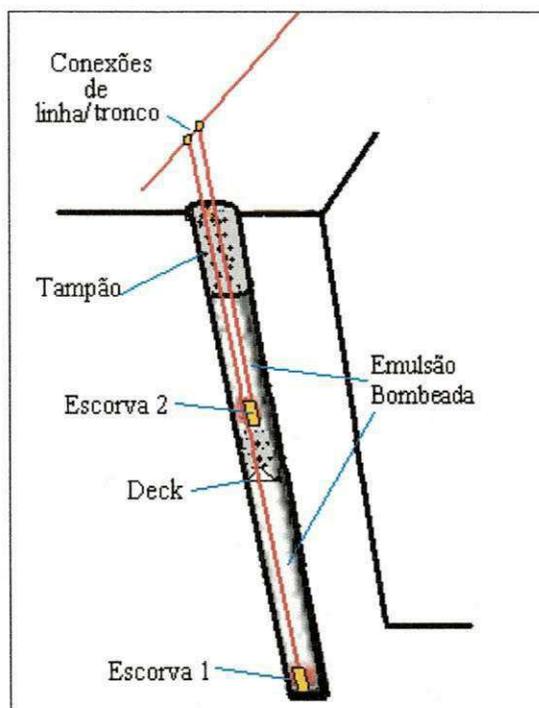


Figura 5.11 - Forma de carregamento (2003).

Dependendo da análise de desvios dos furos (*"boretrack"*), perfilagem das bancadas, densidade do explosivo, a alocação do deck e das escorvas podem ser reajustados. Nestes furos foram utilizados dois reforçadores, dois detonadores, um *deck* e um tampão (brita # 19 mm + pedrisco p/ furo de 3 pol.), conforme ilustrado na figura 5.12.



Figura 5.12 - Acessórios usados no carregamento de cada mina (2002).

Após as operações de carregamento e tamponamento das cargas, é feita a conexão dos fios com a linha tronco (em paralelo) dos detonadores (Figura 5.13). Simultaneamente, é feita a programação dos tempos de iniciação dos detonadores.



Figura 5.13 - Conexão dos fios na linha tronco (2002).

Os tempos de retardo dos detonadores são definidos com o programador *Logger* (Figura 5.14). Cada espoleta eletrônica conectada é automaticamente reconhecida pelo dispositivo programador através do código de registro do processador das espoletas, que é também indicado na etiqueta. É apresentado no *display* o último tempo programado, correspondente à espoleta anterior, e, a partir deste, é feito o incremento do tempo à próxima espoleta. Terminada a operação de programação dos tempos de retardo dos detonadores, verifica-se a seqüência de iniciação do desmonte.



Figura 5.14 - Definição dos tempos de retardo com o programador *Logger* (2002).

Completadas todas as operações de carregamento e programação dos tempos de iniciação dos detonadores (Figura 5.15), o fio de conexão é estendido até local seguro e reconectado ao programador *Logger*, que testa, novamente, toda a programação.

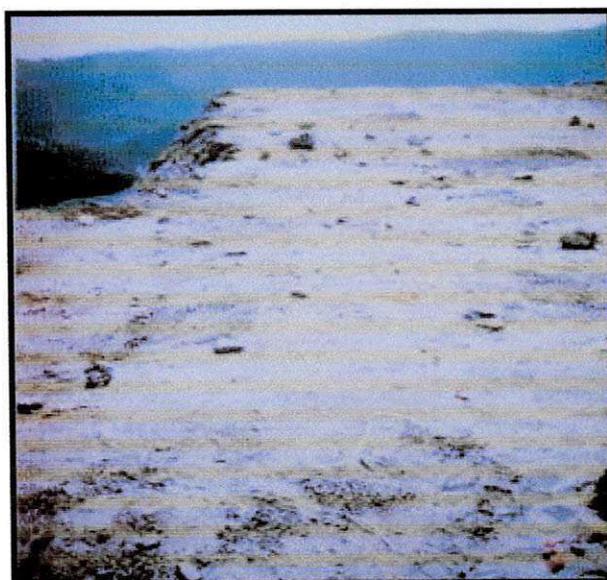


Foto 5.15 - Área pronta do topo da bancada a ser desmontada (2002).

Posteriormente, através de um cabo coaxial, é feita a conexão do programador ao acionador *Blaster* (figura 5.16), que carrega o primeiro capacitor do detonador. Mas, somente será liberada a iniciação quando uma chave de segurança for conectada ao *blaster*, podendo esta ser simultânea ou em contagem regressiva. A operação pode ser interrompida, mesmo após a contagem ter sido iniciada.



Figura 5.16 - Blaster conectado ao Logger para iniciar a detonação (2002).

Para controle e monitoramento das vibrações e sobrepressão acústica ocasionadas pelas detonações na pedreira Cantareira foram utilizados sismógrafos de engenharia Mini Mate Plus série III, conforme ilustrada na figura 5.17, visando mantê-las dentro dos padrões.

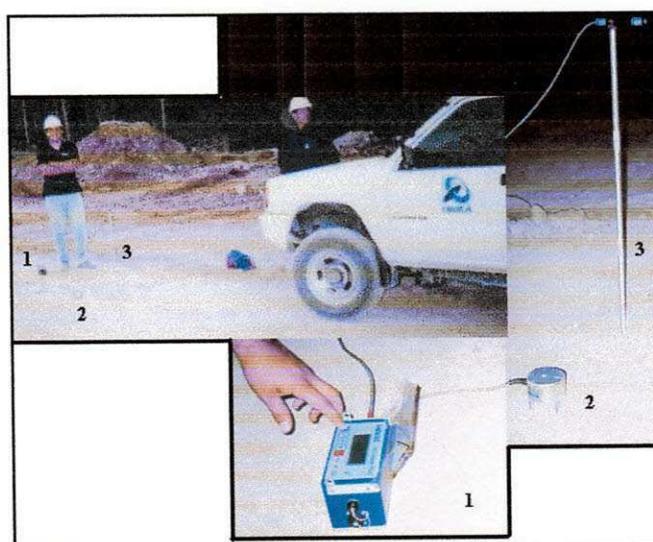


Figura 5.17 - Levantamento sismográfico, utilizando sismógrafo(1), Geofone(2) e Microfone(3) (2002).

O sismógrafo utilizado possui dois canais: um, para o microfone, e outro, para o geofone triaxial. O microfone monitora a sobrepressão do ar, numa faixa entre 100 a 142 dB, e o geofone monitora a vibração, com limite máximo de 127 mm/s, e com a faixa de frequência variando de 2 a 250 Hz. A figura 5.18 ilustra o flagrante do momento da detonação.



Figura 5.18 - Detonação com iniciador eletrônico (2002).

Após a detonação, podem ser observadas a face livre remanescente da bancada (Figura 5.19) e a pilha formada (Figura 5.20), indicando se o desmorte foi satisfatório, dentro dos objetivos desejados.

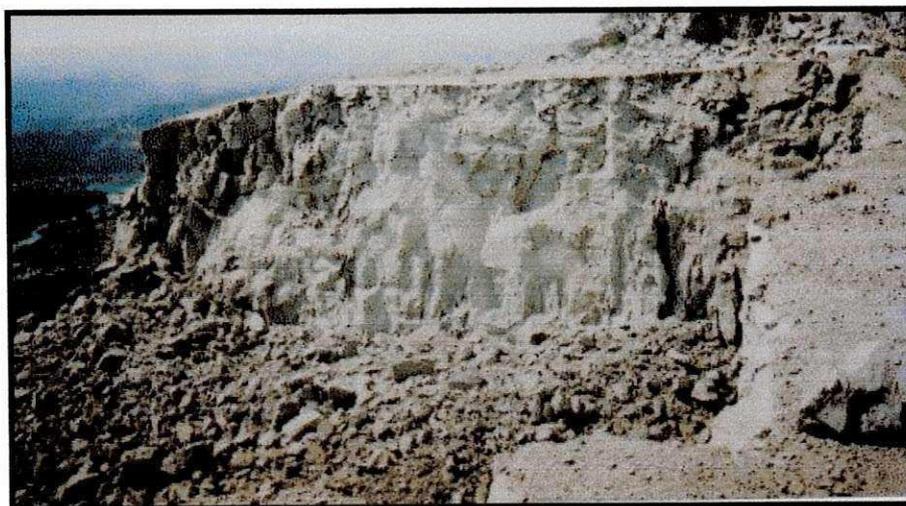


Figura 5.19 - Feição da face livre remanescente (2002).



Figura 5.20 - Pilha formada pelo desmonte (2002).

CAPÍTULO 6

6 - ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste estudo foi observada a performance dos desmontes, no controle das vibrações, e da fragmentação, através dos ajustes dos tempos de espera dos retardos, na iniciação das cargas explosivas nas bancadas mais altas. A empresa possui bancadas desde o nível 845 m até 1070 m acima do nível do mar. As bancadas dos níveis mais baixos são de menor altura e as 04 últimas bancadas (níveis superiores) são bancadas de 20 a 24 metros.

São apresentados os resultados dos desmontes realizados durante os meses de fevereiro a agosto de 2002, na pedreira Cantareira da Holcim - SP, com o sistema eletrônico de detonação da I-kon, pela Orica do Brasil Ltda.

Os parâmetros analisados foram:

- A vibração do terreno - análise da velocidade de Partícula (PPV);
- A fragmentação - análise do percentual de matacos.

Os setores críticos de detonação que levaram à aplicação do sistema eletrônico de iniciação foram os bancos correspondentes às cotas: 1000, 1017, 1040 e 1070.

Foram instalados 04 pontos de monitoramento:

- "A" a 320 m;
- "B" a 220 m;
- "C" a 380 m;
- "D" a 420 m.

Os valores limites dos parâmetros analisados são normatizados. As normas a serem cumpridas pela aplicação desses procedimentos foram:

- CETESB (D7.013 ABRIL/1992) – $PPV \leq 3,0 \text{ mm/s}$
 $PPV_v \leq 4,2 \text{ mm/s}$.
- NBR 9653 – $PPV \leq 15 \text{ mm/s}$.

6.1 - Vibração

Foram realizados monitoramentos para controle da vibração em vários setores da pedreira, considerados críticos, pela proximidade com áreas habitadas. Através do monitoramento e análises do comportamento das velocidades de partícula (PPV), foram obtidos resultados satisfatórios, que demonstram o controle da vibração originada nas detonações dos bancos altos, medidos nos pontos A, B, C e D, conforme valores demonstrado na tabela 6.1.

Data	PPV (mm/s)	PPV _v (mm/s)	Cota do Banco (m)	Local de Instalação do Geofone	Frequência Max./Mín. (Hz)	Tempo de Retardo por Cargas (ms)
28/fev	3.03	1.78	1017	B	64/57	15
12/mar	2.68	1.52	1040	A	57/37	15
26/mar	0.933	0.762	1017L	A	39/30	25
09/abr	2.44	1.65	1017	B	85/73	5
16/abr	2.65	2.29	1017	B	>100/73	5
19/abr	2.31	2.03	1040L	B	51/37	15
24/abr	1.89	1.65	1017L	C	51/37	15
14/jun	0.899	0.635	1040L	C	85/57	3
12/jul	6.85	6.1	1040L	B	57/27	3
23/jul	1.36	1.14	1017L	B	85/57	16
02/ago	1.74	1.65	1040L	D	73/26	16
16/ago	2.16	2.16	1040L	D	39/19	16
27/ago	0.933	0.635	1040L	D	51/19	16
30/ago	1.36	1.02	1070L	D	47/18	16
03/set	1.91	1.9	1017L	D	64/34	16
06/set	1.38	1.27	1040L	D	73/37	16
13/set	1.24	0.635	1017L	D	73/47	16
24/set	2.2	1.52	1017L	B	73/32	16

Tabela 6.1 - Resultados da velocidade de partícula versus retardo por cargas.

Todos estes resultados foram obtidos em desmontes com furos de 3" de diâmetro, cargas divididas por um *deck* no furo, fator de carregamento de 600 g/m³ e carga máxima por espera de 55 kg, onde os tempos de retardo entre as cargas foram ajustados.

Foi observado na tabela 6.1 um único resultado anômalo, ocorrido no dia 12 de julho, como apresentado no sismograma do movimento longitudinal da partícula no intervalo de 0 a 400 ms (figura 6.1). Uma explicação inicial dessa anomalia é que, visando melhorar a fragmentação, foi reduzido o tempo de retardo (3 milissegundos), e essa redução contribuiu para o aumento da vibração. Uma outra suposição é a proximidade do ponto de captação.

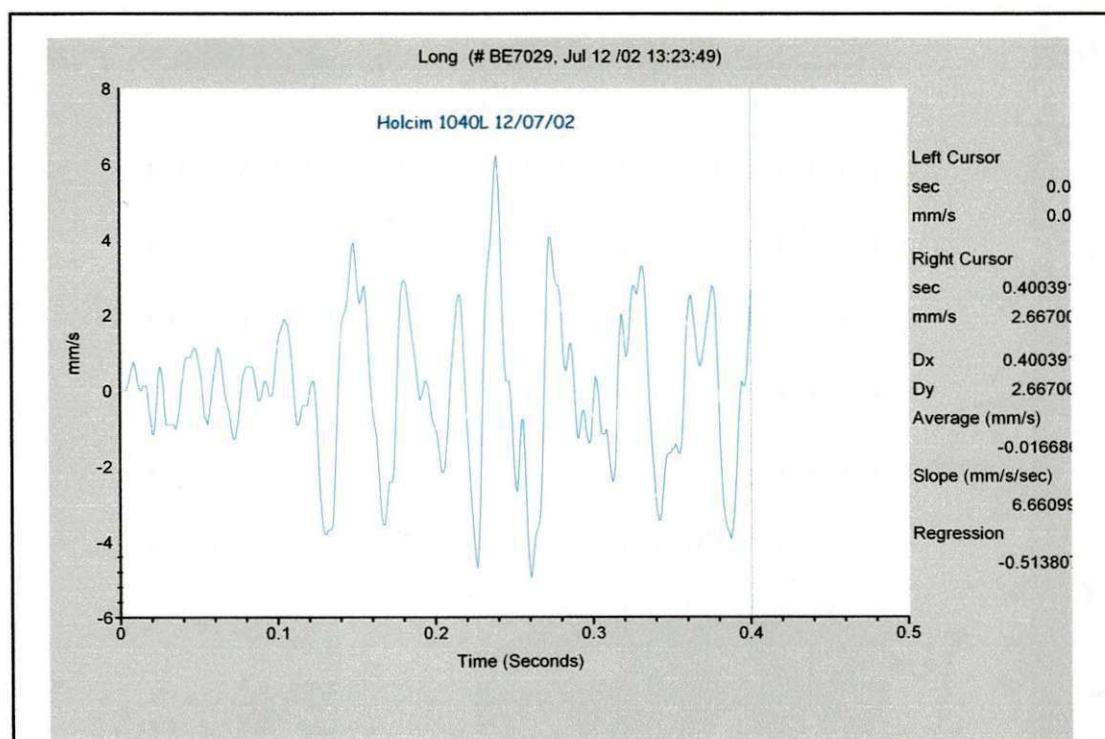


Figura 6.1 - Sismograma 1 (12/07/02).

O estudo desenvolvido por BAZANTE *et al.*, (2002) indica que, para otimizar a fragmentação, há a necessidade de um valor mínimo para espera entre furos de 2.3 a 3.3 ms/m. STAGG e RHOLL (1988), também demonstraram que para evitar a detonação instantânea das cargas, preservando o controle de vibrações do terreno, deve-se ter uma espera mínima de 8ms entre os iniciadores, o que, geralmente é suficiente para melhorar a fragmentação.

Outra consideração atribuída para este valor atípico de vibração, ocorrido na pedreira Cantareira, é o da ocorrência de uma sobreposição de ondas, o que é comum, quando se trabalha com intervalos de tempo muito curto. Isso é agravado pela redução acentuada da frequência na direção longitudinal e transversal (EDL JR., 1983). Este aumento da velocidade de partícula para 6,8 e 6,1 mm/s, da resultante e componente vertical, respectivamente, também foi afetado pela posição e seqüência de detonação das cargas, relativas ao ponto onde foi instalado o geofone, ilustrado na figura 6.2.

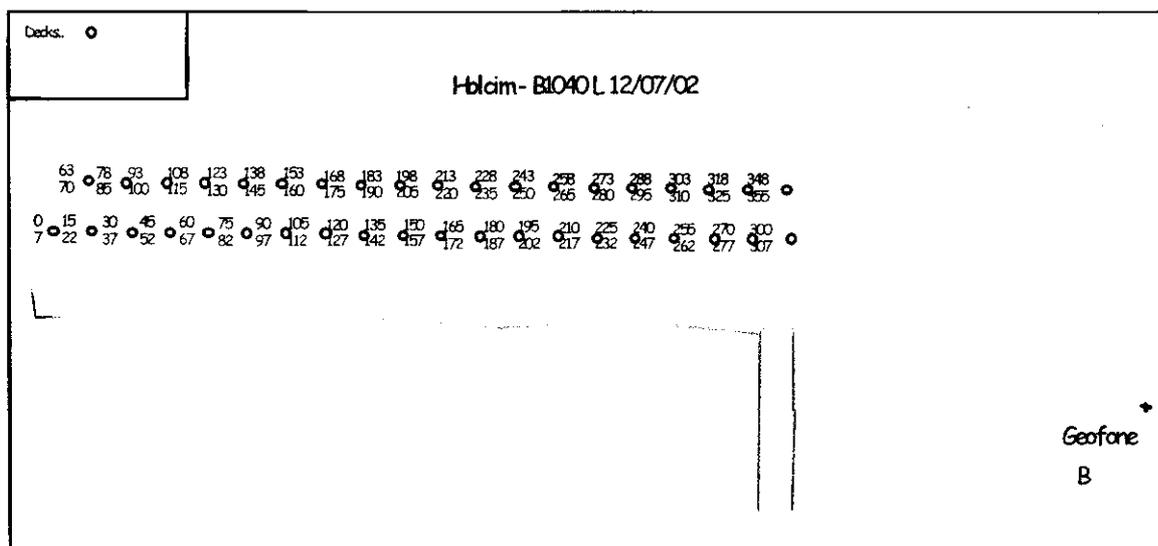


Figura 6.2 - Seqüência de detonação pelo software Holancim-B1040 L 12/07/02.

Com objetivo de ajustar o plano de desmonte, evitando assim situações semelhantes, foi aumentado o tempo de retardo entre as cargas para 16 milissegundos. Verifica-se, assim, que os valores de pico da velocidade de partícula ficaram abaixo de 3,0 mm/s. Com isso, foram eliminados os efeitos da sobreposição de onda. O gráfico 6.1 ilustra o comportamento dos valores de pico da velocidade de partícula resultante e da componente vertical, durante o período em que foi aplicado o sistema eletrônico de iniciação.

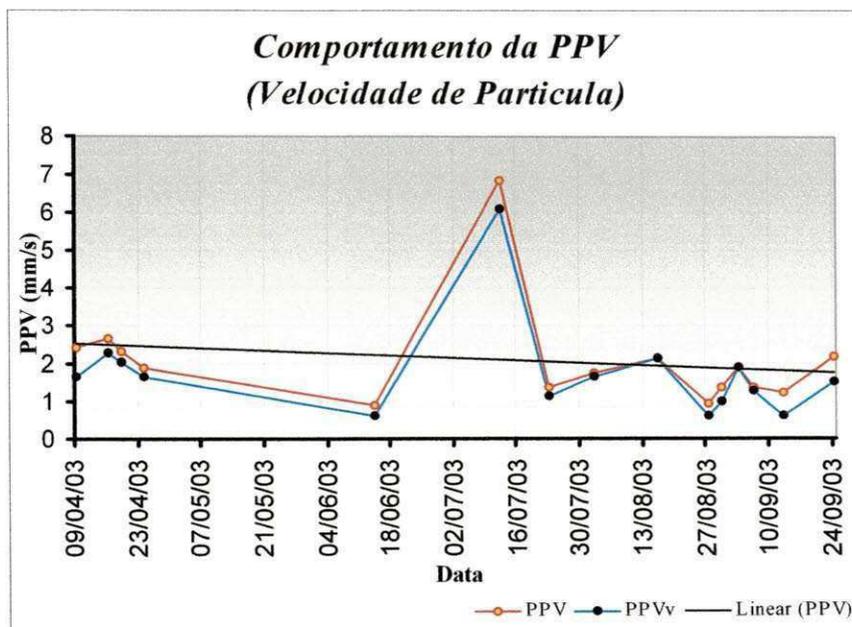


Gráfico 6.1 - Comportamento da Velocidade de Partícula (PPV).

Analisando o gráfico 6.1 observa-se que apenas um valor ultrapassou o limite de 3 ms. Mesmo assim, verificou-se uma redução ao longo do tempo, conforme mostra a linha de tendência. Simulando a exclusão desse valor anômalo, verifica-se que a diminuição da PPV seria mais acentuada, conforme se observa no gráfico 6.2.

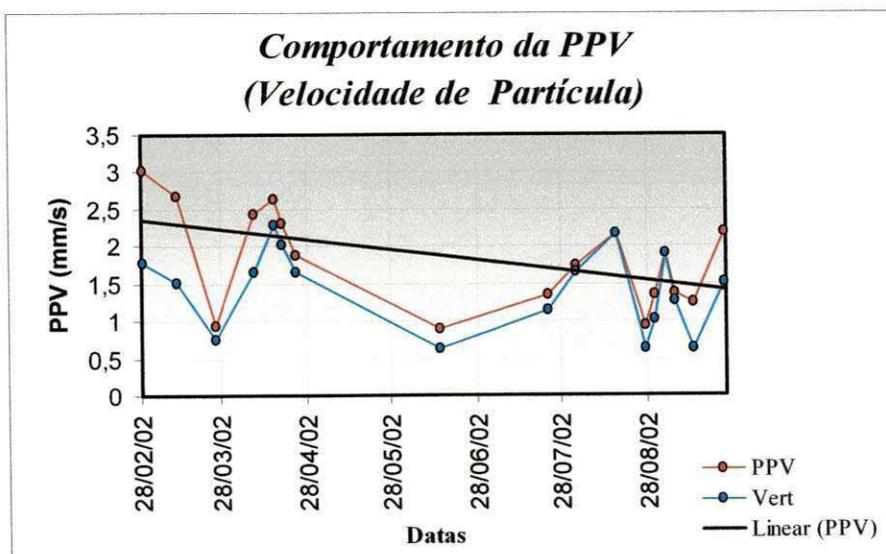


Gráfico 6.2 - Comportamento da PPV sem o valor atípico.

Com o objetivo de verificar o comportamento da PPV de cada setor de captação, foi feita uma análise individual de cada local de instalação do geofone: B, C e D. Conforme se verifica nos gráficos 6.3, 6.4, 6.5, observa-se que a tendência de queda deu-se nos 03 pontos de captação. O ponto de captação instalado no ponto "A" não foi analisado pelo fato dos valores obtidos nos monitoramentos terem sido satisfatórios. Como era esperado, os valores do "B" são maiores, já que este local está mais próximo das bancadas. As análises demonstraram que a variação dos pontos de captação dos geofones, dentro da área monitorada, não teve influência significativa para satisfazer os objetivos, mantendo assim, a PPV dentro das normas vigentes.

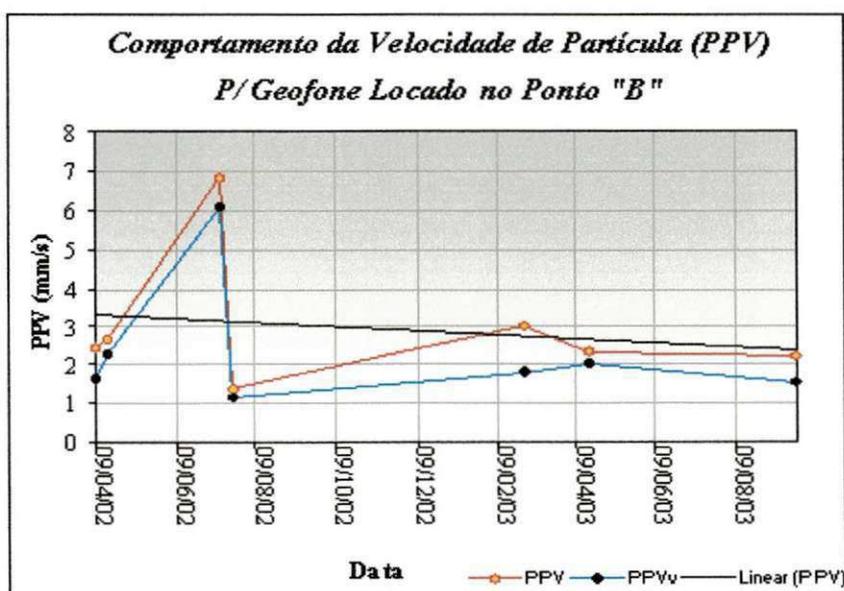


Gráfico 6.3 - Comportamento da PPV c/ geofones instalados no Ponto "B".

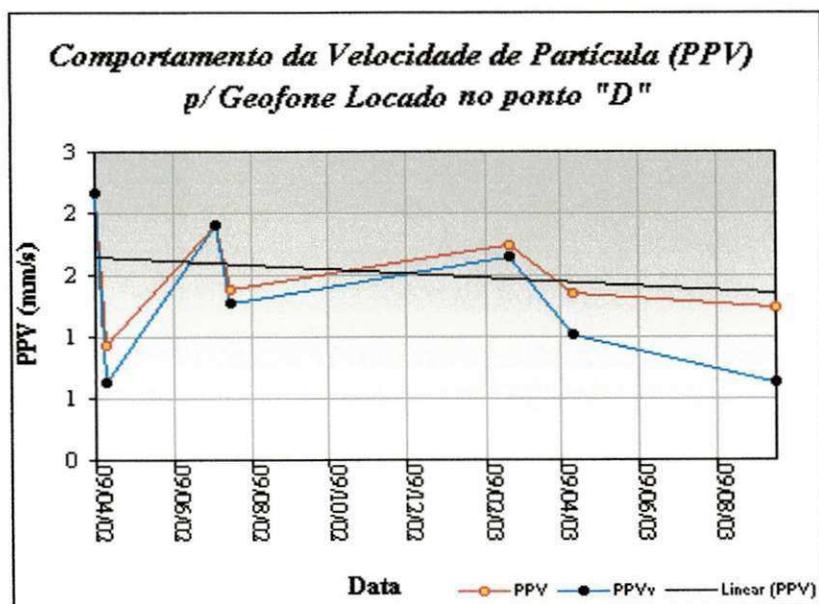


Gráfico 6.4 - Comportamento da PPV, com geofones instalados no ponto "D".

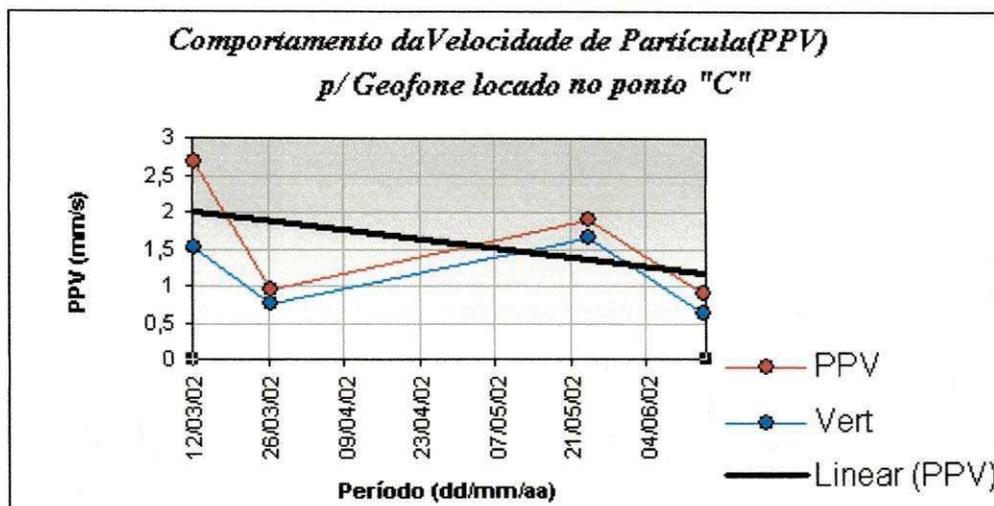


Gráfico 6.5 - Comportamento da PPV, com geofones instalados no ponto "C".

Também foram realizados 04 desmontes sem espaçadores (*decks*), portanto, com valores máximos de carga.

Os dois primeiros valores apresentados na tabela 6.2, constituem os pontos de captação posicionados dentro de uma região localizada atrás do banco. E, por esse fato, apresentou maiores valores de vibrações. Já os demais bancos, 1000L e 1017L, foram posicionados perpendicularmente às frentes, o que minimizou o valor da PPV, na área monitorada, figura 6.3.

Data	PPV (mm/s)	Vert(mm/s)	Banco	Geof.	Freq Max/Mín(Hz)	Ret/Cargas (ms)
05/abr	4.5	2.03	980	B	64/>100	8
06/mai	5.75	2.67	1000	A	73/>100	15
10/mai	1.2	0.889	1000*	A	37/85	8
01/out	3.48	2.16	1000L	B	47/51	16
08/out	2.56	1.02	1017L	B	30/47	16

Tabela 6.2 - Comportamento da PPV (Velocidade de Partícula) nos bancos 1000 e 1017.

- Esta frente está bem mais distante da área monitorada do que as demais.

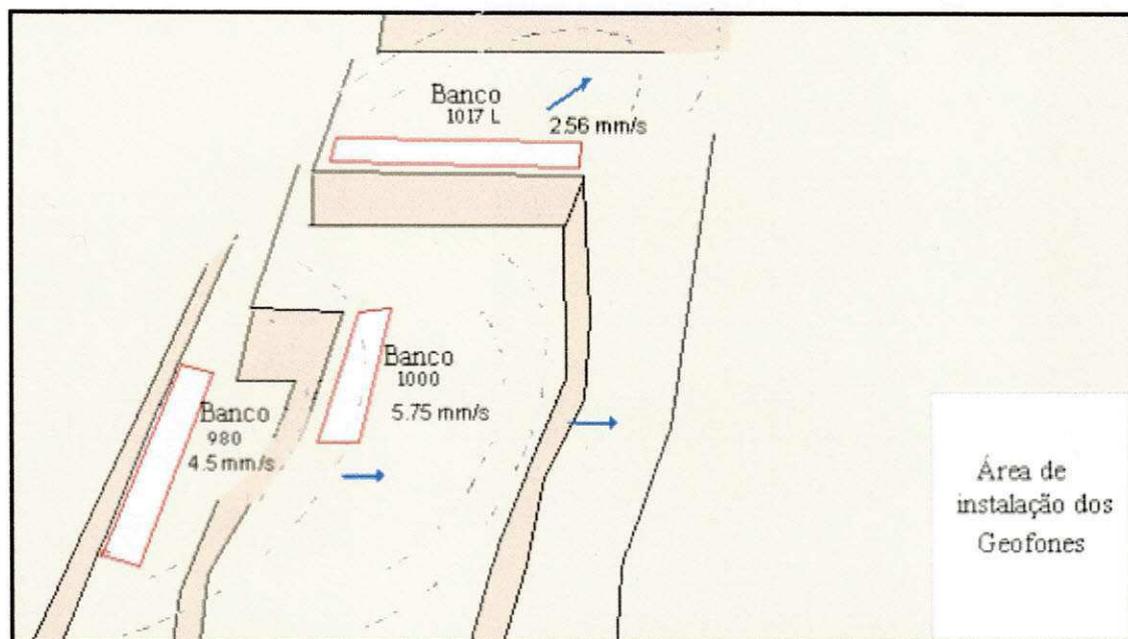


Figura 6.3 - Posicionamento dos bancos 1000 e 1017 da Pedreira de Cantareira (2002).

Além disso, a frente de lavra no banco 1017 L está a uma distância maior do que quando começaram as detonações em 28/02/02. Assim, para os desmontes dessas bancadas terminadas em L (1000 L, 1017L, 1040L e 1070L), pode-se utilizar, com cargas maiores por espera maiores que as praticadas nos desmontes com espaçadores (“decks”).

6.2 - Fragmentação

A fragmentação foi analisada a partir da avaliação do percentual de matacões, ou seja, o número de matacões por volume de rocha desmontada *in situ*. O método utilizado para a análise foi o índice de fogacho, conforme apresentado na tabela 6.3.

Mês/Ano	Vol. total desm. (situ) m ³	Vol. parc. Desm. I-Kon (situ) m ³	% do total desm.	Bancadas desmontadas	Índice de fogachos	
					C/ Espoleta Eletrônica	S/ Espoleta Eletrônica
Fev./02	30.226,60	3.303,37	10,93%	1017	2,91%	2,34%
Mar./02	24.340,51	6.519,60	26,78%	1017/1040	1,84%	1,79%
Abr./02	31.344,84	16.225,71	51,77%	1017/1040	1,32%	4,01%
Mai./02	25.737,97	15.186,22	59,00%	1000/1017	9,62%	8,80%
Jun./02	37.407,37	10.640,85	28,45%	1000/980	3,35%	3,24%
Jul./02	34.731,52	12.137,92	34,95%	1040/1017	7,37%	4,45%
Ago./02	32.291,62	25.972,87	80,43%	1040/1017/1070	6,26%	5,04%

Tabela 6.3 - Levantamento de desmonte feito com e sem a espoleta eletrônica.

- desm. – desmontado ; Vol. – volume ; C/ - com; S/ - sem.; parc. – parcial.

A tabela 6.3 apresenta os resultados medidos durante o período de fevereiro a agosto de 2002. A tabela indica os dados relativos aos desmontes feitos na pedreira, sem e com a aplicação da espoleta eletrônica.

Os resultados do desmonte são apresentados nos gráficos 6.6 e 6.7 sob a forma de histogramas, tendo a finalidade de avaliar os resultados da fragmentação.

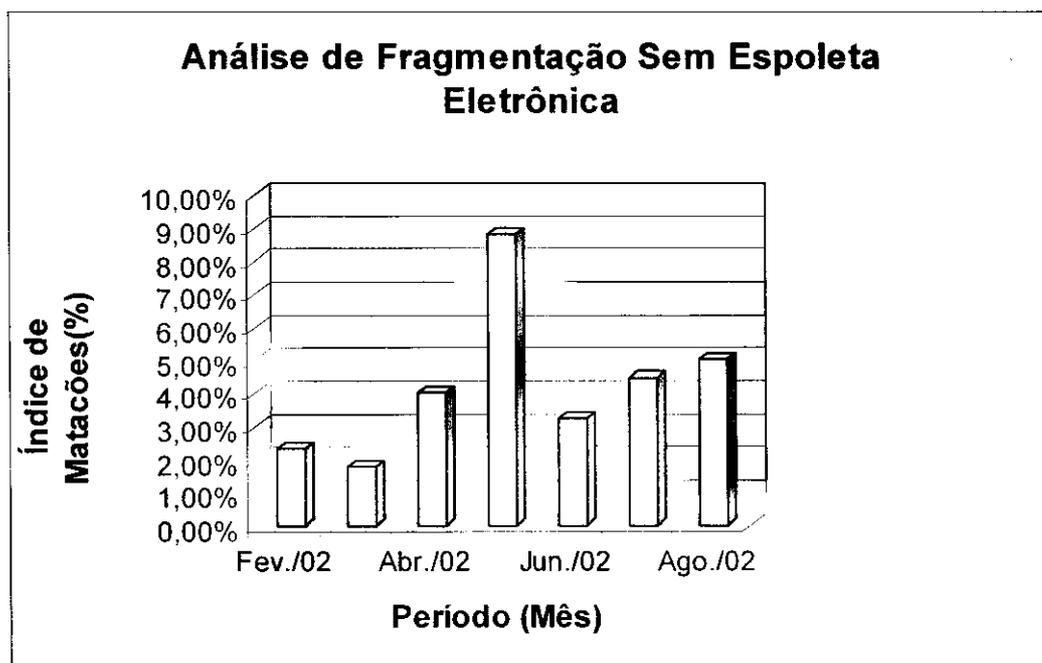


Gráfico 6.6 - Índice de matação gerado pelos desmontes realizados de fevereiro a agosto de 2002, na Pedreira Cantareira, sem aplicação dos iniciadores eletrônicos.

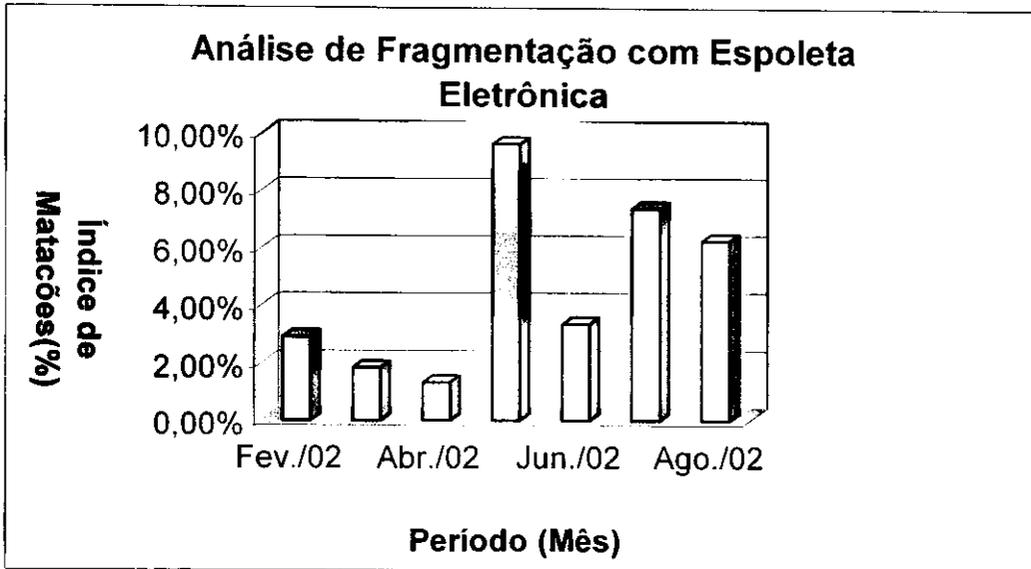


Gráfico 6.7 - Índice de matação gerado pelos desmontes realizados de fevereiro a agosto de 2002, na Pedreira Cantareira, com iniciadores eletrônicos.

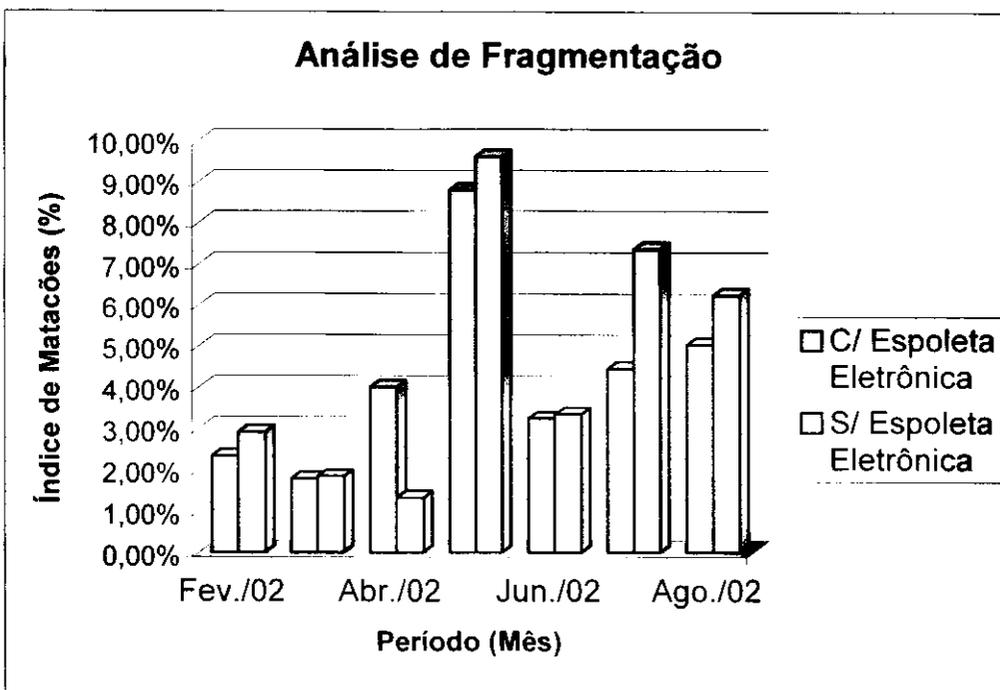


Gráfico 6.8 - Gráfico comparativo do índice de matações gerados pelos desmontes feitos de fevereiro a agosto de 2002, na Pedreira Cantareira, feito com e sem os iniciadores eletrônicos.

Foi aplicado o TESTE DE NORMALIDADE/TESTE DE DAVID, utilizando o programa “ASSISTAT/Versão 6.0 beta”, ao nível de significância de 10%, para as duas situações, tendo-se obtido os seguintes resultados:

Com Espoleta:

Maior valor de x = 9.62
 Menor valor de x = 1.32
 Média aritmética = 4.667142
 Desvio padrão(s) = 3.119614
 Limite inferior = 2.49
 Valor do teste (A) = 2.660586
 Limite superior = 3.14

CONCLUSÃO: Distribuição Normal

- Onde x = percentual de mataco (%)

Sem Espoleta:

Maior valor de x = 8.8
 Menor valor de x = 1.79
 Média aritmética = 4.238572
 Desvio padrão(s) = 2.314558
 Limite inferior = 2.49
 Valor do teste(A) = 3.028656
 Limite superior = 3.14

CONCLUSÃO: Distribuição Normal

A análise estatística dos resultados comprovou a análise gráfica, demonstrando que não houve variação significativa na média da fragmentação. Mas, para confirmar essa conclusão, foi feito o TESTE U (Teste de Wilcoxon-Mann-Whitney), aplicando o mesmo software “ASSISTAT”, para comparar duas amostras ao nível de significância de 5 e 10% de probabilidade (SILVA, 2002), obtendo-se a seguinte conclusão:

- Ao nível de 10% de significância:

Como $Z_{calc} = 0.06 < Z(10\%) = 1.65$, então as médias de percentual de mataco nos desmontes feitos com e sem a aplicação dos iniciadores eletrônicos não são diferentes entre si.

- Ao nível de 5% de significância :

Como $Z_{calc} = 0.06 < Z(05\%) = 1.96$, então as médias de percentual de mataco nos desmontes feitos com e sem a aplicação dos iniciadores eletrônicos não são diferentes entre si.

Aparentemente esses resultados não são significativos, porém vale salientar que, segundo relatórios da empresa, até setembro de 2001 trabalhava-se com uma razão de carga de 750 g/m³. Após a redução do diâmetro de furação para 3”, a razão de carga passou para 650 g/m³, até chegar a 600g/m³, quando utilizados separadores nos

explosivos distribuídos por furo. Além disto, o desmonte com “decks”, dependendo do fraturamento e do desvio de furação, pode provocar perda de parte da energia da carga explosiva e problemas de confinamento. A utilização de “*air deck*” diminui a pressão inicial dos gases produzidos pela explosão, e incrementa o confinamento dos gases e tempo de ação da explosão sobre a rocha (SILVA, 1998).

Vale ressaltar, também, que a partir de meados de abril de 2002, utilizaram-se os iniciadores eletrônicos nos bancos 1000 L, 1017L, 1040L e 1070L. Estes possuem, na lateral aberta, uma zona do maciço com fraturas de alívio geradas por escavações anteriores (figura 6.4), promovendo a formação de grandes blocos nas detonações, aumentando o índice de matações.

Seria possível melhorar essa condição, se houvesse mudança na direção de avanço nos bancos, o que resultaria em melhor fragmentação e acabamento da face. Porém, a alteração dessa direção é impossível, por causa do planejamento da lavra dos bancos.

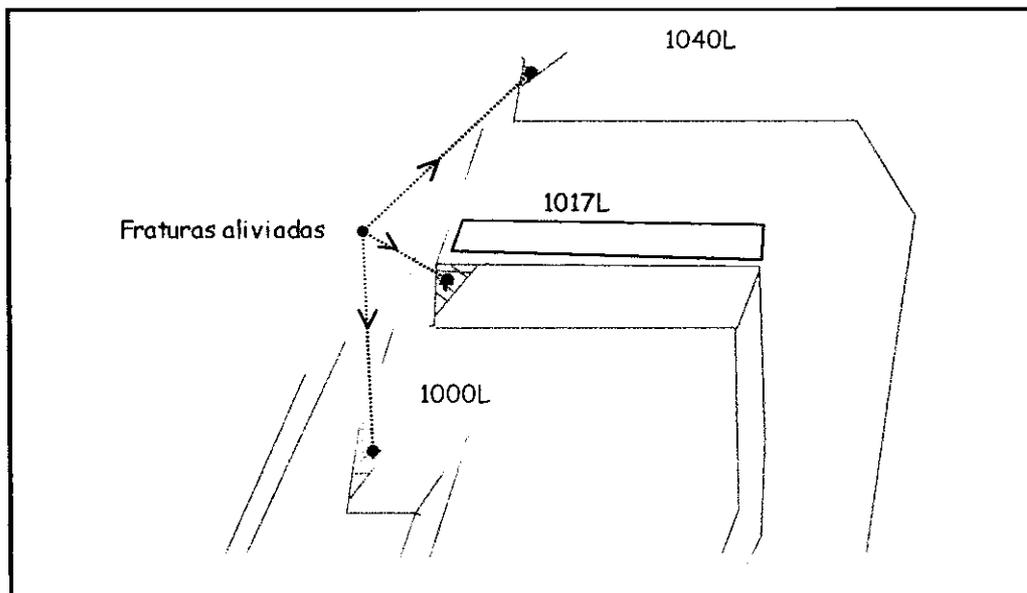


Figura 6.4 - Posicionamento das bancadas 1000L, 1017L e 1040L.

CAPÍTULO 7

7 – CONCLUSÕES E RESULTADOS OBTIDOS

Após a realização de todo o estudo, considera-se que os objetivos foram satisfeitos, tanto no controle da vibração como na fragmentação. Confirmam-se, assim, os estudos sobre a variabilidade do tempo de iniciação, demonstrando que detonadores mais precisos melhoram, significativamente, a fragmentação.

- No controle da vibração, concluiu-se que:

- Houve redução progressiva na velocidade de partícula;
- Os valores da velocidade de partícula se mantiveram dentro das normas;
- O posicionamento dos geofones não tiveram influência no alcance dos objetivos.

- No controle da fragmentação, a conclusão foi de que:

- A fragmentação se manteve dentro da média dos desmontes normalmente realizados;
- Houve uma redução do fator de carregamento e do diâmetro de furação, sem comprometimento da fragmentação;
- Devido a fragmentação teve outros fatores comprometedores, tais como: fraturas de alívio, desvios dos furos, alterações no confinamento das cargas, etc.

Segundo a empresa também houve uma melhora da operação, com a implantação do sistema de espoleta eletrônica. Pode-se destacar:

- Boa fragmentação da rocha;
- Redução do fator de carregamento;
- Formação de pilhas uniformes;
- Redução dos níveis de vibração mantendo abaixo de 4,2 mm/s;
- Redução nos custos de escavação e britagem.

7.1 - Sugestões

Algumas das sugestões para futuros trabalhos seria:

- Redução dos tempos de retardos entre a iniciação na base e centro da mesma mina;
- Manter mais de um ponto de captação por desmonte;

- Traçar isolinhas da velocidade de partícula e verificar sua relação com o sentido da seqüência de detonação;
- Encontrar a curva granulométrica da fragmentação;
- Utilizar todos os sistemas de monitoramento apresentados no capítulo 4 para monitoramento e avaliação dos desmonte;
- Avaliar a precisão fornecida pela espoleta.

8 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMADEI, B.; STEPHENSON, O. - **Rock stress and it's measurement.** – Cambridge, University Press / Chapman & Hall, 1997. 490p.
- BAZANTE, A. J.; BONATES, E. J. L.; MACEDO, A. J. B. – II Congresso Brasileiro de Mina á Céu Aberto e II Congresso Brasileiro de Mina Subterrâneas - **Desenvolvimento de Um Modelo de Simulação Para Estimar a Interferência dos Tempos de Detonação** – Belo Horizonte - MG, Set/2002, p. 9.
- CAMERON, A. & HAGAN, T. – 1996 – **Curso Internacional de Desmonte de Rocha com Explosivo para Minas a Céu Aberto e Subterrâneas.** IBRAM.
- CINTRA, B. H. (1993) – **Projetos de Desmonte de rocha com Explosivos** – SAMA - p. 134.
- CINTRA, B. H. (1997) – **Engenharia dos Explosivos** – SAMA, p.222 .
- CROSBY, W. A. (1998) - **Drilling and Blasting in Open Pits and Quarries** – Mining resource engineering Limited, 1555 sydenham Road, R.R.#8, Kingston, Ontario, Canada, Vol. 1 e 2, 39 a 42 p.
- CUDZILO S. – **Shock Initiation Studies of Ammonium Nitrate Explosives - Fuel and Energy Abstracts** Copyright © 2003 The Institute of Energy Volume 36, Issue 6, Pages 402-477 (November 1995).
- DOLAN, J. E. Explosives in the service of man. **The Journal of Explosives Engineering**, Cleveland, v.14, n.1, p.8-12, 1997.
- DOMINGOS, L. C. G. - **Estrutura da Terra** – Editada em 2000, Coimbra, Portugal. Última atualização 06/05/03. Disponível em : <<http://domingos.home.sapo.pt/index.html>>. Acesso em 15/Ago./2002.
- DOWN, C. G. (1978) – **Environmental Impact of Mining.**
- DOWDING, C. H. & AIMONE, C. T. – **Mining Engineering Handbook** - Cap. 9 , 1993, p. 722 – 978.
- EDL JR., J. N. - **First International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting** - The Role of Waves in Explosively Induced Bulk Rock Motion - Sweden, august de 1993, p. 15.
- ESTON, S. M. - **Uma Análise dos Níveis de Vibração Associados a Detonação** - tese(Livre Docência) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Minas, São Paulo- SP, 1998,60 – 87p.

- EXPLO/ICI e UFPB/CCT, (1997) – **Curso de Tecnologia Avançada em Desmonte de rocha com Aplicação de Explosivo**. Campina Grande, 123 p.
- GROUHEL, P., KLEINE, T. H. – **Designer: a spreadsheet for determining the most cost effective for an open cut blast** - Third Large Open Pit Mining Conference: 1992. Proceedings MacKay, Australia, 237-245 p.
- HERMANN, C. (1968) – **Manual de Perfuração de Rocha** – São Paulo, Polígono, Cap. C. 2 – 5, 96 – 141 p.
- HARTMAN, H.L. (Ed.), - **SME Mining Engineering Handbook** - AIME, 1992.
- **For the latest information on the I-kon™ digital blasting revolution click here** – Editada em 2000, Coimbra, Portugal. Última atualização 06/05/03. Disponível em : < <http://www.i-konsystem.com/html2/index.html>. > Acesso em 15/Ago./2002.
- KONYA, C. J. – **Blast design, Montville** - , USA: 1995. Intercontinental Development. 230 p.
- HOPLER, R. B. – **History of the development and use Bulk Loaded Explosives from Black Powder to Emulsion** – Proceedings of the Ninth Conference on Explosives and Blasting Techniques – SEE –1993.
- LADEIRA, F. L., - **Curso de mecânica das rochas** – Ouro Preto, Escola de Minas da UFOP, Departamento de Mineração, 1976. 425 p.
- LANGEFORS, U. & KIHLSSTROM, B.; - **The Modern Technique of Rock Blasting** - John Wiley & Sons. 2nd edition. 1979.
- LEMOS, J. E. G. – **Avaliação de ruídos em área urbana – caso CIMEPAR - João Pessoa Pessoa-PB** – Campina grande, 2000. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Mineração e Geologia, Universidade federal da Paraíba, 96 p.
- LEWIS, N. ; PEREIRA, P. - **Operating Improvements at Vulcan Materials McCook Quarry using Electronic Detonators** - International Society of Explosives Engineers, 2003, USA, Volume 2, p. 14.
- IRAMINA, W. S. - **Desmonte de rocha e controle ambiental**. São Paulo, 1997. Dissertação (Mestrado) Departamento de Engenharia de Minas. Orientador: Sérgio Medici de Eston, 128p.
- IRAMINA, W. S. - **Desmonte do mapa de iso-velocidades como ferramenta de controle ambiental e rocha e controle ambiental**. São Paulo, 2002. 223p. Dissertação (Doutorado) Departamento de Engenharia de Minas. Orientador: Sérgio Medici de Eston.

- IRAMINA, W. S.; ESTON, S. M. de B.; LANDIM, P. M. B.; CORTE, D. de La - Principais normas e recomendações existentes para o controle de vibrações provocadas pelo uso de explosivos em áreas urbanas - Parte I. **REM(Revista Escola de Minas)** . Ouro Preto-MG, p.56, Jan-Mar 2003.
- MORHARD, R. C. (1954)(1987)- **Esplosives and Rock Blasting**, Atlas Powder Company, p. 661.
- MUNARETTI, H. - **Avaliação da Utilização de Anfo Fabricado *In Situ* em Pedreira de Calcário**. 1997. p.107. Dissertação de Mestrado em Eng. de Minas, PPGEM / UFRS, Porto Alegre, RS.
- MUNARETTI, H.; KOPPE, J. C.; COSTA, J. C. L. – Mineração - O uso de anfo na redução de custo de desmonte em pedreira de calcário. **REM(Revista Escola de Minas)** . Ouro Preto-MG, p.176-181, Jul-Set 1999.
- OLOFSSON, S. O. – **Applied explosives technology for construction and mining** -, 2 ed. vv., Arla, Sweden: Applex, 1990. 304 p.
- SEN, G. C.; SILITONGA, M. - **Safe ground vibration levels in blasting operations** - INTERNATIONAL CONFERENCE OF SAFETY IN MINES, 21 – Proceedings... Sidney, Austrália, 1985, 743-750 p.
- SCOTT, A., ed. - **Open Pit Blast Design: analysis and optimization** – queens land, Julius Kruttschnitt Mineral research Center, 1996. (Monograph Series in Mining and Mineral Processing, 1).
- SIEGEL, S. (1979) - **Estatística não-paramétrica** - Para as Ciências do Comportamento - Editora Mc Graw - Hill do Rasil Ltda., Brasil, p. 350.
- SILVA, C. M. (2000) – **Desenvolvimento de Tecnologia Eletrohidráulica Aplicada ao Desmonte de Rochas em Áreas Urbanas** – Cap. 2, EPUSP. 2001, S. Paulo/SP.
- SILVA, F. de A. S. e. & AZEVEDO, C. A. V. de. Versão do programa computacional Assistat para o sistema operacional Windows. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande,v.4,n.1,p71-78,2002.
- SILVA, V. C. (1998) – **Desmonte de Rochas com Explosivos** - IETEC – Belo Horizonte –MG, 140 p.
- SILVA, V. C. (1998) – **DESMONTE** – Plano de Fogo para o Desmonte Escultural. **Mineral e Minerais**. n 227. Ouro Preto-MG, p.28-31, Abril 1998.

- SMIT F.C.; PISTORIUS, C.W.I. – **Implications of the Dominant Design in Electronic Initiation Systems in the South African Mining Industry - A Cyclical Model of Technological Change** - Technological Forecasting and Social Change, November 1998, vol. 59, no. 3, pp. 255-274(20) Elsevier Science.
- STAGG, M.S., RHOLL, S.A., OTTERNESS, R.E., **The effect of explosive type and delay between rowson fragmentation**, Proceedings of the 15th Conference on Explosives and Blasting Technique, Society of Explosives Engineers, Annual Meeting, New Orleans, February 1989, 353-366.
- STIRLING, A. G. - **Digital Energy Control – A New Tool for Blasting** - Orica USA Inc., Watkins, CO, 2003, p. 5.
- ROLIM, C. A. - DESMONTE – Substituição de Cordel detonante por detonador não-elétrico pode reduzir custos. **Mineral e Minerale**. n 228, p. 33-34. Maio de 1998.
- ROLIM FILHO, J. – Considerações sobre desmonte de rochas ênfase aos basaltos, feições e entablamento. Tese. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos/SP. 1993. 216 p.
- WERNICK, E.; FERREIRA, C. J.; HORMANN, P. K.; TEUPPENHAYN, J. P.; GALEMBECK, T. M. B. – **Padrões de ETR em Granitos Crustais, Cálcio-Alcalinos, e Rapakivi: Influência dos Minerais Acessórios** - Revista Brasileira de Geociências, Vol. 26(4):289-302, dezembro de 1996, pg. 290-291.
- WHITAKER, B. N.; SINGH, R. N.; SUN, G. - **Rock fracture mechanics: principles, design and applications** – Amsterdam, Elsevier Science Publishers, 1992. Cap. 13, 570p.

