

**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
CAMPUS II**

**COORDENAÇÃO DO CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA DE MINAS**

**ESTUDO DA FRAGMENTAÇÃO EM DESMONTE COM EXPLOSIVOS  
NA PEDREIRA QUEIMADAS-PEDRAQ**

**POR: JULIO CESAR DE PONTES**

**Campina Grande - 1998**

JULIO CESAR DE PONTES

**ESTUDO DA FRAGMENTAÇÃO EM DESMONTE COM EXPLOSIVOS  
NA PEDREIRA QUEIMADAS-PEDRAQ**

**Dissertação apresentada a banca examinadora  
do curso de Mestrado  
em Engenharia de Minas da Universidade  
Federal da Paraíba – UFPB, como requisito  
parcial à obtenção do título de Mestre em  
Engenharia de Minas.**

**Área de Concentração: Lavra de Minas**

**Orientador: Prof. Dr. José Lins Rolim Filho**

**Co-Orientador: Prof. Dr Aarão de Andrade Lima.**

**Campina Grande**

**1998**



P814e

Pontes, Julio Cesar de.

Estudo da fragmentação em desmonte com explosivos na  
pedreira Queimadas-Pedraç / Julio Cesar de Pontes. -  
Campina Grande, 1998.

128 f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas) -  
Universidade Federal da Paraíba, Centro de Ciências e  
Tecnologia, 1998.

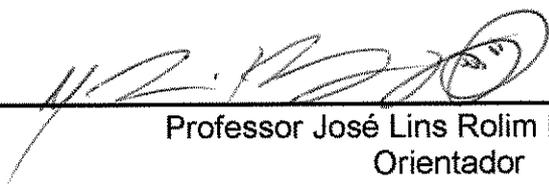
"Orientação : Prof. Dr. José Lins Rolim Filho, Prof. Dr.  
Aarão de Andrade Lima".

Referências.

1. Explosivos - Desmonte - Paraíba. 2. Pedreira -  
Queimadas (PB). 3. Fragmentação - Estudo. 4. Dissertação -  
Engenharia de Minas. I. Rolim Filho, José Lins. II. Lima,  
Aarão de Andrade. III. Universidade Federal da Paraíba -  
Campina Grande (PB). IV. Título

CDU 622.235(813.3)(043)

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DEFENDIDA E APROVADA EM 03 DE JULHO DE  
1998 PELA BANCA EXAMINADORA CONTITUÍDA PELOS PROFESSORES:



---

Professor José Lins Rolim Filho – Ph.D.  
Orientador



---

Professor Aarão de Andrade Lima – Ph.D.  
Co-Orientador



---

Professor Tumkur Rajarão Gopinath – Ph.D.  
Examinador



---

Professora Felisbela Maria da Costa Oliveira – Ph.D.  
Examinadora

**CAMPINA GRANDE**

**1998**

## DEDICATÓRIA

Toda graça, gentileza e delicadeza vem da assimetria. Um ser humano é incapaz de criar a perfeição.

Tudo vem em ciclos. Viver é isso.

Somos seres perecíveis, que sem: amor, compreensão, saúde, dedicação e carinho, temos nossas validades antecipadas e jamais conseguiremos o bril indelével do sol, da lua e das estrelas.

Compreendo que nascemos iguais em dignidade e direitos, e acredito cada vez mais em Deus e na sua onipresença.

Portanto, dedico este trabalho a todos que têm objetivo definido e mesmo que com as maiores dificuldades, às enfrentam e o atinge; dando de si próprio, o seu tudo...

## AGRADECIMENTOS

À direção Geral e a Coordenação de Geologia e Mineração da Escola Técnica Federal do Rio Grande do Norte, nas pessoas dos professores: Francisco das Chagas de Mariz Fernandes e Paulo Roberto Leiros de Souza.

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), à Universidade Federal da Paraíba, aos organismos que, sabiamente, lutam pela manutenção e crescimento da educação, ciência e tecnologia do nosso país, atributos capazes de resolver a maioria dos nossos problemas.

Agradecimentos especiais ao Prof. Dr. José Lins Rolim Filho, pela orientação e sugestões sem o qual seria impossível este trabalho.

Reconhecimento especiais aos: Prof. Dr. Aarão de Andrade Lima, Prof. Dr. Tumkur Rajarão Gopinath e Prof. Vicente de Paula Medeiros de Freitas pelas valiosas contribuições e dedicação, contribuindo para elevação do nível deste trabalho. Gostaria ainda de externar meus sinceros agradecimentos aos professores: Prof. João Batista Monteiro de Souza, Prof. Alexandre Rocha da Rocha, Prof. Dr. Emanuel Jardim de Sá, Prof. Eurípides de Medeiros Júnior e a Fabio Cavalcante pelas colaborações no tocante a este assunto.

A todos que fazem a PEDRAQ, pela grande contribuição na coleta dos dados e informações imprescindíveis para realização desta dissertação.

Aos meus familiares que souberam compreender e aceitar minha ausência durante exaustivas horas de trabalho, sobretudo minha esposa, Alana Abrantes Nogueira de Pontes e meu filho Alcindo Neto.

Aos demais funcionários e professores do Departamento de Engenharia de Minas da UFPB, pelo atendimento sempre cordial aos nossos pleitos. A todos, meu reconhecimento e sinceros agradecimentos.

## RESUMO

A presente dissertação tem o objetivo de analisar a fragmentação obtida com desmonte por explosivos na pedreira localizada no município de Queimadas, Estado da Paraíba, a qual é de propriedade da empresa (PEDRAQ). A rocha extraída é classificada como um granodiorito, sendo utilizada na produção de brita para aplicação na construção civil, principalmente na região de Campina Grande. O trabalho desenvolve-se inicialmente por uma revisão sucinta da tecnologia da aplicação de explosivos em obras civis, tratando principalmente das propriedades dos explosivos, propagação de ondas no maciço rochoso, mecanismos de fragmentação, e planos de fogo. A etapa de campo envolveu a medição de blocos fora de especificação (blocos superior a 0,70m em uma de suas dimensões), para o caso de dez desmontes primários. Os dados das medições dos blocos fora de especificação foram compilados em tabelas. Os volumes dos blocos fora de especificação em relação ao volume de rocha desmontado em cada fogo variou de 28 a 70 por cento, sendo superior a 53 por cento para nove dos dez fogos analisados. Procedeu-se ao levantamento topográfico por irradiação de toda a pedreira, seguido de um minucioso mapeamento das juntas presentes no maciço, nas duas bancadas. Os dados dos levantamentos topográfico e geotécnico serviram de base para a confecção de plantas e cortes. Através de plotagem em projeções hemisféricas foram detectadas duas famílias de juntas sub-verticais, com direções aproximadamente normais. Os espaçamentos médios para as juntas das duas famílias foi determinado, obtendo-se os valores em torno de 5 e 9 metros. Os boletins dos fogos fornecidos pela empresa foram analisados. Para efeito de comparação, as quantidades dos diferentes explosivos usados foram convertidas em energia dinâmica e energia semi-estática, sendo plotadas juntamente com a percentagem de blocos fora de especificação. Conclui-se que o efeito das juntas na geração de blocos fora de especificação é dominante. Para melhoria da fragmentação é sugerida redução da altura de bancadas bem como escolha do explosivo com base nas energias dinâmica e semi-estática, em relação ao espaçamento das juntas. Ficou patenteado pelo estudo a excessiva geração de blocos fora de especificações nos dez fogos estudados, acarretando problemas de ruído, ultralancamento, aumento de custo de perfuração, explosivo e mão de obra.

## ABSTRACT

The main objective of the present dissertation is to analyze the fragmentation resulting from blasting at a quarry located at Queimadas County, in the State of Paraíba. The quarry is owned by PEDRAQ company. The rock, classified as granodiorite, is used for the production of crushed stone, which is consumed at construction sites in the Campina Grande region. The research work consists initially of a condensed review of the technology of explosives engineering, treating mainly of explosives properties, propagation of shock and elastic waves, rock fragmentation mechanisms, and design of blasting rounds. The field works involved the measurement of oversize rock blocks (blocks with at least one dimension larger than 0.70m), encompassing a set of ten primary blast rounds. The data from the measurement of oversize blocks was organized in a set of tables. The relationship between the volumes of oversize blocks with respect to the total volume of rock for each blasting round varied from 28 to 73 percent, with values over 53 percent for nine, among the ten blasting rounds studied. A topographic survey of the whole quarry was conducted, followed by a detailed mapping of rock mass joints, at both benches. The data from the topographic and geotechnical surveys were plotted in plan views and vertical sections. From the hemispheric projection of joint poles, two sets of sub-vertical joints were detected. The direction of those joint sets are approximately normal, with joint spacing around 5 and 9 meters. The bulletins of round blasts supplied by the company were analyzed. For the sake of comparison, the quantities of different types of explosives were converted into dynamic and semi-static energy. The energy per volume of rock blasted was plotted against the percentage of oversize blocks for the ten blasting rounds analyzed. From those graphs it has been concluded the major influence of rock joints density into the generation of oversize blocks. In order to improve fragmentation a reduction of bench height is suggested. Also, it is emphasized the importance of selection of explosive type considering joint spacing for different domains of the rock mass. From this study it has been shown the excessive generation of oversize blocks, with the need of extensive secondary blasting, causing air blast and fly rock problems, in addition to high drilling, explosives, and manpower costs.

**SUMÁRIO**

<b>AGRADECIMENTOS .....</b>	<b>i</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>ii</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>iii</b>
<b>SUMÁRIO.....</b>	<b>iv</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS.....</b>	<b>viii</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>ix</b>
<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>x</b>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 Apresentação.....	1
1.2 Objetivos da Pesquisa .....	2
1.3 Justificativa .....	3
1.4 Metodologia .....	4
<b>2 EXPLOSIVOS CIVIS .....</b>	<b>5</b>
2.1 Histórico .....	5
2.2 Explosivos Industriais .....	8
2.2.1 Processo de Decomposição dos Explosivos .....	10
2.2.2 Classificação dos Explosivos Industriais .....	12

2.2.3	Principais Propriedades dos Explosivos .....	14
<b>3</b>	<b>ONDAS</b>	<b>22</b>
3.1	Ondas Elásticas .....	22
3.1.1	Propagação .....	23
3.1.2	Reflexão em Superfícies Livres .....	25
3.2	Ondas de Choque .....	26
3.2.1	Relação das Características do Material na Frente da Onda de Choque .....	26
3.2.2	Indução de Ondas de Choque por Detonação de Explosivos .....	30
3.3	Algumas Considerações de Superposição de Ondas de Choque .....	34
3.4	Ondas de Rarefação ou de Expansão .....	36
3.5	Considerações Finais .....	36
<b>4</b>	<b>DESMONTE EM MACIÇOS ROCHOSOS</b>	<b>38</b>
4.1	Características Técnicas e Uso dos Explosivos Químicos Convencionais no Desmonte de Rocha . .....	38
4.2	Desmonte com Explosivos Químicos Convencionais .....	41
4.3	Desmontes Esculturais ou Controlados .....	42
4.3.1	Perfuração Contínua (Line Drilling) .....	43
4.3.2	Carga Amortecida (Cushion Blasting) .....	44
4.3.3	Corte Prévio (Pré Splitting) .....	44
4.3.4	Resumo .....	45

4.4	Mecanismo de Fragmentação nos Desmontes a Explosivos .....	46
4.5	Projetos de Plano de Fogo a Céu Aberto .....	51
4.5.1	Definição dos Elementos do Plano de Fogo .....	53
4.6	Posicionamento das Bancadas em Função das Feições Estruturais .....	65
4.7	Influência das Características Geomecânicas da Rocha e do Maciço Rochoso nos Desmontes .....	68
4.8	Análise do Rendimento Energético nos Desmontes de Rocha .....	73
<b>5</b>	<b>ESTUDO DE CASO</b> .....	<b>77</b>
5.1	Pesquisa de Campo .....	77
5.2	Trabalhos de Gabinete .....	77
5.2.1	Metodologia para Medição em Mapa dos Espaçamentos Médios entre Juntas .....	80
5.2.2	Discussão dos Resultados dos Espaçamentos Médio entre as Juntas .....	81
5.3	Considerações Gerais Sobre a Geologia Regional .....	82
5.4	Jazimento Mineral (Tectônica Local) .....	84
5.5	Aspectos Petrográficos do Maciço Rochoso da Área em Estudo .....	85
5.5.1	Aspectos Petrográficos das Unidades Biotita-Hornblenda Granodiorito .....	86
5.6	Descrição e Interpretação das Faces da Bancada .....	89
5.7	Aspectos Gerais da Lavra .....	97
5.7.1	Classificação do Maciço .....	99
5.8	Análises e Interpretações dos Desmontes Primários .....	99
5.8.1	Análise Global do Desmonte .....	100
5.8.2	Considerações Energéticas .....	103

5.8.3	Sugestões .....	104
5.9	Discussão e Conclusões .....	106
5.10	Sugestões para Futuras Pesquisas .....	110

<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>111</b>
-----------------------------------	------------

<b>ANEXOS</b>	<b>118</b>
---------------	------------

## LISTA DE SÍMBOLOS

### CAPÍTULOS 1, 2 E 5

SÍMBOLO	SIGNIFICADO
Az	Azimute
CO <sub>2</sub>	Gás Carbônico
km	Quilômetros
TNT	Trinitrotolueno
G <sub>3</sub>	Ciclo orogenético brasileiro
RQD	Razão entre o total de partes intactas com comprimentos $\geq 100$ mm de testemunho recuperado em relação ao comprimento total do furo.
RMR	Parâmetro de qualidade do maciço para o sistema de classificação de Bieniawski.
$\sigma$	Tensão normal no plano de quebra de uma partícula.
D	Energia dinâmica.
SE	Energia Semi-estática

### CAPÍTULO 3

A	Área secção transversal da barra
A <sub>i</sub>	Amplitude da onda incidente
A <sub>r</sub>	Amplitude da onda refletida
A <sub>t</sub>	Amplitude da onda transmitida
Co	Velocidade do som no estado natural ou inicial
CP	Calor específico a pressão constante
De	Velocidade de detonação do explosivo
E	Módulo de elasticidade do sólido
G	Módulo de rigidez
I	Impedância
I (1,2)	Impedâncias nos meios 1 e 2 respectivamente

$l(r, e)$	Impedância rocha e explosivo
$k$	Constante da curva velocidade de onda e velocidade de partícula.
$K$	Módulo de elasticidade volumétrico.
$l$	Deformação
$L$	Comprimento deslocado pela frente de onda no tempo $t$ .
$M$	Massa perturbada.
$P$	Pressão
$PCJ$	Pressão no Plano Chapman – Jouguet ou pressão de detonação.
$P'_{CJ}$	Pressão de detonação medida no plano normal à propagação da onda de detonação.
$P(1,0)$	Pressão após e antes do choque.
$P'$	Pressão da interface
$P_i$	Pressão inicial
$P_r$	Pressão da onda refletida
$P_t$	Pressão transmitida
$S$	Coefficiente de Mie-Gruneisen.
$t$	Tempo.
$T(0,1)$	Temperatura antes e após o choque
$U$	Velocidade da onda de perturbação no meio rocha.
$U_i$	Velocidade da onda de choque ao se propagar no meio (onda incidente).
$U_r$	Onda refletida na interface.
$U_s$	Velocidade da onda de choque ao se propagar.
$U_{si}$	Velocidade da onda de choque ao se propagar no meio (Onda incidente).
$U_t$	Onda transmitida.
$V$	Velocidade da onda elástica no material.
$V$	Velocidade da partícula.
$V_0$	Velocidade da partícula antes do choque.
$V_1$	Velocidade da partícula após o choque.
$V(0,1)$	Velocidade das partículas nos meios descomprimido e comprimido.

Vol (1,0)	Volume de massa unitária após o choque e antes dele.
X	Direção de propagação da onda.
$\beta$	Coefficiente de expansão térmica.
$\varepsilon$	Deformação unitária normal longitudinal.
$\lambda$	Constante de amortecimento
$\nu$	Coefficiente de Poisson do corpo
$\rho$	Densidade do material em que a onda se desloca
$\rho_e$	Densidade do explosivo
$\rho_o$	Densidade antes do choque
$\rho_1$	Densidade após o choque
$\rho$ (1,2)	Densidade nos meios 1 e 2 respectivamente
$\sigma$	Tensão
$\sigma_o$	Tensão antes do choque
$\sigma_1$	Tensão após o choque.
$\Gamma$	Constante de Mie-Gruneisen

## Capítulo 4

A	Afastamento, em metros exceto quando especificado
C	Fator de rocha
C <sub>po</sub>	Coefficiente de profundidade ótima
D	Distância do furo
D <sub>e</sub>	Velocidade de detonação no Plano Chapman-Jouguet
E	Número neperiano
E <sub>a</sub>	Energia absorvida pela rocha
E <sub>ac</sub>	Energia desenvolvida pelo explosivo de coluna e absorvida pela rocha
E <sub>af</sub>	Energia desenvolvida pelo explosivo de fundo e absorvida pela rocha
E <sub>c</sub>	Energia desenvolvida pelo explosivo de coluna
E <sub>f</sub>	Energia desenvolvida pelo explosivo de fundo

En	Fator de tensão energético
Eta	Energia total desenvolvida pelos explosivos e absorvida pela rocha
Ew	Energia desenvolvida pelo explosivo por quilo
Ewk	Energia desenvolvida pelo explosivo expansão trabalho
Ewkf	Energia desenvolvida pelo explosivo de fundo/kg
Ewkc	Energia desenvolvida pelo explosivo de coluna/kg
f	Fator de fixação de fundo a depender da inclinação da bancada
Fs	malha média de fragmentação
Ga	Grau de atacamento
H	Altura de bancada
le	Impedância do explosivo
lr	Impedância da rocha
lie	Impedância da coluna explosiva
lic	Impedância ao impacto do explosivo de fundo
lic	Impedância ao impacto do explosivo de coluna
lir	Impedância ao impacto da rocha
K	Constante do meio rocha
L	Comprimento do furo
lc	Comprimento médio do bloco a ser obtido
n	Coefficiente de alcance das fraturas
N	Peso do explosivo utilizado
P	Pressão de choque na parede do furo
Pdet	Pressão de detonação do explosivo
Pg	Pressão no furo de observação (psi)
Pgcor	Pressão corrigida
Q	Carga
Qc	Carga de coluna
Qf	Carga de fundo
Qu	Resistência à compressão uniaxial
R	Raio do furo carregado
R	Raio de enfraquecimento da rocha sob ação dos explosivos

Rlcc	Razão linear de carga de coluna
Rlcf	Razão linear de carga de fundo em regime de cratera
Rlcf <sub>r</sub>	Razão linear de carga de fundo
Rv	Relação de adensamento de carga
S	Potência relativa do explosivo
Voir	Volume de rocha a fragmentar
Vr	Velocidade sônica na rocha
$\omega_1$	Rendimento por incompatibilidade de impedância
$\omega_2$	Rendimento por atacamento
$\omega_3$	Rendimento na refragmentação da energia semi-estática
$\alpha$	Inclinação do furo
$\rho$	Densidade em g/cm <sup>3</sup>
$\emptyset$	Diâmetro do furo em milímetros, exceto quando especificado
$\Phi$	Diâmetro da carga
$\rho$ (e,r)	Densidade do explosivo e da rocha respectivamente
$\mu_c$	Volume da pá carregadeira em jardas cúbicas
$\varepsilon_{frag}$	Energia de fragmentação

**LISTA DE FIGURAS**

- FIGURA 2.1** Comparação Sensibilidade X Efeito
- FIGURA 2.2** Processo de Decomposição dos Explosivos
- FIGURA 2.3** Plano Chapman Jouguet
- FIGURA 2.4** Características Classificatórias de Acordo com as Propriedades Básicas dos Explosivos
- FIGURA 2.5** Influência do Diâmetro da Carga no Parâmetro Velocidade de Detonação
- FIGURA 3** Tipos de Ondas Mecânicas
- FIGURA 3.1** Barra delgada submetida a pulso de pressão
- FIGURA 3.2** Deslocamento de Ondas
- FIGURA 3.3** Velocidades (ondas X partículas)
- FIGURA 3.4** Interação de ondas entre meios ( $l_d < l_e$ )
- FIGURA 3.5** Curva de Hugoniot ( $l_d < l_e$ )
- FIGURA 3.6** Interação de ondas entre meios ( $l_d > l_e$ )
- FIGURA 3.7** Curva de Hugoniot ( $l_d > l_e$ )
- FIGURA 4a** Plano Visual do primeiro estágio
- FIGURA 4b** Plano Visual do segundo estágio
- FIGURA 4c** Plano Visual do terceiro estágio
- FIGURA 4.1** Importância da fragmentação nos custos de produção
- FIGURA 4.2** Mecanismos de Fragmentação das Rochas
- FIGURA 4.3** Curva de variação de pressão sobre as paredes do furo X tempo
- FIGURA 4.4** Direção ideal da Detonação
- FIGURA 4.5** Expansão das ondas de choque
- FIGURA 4.6** Posicionamento das bancadas em função das feições estruturais

- FIGURA 4.7** Posicionamento das bancadas em função das feições estruturais
- FIGURA 4.8** Posicionamento das bancadas em função das feições estruturais
- FIGURA 4.9** Posicionamento das bancadas em função das feições estruturais
- FIGURA 4.10** Posicionamento das bancadas em função das feições estruturais
- FIGURA 4.11** Carregamento interceptado por vazios
- FIGURA 5.1** Mapa de localização da área
- FIGURA 5.2** Blocos fora de especificações
- FIGURA 5.3** Mapa geológico regional
- FIGURA 5.4** Granito de Queimadas
- FIGURA 5.5** Biotita-Honblenda Granodiorito
- FIGURA 5.6** Rocha Migmatítica com predomínio das fácies nebulíticas
- FIGURA 5.7 À**
- FIGURA 5.12** Representação da face estrutural da bancada inferior
- FIGURA 5.13 À**
- FIGURA 5.20** Representação da face estrutural da bancada superior
- FIGURA 5.21** Desmontes diferenciados
- FIGURA 5.22** Gráfico Energia Dinâmica X % Vol. > 0.70 m
- FIGURA 5.23** Gráfico Energia Semi-estática X % Vol. > 0.70 m
- FIGURA 5.24** Gráfico Energia Dinâmica/Semi-estática X % Vol. > 0.70 m
- FIGURA 5.25** Gráfico Energia Total X % Vol. > 0.70 m

**LISTA DE TABELAS**

<b>TABELA 4.1</b>	Classificação Quanto à Resistência e Plasticidade da Rocha
<b>TABELA 4.2</b>	Classificação de Fraturas na Rocha Segundo Lang (1972)
<b>TABELA 4.3</b>	Classificação de Fraturas na Rocha Segundo Diniz Da Gama (1976)
<b>TABELA 5.1</b>	Resultados dos Espaçamentos Médios entre as Juntas
<b>TABELA 5.2</b>	Tabela Geral dos Desmontes Primários
<b>TABELA 5.3</b>	Demonstrativo de Energia Dinâmica por Fogo
<b>TABELA 5.4</b>	Demonstrativo de Energia Semi-Estática por Fogo
<b>TABELA 5.5</b>	Resultados de Energia Dinâmica/Semi-Estática dos Fogos
<b>TABELA 5.6</b>	Resultados de Energia Total dos Fogos

# **1 INTRODUÇÃO**

## **1.1 APRESENTAÇÃO**

Na evolução histórica da mineração, observa-se que tem sido feito um grande esforço em pesquisas, objetivando uma maior produtividade no desmonte de rochas. Nas últimas décadas as técnicas de desmonte de rocha tiveram uma evolução bastante significativa, buscando alternativas seguras e econômicas, tanto no desmonte primário quanto no secundário.

Entretanto, verificam-se que são vários os problemas provocados pelo processo de mineração, que vão desde uma intervenção severa na ecologia local, até a segurança, quando os trabalhos se desenvolvem em meios urbanos.

O presente trabalho tem a finalidade de levantar e discutir alguns dos principais problemas gerados pela ação dos desmontes a explosivos na mineração a céu aberto, bem como enumerar e propor algumas medidas para minimizar os seus efeitos. Além disto, estudar os fraturamentos existentes no maciço rochoso da pedreira (Pedra-Queimadas/PB) com o objetivo de otimizá-la através de um planejamento adequado.

Em se tratando de qualidade total, a segurança é um fator primordial no desenvolvimento de qualquer atividade humana. Os acidentes envolvendo homens e/ou máquinas sempre ocorrem devido ao mau emprego de técnica, dimensionamento errôneo dos equipamentos e, na maioria dos casos, associados ao excesso de confiança desprezando as mais elementares normas básicas de segurança.

## 1.2 OBJETIVOS DA PESQUISA

A finalidade da detonação é fragmentar a rocha a ponto de torná-la compatível com os equipamentos da pedreira ou mina. Como apenas uma minoria de pedreira e minerações opera com planejamento ou dispõe de um sistema de avaliação que viabiliza controles e análises do que ocorre em seus processos, torna-se necessário dizer que: Em termos de produção, os responsáveis devem estruturar seus trabalhos e técnicas para obter a maximização na produção ao menor custo.

Portanto, esta pesquisa tem como objetivo oferecer suporte técnico para melhor aproveitamento da energia desenvolvida pelos explosivos no processo de fragmentação de rocha, além de mostrar que a otimização do desmonte por explosivos reduz consideravelmente os custos globais de uma pedreira ou mineração, demonstrando que a explosão é uma forma de energia barata capaz de realizar muito trabalho.

### 1.3 JUSTIFICATIVA

A humanidade encontra-se na era das grandes realizações. A cada dia que se passa o homem necessita de vias rápidas de transportes, grandes potenciais eletro-energéticos, sendo imprescindível o aproveitamento mais racional das jazidas de bens minerais. A produção de minérios em grande escala permite a obtenção de divisas no mercado externo, necessárias ao desenvolvimento, através de investimentos no setor. Todo este complexo de necessidades exige para sua realização, desmonte de rochas, tornando-se indispensável a aplicação de técnicas aprimoradas na utilização de explosivos em rochas coesas.

Para atender as considerações acima apresentadas é necessário um equipamento adequadamente dimensionado. O balanceamento adequado entre as dimensões da caçamba, máquina escolhida, capacidade de produção dos equipamentos de britagem e transporte, custos diretos e indiretos é que determinam a fragmentação, lançamento e altura máxima a que deverá chegar a pilha de rocha desmontada, quando existe liberdade de áreas de operação.

Para que haja uma integração perfeita de resultados, é necessário avaliar as características geomecânicas e estruturais do maciço rochoso, definindo assim as direções das frentes de ataque, cálculos corretos da geometria do desmonte, adequação da impedância explosivo/rocha, quantidade de linha de fogo, retardos etc., todos visando chegar a máxima produtividade, observando as características da qualidade do material desmontado.

Várias tecnologias de desenvolvimento de novos explosivos têm como alvo a produção e sistemas de iniciação inerentemente seguros. Contudo, a prevenção de acidentes sempre dependerá da conjunção da boa prática e de procedimentos seguros de todos os envolvidos nas operações de carregamento e detonação.

A tentativa de otimizar todos estes parâmetros propiciou o desenvolvimento desta pesquisa.

## 1.4 METODOLOGIA

Após minuciosa revisão dos trabalhos bibliográficos que concerne o desmonte de rocha com explosivos em minas a céu aberto, optou-se por dividir o conteúdo desta dissertação em cinco capítulos assim descritos:

No primeiro capítulo relata-se, a princípio, de forma generalizada o presente trabalho de pesquisa, situando-o no contexto da área de estudo em que está inserido, ou seja, os diversos parâmetros do uso dos explosivos civis no desmonte de rocha.

No capítulo 2, expõe-se um breve histórico sobre os explosivos, assim como alguns conhecimentos básicos e suas propriedades mais importantes.

No capítulo 3, descreve-se os conhecimentos básicos de interação energética dos explosivos com a rocha.

No capítulo 4, reúne-se informações de desmonte em maciços rochosos a céu aberto, dando ênfase aos desmontes em pedreiras com uso de explosivos químicos comerciais.

No capítulo 5, descreve-se o estudo de um caso, na pedreira Queimadas-PB. (PEDRAQ), localizada as margens da BR-104, Km 61- Sítio Guritiba, apresentando análise de prática de desmonte, sugestões e conclusões.

Na sequência são apresentadas referências bibliográficas e em seguida anexos.

## 2 EXPLOSIVOS CIVIS

### 2.1 HISTÓRICO

A evolução histórica dos explosivos industriais é tratada por diversos autores genericamente. A seguir, serão mencionados aqueles que serviram como referência para elaboração deste histórico:

ASSEHTON (1940) e COOK (1958), ABAMS (1943) e COOK (1958), PERSSON (1970), HEMPHIL (1981), RUNE (1981), CLARK (1982).

A pólvora negra foi o marco inicial para o desenvolvimento dos explosivos e foi também utilizada como primeiro agente efetivo no desmonte de rocha. Inicialmente foi usada pelos chineses, gregos e outros povos antigos para fins pirotécnicos. Após modificações passou a ser empregada para fins bélicos. Desde o início, os resultados não foram satisfatórios, por se tratar de um explosivo fraco e de ação lenta. Tentou-se, então, substituí-la por cloreto de potássio e/ou nitrato de potássio, que não apresentaram melhoria significativa. Supõe-se que a origem da pólvora negra, foi decorrente de uma mistura acidental de nitrato de potássio com materiais combustíveis.

Em (1354), o monge BARTHOLD SCHWARTZ começou a divulgar o uso da pólvora entre os povos ocidentais. Em (1425), foi então possível realizar sua granulação, no entanto, deve-se aos franceses, em (1525), a sua classificação granulométrica, que foi essencial para a melhoria de suas qualidades como fonte de energia.

Na metade do século XVII, ROGER BACON, descreve a pólvora em termos científicos.

Em 1838, o químico PELOUZE, obteve a nitrocelulose, entretanto, só em 1846 é que os cientistas SCHONBEIN e BOTTGER descobriram as propriedades explosivas dessa substância. Com a descoberta da nitroglicerina em (1847) pelo italiano ASCÂNIO SOBREIRO, que a denominou de piroglicerina, houve uma verdadeira revolução, pois este preparo oferecia um poder de explosão maior do que o da pólvora e da nitrocelulose. Porém apresentava um inconveniente, era muito perigoso quando submetido a movimentos bruscos ou atrito, fato este que limitava

sua condição de segurança em seu manuseio e conseqüentemente restringia seu uso na indústria.

SCHULTZE (1864) desenvolveu a primeira pólvora sem fumaça (pólvora coloidal), que apesar de ter poder rompedor inferior a nitroglicerina, apresentava a vantagem de ser estável quimicamente.

Vinte anos depois da descoberta da nitroglicerina, o cientista sueco ALFRED NOBEL superou o inconveniente desta substância explosiva, adicionando diatomito à nitroglicerina, o que minimiza sua sensibilidade. Surge, desta forma, a dinamite, explosivo potente que oferece, ao mesmo tempo, boas condições de segurança e que durante anos, foi o grande e poderoso explosivo.

NOBEL (1875) descobriu a gelatina explosiva, mistura de nitrocelulose com nitroglicerina e desenvolveu as dinamites contendo esta gelatina como ingrediente principal, que se tornou a base das dinamites nitroglicerizadas.

Passados dez anos da descoberta da gelatina explosiva em (1885), o químico TURPIN descobre a detonabilidade do ácido pícrico, que em pouco tempo foi misturado com trinitrocresol, originando o explosivo cresilite. Logo em seguida, Wilbrand descobre o trinitrotolueno (TNT), cuja industrialização se verificou em (1901), passando a ser oficialmente utilizado como explosivo militar em cargas de granadas em (1912).

A ciência e tecnologia, sempre empenhadas em modificar o presente, fizeram surgir no período de (1914) a (1918), dois novos explosivos o trotil e o hexil, sendo que o trotil possui maior poder detonante.

Modernamente vários explosivos não nitroglicerizados têm sido desenvolvidos para fugir às desvantagens em termos de segurança que a nitroglicerina apresenta e principalmente pelo seus efeitos fisiológicos causados aos usuários do produto. A base destes explosivos é o nitrato de amônio. Conhecido desde o século passado, mas efetivamente utilizado como explosivo após dois acidentes.

A casualidade marcou o primeiro acidente em (1923), na cidade alemã de Oppau, que deu existência industrial a outro membro da família dos explosivos, quando tentava-se fragmentar nitrato de amônio que estava aglutinado pela umidade, com utilização de dinamites. Toda a massa de nitrato de amônio detonou, causando a destruição da cidade. Entretanto, apesar desse acidente na época passou-se despercebido a capacidade explosiva desse fertilizante.

De outro acidente (24) anos depois do primeiro, em (1947), nasceu o ANFO. ("AMMONIUM NITRATE FUEL OIL EXPLOSIVES"), mistura de nitrato de amônio com "óleo diesel", quando o choque entre dois navios carregados de nitrato de amônio, resultou em incêndio seguido de violenta explosão destruindo o porto e parte da cidade do Texas (USA). No entanto, o inconveniente da não resistência à água só foi resolvido em (1950), quando os cristais de nitrato de amônio receberam cobertura higroscópica, consolidando o seu uso como elemento explosivo.

Em desenvolvimento mais recente, meados da década de cinqüenta, no campo dos explosivos, são as lamas explosivas (SLURRY). Estas apresentam enorme quantidade de energia útil desenvolvida, grande capacidade de trabalho na ruptura de rochas, possuem relativa insensibilidade à umidade e excelente relação custo/volume desmontado. Consistiam, inicialmente, de nitrato de amônio, trinitrolueno (TNT) e água. Aperfeiçoamentos mais recentes incluem substâncias como: alumínio, nitrato de potássio e outros agentes.

As emulsões estão sendo desenvolvidas e aperfeiçoadas recentemente, e vêm se afirmando com muita agressividade no mercado. Consistem no carregamento dos explosivos diretamente no furo em minas a céu aberto. As substâncias que compõem o explosivo são colocadas no interior de um equipamento montado sob um sistema móvel (caminhão ou carreta), misturados no momento do carregamento.

São explosivos de alta resistência à água, boa consistência e segurança com relação ao atrito e choque. A base é principalmente nitrato de amônio. Na sua composição contém quantidades substanciais de oxidantes, dissolvidos em pequenas gotas de água, que por sua vez são envolvidas por uma substância combustível. As emulsões são produtos similares às lamas em inúmeros aspectos, só difere pelo fato de serem constituídas por duas fases líquidas e as lamas por duas fases líquidas e uma sólida.

Ao longo do tempo, os acessórios de detonação que constituem os iniciadores da massa explosiva e são controladores do tempo de iniciação de cargas em seqüência, também vem passando por vários aperfeiçoamentos. Destacam-se a enorme quantidade de elementos de retardo existentes de melhor qualidade e o desenvolvimento das espoletas elétricas com invólucros de cobre afim de aumentar a segurança.

Os serviços que utilizam explosivos, contam atualmente com recente desenvolvimento de sistema de iniciação não elétrico e de iniciação pontual. Trata-se do sistema "Nonel".

É evidente que os explosivos civis evoluem constantemente acompanhando a mais nova tecnologia de ponta, buscando otimizar requisitos importantes, cujo destaque indica poder de fragmentação das rochas, facilidade no manuseio, redução de custos dos produtos e principalmente qualidade e segurança.

## 2.2 EXPLOSIVOS INDUSTRIAIS

Os explosivos industriais são substâncias ou misturas de substâncias químicas, que possuem a propriedade de, ao serem convenientemente iniciados, sofrem transformações químicas exotérmicas violentas e rápidas, transformando-se em gases, que resultam na liberação de grandes quantidades de energia em reduzido espaço de tempo. Essa geração de energia em milésimos de segundos, geram ondas de choque, conferindo aos explosivos grande poder de ruptura. HERRMANN (1972), HEMPHIL (1981).

Para que haja o início da reação, é necessário uma quantidade de energia inicial, denominada energia de ativação. Esta energia pode ser transmitida ao explosivo de várias formas, destacando-se os meios mecânicos tais como: impacto e atrito, ação do calor fornecido por faíscas, chamas e aumento gradual da temperatura, ou ainda, por onda de choque de alta pressão como no caso dos próprios iniciadores de explosivos. Generalizando, essa resistência que o estado meta-estável do explosivo apresenta à ação do calor é conhecido como estabilidade. Já a facilidade com que a reação química pode ser iniciada é conhecida por sensibilidade.

A energia de ativação necessária para iniciar a reação é fornecida à uma parte reduzida da massa explosiva. Esta pequena parte é sensibilizada, ou seja, inicia o processo de transformação, que por sua vez libera energia suficiente propagando-se às partes circunvizinhas e provoca o mesmo efeito de sensibilização nestes locais. Deste modo, a reação se desenvolve em cadeia até que toda massa explosiva existente seja transformada. Portanto, é uma reação que se autopropaga após a iniciação. A decomposição que caracteriza o comportamento dos explosivos

ocorre de forma natural no sentido do aumento de entropia, e os produtos da decomposição são sempre mais estáveis do que a composição inicial, ou seja, possuem menor disponibilidade de energia. A existência da energia de ativação que se faz necessária para a iniciação, e que se reflete na estabilidade do explosivo, são os fatores determinantes da segurança para evitar uma possível iniciação acidental.

Na cadeia explosiva padrão, pode-se identificar:

- 1- Explosivo iniciador ou primário - elemento ativador inicial;
- 2- Explosivo reforçador, secundário ou "booster" - elemento entre o iniciador e a carga principal, tendo propriedades intermediárias;
- 3- Explosivo de ruptura, principal ou terciário - principal elemento de fornecimento de energia e, portanto, de maior quantidade na cadeia. É relativamente insensível, tendo maior segurança ao manuseio e armazenamento. A Figura (2.1), mostra a variação relativa das Propriedades (efeito x sensibilidade) nos explosivos.

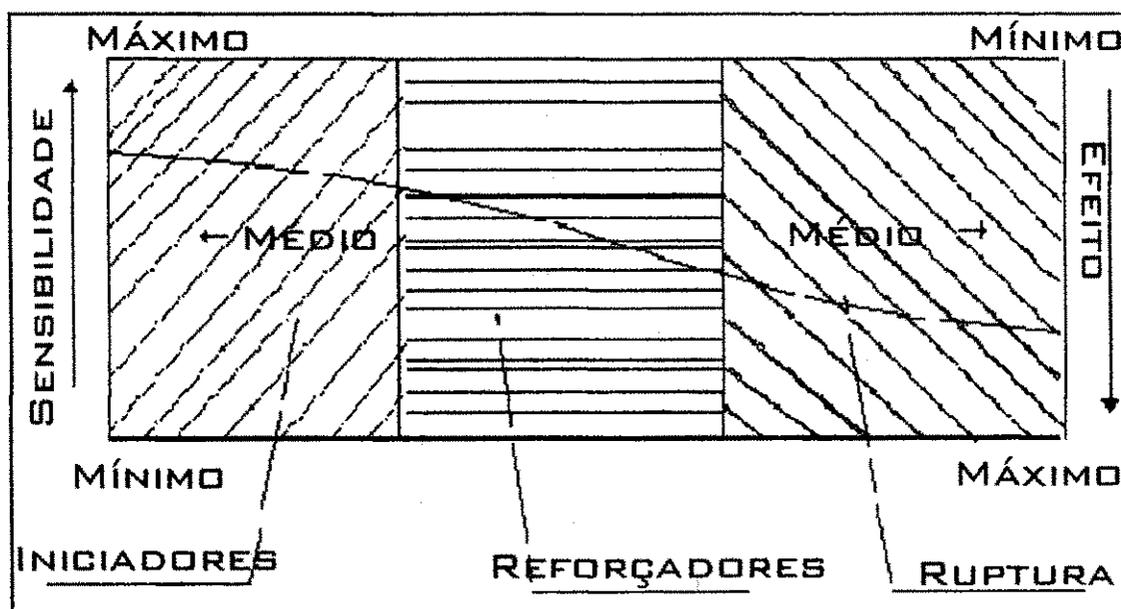


Figura (2.1) - Comparação Sensibilidade X Efeito  
PERSSON (1970).

## 2.2.1 PROCESSO DE DECOMPOSIÇÃO DOS EXPLOSIVOS.

Segundo PERSSON (1970), é conveniente entender alguns aspectos relacionados à terminologia usualmente utilizada tais como: combustão, deflagração e detonação no processo de decomposição dos explosivos.

**COMBUSTÃO OU QUEIMA** - é o processo de oxidação lenta, (calor, oxigênio e combustível). Onde o elemento combustível volatiliza sua superfície e os vapores, ao atingirem o ponto de fulgor, são inflamados. Nesse processo há necessidade do ar atmosférico para continuar a reação de combustão.

**DEFLAGRAÇÃO** - é um processo de queima lenta realizado através da chama. A propagação da reação dá-se por uma condução térmica, cada partícula que se queima transmite calor à partícula adjacente, que se inflama ao atingir a temperatura de explosão. Nesse fenômeno, não há necessidade de oxigênio externo, pois todo o comburente encontra-se intrínseco na substância em atividade.

**DETONAÇÃO** - é a transmissão energética que ocorre na coluna explosiva por onda de choque. Cada partícula ao detonar cria uma onda de alta pressão que comprime adiabaticamente a partícula adjacente, fazendo com que ela se aqueça e detone ao atingir a temperatura de explosão.

Basicamente, a detonação significa qualquer expansão rápida da matéria para outro volume muito maior do que o original, a velocidade elevada e constante.

Os fenômenos de deflagração e detonação são importantes no estudo do comportamento dos explosivos, em princípio pode-se afirmar que a deflagração é um termo relacionado com processo de decomposição lenta e a detonação relaciona-se com reações rápidas. Salienta-se que a mesma substância potencialmente explosiva pode apresentar ambos os fenômenos.

As conceituações destes dois fenômenos em análises, apresentam uma diferença notória em termos de velocidade. Se esta for maior do que a velocidade do som no meio explosivo, trata-se de detonação, caso contrário é tido como deflagração.

Dentro do processo de decomposição da coluna de explosivo, têm-se as seguintes fases: explosivos sólidos, explosivos aquecidos, explosivos liquefeitos, explosivos gaseificados, fase gasosa aquecida e por fim a camada em reação, Figura (2.2).

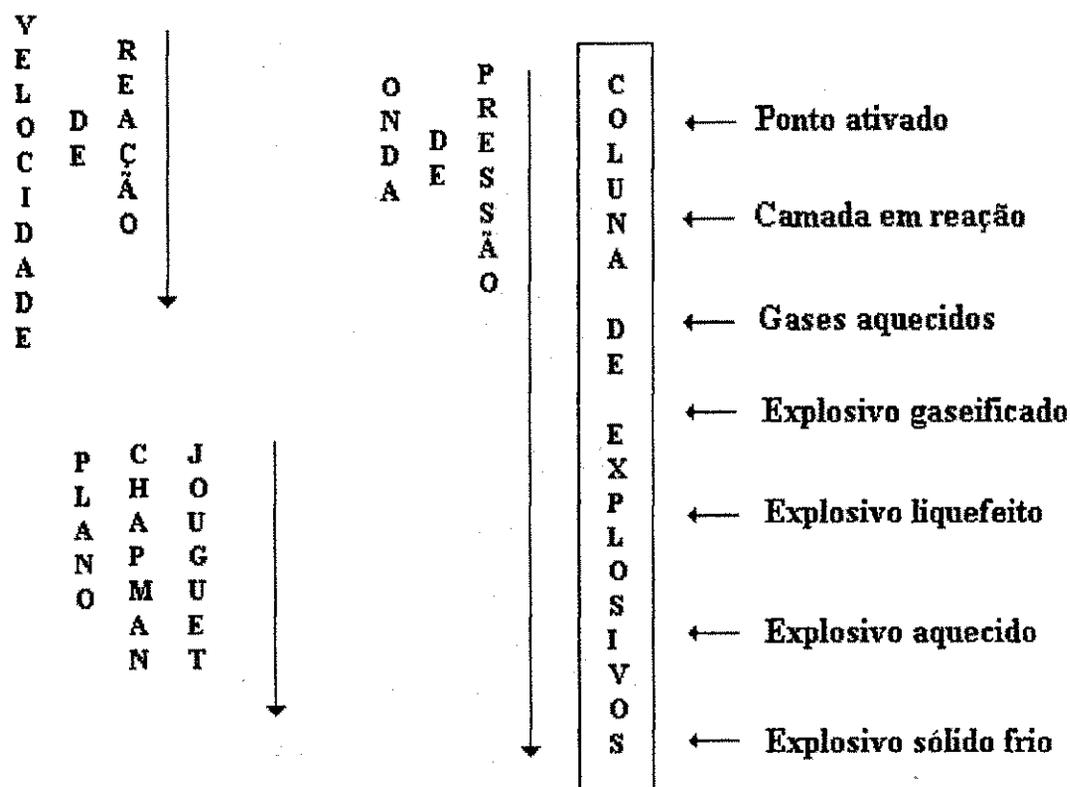


Figura (2.2) - Processo de Decomposição dos Explosivos  
(Plano Chapman-Jouguet).

Quando a energia de ativação adequada é aplicada em uma coluna de explosivo, inicia-se uma frente de reação química, gerando uma onda de pressão, que avança a uma velocidade crescente.

A medida que a pressão e a temperatura vão aumentando, ocorre um aumento na velocidade de reação e da onda de pressão, significando o trecho em deflagração. Quando as velocidades de reação e da onda de pressão atingem seus valores limites, o processo de decomposição permanece com velocidade constante

e a compressão se realiza sem perdas de energia, originando neste instante o processo de detonação. A interface no regime estacionário, ou seja, o plano onde a diferença entre as velocidades das ondas de pressão e a de reação são constantes, é denominado Plano Chapman - Jouguet representado por PCJ, COOK ( 1958 ), BARTOLOME ( 1972 ), Figura (2.3).

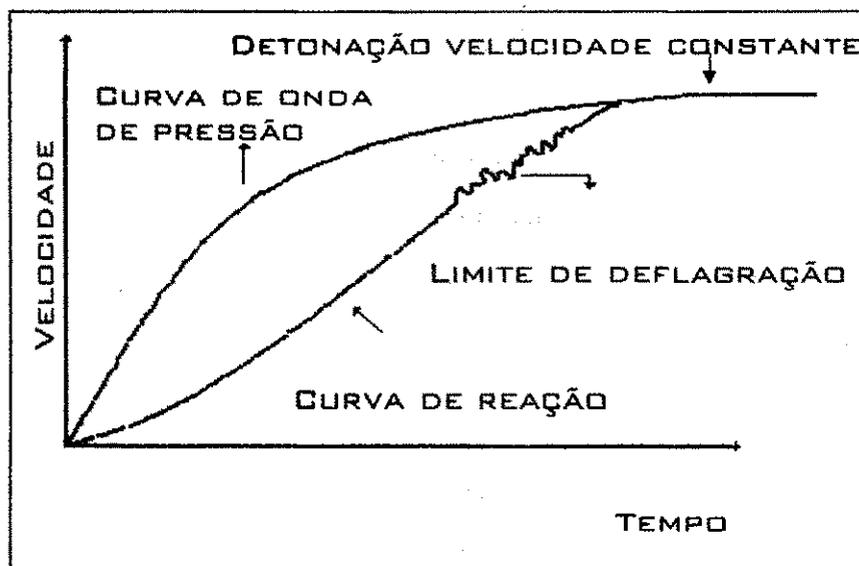


Figura (2.3) - Gráfico esquemático da reação de decomposição nos explosivos (Plano Chapman Jouguet).

## 2.2.2 CLASSIFICAÇÃO DOS EXPLOSIVOS INDUSTRIAIS

De acordo com as propriedades, vários autores como PERSSON (1970), HEMPHIL (1981), CLARK (1982) e outros fazem uma classificação dos explosivos no que se refere à: aplicação, desempenho e constituição.

Em função de suas características físicas e químicas os explosivos podem ser classificados de diversas formas. Quanto à aplicação são classificados de acordo com a energia de ativação: explosivos primários ou iniciadores, explosivos secundários ou reforçadores, explosivos terciários ou rompedores e explosivos propelentes ou militares.

a) Explosivos Primários ou Iniciadores - têm por finalidade subministrar energia de ativação suficiente à transformação de outros explosivos menos sensíveis. Por serem extremamente sensíveis e de elevado custo, seu uso é restrito a pequenas massas de carga, tais como: espoleta, cordel detonante e outros acessórios contendo fulminato de mercúrio, azida de chumbo etc.;

b) Explosivos Secundários ou Reforçadores - são as massas explosivas que fazem o elo de ligação entre os explosivos primários e a carga principal, que tem como exemplo desta categoria o booster.

c) Explosivos Terciários ou Rompedores - são destinados a produção de um trabalho de destruição pela ação da força dos gases produzidos pela sua transformação. Para sua completa iniciação exigem uma energia de ativação oriunda da onda de detonação de um explosivo possível de iniciação pela chama ou por choque. São utilizados em grandes massas e possuem elevada estabilidade química, por isto, não é desejável a sua iniciação com impulsos mais fracos, como exemplo deste tipo de explosivos, têm-se: dinamites, gelatinas e as lamas explosivas.

d) Explosivos Propelentes ou Militares - se destinam a produção de efeito balístico. Exigem como impulso inicial a chama e tem velocidade moderada e regulável. As pólvoras mecânicas e coloidais são exemplos típicos.

As características descritas anteriormente, estão resumidas na Figura (2.4).

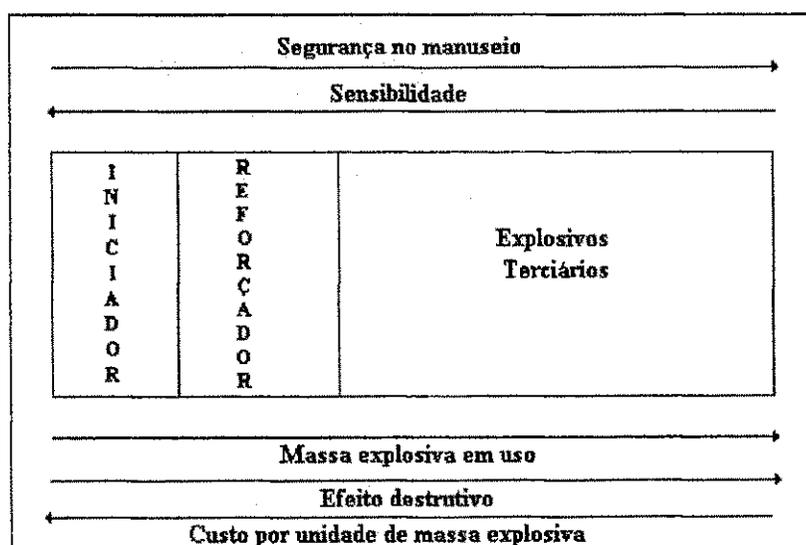


Figura (2.4) - Características Classificatórias de acordo com as propriedades básicas dos explosivos ROLIM (1993).

Na classificação dos explosivos quanto ao desempenho, são classificados como: deflagrantes ou baixos explosivos, possuem velocidade de detonação na ordem de 500 m/seg. e os detonantes ou altos explosivos com velocidade variando de 1.200 a 7.200 m/s.

Quanto à constituição dos explosivos, dependendo dos materiais e das misturas, classificam-se em:

a) Explosivos Químicos – São constituídos por uma única substância pura, (nitroglicerina) ou pela combinação química, que tem o oxigênio como comburente, o carbono e hidrogênio como combustível.

b) Explosivos Mecânicos – Constituídos por misturas dos elementos ou compostos. Ex.: pólvora negra (enxofre, salitre e carvão vegetal).

c) Explosivos Mistos – Constituídos de uma ou mais substâncias explosivas e outros produtos inertes. Ex.: nitrocelulose, nitroglicerina e ingredientes inertes.

## 2.3 PRINCIPAIS PROPRIEDADES DOS EXPLOSIVOS

Para perfeita especificação dos explosivos se faz necessário conhecer suas propriedades mecânicas, físicas, químicas, termodinâmicas e de segurança, de forma a garantir a melhor interação do explosivo com a rocha.

**Rusticidade:** é a propriedade mecânica que informa a capacidade do explosivo de resistir às solicitações mecânicas de transporte, armazenamento e emprego.

**Estado Físico e a Consistência:** é o aspecto com que os explosivos podem ser comercializados, ou seja, nos estados sólido, pastoso, líquido e gasoso.

**Densidade Real e Gravimétrica:** a densidade real é normalmente expressa como uma relação entre a massa específica do explosivo e a massa específica da água a 277° K (4°C) (unitária no sistema métrico). Utiliza-se ainda a densidade gravimétrica como sendo a relação entre a massa e o volume correspondente expresso geralmente em g/cm<sup>3</sup> ou g/l. Outra forma muito utilizada é a densidade de carregamento, sendo a relação entre a massa de explosivo por unidade de comprimento, sendo a relação entre a massa de explosivo por unidade de comprimento para um diâmetro específico. A densidade de um explosivo determina

a massa de explosivo que pode ser carregada numa determinada coluna no interior do furo. Quando o custo de perfuração é elevado, justifica-se a utilização de explosivos mais densos. A energia por unidade de volume é, atualmente, um fator importantíssimo a ser considerado, embora não seja ainda utilizada normalmente como uma propriedade do explosivo.

Deve-se observar que um adensamento bem feito facilita a fragmentação. Entretanto, um bom adensamento não implica necessariamente que as cargas sejam compactadas, pois pode alterar muito a densidade gravimétrica, a ponto de dessensibilizarem-se prejudicando o desempenho do fogo. O explosivo possui uma densidade chamada crítica, além da qual ele deixa de ser explosivo e passa a ser um material inerte.

**Resistência à Água ou Higroscopicidade:** é a habilidade do explosivo de quando exposto à água, não alterar suas características, principalmente a sensibilidade e a eficiência. Os produtos gelatinosos e as lamas explosivas apresentam ótima resistência à água. As dinamites não gelatinosas a base de nitratos não são higroscópicas, portanto, desaconselháveis para carregamento em locais que apresentam água. Os explosivos semi-gelatinosos e os chamados pulverulentos (consistência granular), são desaconselháveis para utilização em locais com presença d'água. A emissão de gases de coloração marrom, que corresponde a óxidos de nitrogênio durante um desmonte, pode indicar detonação ineficiente causada por deteriorização proveniente da ação da água, e significa que necessita-se de um explosivo com maior resistência à água, ou com invólucro que proporcione melhor proteção ao explosivo.

**Toxidez :** refere-se as quantidades de gases tóxicos produzidos nas detonações, que devem ser mínimas e existem também limites máximos, que devem ser respeitados. Entretanto, isso não implica que os explosivos "in natura" não sejam tóxicos. O monóxido de carbono, óxido de nitrogênio e óxidos sulfurosos são gases nocivos à saúde, geralmente formados durante uma detonação.

A maioria dos explosivos são otimizados no balanço de oxigênio com a finalidade de aumentar a energia liberada na transformação e diminuir a quantidade de gases tóxicos. Contudo há determinadas condições que podem facilitar a geração de gases nocivos, mesmo com explosivos balanceados. Cita-se como fatores relevantes, diâmetro de carga insuficiente, iniciação inadequada, deterioração por

ação da água, remoção do invólucros e invólucros de plástico, que aumentam a produção de gases tóxicos.

Quanto aos gases tóxicos desenvolvidos na reação química os explosivos industriais impõem à indústria distribuí-los em três classes:

Classe 1 - até 30 litros de gás / quilo

Classe 2 - até 60 litros de gás / quilo

Classe 3 - mais de 60 litros de gás / quilo

A classe 1 é considerada não tóxica, a classe 2 pouco tóxica e na classe 3 os explosivos são considerados tóxicos e seu uso fica restrito as condições de ventilação.

As seguintes precauções devem ser tomadas para se manter no mínimo a quantidade de gases nocivos produzidos pela detonações:

- 1- Evitar uso de explosivos deteriorados;
- 2- Evitar sobrecargas nos furos;
- 3- Evitar qualquer condição que proporcione queima e não explosão (separação do cartucho escorva, vazios na coluna explosiva, detonadores molhados, uso de espoletas danificadas, etc.);
- 4- Verificar freqüentemente se o ar fornecido é isento de  $CO_2$  ou outro gás tóxico;
- 5- Permitir maior intervalo possível entre a explosão e as operações de limpeza da frente;
- 6- Molhar com água o material desmontado;
- 7- Não retirar o invólucros dos cartuchos e não adicionar quaisquer substâncias combustíveis;
- 8- Em condições úmidas, usar explosivos resistentes a água e detoná-lo o mais rápido possível;
- 9- Confinar a carga explosiva com material não combustível de preferência a areia úmida ou areia úmida com argila, e
- 10- Prover adequada ventilação ou assegurar corrente de ar diretamente na face.

**Estabilidade Química:** os explosivos possuem um grau de instabilidade, sendo que o início da reação necessita de uma determinada quantidade de energia de ativação. Esta característica é variável com: o tempo, a temperatura, tipo de composição do explosivo e condições que o mesmo está submetido, (por exemplo a umidade). Os produtos que não contém nitroglicerina podem ser estocados por longo tempo em locais apropriados, que não apresentarão variações em suas propriedades. Os explosivos nitroglicerinados apresentam migração da nitroglicerina com o tempo, aumentando a sensibilidade e criando situações de risco, que podem causar detonações prematuras e/ou da combustão parcial na coluna explosiva, ocasionando acidentes.

**Inflamabilidade:** é a maior ou menor facilidade de ignição apresentada por uma substância explosiva ao serem submetidas a condição de temperatura, ventilação e umidade, além da qual entram em combustão espontânea. Esse parâmetro vem sendo utilizado para determinar as condições do paiol.

**Calor de Combustão:** é a quantidade de calor liberada no processo de detonação de um explosivo, em geral, mede-se a volume constante.

**Força:** refere-se ao conteúdo de energia de um explosivo, indicando a potência que é desenvolvida e a capacidade de realizar trabalho. No entanto, atualmente esse parâmetro é obtido através das diferentes propriedades das rochas, compatibilizando-os com os explosivos a serem utilizados.

**Temperatura de Explosão:** é a temperatura na qual a substância explosiva entra em decomposição por detonação, o que difere da inflamabilidade. Essa propriedade é importantíssima para segurança na fabricação dos explosivos.

**Volume Gasoso:** é o volume de gás gerado nas detonações. Essa propriedade determina a capacidade de arremesso do material fragmentado no desmonte de rocha sendo extremamente importante seu conhecimento na especificação do explosivo a ser utilizado, para adequar a taxa de energia semi-estática necessária para eficiência da detonação.

**Pressão de Detonação:** esta propriedade esta relacionada com a capacidade que tem o explosivo de fragmentar obstáculo "BRIZÂNCIA". Ocorre na zona de detonação, ou seja, a pressão no plano chapman-jouguet.

Para esta propriedade, COOK (1958), a partir da análise hidrodinâmica, estabeleceu a seguinte relação  $P_2 = \rho_1 D_e W + P_1$ , onde  $p_2$  é a pressão de detonação no plano Chapman - Jouguet;  $p_1$  é a pressão no explosivo antes da

detonação;  $D_e$  = velocidade de detonação do explosivo;  $\rho_1$  é a densidade do explosivo antes do choque;  $W$  é a velocidade da partícula no plano Chapman-Jouguet e é dada por:  $W = (1 - \rho_1/\rho_2) D_e$ . Onde  $\rho_2$  é a densidade do explosivo no plano PCJ, assumindo-se com grande precisão que a relação  $\rho_2/\rho_1 = 4/3$ , e que  $P_1$  é insignificante em relação aos demais parâmetros, tem-se que:  $P_2 = \rho_1 \cdot D_e^2 / 4$ .

Para a pressão de detonação, JOHANNSON (1970) e PERSSON (1970), apresentam a equação (2.1) com bases em resultados de experimentos práticos.

$$P_{CJ} = 2.1 (0,36 + \rho_e) \cdot D_e^2 \quad \text{Eq.(2.1)}$$

**Brizância:** relaciona-se com a capacidade de fragmentação que o explosivo apresenta quando detona, e está diretamente relacionado com a velocidade de detonação, massa volumétrica e da densidade de carregamento. É uma propriedade por demais importante na modelagem de fragmentação dos blocos rochosos.

**Velocidade de Detonação:** é a velocidade com que a onda de choque percorre a coluna de explosivo. Normalmente é expressa em m/s. Ela aumenta de acordo com os seguintes fatores:

- 1- Aumentando-se o diâmetro da carga;
- 2- Aumentando-se a densidade do explosivo;
- 3- Formulação na fabricação do explosivo;
- 4- Diminuindo-se as dimensões das partículas que compõe o explosivo;
- 5- Provendo bom confinamento no interior do furo;
- 6- Provendo bom fator de enchimento do furo, e
- 7- Utilizando maior energia de ativação.

A velocidade de reação dos explosivos, aumenta com o diâmetro do cartucho até certo ponto em que a velocidade atinge seu valor máximo (diâmetro limite). Portanto, diâmetro maior não significa que a velocidade de detonação será cada vez maior, como mostra Figura (2.5).

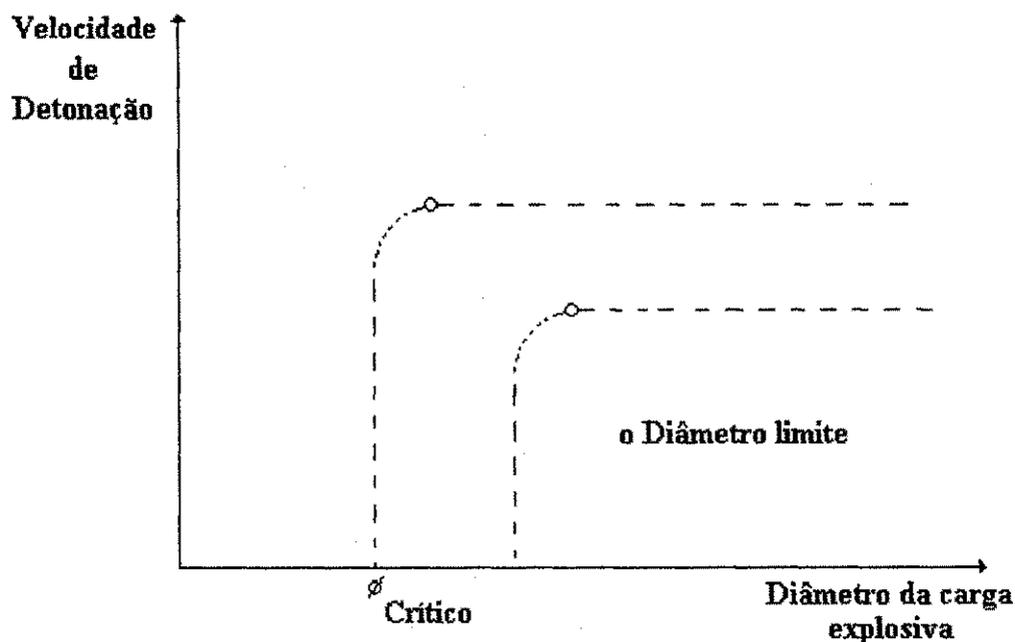


Figura (2.5) - Influência do diâmetro da Carga no Parâmetro Velocidade de Detonação RICHARD (1973).

**Sensibilidade à Iniciação:** é definida como sendo a reação que o explosivo oferece aos agentes exteriores capazes de provocar sua transformação repentina, ao qual chamamos de impulsos iniciais, ocasionado por outro explosivo.

A sensibilidade dos diversos tipos de explosivos existentes varia consideravelmente, e depende dos ingredientes na sua manufatura, dimensão das partículas, densidade, diâmetro da carga, confinamento, presença d'água, e no caso das lamas explosivas, depende também da temperatura.

**Propagação por Simpatia:** é definida através de uma experiência na qual procura-se a maior distância "D" que a iniciação de um cartucho dá lugar a detonação de um outro, através da ação da onda explosiva do cartucho iniciador.

**Sensibilidade ao Choque:** é a propriedade que possuem os explosivos de não detonarem, quando submetidos a choques acidentais. Dependendo dos insumos de fabricação de certos tipos de explosivos, eles podem ser menos ou mais sensíveis ao choque.

**Sensibilidade ao Calor:** é a propriedade de um explosivo detonar com o calor. Consiste na determinação da temperatura de decomposição, a qual varia conforme as propriedades de composição e densidade do explosivo.

### 3 ONDAS

Para o entendimento dos fenômenos que ocorrem no processo de fragmentação dos maciços rochosos expostos à ação dos explosivos, faz-se necessário a compreensão do comportamento da ação das ondas sobre os corpos rochosos, que será abordado a seguir de forma básica.

Considerações teóricas iniciais sobre o fenômeno das ondas, levantaram a possibilidade de ocorrências de ignição, mesmo nos casos em que a detonação não era acompanhada por uma chama quente e extensa, embora não houvesse ainda uma comprovação direta deste fato. Em pouco tempo conclui-se que uma mistura atmosférica com 6,5% de metano pode, por exemplo, iniciar sob a ação de uma compressão mecânica rápida atingindo o valor de 5471550 Pa (54 atm.).

PERROTT (1978) verificou fotograficamente a ignição de regiões ainda não atingidas pela chama de detonação, e que leva à consideração da probabilidade real de ocorrer ignição ocasionada por onda de choque viajando para locais circundantes além da chama.

PAYMAN (1981) mostrou a validade substancial desta observação. Utilizando um método fotográfico especial, ele concluiu que a onda de detonação tem a mesma direção dos produtos gasosos, quando o iniciador é situado no fundo do furo. Com este tipo de arranjo, o lançamento dos gases para além do furo é mais intenso, a velocidade da onda de choque é maior, e a probabilidade de ignição aumenta consideravelmente.

As pesquisas com relação à onda de choque, como parte do problema de segurança, atraiu atenção especial para a velocidade de detonação dos explosivos como fator principal. As análises iniciais de que os explosivos para serem utilizados na presença de atmosferas inflamáveis, devem ser mais fracos e com brizância menor, foi confirmado. A razão pela qual as cargas de diâmetro maiores são mais perigosas, também, proporcionou motivação para novas pesquisas. Este fato deve-se à alta taxa de velocidade de detonação das cargas com diâmetro maiores.

As superfícies que limitam um meio contínuo em duas regiões caracterizadas por valores de massa específica, pressão, temperatura e velocidades das partículas, são definidas por onda mecânicas e de reação. Dependendo do seu comportamento

as ondas são subdivididas em: ondas elásticas, ondas de choque puro e ondas de choque com troca de fase.

A Figura (3.a), mostra a frente de onda avançando com uma velocidade de propagação ( $U$ ). As grandezas físicas de pressão ( $P$ ), densidade ( $\rho$ ), temperatura ( $T$ ) e velocidade da partícula ( $V$ ), que caracterizam o estado sólido, são modificadas na passagem da frente de onda. Dependendo do tipo de onda estas modificações podem ocorrer de modo contínuo ou descontínuo.

A Figura (3.b), mostra ondas elásticas, que não apresentam mudança de fase do material em que se propagam, nem indicam descontinuidades nas grandezas físicas na frente de onda.

A Figura (3.c), corresponde às ondas de choque puro, que não sofrem alteração de fase e as propriedades físicas sofrem descontinuidades na frente de onda. As ondas elásticas são originadas das ondas de choque puro quando sofrem amortecimentos, por ação das ondas de rarefação.

A Figura (3.d), corresponde às ondas de choque com permuta entre as fases, que além de apresentarem características das ondas de choque puro, proporcionam mudança de fase, geralmente de sólido para líquido e desse para o estado gasoso. Essas ondas de choque são originárias de transformações químicas exotérmicas.

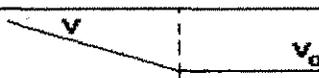
Estado Final	Estado Inicial
$P, \rho, T, V$	$P_0, \rho_0, T_0, V_0$
$\xrightarrow{U}$	
<b>a) Sólido sujeito à ação de uma onda</b>	
	
<b>b) Ondas Elásticas</b>	
	
<b>c) Ondas de choque puro</b>	
	
<b>d) Ondas de choque com mudança de fase</b>	

Figura (3) - Tipos de ondas mecânicas. BARTOLOME (1972).

### 3.1 ONDAS ELÁSTICAS

Para perfeita compreensão do fenômeno de transmissão de ondas elásticas entre meios diferentes, é importante a definição do conceito de impedância ( I ).

Os dois tipos de impedâncias (de detonação quando o meio é o explosivo e de acústica quando se trata do meio rocha), são definidas como o produto da densidade ou pela velocidade de propagação de detonação no meio explosivo ( $D_e$ ), ou pela velocidade de propagação de uma onda no meio rocha ( $V$ ), como mostra a equação (3.1). Essa propriedade dos corpos, mostra a capacidade relativa que os mesmos possuem de receber e transmitir energia na forma de ondas.

$$I = V \cdot \rho \quad \text{Eq. (3.1)}$$

onde:

$$V = U \text{ (meio rocha) e } V = D_e \text{ (meio explosivo)}$$

A impedância destaca-se quando são consideradas as interações de tensões elásticas na interface de diferentes meios de propagação CARPENTER (1971), onde o comportamento entre as ondas de tensões incidentes, refletidas e refratadas é regido através da relação de impedância entre diversos meios de propagação das ondas.

Quando há propagação de uma onda elástica de um meio de impedância ( $I_1$ ) para outro meio ( $I_2$ ), a relação entre as amplitude das ondas incidentes ( $A_i$ ), transmitida ( $A_t$ ) e refletida ( $A_r$ ) são representada nas equações abaixo;

$$A_r ( I_2 + I_1 ) = A_i ( I_2 - I_1 ) \quad \text{Eq. (3.2)}$$

$$A_t ( I_2 + I_1 ) = 2 A_i I_2 \quad \text{Eq. (3.3)}$$

Destas equações pode-se concluir:

- 1 - As ondas incidentes e transmitidas terão que ser de compressão, para que se possa dar continuidade na transmissão entre dois meios de interface não coesa.

2 - Se o meio "2" for a atmosfera (baixa impedância), geralmente tem-se ondas de tração refletidas no meio "1", facilitando o processo do desmonte do maciço rochoso.

3 - A onda refletida terá sempre amplitude inferior à onda incidente, podendo também ser de compressão ou de tração, dependendo dos valores de impedâncias de meios diferentes.

### 3.1.1 PROPAGAÇÃO

Analisando os fenômenos registrados no inter-relacionamento entre as ondas elásticas e o meio elástico, considerando-se inicialmente uma situação unidimensional.

Supondo uma barra de aço submetida a um pulso de pressão (P) em uma de suas extremidades. A sua forma inicial será modificada, porque uma onda de tensão se propagará ao longo da barra da área unitária "A", com uma certa velocidade (U). As partículas atrás dessa frente de onda adquirem uma velocidade (V), como mostra a Figura (3.1).

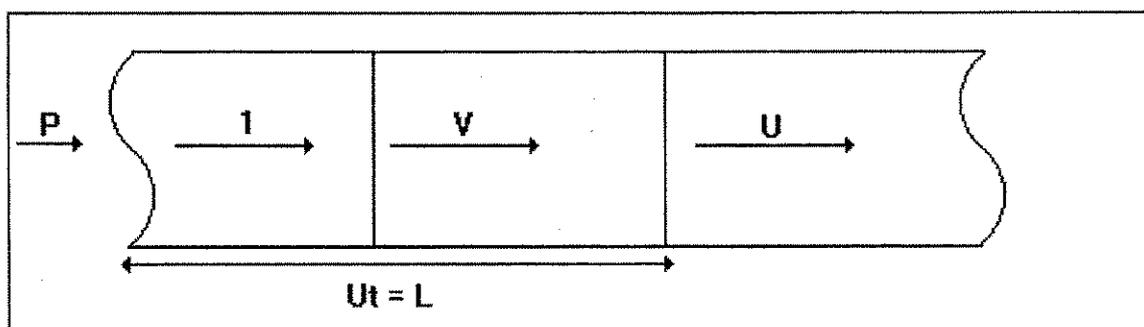


Figura (3.1) - Barra delgada submetida a pulso de pressão.

Após o intervalo de tempo "dt", o deslocamento infinitesimal da frente de onda "dL" e o elemento de massa então perturbado "dm" são quantificadas pelas equações;

$$dL = U dt \quad \text{Eq. (3.4)}$$

$$dM = \rho A U dt \quad \text{Eq. (3.5)}$$

A passagem da onda provoca no material a tensão  $\sigma$ , que é apresentada na equação (3.6). A conservação da quantidade de movimento segundo BARTOLOME (1972) pode ser obtida através desta expressão, com validade para onda de choque, como também para ondas elásticas.

$$P - P_0 = \rho_0 (U - V_0) (V - V_0) = \sigma - \sigma_0 \quad \text{Eq. (3.6)}$$

Através da equação (3.6), pode-se obter uma justificativa para que a velocidade da partícula  $V$ , seja um índice de controle de detonações em meios contínuos.

A equação (3.7), mostra a teoria da elasticidade relacionado com o módulo de elasticidade  $E$ , velocidade de propagação da onda  $U$  e densidade do material  $\rho$ . Onde  $\rho u^2$  é conhecido como impedância ao impacto. Vale salientar que o módulo de elasticidade dinâmico pode ser obtido com baixo custo de ensaio e de modo bastante simples através desta mesma equação.

$$d\sigma / d\varepsilon = \rho u^2 = E \quad \text{Eq. (3.7)}$$

É importante mencionar, que se a velocidade da onda no ponto em questão for maior do que a velocidade de onda elástica no meio (número Mach  $>1$ ), resultará em onda de choque, obtendo assim resultados não confiáveis. Geralmente os erros nos experimentos são resultantes desta fonte.

RODNEY (1966) relata que para corpos elásticos tridimensionais, isotrópicos e homogêneos, a teoria da elasticidade prevê que a relação entre tensão/deformação é representada através da equação (3.8).

$$d\sigma / d\varepsilon = E (1 - \nu) / ((1 + \nu)(1 - 2\nu)) \quad \text{Eq. (3.8)}$$

A velocidade de propagação da onda elástica  $U$  pode ser expressa em função do módulo de elasticidade volumétrico  $K$  e do módulo de rigidez transversal  $G$ , que combinados com a equação (3.9), resulta:

$$U = \sqrt{[(k + 4G/3)/\rho]} \quad \text{Eq. (3.9)}$$

$$\text{onde: } K = E / 3 (1 - 2 \nu) \quad \text{e} \quad G = E / 2 (1 + \nu)$$

Em se tratando de fluídos ou sólidos, quando estão sujeitos a pulsos geradores de tensões bastante acima do limite de elasticidade, a expressão se reduz, como mostra equação (3.10).

$$U = \sqrt{[k / \rho]} \quad \text{Eq.(3.10)}$$

Associando as equações (3.6) e (3.7), fazendo  $V_0 = 0$  e  $\rho_0 = \rho$  obtém-se a relação entre velocidade da partícula, velocidade de onda e tensão aplicada relacionadas conforme a equação;

$$V = \sigma U / E \quad \text{Eq.(3.11)}$$

Na equação (3.11), observa-se que: se a tensão for de compressão no sentido do deslocamento da onda elástica, a velocidade da partícula tomará o sentido da onda e quando as tensões forem de tração ou negativas, a velocidade da partícula terá sentido contrário ao deslocamento da onda.

Depois da apresentação das equações, fica demonstrado o relacionamento entre os parâmetros elásticos dinâmicos e as ondas elásticas.

### 3.1.2 REFLEXÃO EM SUPERFÍCIES LIVRES

Quando a onda elástica atinge uma extremidade livre do corpo, o último elemento é deslocado por ação de inércia, adquirindo uma tensão  $\sigma$ . Após o término da aceleração, esse elemento sofrerá tensionamento com uma tensão  $-\sigma$ , gerando uma onda de tração no retorno.

ROLIM (1993) conforme equação (3.11), conclui que, quando uma onda de compressão incidente colide com outra de tração refletida, considerando ambas de mesma intensidade, a tensão, neste ponto, será nula e a velocidade da partícula

será duplicada. Esta conclusão é muito importante para interação explosivo/rocha, quando se refere a fragmentação, decorrente das interações entre ondas incidentes e refletidas na superfície livre, ou em fraturas no interior do maciço rochoso.

### 3.2 ONDAS DE CHOQUE E ONDAS ELÁSTICAS

Quando se estuda a ação das substâncias explosivas sobre os maciços rochosos as ondas de choque são de grande importância neste estudo.

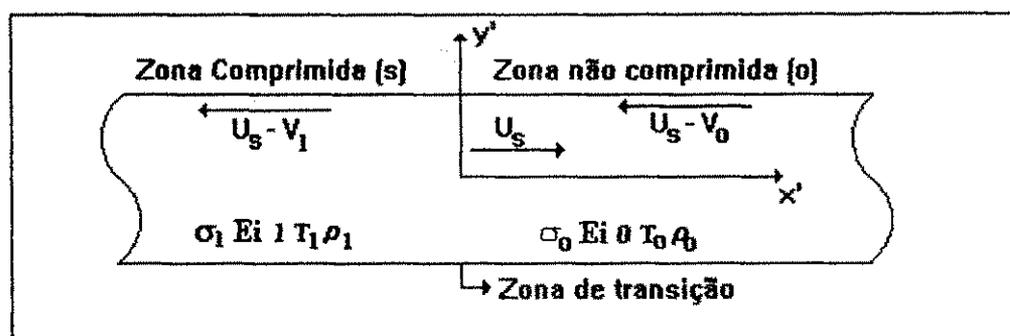
Existe duas diferenças básicas entre as ondas de choque e as ondas elásticas:

- 1- Segundo MARVIN (1964) e JONES (1968) nas ondas de choque, a tensão de pico se propaga com maior velocidade (supersônica) em relação à perturbação causada em seu avanço; já ondas elásticas se propagam à mesma velocidade da perturbação causada durante seu avanço.
- 2- As ondas de choque apresentam um perfil de ataque instantâneo após a ação, enquanto as ondas elásticas requerem tempo para sua formação.

#### 3.2.1 RELAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DO MATERIAL NA FRENTE DA ONDA DE CHOQUE

Em BARTOLOME (1972) são encontradas as deduções das expressões apresentada neste capítulo.

Para melhor entendimento do relacionamento entre as características dinâmicas na frente das ondas de choque e as características elásticas do corpo, vamos analisar o caso unidimensional de uma onda que percorre um meio (sólido, líquido ou gasoso) em movimento, com velocidade de partícula absoluta  $V_0$ . Considerando a velocidade de propagação da onda  $U_s$ . A região atrás da frente da onda será considerada por  $S$ , e são constantes: a velocidade da partícula  $V$ , a tensão  $\sigma$ , a densidade  $\rho$ , a energia interna por unidade de massa  $E_i$  e a temperatura  $T$ , como também, serão considerados constantes os parâmetros correspondentes na frente da onda. Usaremos o sistema de referência  $(X, Y)$  que será considerado único na frente da onda. Deste modo, o tratamento será realizado se a onda fosse estacionária Figura (3.2).



### Deslocamento de onda

Figura(3.2) - (sistema de referência fixo à frente da onda) .

Para perfeita compreensão dos efeitos físicos na interação entre as ondas de choque puro e os parâmetros elásticos do meio, é necessário utilizar dos princípios da conservação da massa e conservação da quantidade de movimento, aplicados aos elementos de massa que passam da zona não comprimida para zona comprimida da Figura (3.2) Conclui-se:

a) Pelo princípio de conservação das massas:

$$\rho_0 (U_s - v_0) = \rho_1 (U_s - v_1) \quad \text{Eq.(3.12)}$$

$$\text{Para: } v_0 = 0 \Rightarrow \rho_0 U_s = \rho_1 (U_s - v_1) \quad \text{Eq.(3.13)}$$

Nos sólidos a velocidade adquirida pelas partículas  $v_1$  é desprezível em relação à velocidade com que se propaga o choque. Para efeitos práticos, pode-se considerar que  $\Delta\rho = 0$ .

b) Pela conservação da quantidade de movimento:

Nesta questão, volta-se a equação (3.6), válida para ondas elásticas, tornando possível o conhecimento indireto da pressão a que fica submetido o corpo em estado de choque. A partir da medida da velocidade da partícula e propagação da onda.

Considerando  $V_0$  e  $P_0$  iguais a "zero", obtém-se:

$$P - P_0 = \rho_0 U_s v = \sigma - \sigma_0 \quad \text{Eq.(3.14)}$$

A relação da equação (3.14) é considerada como equação de descontinuidade ou relação de RANKINO-HUGONIOT. Explicitando-se  $v$  e  $U_s$  nas equações (3.13) e (3.14), obtém-se:

$$V_1 = \pm \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_0) (\rho_1 - \rho_0) / \rho_1 \rho_0} \quad \text{Eq.(3.15)}$$

$$U_s = \pm \sqrt{\rho_1 (\sigma_1 - \sigma_0) / [\rho_0 (\rho_1 - \rho_0)]} \quad \text{Eq.(3.16)}$$

Se considerarmos um volume de massa unitária nas condições antes do choque  $V_{010}$  e após o choque  $V_{011}$ , as equações (3.15) e (3.16) se tornam:

$$V_1 = \pm \sqrt{-(\sigma_1 - \sigma_0) [V_{011} - V_{010}]} \quad \text{Eq.(3.17)}$$

$$U_s = \pm \sqrt{-(\sigma_1 - \sigma_0) V_{010}^2 / [V_{011} - V_{010}]} \quad \text{Eq.(3.18)}$$

Analisando as equações (3.17) e (3.18), conclui-se que a variação de densidade e volume na frente de onda não pode ser nula.

Se faz necessário lembrar que nas equações (3.15), (3.16), (3.17) e (3.18) foram desconsideradas as características do meio no qual as ondas se propagavam.

Realizando experiências em condições ideais de velocidade de onda como uma função da velocidade da partículas  $U_s = f(v)$ , fica explícito que se trata de uma relação linear.

Através da Figura (3.3), pode-se identificar a equação (3.19). No caso da velocidade de onda de choque se aproximará da velocidade do som no móvel em repouso  $C_0$ .

$$U_s = C_0 + K V \quad \text{Eq.(3.19)}$$

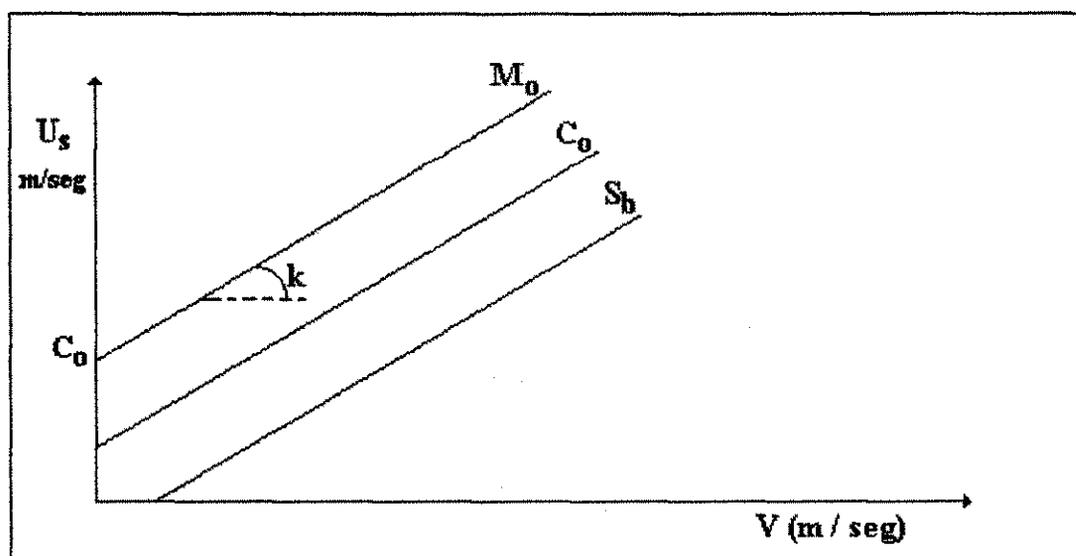


Figura (3.3) - Velocidades (ondas X partículas)  
(Bartolome, 1972).

Fazendo a substituição na equação (3.19) por valores correspondentes obtidos nas equações (3.17) e (3.18) teremos:

$$V_0 I_0 \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_0)}{(V_0 I_0 - V_0 I_1)}} = C_0 + k \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_0) (V_0 I_0 - V_0 I_1)}$$

$$\sigma_1 = \frac{c_0^2 (1 - V_0 I_1 / V_0 I_0)}{V_0 I_0 (K - 1 - K V_0 I_1 / V_0 I_0)^2}$$

$$P / \sigma_0 = 0$$

Eq.(3.20)

Desta equação (3.20), nota-se que no limite, quando  $\sigma_1$  tende para o infinito, a equação:  $K - 1 - K V_0 I_1 / V_0 I_0$  tende a zero e a densidade máxima que um corpo sólido qualquer pode atingir comprimido por choque, será:

$$\rho = K \rho_0 / (K - 1)$$

Eq.(3.21)

Para os corpos sólidos, na maioria dos casos o valor de  $K$  é de aproximadamente 1,5 e a máxima compressão que estes corpos podem ser submetidos será na ordem de:  $V_{011} / V_{010} = 1/3$ .

Em DURVAL (1963) e QUEEN (1970), são mencionadas outras equações, como as de Mie Gruneisen, que explicitaram os parâmetros  $C_0$  e  $K$  da equação (3.19), em detrimento de propriedades do material, ou seja,  $\beta$  coeficiente de expansão térmica,  $C_p$  calor específico a pressão constante, e  $\Gamma$  constante de Mie Gruneisen.

$$U_s = V + S v_1 \quad \text{Eq.(3.22)}$$

onde:

$$S = (\Gamma + 1) / 2 \quad \text{e} \quad \Gamma = V^2 \beta / C_p$$

Realizando a substituição da equação (3.22) em (3.14), tem-se:

$$(\sigma_1 - \sigma_0) = \rho_0 (V v_1 + S v_1^2) \quad \text{Eq.(3.23)}$$

### 3.2.2 INDUÇÃO DE ONDAS DE CHOQUE POR DETONAÇÃO DE EXPLOSIVOS.

MENDES (1967), COATES (1973), CHURCH (1981), entre outros, concordam, que sendo a impedância do material o principal fator que comanda a pressão da onda de choque ao ser transmitida de um meio para outro, o relacionamento entre impedância e pressão é notório, realizando desta forma a interação entre o maciço rochoso e o explosivo utilizado.

O desmonte de rocha, sofre com um problema crucial, que é a obtenção da pressão e velocidade da partícula transmitida através da interface, a partir do conhecimento dos valores correspondentes na zona da onda incidente. Para melhor análise deste problema analisa-se dois casos:

Primeiro Caso: A Figura (3.4), mostra um corte longitudinal na região que inclui a interface de dois materiais através da qual uma onda de choque se propagará, sendo que, o meio direito possui impedância menor do que o meio esquerdo. Na parte (a) da Figura (3.4), são mostradas as grandezas de velocidade da partícula  $V$ ,

a pressão  $P$  e a velocidade de propagação da onda  $U$ . Para regiões de onda incidente, refletida na interface e transmitida através dessa onda. Na parte (b) da figura (3.4), é mostrado o perfil esquemático de pressão nas zonas comprimidas e não comprimidas do corpo em análise.

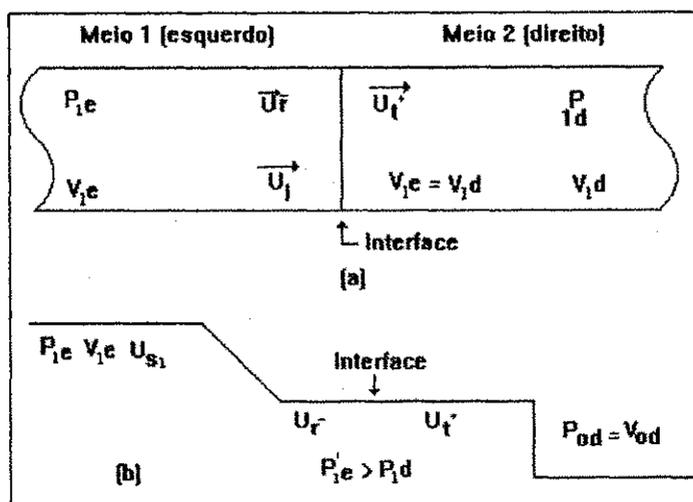


Figura (3.4) - Interação de ondas entre meios, na condição de  $I_d < I_e$ .

a) Corte esquemático e grandezas envolvidas

b) Perfil após a interação.

Utilizando as curvas de HUGONIOT dos materiais que relacionam pressão versus velocidade da partículas, obtém-se a velocidade e pressão transmitidas.

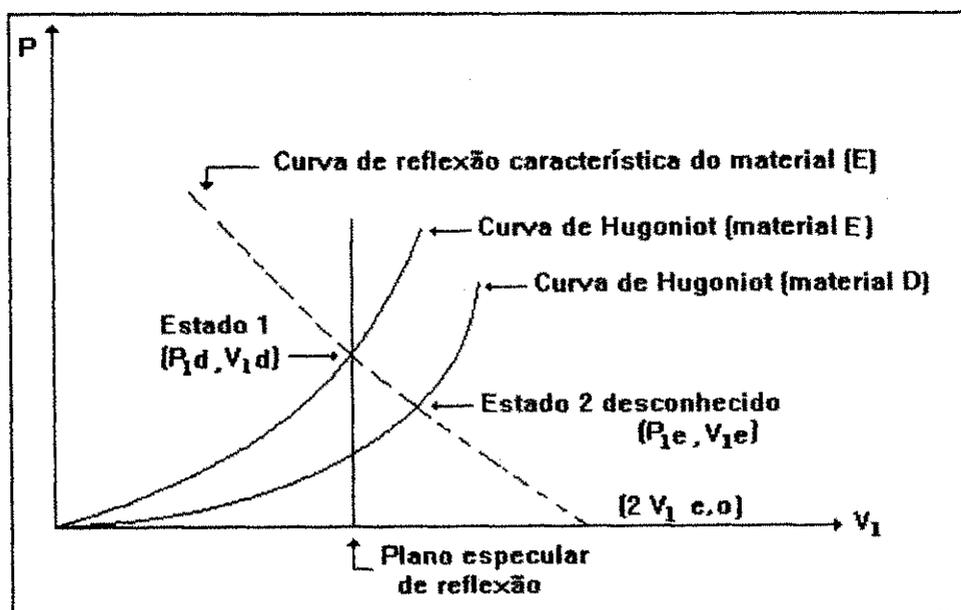


Figura (3.5) - Curva de Hugoniot representativa da interação entre dois meios onde  $I_d < I_e$ .

Analisando a curva de Hugoniot, observa-se que o ponto correspondente à região da onda incidente (estado<sub>1</sub>) é conhecido. No caso do explosivo por exemplo, esse ponto seria o da pressão e velocidade de detonação. Como a onda se refletirá na interface, a imagem especular de reflexão da curva de HUGONIOT corresponde ao material que passará pelo ponto de estado conhecido. Já na interface, a pressão e a velocidade de onda transmitida ao material<sub>2</sub> correspondem ao ponto de interseção da curva especular de reflexão do material<sub>1</sub> com a curva de HUGONIOT correspondente ao material<sub>2</sub>. Figura (3.5).

Analicamente, as relações entre as pressões transmitidas  $P_t$ , refletidas  $P_r$  e incidentes  $P_i$  são obtidas pelas equações (3.24) e (3.25), onde os parâmetros com índice "d" e "e" referem-se aos meios receptores e transmissores.

$$P_t = \frac{2\rho_d U_d P_i}{\rho_d U_d + \rho_e U_e} \quad \text{Eq.(3.24)}$$

$$P_r = P_i \left( \frac{\rho_d U_d - \rho_e U_e}{\rho_d U_d + \rho_e U_e} \right) \quad \text{Eq.(3.25)}$$

Explicitando as equações (3.24) e (3.25) na forma de impedância (produtos  $\rho v$ ), tem-se:

$$P_t = \frac{2 I_d + P_i I_e}{I_d + I_e} \quad \text{Eq. (3.26)}$$

$$P_r = P_i \left[ \frac{I_d - I_e}{I_d + I_e} \right] \quad \text{Eq. (3.27)}$$

Se  $I_d < I_e$ ,  $p_t$  será  $<$  que  $p_i$ , observa-se através da equação (3.26). Já pela equação (3.27), tem-se que  $p_r < 0$ . Ainda analisando essa condição, observando a figura (12), obtém-se que  $v_t > v_i$ .

Segundo JONES (1968) pode citar como exemplo deste caso um choque de 240 kbar em alumínio transmite ao aço 340 kbar e reflete 100 kbar na forma de compressão para o alumínio.

Segundo Caso. Analisando a Figura (3.6.a), observa-se um corte longitudinal da região que inclui a interface de dois materiais através da qual a onda de choque se propagará, possuindo no meio direito uma impedância maior que no meio esquerdo. A Figura (3.6.b) apresenta o perfil de pressão nas zonas comprimidas e não comprimidas do corpo.

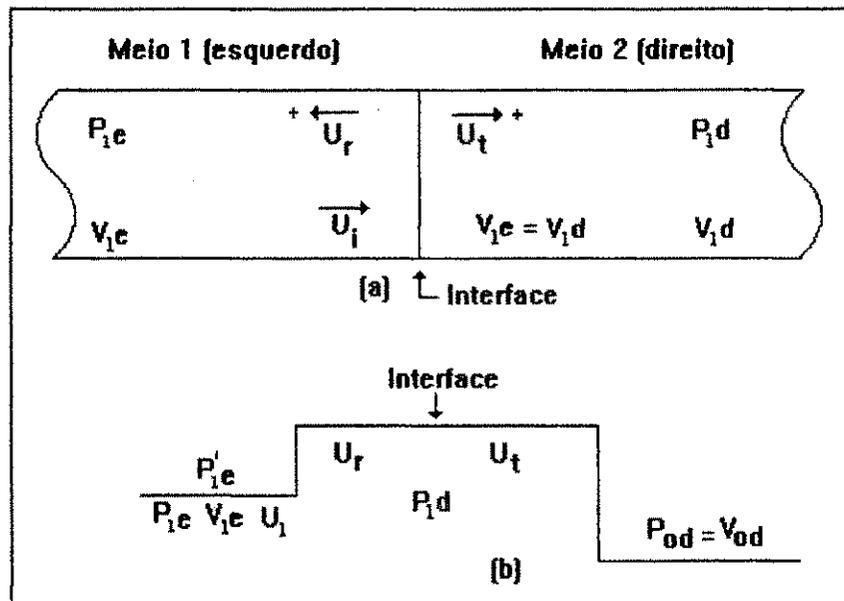


Figura (3.6) - Interação de ondas entre meios,  $I_d > I_e$ .

- a) Corte esquemático e grandezas envolvidas  
b) Perfil após a interação.

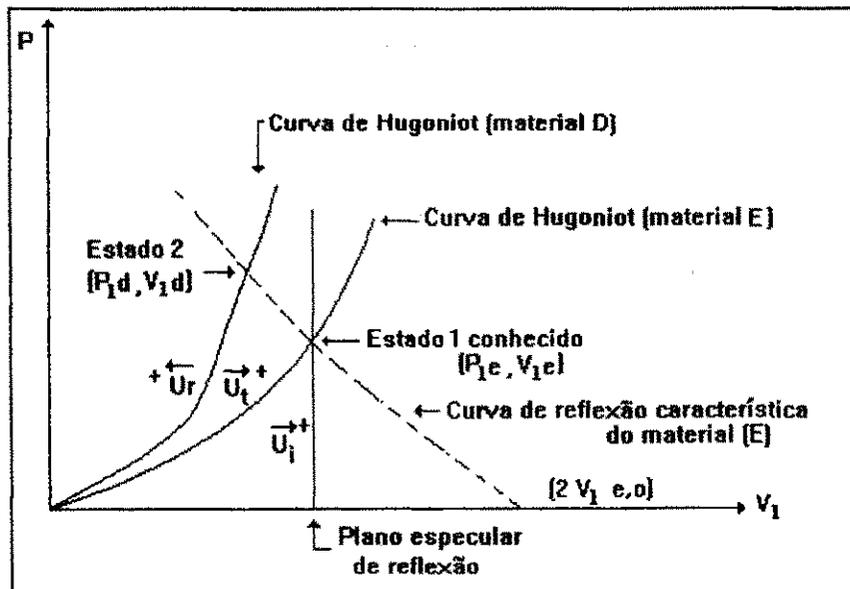


Figura (3.7) - Curva de Hugoniot representativa da interação entre dois meios onde  $I_d > I_e$ .

A partir da equação (3.26) percebe-se que se  $I_d > I_e$ ,  $p_t$  será  $> p_i$  e através da equação (3.27), nota-se que  $p_r > 0$ . Analisando esta condição e de acordo com a Figura (3.7), tem-se que  $v_t < v_i$ .

Segundo JONES (1968) pode-se citar como exemplo deste caso um choque de 240 kbar em alumínio, transmite cerca de 95 kbar em polietileno e reflete 145 kbar na forma de tração para o alumínio.

Considerando-se o explosivo como meio esquerdo em contato direto com o meio direito (maciço rochoso), tem-se:

a) Quando a propagação da onda de choque possui a mesma direção de propagação da detonação, estamos tratando de uma interação unidimensional. Nesta condição  $p_{1e} = p_{cj}$  (pressão-Jouguet ou pressão de detonação),  $U_e$  é a velocidade de detonação do explosivo  $D_e$ ,  $P_{1d}$  é a pressão de contato explosivo/rocha ou pressão transmitida  $P_t$  e  $\rho_{0e}$  é a densidade do explosivo, cujo produto com  $D_e$  origina  $I_e$  (impedância do explosivo)  $U_e$  é a velocidade de propagação da onda no maciço rochoso,  $\rho_{0d}$  é a densidade do maciço rochoso  $p_r$  cujo produto origina  $I_r$  (impedância da rocha).

Diante do exposto a equação (3.26) se transformará na seguinte.

$$P_t = \frac{2 I_r + P_{cj} I_e}{I_r + I_e} \quad \text{Eq.(3.28)}$$

b) No caso do desmontes de rochas com cargas de coluna, tem-se um sistema bidimensional, pois a direção de propagação da detonação não coincide com a propagação da onda de choque no maciço rochoso, então adota-se  $p'_{cj} = 0,5 p_{cj}$ .

O fenômeno de fraturamento por onda de choque, pode ser esclarecido através do estudo de transmissão de ondas entre meios de impedâncias diferentes.

### 3.3 ALGUMAS CONSIDERAÇÕES DE SUPERPOSIÇÃO DE ONDAS DE CHOQUE:

As considerações de superposição de ondas, com a mesma amplitude e frequência serão feitas não especificamente para onda de choque, podendo ser

utilizadas para estudo simulado de situações reais de desmonte com explosivo do maciço rochoso.

a) A velocidade inicial ( $V_0$ ) da partícula possui direção inversa ao deslocamento da onda: Nesta situação, são alteradas a direção e o módulo dessa velocidade após a passagem da onda de choque, isto no caso da velocidade imprimida pela onda de choque ser maior do que a velocidade da partícula em movimento.

Nos desmontes de rocha convencionais instantâneos ou mesmo em cortes prévios, situações destes tipos descrita acima podem ser obtidas em medições de velocidade de partícula, onde a medição desta é realizada em pontos da mesma linha de furos e não são localizados à meia distância entre os furos.

b) A velocidade inicial ( $V_0$ ) da partícula em direção oposta ao deslocamento da onda, diminuindo-se a "zero" o valor modular dessa.

Essa situação pode ser analisada, como um particular do item "a", quando o módulo da velocidade imposta na partícula pela onda de choque possui o mesmo valor da velocidade no seu estado inicial. Esta situação poderá ser analisada como resultante da medição da velocidade da partícula, conseguida em um ponto médio entre os furos detonados ao mesmo tempo e com as mesmas cargas. O esclarecimento para esta situação é que geralmente as ondas atingirão ao ponto médio com muita defasagem, aproximadamente a  $180^\circ$ , obtendo-se assim interferência destrutivas prejudicando o desmonte.

c) A velocidade da partícula antes do choque com a mesma direção do deslocamento da onda.

Uma das prováveis explicações para melhoria da fragmentação das rochas em fogos, utilizando micro-retardos, pode ser analisada hipoteticamente nesta situação, em que o choque ocorrendo na mesma linha de furos utilizando retardos e medindo a velocidade da partícula na direção perpendicular a essa linha; no desenvolvimento do fogo, as partículas apresentam-se em pleno movimento, ampliando neste caso a velocidade da partícula por interferência construtiva, tornando-se bastante útil ao processo de fragmentação da rocha.

d) Choque incidente sobre um meio em repouso. É o caso característico do desmonte convencional, com furos na mesma linha e com detonação simultânea.

### 3.4 ONDAS DE RAREFAÇÃO OU DE EXPANSÃO:

São responsabilizadas pela remoção da pressão que causou a onda de choque, atuando com a finalidade de diminuir a velocidade das partículas e por sua causa transforma as ondas de choque em ondas elásticas.

Segundo COATES (1973) a tensão produzida por uma onda em um maciço rochoso a uma distância "R" de um furo de raio  $R_0$ , pode ser estimada através da equação;

$$P_i = (R_0 / R)^\lambda P'_{cj} \quad \text{Eq.(3.29)}$$

Onde:  $\lambda$  é uma constante característica da rocha e do explosivo em uso, variando 1,5 e 2,5.

A diferença entre  $P_i$  e  $P'_{cj}$  é atribuída à ação das ondas de rarefação. Essas são as responsáveis pela atenuação dos fenômenos ondulatórios.

### 3.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS:

a) - Quando for utilizar micro-retardos nos desmonte do maciço rochoso, tem que ter a preocupação com os efeitos construtivo e destrutivo das ondas. O importante é que a onda produzida pela detonação<sub>2</sub> entre em fase, quando a onda da detonação<sub>1</sub> for terminando sua amplitude. Se for utilizado retardos inadequados, ao invés de gerar amplificação de ondas pela onda total do somatório das ondas, uma mais a outra que está amortecendo, vai gerar efeito contrário, ou seja, destrutivos. Por exemplo: iniciando o primeiro fogo, com tempo muito curto em relação ao segundo, logo que o segundo fogo detone, cria uma onda e conseqüentemente elimina parte desta onda negativa, com uma onda do fogo seguinte. A onda total vai eliminar a onda de uma linha, causando o retardo, interferência destrutiva por causa do intervalo de tempo muito curto entre um furo e outro. No caso em que haja o somatório das ondas, sua interferência será construtiva.

Portanto se a rocha não for ensaiada, utiliza-se retardos o mais longo possível de 40, 60 milisegundos, para garantir que não haja problemas de interferência.

Com esses intervalos de tempo, as vibrações causadas pela detonação inicial, praticamente já estará eliminada e a produção de onda já tem alcançado seu percurso final.

Os fabricantes de explosivos recomendam utilizar retardos acima de 40 milissegundos, justamente porque a velocidade de propagação da onda de choque na rocha, estar em torno de 2 a 3.000 m/s.

b) - Quando a relação de impedância explosivo/rocha for unitária o desempenho dos explosivos nos corpos rochosos serão maiores, como mostra as equações 25 e 26 que as tensões absorvidas pelo maciço rochoso é função do explosivo e do meio em que transmite o choque.

c) - O explosivo gera gás quando acionado convenientemente. Gerando onda de choque, essa onda é proporcionada pela velocidade de queima do explosivo, ou seja, pela velocidade de detonação. Quanto maior for essa velocidade maior será a onda de choque e essa onda de choque é aqui denominada de energia cinética.

d) - A distância entre o ponto gerador da tensão e a face livre exerce grande influência no valor da tensão de chegada na interface rocha/ar, como mostra a equação (3.29). A tensão na interface é responsável pela formação da onda de tração refletida mostrada pela equação (3.25), Não restando assim, dúvidas da importância do parâmetro do afastamento nos desmonte de rocha.

## 4 DESMONTES EM MACIÇOS ROCHOSOS

### 4.1 CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS E USO DOS EXPLOSIVOS QUÍMICOS CONVENCIONAIS NO DESMONTE DE ROCHA.

A detonação de explosivos químicos de ruptura no interior de um maciço rochoso produz fenômenos seqüenciais no tempo e no espaço de: plastificação, esmagamento, fraturamento e deslocamento da rocha conforme as Figuras (4.a), (4.b) e (4.c) respectivamente. Desses fenômenos, os que mais nos interessam são aqueles de fraturamento, causados pela energia cinética das ondas sísmicas produzidas e aqueles de separação e lançamento de blocos e/ou fragmentos de rocha, causadas pela energia potencial dos gases também produzidos pela detonação.

#### Plano visual do estágio "1"

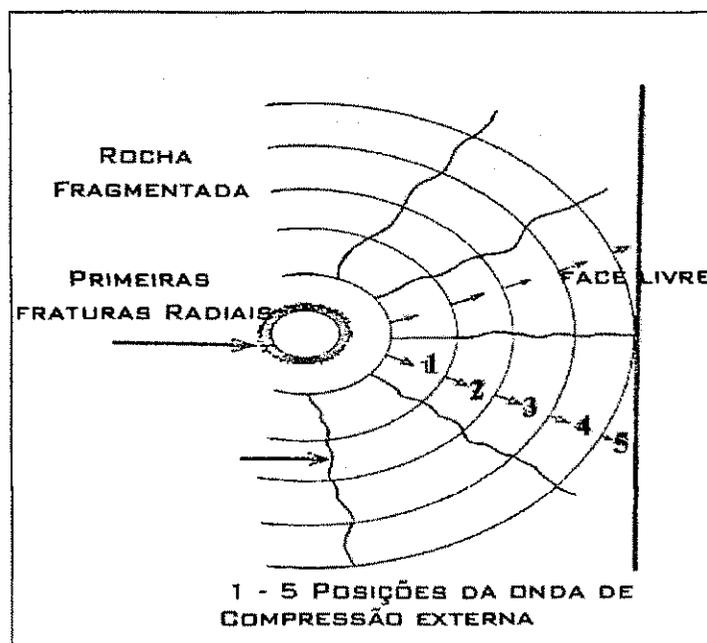


Figura (4.a) – Primeiro mecanismo do fraturamento radial dentro do furo central em regime de compressão da detonação do furo central, IBID (1979).

### Plano visual do estágio "2"

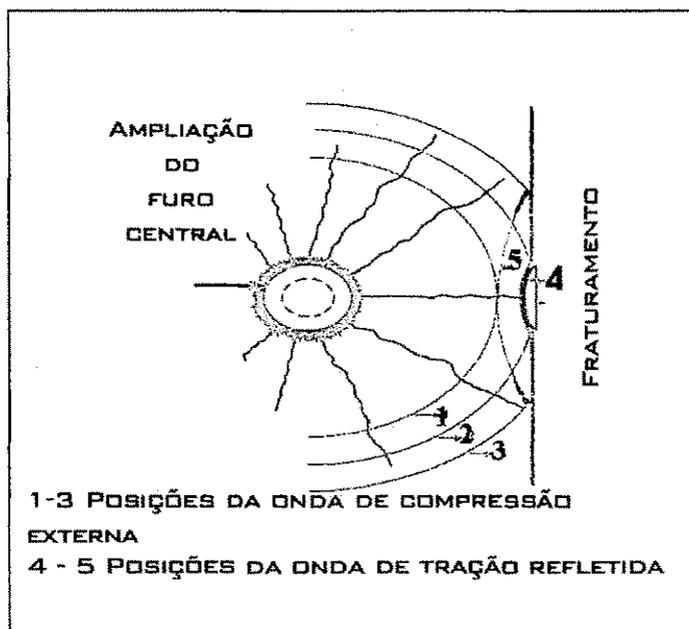


Figura (4.b) – Segunda fase do fraturamento radial e mecanismo de fraturamento onde as ondas de compressão são refletidas na face livre, como uma onda de tração resultando em fratura, IBID (1979).

### Plano visual do estágio "3"

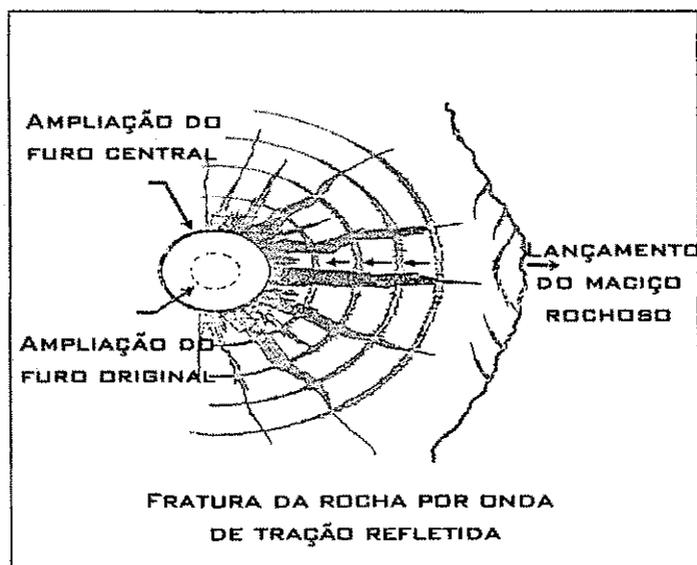


Figura (4.c) – Fase final do fraturamento radial e mecanismo de fraturamento, mostrando fragmentação do maciço rochoso sob tração, resultando

em formação de fraturas laterais e incipientes. IBID (1979).

Utilizando-se de tecnologia adequada de projeto e execução de plano de fogo, realiza-se o desmonte de rochas de modo a se conseguir economia no resultado da operação, ou seja, fragmentação da rocha e formação adequada de pilha, de modo a minimizar o custo das operações seguintes de britagem, carregamento e transporte. A Figura (4.1), mostra a importância do grau de fragmentação no custo da produção. É uma das conseqüências mais notáveis da maximização dos efeitos secundários da transferência dessa energia para o meio ambiente das escavações. É apenas uma questão de se produzir fraturamentos, ruídos, vibrações e lançamento de fragmentos de rocha aonde eles devem ser produzidos: nas bancadas e praças das escavações. HOEK e BRAY (1977).

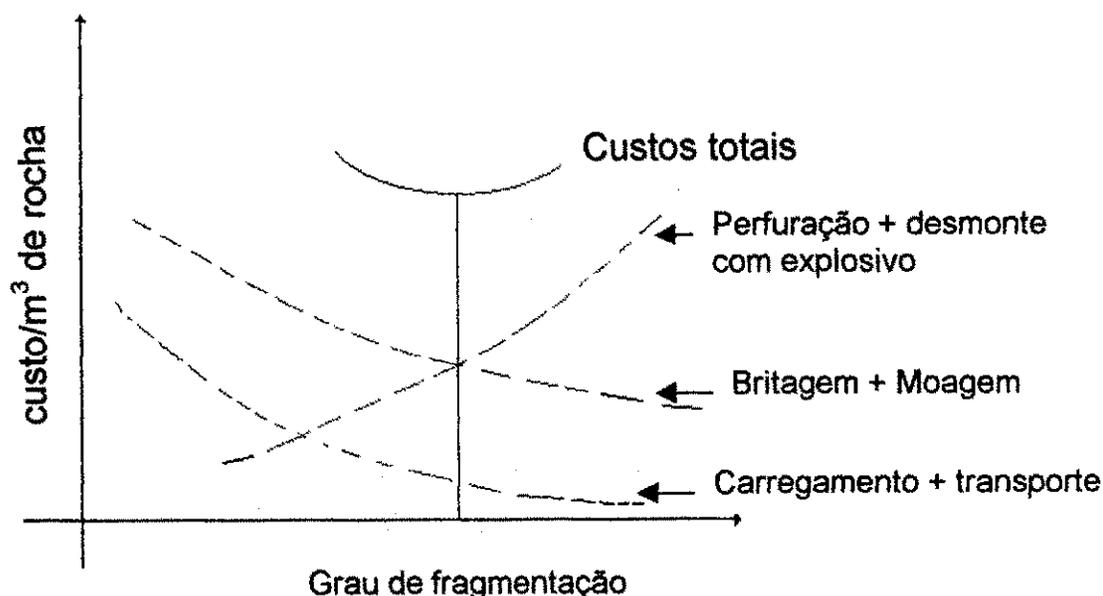


Figura (4.1) - Importância da fragmentação nos custos de produção  
HOEK e BRAY (1977).

Um desmonte será tanto mais eficiente, quanto mais energia do explosivo for utilizada nos seus principais objetivos, que são: a fragmentação e da formação da pilha de rocha adequada. Todos outros efeitos devem ser minimizados sob pena de realizar-se um desmonte sem o máximo aproveitamento da energia disponível.

Desse modo, a melhoria na eficiência do desmonte provoca uma diminuição nos efeitos secundários indesejáveis.

A Figura (4.1), mostra também, que o desmonte em maciços rochosos estão condicionados a vários parâmetros básicos, que influenciarão diretamente sobre os custos das diversas operações unitárias, como: finalidade do material a ser trabalhado, características da rocha ou do maciço, situação topo-geográfica, mão de obra disponível e outros. Após análise criteriosa desses parâmetros é que poderão ser definidos os investimentos, de forma a viabilizar a obra.

## **4.2 DESMONTE COM EXPLOSIVOS QUÍMICOS CONVENCIONAIS**

Nesta modalidade de desmonte, as cargas explosivas são colocadas no interior dos furos realizados no maciço rochoso. As características devem ser rigorosamente estudadas, para que dessa forma haja possibilidade de compatibilizar as especificações do explosivo com as características geomecânicas do maciço a ser desmontado. Essa atividade vem sendo cada vez mais usada por empresas ligadas a operações com pedreiras e mineração.

Apesar dessa atividade se portar de forma crescente, as publicações sobre o problema prático que aborda as propriedades dos explosivos e outras variáveis do desmonte de rocha usando cargas colunares, são pouco freqüentes e de difícil acesso, pois as informações encontram-se demasiadamente fragmentadas, impossibilitando estudos mais aprofundados e fazendo com que as atividades neste setor, ainda sejam executadas seguindo procedimentos quase que exclusivamente empíricos.

Características como: o posicionamento dos furos, peso e distribuição das cargas explosivas, retardos, ponto de ignição e seqüência de detonação são detalhes que juntamente com as especificações do maciço rochoso, compõem o conjunto de parâmetros que devem ser estudados para atingir o sucesso nas operações de desmonte.

Será tratado em maior profundidade por constituir escopo desta pesquisa, o desmonte de rocha à céu aberto para a produção de fragmentos de rochas que irão sofrer processos posteriores de britagem.

Nesta técnica os estudos concentram-se basicamente na otimização do plano de fogo, objetivando que os blocos saiam desta operação com tamanhos adequados às especificações dos equipamentos de britagem primária, além da granulometria é analisado o custo do desmonte que deve ser o menor possível e a quantidade de blocos maiores que as especificações da britagem, para que desta forma, tenha-se noção de quantos "fogachos" serão necessários e com estes dados analisados a relação custo/benefício, atingindo com essa análise o plano de fogo ideal. Para conseguir este plano de fogo ideal, só é possível realizando-se minuciosas pesquisas de dimensionamento dos parâmetros do mesmo, visando desta forma, compatibilizar a geometria do fogo com as características geomecânicas do maciço, assim como, as especificações do explosivo e a produção desejada.

#### **4.3 DESMONTES ESCULTURAIIS OU CONTROLADOS**

É considerado desmonte escultural ou controlado, todas as modalidades de desmonte, que se preocupa em reduzir as irregularidades produzidas nas rochas.

Cada vez mais as pedreiras estão se localizando próximas a áreas urbanas, implicando em situações conflitantes com a população. Com isso, se faz necessário, nesta pesquisa, dar ênfase ao estudo do desmonte escultural, afim de minimizar os impactos causados pela mineração ou pedreira à sociedade, e ao mesmo tempo, atenuar os danos causados ao meio ambiente e ao maciço remanescente.

A finalidade principal desta técnica é, além de atender as especificações granulométrica do material, diminuir o overbreak, evitar as pontas, cavidades e fissuras causadas pelos efeitos de tensão produzidas pela ação do explosivo, obter resultados que valorizem o aspecto estético das bancadas (faces lisas e regulares), permitindo assim, compatibilizar o desmonte usando explosivo com o meio ambiente e a segurança.

Dentre os métodos empregados para a execução dessa técnica, pode-se citar: perfuração contínua (line drilling) , carga amortecida (cushion blasting) e o prefissuramento ( pré-splitting ).

A escolha do método empregado, assim como, a eficiência do mesmo, depende exclusivamente das características geomecânicas do maciço.

Esta técnica de desmonte escultural é aplicada na área de construção civil (em canais, rodovias, portos etc.) e mineração (em bancadas à céu aberto, túneis, inclinados, etc.), sendo que esta última, merece atenção especial devido a abordagem técnica desta pesquisa.

#### **4.3.1 PERFURAÇÃO CONTÍNUA ( LINE DRILLING)**

Este método consiste apenas por uma simples carreira de furos de pequeno diâmetro e espaçamento, sem carga explosivas, que dão origem a um plano de fraqueza artificial permitindo o rompimento modelado a partir da ação efetuada pela detonação primária. Em alguns casos os furos possuem um espaçamento tão pequeno, que chega a se formar verdadeira fissura. É importante salientar que a precisão dos furos deve ser a maior possível. Para que isso aconteça, geralmente é empregada a técnica de furo canalizado, onde é inserido no furo anterior, uma haste de aço, que ajuda ao operador a realizar a perfuração seguinte paralela a anterior, fazendo com que o índice de deflexão não aumente.

Sua principal vantagem é que pode ser aplicável onde cargas explosivas mais leves podem resultar em danos às superfícies limítrofes da escavação. CINTRA (1986).

Pode-se citar como desvantagens: resultados incertos, a não ser em formação bem homogêneas; torna o trabalho moroso e o custo de perfuração é muito elevado.

#### **4.3.2 CARGA AMORTECIDA ( CUSHION BLASTING )**

Este método é caracterizado por uma singela linha de furos ao longo do perímetro escavado, e o carregamento dos furos é feito com espaçadores, de forma a obter razão linear de carregamento baixo.

Os furos do fogo amortecido só deverão ser iniciados após a remoção do material da escavação principal e detonada com um mínimo de retardos possível, para que a onda de choque propicie o cisalhamento da rocha entre os furos.

A relação afastamento/espacamento, deverá estar em torno de 1,2 a 1,3, assim como o diâmetro do furo deverá girar entre 2 e 4 polegadas.

Dentre os métodos com carga explosiva, este é o que oferece a máxima proteção para face final e é aconselhável para locais onde se deseja diminuir efeitos das vibrações causados pelas detonações. CINTRA (1986) e ROLIM (1993).

A grande vantagem desse método, está na possibilidade de seu uso em rochas fraturadas, permitindo o alívio dos gases graças às faces livres nas proximidades da superfície de aplicação. Outra vantagem é que torna fácil a verificação imediata da geologia local no corte da escavação principal, para possível e posterior ajustamento das cargas e espaçamentos entre os furos.

#### **4.3.3 CORTE PRÉVIO ( PRE SPLITTING )**

É a modalidade de detonação controlada, que se caracteriza por uma prévia detonação de uma seção antes da principal, diferenciando dos demais métodos citados de desmonte escultural. Faz parte desse corte prévio uma linha

de furos de diâmetro em torno de 2 a 4 polegadas e espaçamentos pequenos, que são cuidadosamente carregados com cargas bem distribuídas.

A distância entre os furos é condicionada à resistência à tração da rocha e os furos devem ser detonados simultaneamente, para que os efeitos de superposição de ondas, permitam ampliar o espaçamento entre os furos ROLIM (1993).

Os furos devem ser realizado de forma a se conseguir o maior paralelismo possível, facilitando a eficiência do método. Funciona também com furos inclinados até 45° além desta inclinação, chegando-se até a horizontal, os resultados não são satisfatórios.

As vantagens deste, podem ser resumidas como segue: menos perfuração que qualquer outro método de cirurgia rochosa, diminuindo custos; obtenção de contornos regulares, uniformes e esteticamente satisfatórias; menos ultraquebra (overbreak) em torno de 50 a 90% e a superfície criada amortece os abalos dos desmontes posteriores, preservando o maciço.

Apesar das vantagens, o método também possui seus inconvenientes: há dificuldades na previsão das condições geológicas locais, uma vez que o prefissuramento é avançado em relação a escavação principal, podendo danificar os furos da escavação principal se estes já tiverem sido perfurado ou prejudicar a futura perfuração. CINTRA (1986).

#### **4.3.4 RESUMO**

É importante que todos que fizerem uso do desmonte escultural, conheçam as vantagens e limitações de cada técnica. Ao fazer uso destes métodos, recomenda-se realizar experiência em pequenas escalas, para posterior determinação de cargas e geometria de perfuração ideais.

Não há dúvidas que as soluções aplicadas aos métodos convencionais de desmonte, são as mais utilizados atualmente para proteger a rocha remanescente e taludes. No entanto, isso ainda é pouco. A adoção nos casos críticos, de

soluções combinadas de prefissuramento em bancadas inclinadas ou verticais, parece ser a solução adequada.

#### **4.4 MECANISMO DE FRAGMENTAÇÃO NOS DESMONTES A EXPLOSIVOS**

Com base em observações de campo, acreditava-se que os explosivos industriais desenvolviam seu trabalho de fragmentação, apenas pela atuação dos gases em altas pressões decorrentes das detonações. Imaginava-se que, estes gases, em seu processo de descompressão abriam fendas na rocha, que se estendiam até as faces livres, dividindo assim o maciço rochoso em fragmentos de menor dimensão.

Estudos mais recentes, por pesquisadores como LANGEFORS (1963), DINIS DA GAMA (1971), COATES (1973) e outros, em modelos físicos com a aplicação da técnica de fotoelasticidade, em modelos matemáticos e também através de testes no campo, deram origem a um novo capítulo no estudo da mecânica das rochas: a dinâmica das rochas. Segundo este estudo a detonação de uma carga explosiva confinada em um maciço rochoso (estudo feito inicialmente para cargas esféricas e depois estendido para cargas cilíndricas), apresenta duas fases distintas e características: uma fase dinâmica correspondente aos fenômenos oriundos do caminhamento das ondas de choque pelo maciço rochoso (geralmente dentro dos primeiros 5 milisegundos após a ignição do explosivo), e uma fase semi-estática, correspondente ao trabalho mecânico realizado durante o processo de expansão ou descompressão dos gases da detonação (normalmente 50 milisegundos após a ignição do explosivo). Figura (4.2) e Figura (4.3).

## Mecanismo de Fragmentação do Maciço Rochoso

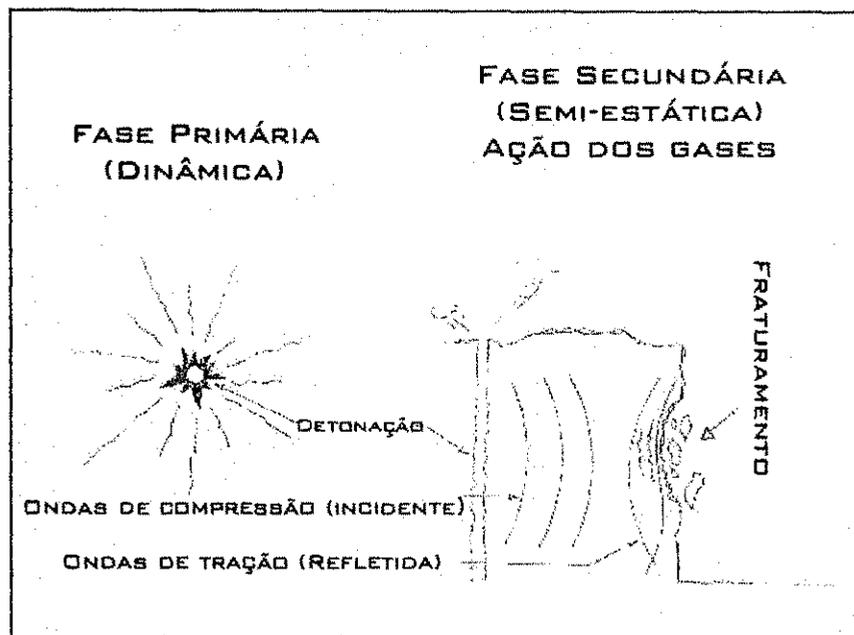


Figura (4.2) – Mecanismo de fragmentação das rochas  
IBID (1979)

A pressão sobre a parede do furo, inicialmente muito alta, sofre uma queda pela ação das ondas de rarefação, caindo acentuadamente. Figura (4.3).

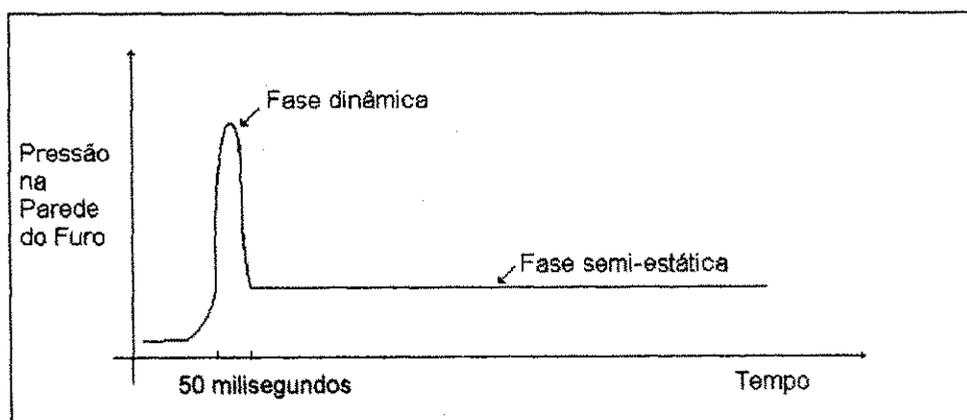


Figura (4.3) – Curva de variação de pressão sobre as paredes do furo versus o tempo, mostrando as fases dinâmica e semi-estática da detonação.  
ITO (1962) e SARSA (1962)

## FASE DINÂMICA

A detonação de um explosivo é caracterizada pela presença de uma onda de choque que percorre a coluna explosiva (freqüentemente no sentido descendente), com velocidade diferenciada em função dos tipos de explosivos e das condições de ignição e confinamento. Durante a fase dinâmica, a carga explosiva confinada no interior do furo deflagra uma reação de decomposição, que tende a atingir um regime estacionário (Plano Chapman - Jouguet), como mostra a Figura (4.4).

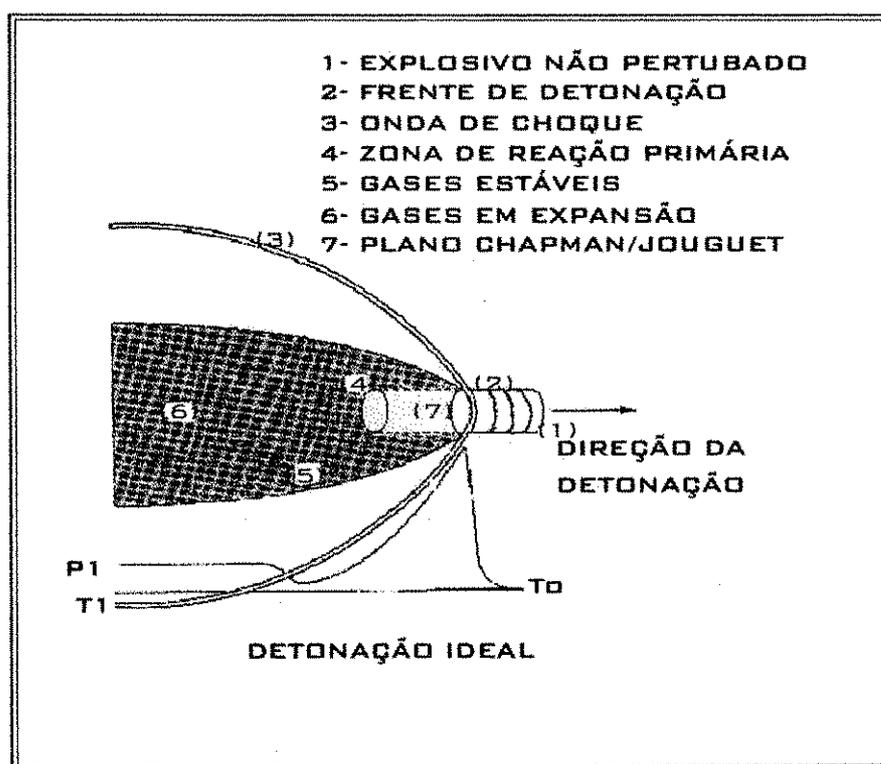


Figura (4.4) - Plano Chapman – Jouguet. Ice explosives (1997).

A fase dinâmica da detonação inicia-se, justamente, com o aparecimento desta onda de choque percorrendo a coluna explosiva, conforme Figura (4.5). Ao percorrer a coluna explosiva, esta onda de choque, propaga-se pelo maciço vizinho; a cavidade, afastando-se concentricamente, atuando com pulsos de compressão, até atingir a face livre, onde reflete-se e retorna para o interior do maciço aplicando esforços de tração a este. Quando, na reflexão, os pulsos de tração são superiores à resistência de tração dinâmica da rocha, iniciam-se fraturamentos paralelos a face

livre, o que é constatado nos desmontes em bancadas PERSSON (1970) e FOURMAINTRAUX (1983).

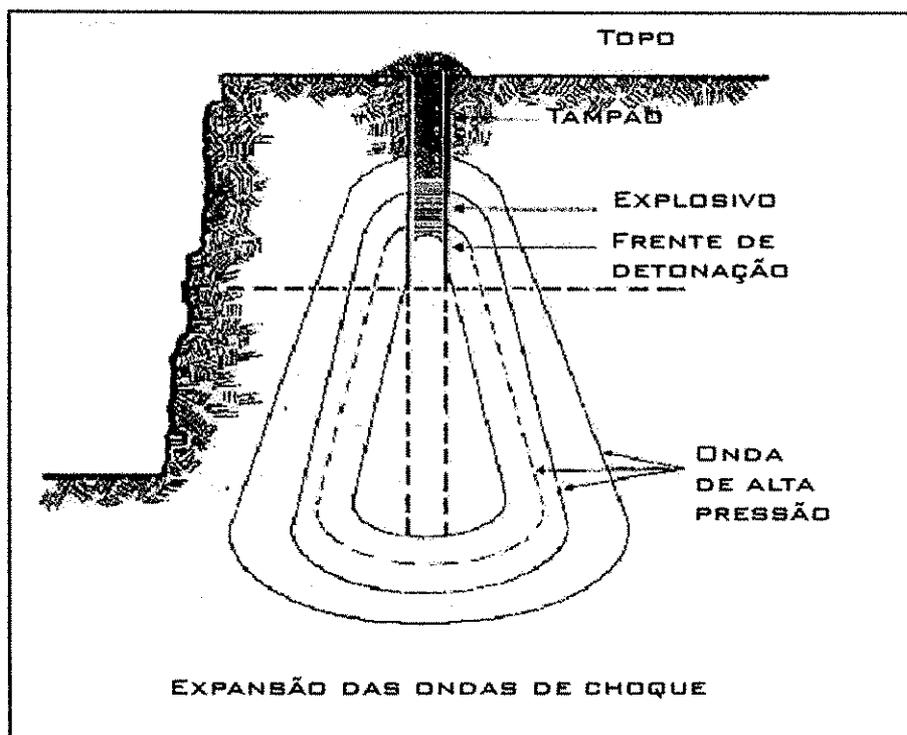


Figura (4.5) - Expansão das ondas de choque. Ice explosives (1997).

Durante o processo cinemático, tanto as ondas incidentes de compressão, como as refletidas e as combinadas originam fraturas no maciço, sem as quais, em maciços não fraturados, a ação destrutiva da fase (semi-estática) não seria possível. Desta maneira, do ponto de vista de fraturamento descrito por CHURCH (1981) e outros pesquisadores sobre os eventos que ocorrem durante o caminhamento das ondas de choque, ou seja, na duração da fase dinâmica é basicamente a seguinte:

- 1- Aparecimento das fraturas radiais oriundas por tensões de tração perpendiculares aos pulsos de compressão;
- 2- Reflexão das ondas de choques nas faces livres;
- 3- Retorno das ondas de choque com o aparecimento das fraturas tangenciais ;
- 4- Fraturas originadas pela ação combinada de : compressão, tração e flexão.

Apesar da importância da fase dinâmica sua contribuição energética na fragmentação do maciço gira em torno de apenas 3 a 4% da energia total.

Entretanto, sem sua presença, em maciços não fraturados, seria impossível a fragmentação LANGEFORS (1963) e GUILHERME (1989).

## **FASE SEMI-ESTÁTICA**

Esta fase é assim denominada pelo fato de ocorrer geralmente em instantes relativamente posteriores 50 milissegundos ao da ocorrência da fase dinâmica. A fase ocorre quando os gases da detonação, em altas pressões e temperaturas, resultantes da reação química, confinados na cavidade da rocha, procuram seu caminho de saída para atmosfera.

Durante esta fase os gases oriundos das detonações, penetram pelas fraturas radiais e em seguida pelas tangenciais provocadas pela fase dinâmica, separando os blocos, movimentando-os para frente, consumando desta forma o trabalho mecânico de fragmentação e lançamento do maciço rochoso, iniciado na fase dinâmica LANGEFORS (1963).

A ação das duas fases distintas da detonação, induzem no maciço quatro zonas com características de fragmentação específicas denominadas:

- 1- Zona Hidrodinâmica - Contígua à cavidade do explosivo, é assim denominada, face às altas pressões e temperaturas envolvidas no processo de detonação; a rocha nesta vizinhança comporta-se como fluido;
- 2- Zona Plástica – Ainda face às altas tensões, atuantes nesta zona, no regime plástico, ocorre uma pulverização da rocha, que inclusive, pode ser constatada na meia "cana do furo" após o desmonte. Nesta zona a rocha se comporta como um fluido de baixa viscosidade e sem resistência ao cisalhamento;
- 3- Zona Fraturada – Devido às trações tangenciais à cavidade do furo, provocadas pelas ondas de compressão, que nesta zona ultrapassam a resistência à tração da rocha, aparecem fraturas radiais, (também conhecidas como "gretas"), relativamente extensas, entremeadas por um sistema secundário de fraturas radiais menores. Como a excessiva fragmentação na zona de esmagamento é associada à taxa de energia de dissipação, essa zona tende a aumentar com a pressão de detonação e com relação entre diâmetros (carga/furo). Além do mais, é importante considerar fatores como: as características físicas e mecânicas da

rocha, do maciço rochoso e do material entre a carga e a parede do furo ROLIM (1993).

Finalmente, deve ser considerada a ação dos gases da detonação, que, ao penetrarem nas fraturas, comprimem a rocha existente entre duas fraturas consecutivas. Quando a pressão do gás é muito alta e atua por longo tempo, ocorrem esmagamentos adicionais que dificultam a identificação do esmagamentos promovidos exclusivamente pela ação dinâmica da onda de choque, RENECHART (1965), HAGAN (1979), e

**4 - Zona Elástica ou Sísmica –** É a mais afastada da cavidade do explosivo e onde as tensões tangenciais já não são suficientemente elevadas para superar a resistência à tração da rocha. Por conseguinte não ocorrem, nesta zona, fraturas radiais, porém as ondas de choque propagam-se através desta até atingir a face livre e retornam aplicando altas tensões de tração ao maciço dando origem às fraturas tangenciais. É constituída por material intacto, não fraturado pela detonação, onde a propagação ondulatória se dá com amplitudes inferiores ao limite elástico da rocha, NIEBLE (1974).

#### **4.5 PROJETOS DE PLANO DE FOGO A CÉU ABERTO**

Pode-se definir desmonte em maciço rochosos, como sendo os procedimentos controladores de destruição desses corpos com a finalidade de extrair blocos capazes de serem manipulados ou mesmo para realização de uma escavação, segundo uma geometria definida em projeto. Os desmontes de rocha à céu aberto com cargas explosivas são executados através do método chamado de bancada, que possui dois planos horizontais e um plano vertical ou inclinado, definindo a rocha a ser desmontada, onde o plano horizontal superior é o topo da bancada; o horizontal inferior é a praça e o plano vertical ou inclinado é a face. O encontro da face com a praça é o pé da bancada e se após a detonação surgir alguma porção de rocha junto à face ou acima do plano da praça, esta porção chama-se repé.

Geralmente os métodos usuais de cálculo dos parâmetros do plano de fogo, baseiam-se em características geométricas, não considerando as propriedades geomecânicas da rocha ou a granulometria desejada no desmonte, e o explosivo é calculado em peso, a partir do diâmetro do furo sem considerar por exemplo a sua energia específica ou sua densidade.

Devido a este motivo, será dado ênfase nesta pesquisa, a todos os fatores que de algum modo irão ajudar na eficiência e qualidade do plano de fogo.

Entende-se por projeto de plano de fogo, a forma racional e econômica de aproveitar as duas fases dinâmica e semi-estática da detonação, o que é possível quando se tenta adequar entre si as características dos explosivos, do maciço rochoso e do trabalho da mina ou obra. Deste modo, o plano de fogo consiste no dimensionamento das substâncias explosivas, no arranjo geométrico dos furos, na seqüência de detonação e no tipo de iniciação do fogo, variando conforme a obra a ser realizada e as condições do meio ambiente. Conquanto, é necessário ser levantados dados preliminares afim de prever as reais necessidades da obra, tais como: produção desejada, tamanho máximo e mínimo do bloco útil, finalidade do desmonte, danos causados ao meio ambiente (medidas mitigadoras) e obras auxiliares a serem realizadas.

Após o levantamento desses dados, são executadas pesquisas geológicas e geotécnicas a níveis regional e local, bem como, levantamento topográfico da área a ser trabalhada com a finalidade de adquirir suporte técnico para as futuras etapas de trabalho. Entre os parâmetros a serem considerados para execução do plano de fogo, destacam-se:

- 1 - Dimensões da escavação a ser realizada;
- 2 - Feições litológicas;
- 3 - Feições geoestruturais;
- 4 - Grau de coerência;
- 5 - Grau de alteração;
- 6 - Nível freático;
- 7 - Resistência da rocha;
- 8 - Densidade da rocha;
- 9 - Módulo de elasticidade;
- 10 - Anisotropia e módulos das velocidades de ondas elásticas longitudinais ;
- 11 - Energia de fragmentação e

## 12 -Impedâncias.

Concluída as etapas descritas acima, torna-se fácil realizar o planejamento da jazida ou obra, executando todas etapas futuras de trabalho, assim como identificar os tipos de explosivos, equipamentos de carregamento, de transporte, de perfuração, etc., que sejam mais eficiente para o projeto.

### 4.5.1 DEFINIÇÃO DOS ELEMENTOS DO PLANO DE FOGO

Além dos vários parâmetros de um plano de fogo já citados anteriormente, analisa-se a seguir outros de fundamental importância que estão envolvidos nos desmontes de rocha, com a finalidade de fornecer subsídios para o bom desempenho de uma detonação.

Como os dados levantados no início do projeto são considerados preliminares, o plano de fogo será definido pela distribuição geométrica dos furos e das cargas explosivas.

#### ALTURA DA BANCADA (H)

É a distância vertical entre o topo e o pé da bancada. Vários são os fatores limitantes da altura da bancada, entre eles: condições gerais da rocha, segurança, tipo de equipamento disponível, produção desejada, topografia local, condições geológicas, etc.

A altura máxima de uma bancada deve ser determinada, atendendo aos fatores citados acima, obedecendo a relação proposta por ASH(1976) e SMITH (1976).

$$H \leq 4 A$$

Eq.(4.1)

Quanto a altura mínima, é indiretamente obtida, relacionando o comprimento mínimo do furo ao seu diâmetro, HEMPHILL (1981) por intermédio da seguinte expressão:

de igual valor modular da impedância da rocha. Como o produto da densidade ( $\rho$ ) pela velocidade ( $V$ ) é a impedância ( $I$ ), tem-se a compatibilização da impedância do explosivo ( $I_e$ ); com a rocha ( $I_r$ ), acrescido de um fator ( $K$ ), daí obtém-se que:

$$I_e = K I_r \quad \text{Eq.(4.5)}$$

Como existem geralmente cargas diferenciadas, logo:

$$I_e = X I_b + Y I_c \quad \text{Eq.(4.6)}$$

Outro fator importante, que deve ser levado em consideração na escolha do explosivo é a porosidade efetiva intergranular (porosidade da rocha), pois quanto mais poroso for o bloco mais facilmente a estrutura entra em colapso e maior será a zona de esmagamento e conseqüentemente a absorção da energia dinâmica.

Como o módulo de elasticidade dinâmico em um maciço rochoso extremamente fraturado é bem menor do que em maciço compactado não poroso, o uso de explosivo de alta capacidade dinâmica é desaconselhável, haja vista induzir absorção desta energia, sendo aconselhado utilizar explosivo que gere maior volume de gás.

É necessário salientar, que quanto maior a densidade do explosivo, maior energia de expansão é produzida, porque maior será a quantidade de gases e maior será o tratamento de impedância do explosivo com a rocha. Além disso, quanto maior for a densidade do explosivo, maior será o afastamento e o espaçamento para uma dada razão de carregamento e portanto, menor será a quantidade de furos necessário. Assim, às vezes compensa utilizar explosivos mais denso, mesmo que seja mais caro, economizando na perfuração que é a etapa mais onerosa no desmonte de rocha com explosivos.

## **DIÂMETRO DO FURO ( $\varnothing_f$ )**

O diâmetro do furo implica indiretamente na dimensão do bloco a ser desmontado e, sendo a pá carregadeira o primeiro equipamento limitante da maior

dimensão do bloco (a máquina responsável pela limpeza da praça), ela se relaciona com o diâmetro do furo por meio da equação empírica proposta por HERRMANN (1972).

$$\varnothing \text{ (polegadas) } = \mu_c \text{ (jardas cúbicas)} \quad \text{Eq.(4.7)}$$

onde:

$\varnothing$  = ao diâmetro do furo em polegadas

$\mu_c$  = a capacidade da pá carregadeira em jardas cúbicas .

A partir da razão de carga dimensionada para proporcionar a fragmentação desejada o diâmetro do furo estará relacionado com o afastamento, espaçamento na seguinte relação LANGEFORS (1963).

$$\varnothing_f = ( 0,005 \text{ a } 0,0125 ) H \quad \text{Eq.(4.8)}$$

## AFASTAMENTO (A)

É a distância medida entre a face livre e a primeira linha de furos ou entre linhas de furos paralelos à face livre. Se os furos forem inclinados, deve-se distinguir entre o afastamento real, que é medido perpendicularmente a face livre e o afastamento aparente, que é medido no topo da bancada.

O afastamento pode ser dimensionado pelas seguintes equações proposta por HERRMANN (1972).

$$25 \varnothing \leq A \leq 45 \varnothing \quad \text{Eq.(4.9)}$$

Podendo atingir até 65.5  $\varnothing$ , segundo BERGMAN (1973).

Um outro parâmetro a ser considerado no fogo, por LANGEFORS (1963) é que:

$$20\% H \leq A \leq 50\% H \quad \text{Eq.(4.10)}$$

O afastamento também pode ser determinado aproximadamente fixando um metro de afastamento para cada polegada de diâmetro do furo.

## ESPAÇAMENTO (E)

É a distância entre os furos de uma mesma linha. Para os casos convencionais de desmontes em pedreiras o espaçamento é expresso por:

$$1,3 A \leq E \leq 3 A \quad \text{Eq.(4.11)}$$

$$3E \leq H \quad \text{Eq.(4.12)}$$

## INCLINAÇÃO DA BANCADA

Corresponde ao ângulo que esta faz com a vertical, geralmente a perfuração inclinada substitui quase que completamente a perfuração vertical, exceto em casos especiais onde as condições locais não são favoráveis. São as seguintes as vantagens de perfuração inclinada:

1. Melhor aproveitamento da energia da onda de choque refletida na face livre, visto que na perfuração vertical esse valor é de 25%, enquanto que na perfuração inclinada esse valor é de 37,5%. Assim sendo diminui-se a necessidade de subfuração com conseqüente redução dos custos.
2. Redução de blocos fora de especificações causados pelo ultra-arranque ou pela parte superior da coluna que não é carregada.
3. Maior segurança para os homens e máquinas, tendo em vista a melhor estabilidade da face inclinada.
4. Redução de vibração com a diminuição da subfuração.
5. Menor ultra-arranque aumentando com isso a eficiência das perfuratrizes que não trabalharão em material já abalado pela detonação anterior.
6. Maior lançamento facilitando o trabalho para as pás carregadeiras.

Como problemas e limitações à perfuração inclinada temos:

1. Dificuldade de um bom alinhamento e paralelismo entre os furos por parte do operador da perfuratriz, podendo acarretar fragmentação medíocre e não eliminação de repé.
2. Dificuldade no manuseio de hastes em furos com mais de 10°, bem como dificuldade de embocamento do furo para grandes inclinações.
3. Maior possibilidade de prisão da coluna de perfuração.
4. Características da rocha, como juntas, friabilidade, fraturas, mergulho das camadas, podem prejudicar a perfeita consecução do furo e acarretar problemas no carregamento do mesmo.

A experiência demonstra que, conforme às condições locais, o ângulo de perfuração com a vertical deve variar entre 15° e 30°.

### **SUBFURAÇÃO ( $S_f$ )**

É o acréscimo dado ao furo abaixo do nível da praça, com a finalidade de evitar a formação de repé. Seu valor varia entre 0,2 e 0,3 vezes o afastamento e está condicionado ao ângulo de ruptura da rocha, geralmente, oscila entre 12° e 18° HOEK e BRAY (1977).

### **COMPRIMENTO DO FURO**

Está intimamente relacionado com os parâmetros geométricos da bancada, diâmetro do furo e com as especificações dos equipamentos de perfuração, cuja limitações decorrem da perda de eficiência da perfuração e desvios dos furos a medida que aumenta a profundidade. A relação que existe entre o comprimento do furo e esses parâmetros é regida pelas equações segundo: HERMANN (1972) e HEMPHILL (1981)

$$L = H / \cos \alpha + S_f \quad \text{Eq.(4.13)}$$

$$L \geq 50.8 \phi \quad \text{Eq.(4.14)}$$

## TAMPÃO ( T )

É o nome dado a parte do furo carregado com material inerte. Colar é a porção não carregada do furo que recebe o tampão. Considerando-se a hipótese de um maciço rochoso isótropico no qual as ondas de choque se deslocam esfericamente, as ondas de compressão deverá atingir o topo e a face livre da bancada ao mesmo tempo. Portanto, o comprimento máximo do tampão deve ser próximo ao valor do afastamento. Por outro lado considerando-se uma perda de energia de até 50% nesta região devido à ação de fogos anteriores, essa perda energética deverá ser compensada com uma redução no tamanho do tampão em torno de 50%, logo o tampão deverá ter comprimento em torno de meio afastamento ( $0.5.A$ ). Destas duas hipóteses fica evidenciado os limites para o tampão, isto é, 0.5 a 1.0A. Recomenda-se que testes sejam realizados começando-se com o comprimento inicial de 1.0A, reduzindo-se conforme as observações dos fogos. O tampão possui as seguintes funções:

1. Confinar os gases da detonação, com isso obtém-se melhor eficiência do fogo. Os explosivos de baixa sensibilidade têm sua detonação completa ajudada através do tamponamento do furo. Os explosivos lentos e pouco sensíveis à detonação mostram com freqüência, que com tampões inadequados e uma má iniciação, não conseguem liberar potência suficiente para fragmentar e arrancar a rocha, embora a carga tenha sido bem dimensionada. (O confinamento proporciona, em geral, uma maior velocidade de detonação e maior sensibilidade à propagação para todos os tipos de explosivos, de modo que a energia do explosivo possa romper a rocha antes que o material do tampão seja lançado para fora do furo);
2. Proteger a carga da ignição acidental ou detonação provocada por agente externo;
3. Colaborar para o melhor acabamento da superfície remanescente das detonações e
4. Escalonar cargas permitindo controlar os níveis de vibração, lançamento, impacto de ar e zonas de descontinuidade ao longo do furo.

O tampão deve ser bem dimensionado em comprimento bem como, no tipo de material utilizado, evitando-se com isso o ultralançamento da parte superior da bancada e diminuição dos efeitos do impacto de ar.

O material mais indicado para tamponamento é um rocha com peso específico maior que  $2.5 \text{ t/m}^3$ , com angularidade bem pronunciada e granulometria entre 1/10 e 1/20 do diâmetro do furo, a qual proporciona um tampão de alta resistência dinâmica. HAGAN (1979).

## DISTRIBUIÇÃO DAS CARGAS NO FURO

A própria condição geométrica da bancada induz uma maior resistência à fragmentação nas regiões mais próximas do piso. As diferentes reações oferecidas à quebra implicam necessariamente a utilização de pelo menos dois carregamentos de explosivos distintos em um mesmo furo, denominados, de acordo com a posição ocupada no furo, carga de fundo e carga de coluna.

**Comprimento da carga de fundo ( $L_f$ ):** porção do furo preenchido com explosivo mais potente, cuja finalidade é a quebra da rocha na região mais engastada, ou seja, o pé da bancada.

No cálculo deste comprimento leva-se em consideração a ação das ondas de choque agindo de forma esférica. Se a velocidade de detonação do explosivo for idêntica à velocidade de propagação da onda de choque na rocha (casamento perfeito de impedância), na condição limite, o comprimento dado à carga de fundo é obtido pela equação:

$$L_f = A + S_f \quad \text{Eq.(4.15)}$$

Vários autores atribuem como margem de segurança 30% para a variação da velocidade sônica na rocha resultando, desta correção, a equação:

$$L_f = 1.3A + S_f \quad \text{Eq.(4.16)}$$

**Comprimento da carga de coluna ( $L_c$ ):** esta parte do furo é, geralmente, preenchida com explosivos menos potentes porque é nela que a ação potencial dos gases de detonação (ação de flexão) se faz sentir mais pronunciada. O comprimento da carga de coluna é, portanto, a diferença entre o comprimento total do furo e os comprimentos da carga de fundo e o tampão.

$$L_c = L - (L_f + T) \quad \text{Eq.(4.17)}$$

**Razão energética da carga de fundo ( $q_f$ ):** é a quantidade de energia desenvolvida pelo explosivo, para que determinado volume de rocha seja desmontado.

$$q_f = Q_f / V_f = Q_f / [A \cdot E \cdot (L_f - S_f)] \quad \text{Eq.(4.18)}$$

**Razão Energética linear de carga de fundo ( $RL_{cf}$ )**

$$RL_{cf} = Q_f / L_f \quad \text{Eq.(4.19)}$$

**Razão energética de carga de coluna ( $Q_c$ ):** depende da diminuição máxima dos blocos, a serem detonados cujo explosivo escolhido depende da impedância da rocha e terá como responsabilidade desmontar o maciço rochoso.

$$Q_c = q_c \cdot V_c = q_c \cdot A \cdot E \cdot [L - (L_f + T)] \quad \text{Eq.(4.20)}$$

**Razão linear de carga de coluna ( $RL_{cc}$ ):** Será determinada como sendo, o peso da carga de coluna por unidade de comprimento.

$$RL_{cc} = Q_c / [L - (L_f + T)] \quad \text{Eq.(4.21)}$$

**Carga total ( $Q_t$ )**

$$Q_t = Q_f + Q_c + Q_e \quad \text{Eq.(4.22)}$$

onde:

$Q_e$  = cargas eventuais.

### Razão de carregamento médio ( $R_m$ )

$$R_m = Q_t / V_t \quad \text{Eq.(4.23)}$$

### Energia total ( $E_t$ )

$$E_t = E_{tf} + E_{tc} \quad \text{Eq.(4.24)}$$

### Razão energética total ( $R_{et}$ )

$$R_{et} = E_t / V_t \quad \text{Eq.(4.25)}$$

### Número de furos ( $N_f$ )

Será definido pela relação entre a produção desejada e o volume desmontado por furo.

$$N_f = P / V_f \quad \text{Eq.(4.26)}$$

Onde:

$P$  = Produção desejada

$V_f$  = volume arrancado durante o desmonte por furo

**Perfuração específica ( $P_e$ ):** é um parâmetro muito importante para avaliar a eficiência na distribuição da energia termodinâmica no maciço, sendo calculada através da relação entre o comprimento total perfurado e o volume total a ser desmontado.

$$P_e = N_f \cdot L / V_t \quad \text{Eq.(4.27)}$$

## PONTO DE INICIAÇÃO DA COLUNA EXPLOSIVA ( $P_i$ )

Para uma análise teórica deste parâmetro, considera-se hipoteticamente a coluna explosiva dividida em três partes iguais, sendo 1/3 no fundo do furo, 1/3 na parte central e 1/3 na parte superior do furo e observar-se-á as várias possibilidades de iniciação.

- Caso 1. A iniciação é feita na parte superior da carga, a distribuição da energia atuante na coluna explosiva será máxima no fundo do furo;
- Caso 2. A iniciação é feita na parte central da carga, neste caso a energia atuante no topo e no fundo da coluna explosiva são equivalentes.
- Caso 3. A iniciação é feita na parte inferior da carga (fundo do furo), a energia será máxima na parte superior da coluna explosiva;
- Caso 4. A iniciação é feita simultaneamente na base e no topo da carga, o ponto de máxima energia atuante será o centro da coluna explosiva, e
- Caso 5. A iniciação é instantânea em toda coluna explosiva, o nível de energia desenvolvido é o mesmo em toda sua estrutura, caindo apenas na região do tampão.

Do exposto acima, conclui-se, que a detonação ideal é aquela que apresenta ponto de iniciação no centro da coluna explosiva, visto que as maiores tensões são desenvolvidas na base e no topo da bancada, onde é mais freqüente a formação de blocos maiores e indesejáveis. Quando se usa carga de fundo e carga de coluna a iniciação ideal é na interface entre as cargas.

O ponto de iniciação de uma carga explosiva colunar é muito importante, tendo como finalidade de direcionar níveis energéticos dinâmicos para os pontos críticos da frente de detonação.

Sequência de detonação e retardo, é um dos itens fundamentais para o sucesso do desmonte. Com uso de retardos adequados, a medida que os furos são detonados há uma facilidade à ação do fraturamento por cisalhamento, geram-se novas faces livres, acarretando conseqüentemente, uma menor resistência da rocha à ação dos explosivos nos furos subseqüentes. A técnica de retardar permite obter uma pilha de material fragmentado compatível com os equipamentos de carregamento e transporte, limitando a área de lançamento do material desmontado.

O tempo de espera entre furos ou entre linhas de detonação tem que ser suficiente para criar o espaço necessário à movimentação da rocha a ser detonada na seqüência.

Entretanto, a utilização de elementos de retardos é extremamente problemática, podendo dar resultados tanto excelentes, como péssimos resultados. Possui finalidade básica de retardar um fogo em relação a outro, significando exatamente o tempo de deslocamento da onda de choque, porque quando ela estiver amortecendo, haverá necessidade de outro fogo detonar, para produzir uma reaceleração da velocidade da partícula, ao contrário não terá frente disponível para a amplitude da onda de choque percorrer toda sua trajetória. Este tempo que esta onda de choque necessita para percorrer a uma certa distância, é justamente o tempo de retardo que deverá ser utilizado corretamente.

A correta utilização dos elementos de retardos permite entre outras vantagens:

- 1- Maior aproveitamento da energia de detonação, fazendo com que grande parte da energia que seria desperdiçada de forma deletéria, atue ajudando no processo de fragmentação;
- 2- Posiciona a pilha de material desmontado, através do lançamento dos fragmentos;
- 3- Gera um maior movimento relativo entre os blocos aumentando o cisalhamento entre eles, e

- 4- Maior confinamento, reduzindo a tendência de excessiva abertura entre furos, gerando um maior confinamento dos gases, proporcionando uniformização da fragmentação e reduz o overbreak e ultra lançamento.

## **MALHA DE FURAÇÃO**

É a distribuição geométrica dos furos em função do espaçamento e afastamento. O tipo de malha depende do diâmetro do furo, da dureza da rocha e da capacidade do equipamento de limpeza. As mais usadas geralmente são: quadrada, retangular e estagiada. A malha quadrada apresenta espaçamento e afastamento iguais e os furos de cada carreira são alinhados diretamente atrás dos furos da carreira da frente, enquanto a retangular o espaçamento é maior que o afastamento. Na malha estagiada pode-se ter o afastamento e o espaçamento iguais, mas é mais comum o uso de malha estagiada onde o espaçamento é maior que o afastamento e os furos de uma carreira são locados atrás e no ponto médio entre dois furos da carreira da frente.

Para caso de malhas alongadas o valor de "E" poderá atingir até 6 "A", entretanto os planos de fraqueza das estruturas rochosas devem ser paralelas a face do banco.

Os valores de  $E > A$ , são usados nas malhas para obtenção de blocos para fins de britagem, onde a ação das ondas de compressão refletidas sobre a face livre são mais atuantes que a ação de tração geradas por ondas de compressão entre os furos. Já os valores de  $E < A$  são usados quando se deseja obter grandes blocos ou cortes em rochas ROLIM (1993).

## **4.6 POSICIONAMENTO DAS BANCADAS EM FUNÇÃO DAS FEIÇÕES ESTRUTURAIS**

A definição da direção ideal dada a face das bancadas, são feitas através das estruturas e/ou planos de fraqueza do maciço rochoso, sendo esta determinada com medições de campo e análise de freqüência destes planos.

As frentes das bancadas devem sempre que possível, orientar-se obliquamente às estruturas do maciço que se apresentam na posição quase vertical.

A seguir serão apresentados alguns posicionamento possíveis de formação da bancada, respeitando às condições estruturais, fazendo uso dos termos favorável e desfavoráveis, indicando as condições de riscos e de perdas energéticas.

1- Os planos de fraqueza estão mergulhando em sentido contrário a frente de ataque, Figura (4.6). HOEK e BRAY (1977) mostra, que existe possibilidade de tombamento de blocos apesar de se encontrar nesta posição extremamente favorável, não existe deslizamento em planos, nem deslizamentos em cunha e não existe também roubos de estrutura gasosa, pois a medida que o gás estar em detonação a pressão vai aumentando e consequentemente não há desperdício de gás.

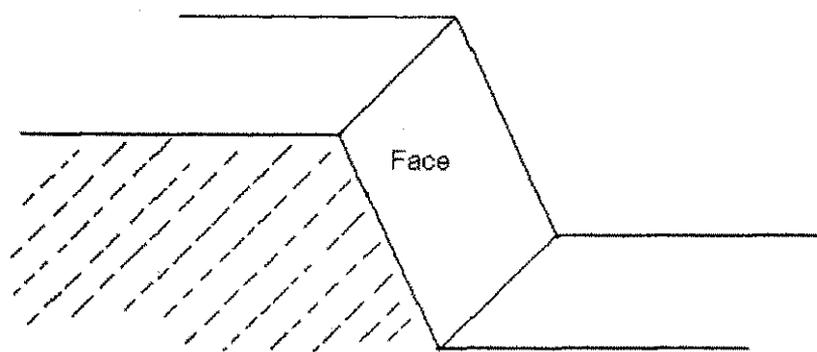


Figura (4.6)

2- A estrutura de fraqueza sub-horizontal, é um posicionamento favorável, porém neste tipo de estrutura o uso de pre-splitting é extremamente complicado. Porque a finalidade deste tipo de desmonte escultural é cortar para evitar danos ao maciço remanescente. Como a estrutura de fraqueza é sub-horizontal existe a possibilidade dos gases penetrarem e romperem à grandes distâncias, Figura (4.7).

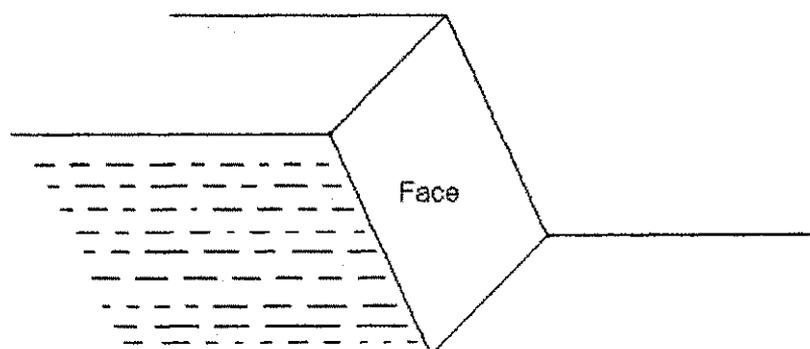


Figura (4.7)

3- As zonas de estruturas de fraqueza se encontram em uma posição sub-vertical, extremamente favorável. Pode-se utilizá-las sem problemas, desde que o ângulo de talude não ultrapassa dos  $90^\circ$ , tornando uma bancada segura, com ótima transmissão de ondas, Figura (4.8).

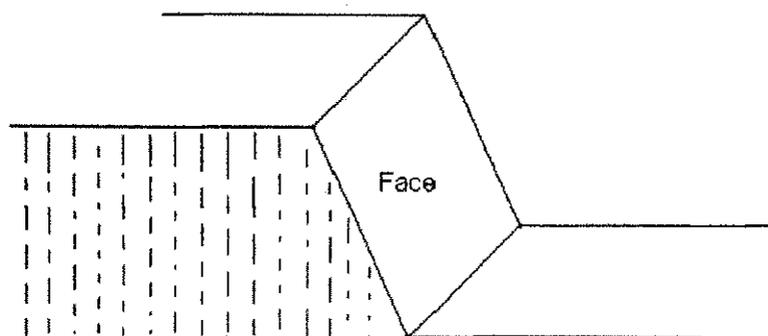


Figura (4.8)

4- Com posicionamento não muito favorável das estruturas de fraqueza, os gases tendem a penetrar nestas estruturas e não tem uma uniformização da onda na direção do espaçamento e sim, simplesmente na direção do afastamento, Figura (4.9).

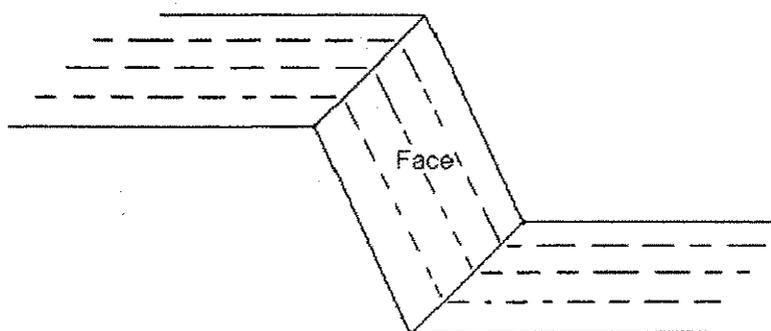


Figura (4.9)

5- Posicionamento extremamente desfavorável, porque neste caso o mergulho das estruturas, corta a face do talude. Várias vezes tem-se pedreira nesta condição, e os trabalhos não podem ser interrompidos. Então, faz-se necessário tornar a direção do ângulo de talude oblíquo a esta estrutura. Assim, com este procedimento, aumenta o fator de segurança do trabalho Figura (4.10).

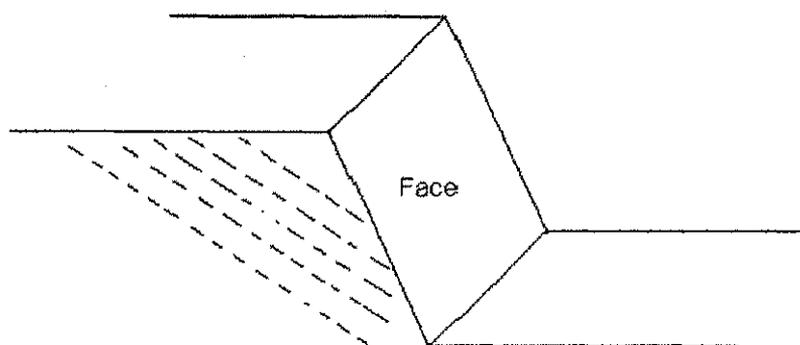


Figura (4.10)

#### **4.7 INFLUÊNCIA DAS CARACTERÍSTICAS GEOMECÂNICAS DA ROCHA E DO MACIÇO ROCHOSO NOS DESMONTES**

Os maciços rochosos são um conjunto de blocos monolíticos de rochas, separadas por imperfeições geológicas e a produção de um volume de rocha bem fragmentado e gerenciado exige grande conhecimento das características do corpo a ser explorado.

LANG (1972) e SAMPAIO (1973) classifica as rochas de forma a atender aos desmontes em quatro características de resistências à compressão. Os parâmetros de plasticidade e elasticidade é de grande importância no processo de propagação e assimilação de ondas elásticas e, conseqüentemente nas ondas de choque; por isto é dada atenção especiais a eles, Tabela (4.1).

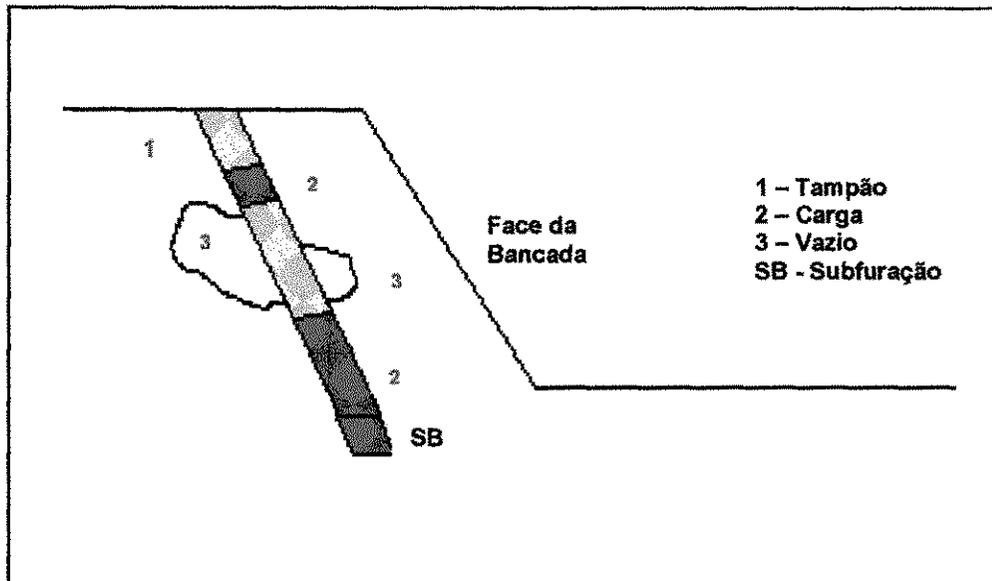
FOURMAINTRAUX (1983) relata a importância que deve ser dada às imperfeições dos maciços rochosos, pois essas constituem planos de desvios e reflexões importantes das ondas de choque, como também atuam como pontos de fraqueza sobre os quais irá agir a ação semi-estática dos gases de detonação.

a) Classificação quanto à resistência.	
Classificação	Resistência Qu (psi)
Muito dura	maior que 25.000
Duras	entre 10.000 e 24.000
Moles	entre 5.000 e 10.000
Muito moles	menor que 5.000
b) Classificação da plasticidade das rochas	
Rochas Elásticas não apresentam deformação permanente a cargas dinâmicas.	
Rochas plásticas permanecem mais que 25% da deformação total a qualquer Nível de tensão e irreversível	

Tabela 4.1 a) Classificação de resistência  
b) Classificação da plasticidade.  
LANG (1972).

### Porosidade efetiva intermediária

Os vazios gerados pelas cavidades tendem a reduzir a eficácia dos desmontes quando interceptados, levando a grandes concentrações de cargas explosivas. Como também prejudica o processo de perfuração, pelo aprisionamento da broca. É conveniente detectar tais anomalias antes de realizar a programação do fogo, como forma de prevenir sérios problemas, ANON (1978) e HAGAN (1980). Quando isso não for possível, as cavidades ainda poderão ser detectadas durante a perfuração. Neste caso, a distribuição das cargas deverá ser compatível com as anomalias geológicas, separando-se com tamponamentos eficientes acima e abaixo do vazio. Não esquecendo que na parte carregadas com cargas explosivas, deve-se adicionar cargas iniciadoras para não prejudicar a seqüência de detonação na coluna explosiva. Figura (4.11).



Figura(4.11) – Carregamento interceptado por vazios  
Rolim (1993)

### Porosidade intergranular

O mais importante efeito da porosidade intergranular no que diz respeito à ação dos explosivos é provocar a dissipação da energia na onda de deformação, além de reduzir a resistência dinâmica da rocha e, como conseqüência, aumentar a porcentagem de finos produzidos.

A grande dissipação na energia de choque em rochas porosas faz com que se usem explosivos com uma elevada taxa de energia semi-estática em relação à energia total utilizada.

É de grande importância manter as altas pressões dos gases de detonação por longos períodos de tempo, até que eles completem todo trabalho. O que se consegue fazendo uso de tampões e afastamentos com dimensões tais que impeçam uma prematura liberação desses gases, ROLIM (1993).

### Descontinuidades, microfissuras e heterogeneidades

O termo descontinuidade é aqui dado às feições geológicas como: juntas, falhas, planos de estratificação ou acamamentos, que tendem a dominar,

sobremaneira, a disposição e a extensão das fraturas produzidas pelos explosivos. Essas estruturas, quando não são consideradas, aumentam os custos por metro cúbico de rocha nos desmontes, KAUFMAN (1971) e HAGAN (1980).

LANG (1972) e SAMPAIO (1973) classifica, o maciço em função da densidade de fraturas em quatro tipos, a fim de prever o desenvolvimento das diversas direções a serem dadas à bancada no decorrer de sua evolução. As siglas usadas são elementos de guia para o mapeamento geotécnico orientado à exploração da jazida a ser desmontada, Tabela (4.2).

Sigla	Tipo de Maciço	Distância entre fraturas
M	Maciços	maior que 2,00 metros
B	Blocos	entre 0,30 e 2,00 metros
F	Fraturados	entre 0,08 e 0,30 metros
MF	Muito Fraturados	menor que 0,08 metros

Tabela 4.2 - Classificação de Fraturas  
LANG (1972).

DINIS DA GAMA (1976) classifica os maciços fraturados em cinco famílias (F1 a F5) conforme o número de fraturas por metro, Tabela (4.3). Onde o intervalo das discontinuidades é calculado em função da média das discontinuidades por banco a ser desmontado.

Classificação	Nº de fraturas por metro
F1	1 fratura
F2	de 2 a 5 fraturas
F3	de 6 a 10 fraturas
F4	de 11 a 15 fraturas
F5	mais que 16 fraturas

Tabela 4.3 – Classificação de Fraturas  
DINIS DA GAMA (1976).

Nos maciços rochosos, planos de fraqueza ou juntas normalmente se apresentam com diversas feições, ( abertas, fechadas, preenchidas ou não, etc...), apresentando diferentes características específicas de propagação da energia dinâmica. As paredes de semelhantes descontinuidades representam superfícies atenuantes da fase dinâmica da detonação. Espaçamento, orientação, persistência, abertura e material de enchimento, ao afetarem direta e sensivelmente a propagação das ondas de choque, modificam a granulometria e, portanto, interferem na geometria do fogo.

Normalmente, as feições estruturais, frequência, largura, distribuição e direção das descontinuidades são bastantes variáveis tornando-se quase que impossível executar dois ou mais furos apresentando o mesmo afastamento e grau de confinamento, tornando-se difícil o processo de perfuração contínua.

## **Juntas**

São estruturas geológicas que geralmente se apresentam nas mais variadas feições possíveis. Quando fechadas e fortemente cimentadas, fraturas induzidas pelos desmontes podem se propagar. Nas juntas abertas, as fraturas induzidas pelo fogo não se propagam, até que estejam completamente fechadas e mesmo assim, em condições especiais.

Para criação de novas fraturas em juntas abertas ou fechadas, as fraturas geradas dependem da qualidade da superfície subsequente no caminho da onda de choque. Como a taxa de energia dinâmica transmitida através dessas interfaces é geralmente muito baixa, a propagação de fraturas além da junta só é possível quando existem microfissuras no bloco subsequente e que, por sua vez, se propagam com as reduzidas taxas energéticas então transmitidas, ROLIM (1993).

Na ação mecânica das cargas explosivas ao se estender além da superfície de descontinuidade, a fragmentação do bloco é feita, na maioria das vezes, apenas por efeito de flexão e não por ação de ondas de choque, DINIS DA GAMA (1976).

Quando juntas abertas ocorrem normal à face da bancada, seccionando ou passando entre os furos, a alta pressão dos gases se direciona para a junta através da linha de fratura, resultando não só numa quebra além do contorno pretendido na escavação, onde a nova face obtida será desigual, como também numa

desuniformidade na granulometria e no lançamento do entulho, o que é, na maioria das vezes, o responsável por efeitos de " air blast " e " fly rock ", PERSSON (1970).

A melhor parede é então obtida quando a face procurada é paralela ao plano de mergulho da junta principal. Nesse caso, espaçamentos apreciavelmente maiores que o afastamento (malha alongada) podem ser usados satisfatoriamente. O mecanismo de fragmentação é a quebra por flexão, BELLAND (1966) e ASH (1973).

Corpos rochosos que apresentam como característica uma densidade de juntas (não coesa ou de baixa coesão) intensa e desordenada tendem a facilitar o desmonte, permitindo que rochas com alta resistência à ação dos explosivos apresentem comportamentos semelhantes a um material de baixa resistência. Em alguns casos, apenas a ação semi-estática dos gases é suficiente para a obtenção de uma boa fragmentação, PERSSON (1970) e SAMPAIO (1973).

A incapacidade de transmitir tensões de tração através de estruturas descontínuas faz com que, em juntas, mesmo fechadas quando de baixa coesão, não se verifique apreciável reflexão das ondas de choque, reduzindo as possíveis interações entre ondas incidentes e refletidas, ROLIM (1993).

Conclui-se que as juntas são bastantes importantes na determinação do contorno do bloco fragmentado pelo plano de fogo e as microfissuras dependendo de sua intensidade pode influenciar no processo de fragmentação se comparadas com as características físicos-mecânicas da rocha intacta

#### **4.8 ANÁLISE DO RENDIMENTO ENERGÉTICO NOS DESMONTES DE ROCHA**

Vários autores como: FOGELSON (1959), LANGEFORS (1963) e BERGAMANN (1973) pesquisaram o balanço energético dos desmontes de rocha, utilizando explosivos químicos, em casamento de impedância unitário. Seus estudos permitem fazer algumas considerações:

## **Transferência de energia do explosivo para a rocha**

A energia desenvolvida durante a detonação, é um parâmetro característico do próprio explosivo que depende dos gases e da temperatura de reação. O seu valor pode ser calculado, indicado em unidade mecânica (MJ/Kg). É indicado pelos fabricantes de explosivos. Temos, por exemplo: Gelatinas 4,5 MJ/Kg; Dinamites comuns 4,1 MJ/Kg e ANFO 3,7 MJ/Kg.

### **Fatores que influem na transferência de energia do explosivo para a rocha são:**

Impedância do explosivo e da rocha, ou seja, para o explosivo é o produto da sua densidade e a velocidade de detonação. Para rocha é o produto de sua densidade e a velocidade de propagação das ondas sísmicas

Defasagem dos diâmetros entre a carga e o furo: quando o diâmetro da carga coincide com o diâmetro do furo é máxima a pressão contra a parede do furo. Diminuindo o diâmetro da carga relativa ao furo, diminui exponencialmente a pressão.

### **Subdivisão da energia absorvida pela rocha**

O trabalho da energia efetivamente desenvolvida em uma detonação pode ser subdividido em diversos efeitos, alguns desejáveis como a fragmentação e outros indesejáveis, mas inevitáveis como: ruído, calor, vibração etc.

Modelos matemáticos e físicos permitem determinar o valor destes diversos efeitos.

### **Efeitos úteis:**

Arrancamento de um pré-determinado volume de rocha. O custo energético é muito pequeno, sendo reduzido o deslocamento necessário para abrir as fraturas

que delimitam o volume a ser desmontado, sendo o custo energético nesta fase menor que 1%.

Fragmentação da rocha é provocada, em ordem sucessiva, pelos seguintes fatores:

- 1- Frentes de impacto derivadas da reflexão da frente da onda de compressão sobre a superfície livre;
- 2- Esforços de tração induzidos pela pressão dos gases nas paredes do furo e nas fraturas (fissuras) abertas na adjacência do furo e
- 3- Colisões entre os fragmentos projetados pela detonação.

A energia absorvida na fragmentação é proporcional à formação de novas superfícies e a energia utilizada neste processo é da ordem de 15% da energia efetivamente transferida à rocha.

- 4- Deslocamento da rocha fragmentada. Este trabalho é produzido pela energia dos gases da explosão agindo contra a força de atrito entre os blocos.

A quantidade de energia usada no deslocamento da rocha fragmentada representa 5 a 6% da energia transferida à rocha.

- 5- Pulverização da rocha. A rocha ao redor do furo fica completamente pulverizada quando da detonação. Este efeito consome de 1,5 a 2% da energia disponível.

- 6- Efeitos sísmicos. Os fenômenos de vibração no maciço rochoso envolve volume muito grande de rocha e dissipa uma fração muito grande de energia, representando cerca de 40% da energia disponível na detonação.

- 7- Perdas no ar. As considerações feitas para os efeitos sísmicos valem para a energia dissipada no ar em forma de vibrações, audíveis ou não, quando os gases se expandem sem mais fragmentar ou deslocar a rocha. Inclui-se, neste caso, também o calor cedido à rocha e posteriormente dissipado no ar. As perdas na atmosfera representam 37 a 38% da energia disponível.

## Balço energético total da energia absorvida pela rocha

Energia termoquímica liberada pela detonação 100%, sendo:

- Energia cinética: 3%
- Energia potencial: 21%
- Outras formas de energia: 76%

### 1 - Energia cinética:

- arrancamento 1% (efeito útil)
- pulverização da rocha 2% (efeito indesejável mas inevitável)

### 2 - Energia potencial:

- fragmentação 15% (efeito útil)
- deslocamento 6% (efeito útil)

### 3 - Outras formas de energia:

- térmica e ruído 36% (efeito indesejável mas inevitável)
- vibrações 40% (efeito indesejável mas inevitável)

Consequentemente, entre todos os efeitos desejados, o mais importante é a fragmentação, que absorve 15% da energia disponível. Para dimensionar um plano de fogo deve-se calcular a razão de carga em função da fragmentação e da malha de perfuração.

Resumindo, a energia termoquímica desenvolvida pelo explosivo: 3% desta energia é cinética e dinâmica, 21% é energia potencial e 76% é energia deletéria (ruído e vibração), este é o maior problema. A maior quantidade de energia que o explosivo produz, estar na forma de ruído, calor, vibração etc. Destes 3%, apenas 1% é utilizado na fragmentação, 2% é utilizado em pulverização. A energia potencial dos 21%, utiliza 15% em fragmentação, (boa capacidade) e 6% é utilizado em deslocamento, a energia útil total é 24%. Entre as energias deletérias tem-se 36% de energia térmica (ruído) e 40% de vibração. Este é o grande problema do desmonte.

## 5 ESTUDO DE CASO

### 5.1 PESQUISA DE CAMPO

O levantamento da área a ser pesquisada, se deu entre os meses de agosto de 1997 a janeiro de 1998, com várias visitas a Pedra - Pedreiras Queimadas (PB), localizada às margens da BR-104, Km 61, sítio Guritiba, como mostra a Figura (5.1), visando o reconhecimento da supracitada área, das técnicas empregadas durante a fase do desmonte e outras atividades complementares, para posterior análise da eficiência do plano de fogo.

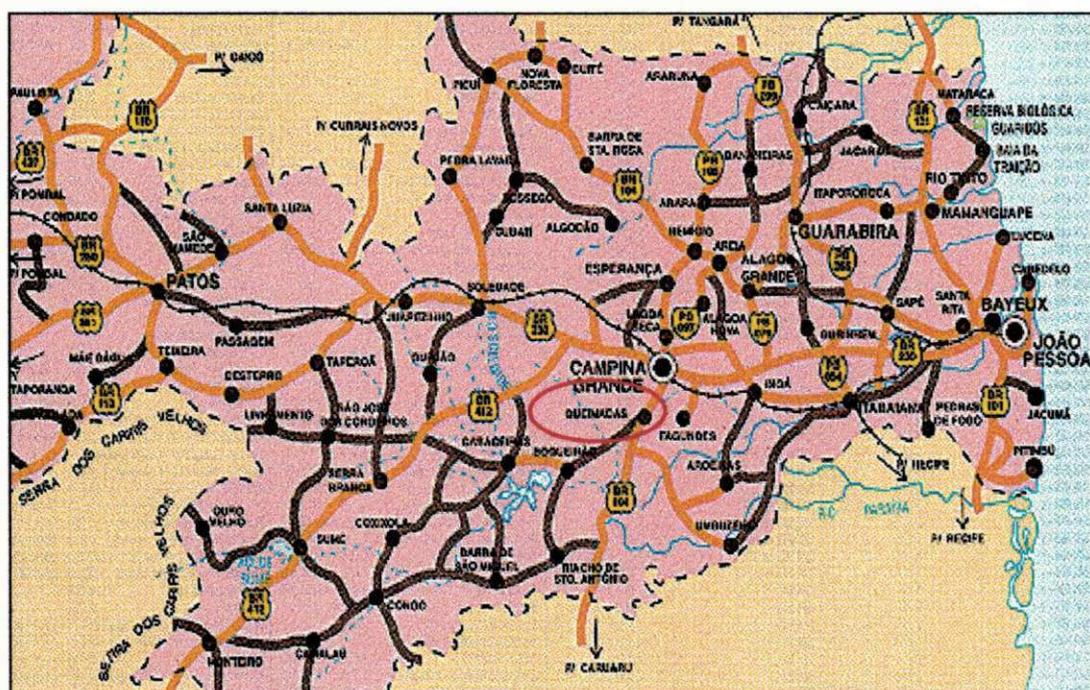


Figura (5.1) – Mapa de localização da área

Após levantamento geológico da região em escala de detalhe, foram coletadas várias amostras nas frentes de exploração, objetivando a identificação da composição mineralógica do maciço rochoso através de análise petrográfica detalhada.

Durante o levantamento, foram coletadas informações sobre as atitudes dos planos das juntas (direção e mergulho), totalizando (42) medições na bancada inferior e (26) na bancada superior. Para a coleta das informações sobre as juntas em ambas bancadas, foi definida uma linha de base com (183) metros de comprimento, dividida em (8) seções de (20) metros e (01) seção de (23) metros, traçada a partir do ponto de amarração, identificado com o auxílio do GPS (sistema de posicionamento global), cujas coordenadas geográficas 7° 20' 59" latitude Sul e 35° 54' 21" longitude Oeste de *greenwich*, ver anexo(1 e 2).

As faces das bancadas inferior e superior foram fotografadas, para posterior descrição e interpretação das diversas seções ao longo da linha de base.

Numa etapa subsequente, foram avaliados (10) fogos primários, com objetivo de estudar a fragmentação da pilha desmontada. O dimensionamento dos blocos foram feitos tomando-se como referência o diâmetro máximo do alimentador do britador primário (Britador de mandíbulas de um eixo, com abertura de 100cm x 60cm), podendo absorver teoricamente blocos com (100) centímetros de comprimento e (60) centímetros de largura, cuja capacidade de absorção prática é da ordem de (80) por cento, ou seja, absorve blocos de (80) centímetros de comprimento e (50) centímetros de largura, que pode ser britado sem provocar danos ao britador.

Após a detonação de cada fogo primário, foram realizadas medições em quaisquer bloco que em uma de suas dimensões ultrapassasse a (0,70) metros, para que posteriormente fosse determinado o percentual de blocos fora de especificação; bem como o volume de material gerado em cada fogo. Estas medições foram efetuadas com o auxílio de uma trena, medindo-se o comprimento, altura e largura dos blocos, ver Figura (5.2).



Figura (5.2) - Blocos fora de especificações

Na geração das plantas foi utilizado o método de levantamento topográfico Planialtimétrico por irradiação, utilizando-se uma estação total Elta-50 zeiss. Este equipamento consiste na união de um teodolito a um distanciômetro reunindo as condições de medidas angulares com precisão de 5 segundos e lineares com precisão de (5) milímetros mais (5) ppm, (a cada Km medido, o erro estimado é da ordem de (5) mm mais (5) mm/Km , ou seja, (10) mm/Km ).

O equipamento emite uma onda rádio com comprimento na faixa do infra vermelho. Esta onda ao ser refletida no prisma do alvo, oferece através do processamento destes elementos, na memória da estação, os valores das coordenadas dos pontos visados ( X, Y e Z ).

Instalado o instrumento no referido ponto, visou-se inicialmente o (RN 561.989), situado no ponto mais elevado da pedreira, escolhendo-se esta direção como origem para o sistema de eixo cartesianos em torno do qual foram obtidas as posições de todos os pontos levantados.

A planta plani-altimétrica gerada a partir dos pontos levantados e compilados na caderneta, constam no Anexo (3).

Os cortes topográficos gerados da planta plani-altimétrica, encontram-se nos Anexos (4 e 5).

## **5.2 TRABALHOS DE GABINETE**

Após o levantamento dos parâmetros estruturais no local da pesquisa, foi criada uma base de dados com o auxílio do software "stereonet", que permitiu a confecção de dois gráficos estereográficos ( Pólos x Planos ), correspondentes às praças de lavra inferior e superior relativamente aos níveis (506) e (532) metros, nas quais é possível observar duas famílias de juntas, como mostram os Anexos (6 e 7).

A primeira família de juntas mais expressiva possui Azimute (Az) ( $74^{\circ}$ ), para o nível inferior e ( $78^{\circ}$ ) para o nível superior. Já a família secundária perpendicular a esta, apresenta Az ( $147^{\circ}$ ), para o nível inferior e ( $158^{\circ}$ ) para o nível superior. Foram detectadas também, juntas sub-horizontais em pequenas quantidades.

Observa-se uma boa concordância das direções das juntas para ambos os níveis indicando a continuidade do maciço na direção vertical.

No nível superior da pedreira, foram coletados menos dados, devido a presença de rocha alterada na face da bancada.

### **5.2.1 METODOLOGIA PARA MEDIÇÃO EM MAPA DOS ESPAÇAMENTOS MÉDIO ENTRE JUNTAS**

O espaçamento é definido como a distância média entre juntas adjacentes em uma mesma família, medindo-se esta distância perpendicular ao plano das juntas. Termos qualitativos descritivos podem ser usados, tais como: espaçamento grande ou pequeno, espesso ou fino acamamento. Para efeitos de engenharia, estes termos

devem ser sempre definidos em forma quantitativa. O tamanho dos blocos está relacionado ao espaçamento de juntas, visto que é definido pelo espaçamento médio para todas as famílias existentes no sistema de juntas do maciço.

Intensidade de juntas é o inverso do espaçamento, sendo definido como o número de juntas por metro. Como um parâmetro alternativo ao espaçamento, a intensidade tem a desvantagem prática de implicar em números grandes e devem ser contados quando as juntas são pouco espaçadas, por exemplo 1 cm. O espaçamento equivalente pode ser estimado facilmente e diretamente, da mesma forma que o tamanho médio dos blocos. O parâmetro espaçamento também é mais fácil visualizar, e aumenta com a qualidade do maciço, FRANKLIN (1989).

A direção base para medição das juntas, é considerada como a direção perpendicular a família de juntas. As medidas foram tomadas ao longo desta direção próxima a face da bancada. Divide-se, então, as somas dos comprimentos medidos pelo número de medições, obtendo-se, assim, o valor médio do espaçamento.

Para primeira família (Az  $74^{\circ}$ ), foram utilizadas as medições das bancadas, com direções de face de ( $152^{\circ}$ ), enquanto que para a segunda família (Az  $147^{\circ}$ ), adotou-se os dados da bancada com direção ( $235^{\circ}$ ).

Observa-se que as direções das bancadas são aproximadamente normais às direções das famílias F1 e F2.

### **5.2.2 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DOS ESPAÇAMENTOS MÉDIO ENTRE AS JUNTAS**

Para família1, da bancada inferior, obteve-se um espaçamento médio de 5,20m, através de 28 medições. O espaçamento médio da família2, da bancada inferior foi de 9m, com apenas quatro dados. Tendo em vista que o setor2 é bastante reduzido como mostra Tabela (5.1). Para bancada superior, o espaçamento médio da família1, foi de 12,5m, enquanto que a família2 foi de 11,8m. conforme mostra a tabela abaixo.

Tabela (5.1) – Resultados dos Espaçamentos médio entre juntas

BANCADA INFERIOR Setor <sub>1</sub> (AZ <sub>médio</sub> 152°) família <sub>1</sub>		BANCADA INFERIOR Setor <sub>2</sub> (AZ <sub>médio</sub> 235°) família <sub>2</sub>	
Nº FRATURAS	ESPAÇAMENTO (m)	Nº FRATURAS	ESPAÇAMENTO (m)
1	1,0	1	2,0
2	1,0	2	19,0
3	11,5	3	1,0
4	0,7	4	14,0
5	0,3	TOTAL 38/4 = 9,0	
5	10,0		
7	8,0		
8	4,5		
9	0,5		
10	12,0		
11	5,0		
12	2,0		
13	5,0		
14	2,0		
15	7,0		
18	8,0		
17	1,0		
18	6,0		
19	4,5		
20	1,0	TOTAL 125,00/10 = 12,50	
21	10,0		
22	9,5		
23	15,0		
24	8,5		
25	5,0		
26	6,5		
27	0,5		
28	1,5		
TOTAL 145,50/28 = 5,20			
BANCADA SUPERIOR Setor <sub>1</sub> (AZ <sub>médio</sub> 150°) família <sub>1</sub>		BANCADA SUPERIOR Setor <sub>2</sub> (AZ <sub>médio</sub> 230°) família <sub>2</sub>	
Nº FRATURAS	ESPAÇAMENTO (m)	Nº FRATURAS	ESPAÇAMENTO (m)
1	20,0	1	11,5
2	4,0	2	12,0
3	3,0	3	12,0
4	6,0	TOTAL 35,50/3 = 11,83	
5	8,0		
6	50,0		
7	3,0		
8	6,0		
9	20,0		
10	5,0		

\*\* Os espaçamentos entre as juntas das famílias 1 e 2, foram medidas no sentido N -> S e E -> W respectivamente para as duas bancadas.

Pode-se notar que o espaçamento na bancada superior foi bem maior, isto deve a presença de uma parte do maciço na porção média do setor F1, sem a presença de juntas.

### 5.3 CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE A GEOLOGIA REGIONAL

A Geologia dessa área é representada essencialmente por rochas de idade Pré-Cambriana englobadas na unidade estratigráfica "COMPLEXO GNÁISSICO-MIGMÁTITICO", Figura (5.3), constituída por gnáisses de alto grau de metamorfismo e

por migmatitos homogêneos e heterogêneos, contendo áreas restritas de composições anfibolíticas, calcissilicáticas, lentes de calcários cristalino e corpos de rochas granitóides ou de composições básicas/ultrabásicas representadas principalmente por gabros.

Entre os corpos graníticos identificados na região de Campina Grande-Queimadas-Bodocongó e Ingá, podem ser diferenciados do ponto de vista estrutural dois grandes grupos: primeiro o GRANITÓIDE CAMPINA GRANDE, que aparece como um grande batólito com estrutura circular, nitidamente discordante das rochas encaixantes; segundo os outros corpos graníticos como o de QUEIMADAS (área pesquisada), que mostram formas alongadas e que são, via de regra, concordantes com as estruturas regionais e com as rochas encaixantes.

O GRANITÓIDE CAMPINA GRANDE é constituído essencialmente por um quartzo-sienito melanocrático, tendo cerca de 45% de microclina, 15% de plagioclásio, 16% de anfibólios, 10% de quartzo, 8% de biotita, 3% de clinopiroxênios e mais ou menos 3% de acessórios representados principalmente por apatita, zircão e minerais opacos. Sua textura varia de isotrópica à ligeiramente orientada, e a estrutura dominante é granular, inequigranular, porfírica, sendo os pórfiros constituídos principalmente de feldspatos. Como ele corta nitidamente as rochas encaixantes e apresenta contatos bruscos, trata-se, provavelmente, de uma rocha granítica intrusiva, que foi aportada numa fase tardia em relação aos principais eventos tectônicos que afetaram a geologia regional, embora tenha sofrido o efeito dos últimos esforços tectônicos, responsáveis pela leve orientação dos seus minerais.

Os GRANITÓIDES ALONGADOS dentre os quais se insere o corpo granitóide de Queimadas são petrograficamente bem diferentes do granito Campina Grande, uma vez que são ricos em quartzo, têm a composição normalmente variando entre granitos típicos e monzogranitos com o conteúdo de quartzo variando entre 20 e 30% e apresentam-se bem orientados, sendo esta orientação paralela, em linhas gerais, com a lineação das encaixantes. Por outro lado os seus contatos são, ora gradativos, ora abruptos, sendo que no caso específico do GRANITO DE QUEIMADAS esse contato é claramente abrupto.

Isso significa que esses granitóides são provavelmente anteriores, do ponto de vista estratigráfico, ao GRANITO CAMPINA GRANDE, tendo sido formados durante os primeiros estágios dos eventos tectônicos que atuaram na região.

Em relação ao GRANITÓIDE DE QUEIMADAS, seus contatos bruscos com as encaixantes, embora não conclusivos, são bastante sugestivos para uma gênese magmática, tendo a sua intrusão ocorrido numa fase singenética em relação aos principais eventos tectônicos, de modo a orientar os seus principais minerais, que apresentam lineações paralelas as foliações das rochas encaixantes e regionais.

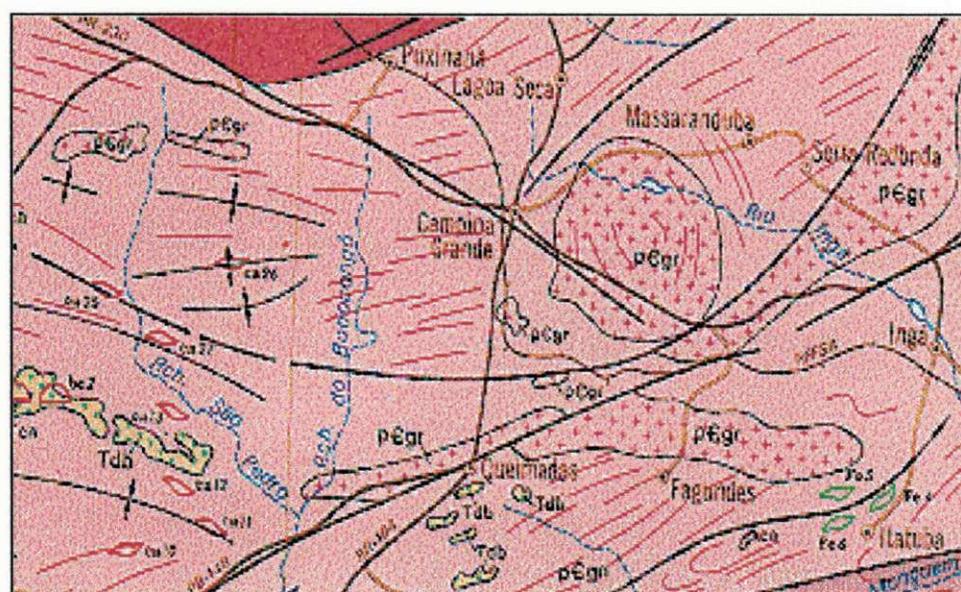


Figura (5.3) – Mapa Geológico Regional

#### 5.4 JAZIMENTO MINERAL (TECTÔNICA LOCAL)

Na zona granítica de Queimadas, os dobramentos praticamente não podem ser reconstituídos e a tectônica é raptural, documentada nos afloramentos pela textura

cataclástica do granito e pela freqüente ocorrência de pequenas falhas e fraturas nos diferentes matacões e corpos graníticos.

Por outro lado, como os matacões e afloramentos graníticos estão orientados, quase sempre, nas direções N-NW, N-S e N-NE, verifica-se nas proximidades de Queimadas uma forte orientação fotogeológica, que levou a CPRM a marcar neste local uma falha transcorrente de direção nordeste, conforme Mapa Geológico Regional Figura (5.3). É possível que esta falha exista, já que ela tem um caráter regional e também porque o granito está muito bem orientado ao longo da BR-104 nas proximidades de Queimadas. Entretanto, como não foram verificados deslocamentos nos contatos norte e sul desse granito na área estudada, ela não pode ser comprovada.

Em síntese, pode-se afirmar que a área estudada tem uma tectônica muito movimentada, predominando na faixa granítica uma tectônica ruptural representada por inúmeras falhas e fraturas de pequenas dimensões, enquanto os terrenos metamórficos têm também, fortes dobramentos.

## **5.5 ASPECTOS PETROGRÁFICOS DO MACIÇO ROCHOSO DA ÁREA EM ESTUDO**

Este maciço compreende rochas geradas no ciclo orogenético Brasileiro mas precisamente correlacionadas com granitóides G3. Trata-se de um maciço composto predominantemente por um biotita - hornblenda granodiorito médio. Este é de origem anatética como a maioria dos granitóides Brasileiros, por isso são freqüentes estruturas migmatíticas no maciço tais como *schlieren*, nebulítica, estromática etc., fornecendo uma característica textural/estrutural localmente heterogênea.

### 5.5.1 ASPECTOS PETROGRÁFICOS DAS UNIDADES BIOTITA – HORNBLENDA GRANODIORITO

Trata-se de uma rocha plutônica correlacionada a tipos G3 do ciclo orogenético Brasileiro, amplamente representada na área de estudo. A Figura (5.4) mostra a expressão geral de ocorrência das rochas plutônicas granulares pertencentes ao COMPLEXO GNÁISSICO MIGMATÍTICO. No interior da área pesquisada estas rochas se distinguem geomorfologicamente por apresentarem um relevo proeminente e pela formação de serras e serrotes que se destacam na paisagem regional, enquanto os gnaisses e migmatitos apresentam uma feição topográfica subaplainada.



Figura (5.4) – Granito de Queimadas

Estruturalmente é uma rocha que sofreu pouquíssimos efeitos do metamorfismo Brasileiro, tendo sido gerada, observada em amostra de mão, uma incipiente foliação marcada pelo alinhamento de algumas lamelas de biotitas. Em geral, a rocha evidencia uma estrutura maciça.

No tocante aos aspectos texturais este litotipo apresenta uma tonalidade esbranquiçada holocristalina, média, fanerítica, hipodiomórfica, alotriomórfica e equigranular.

Mineralogicamente é composto dos seguintes minerais essenciais: Plagioclásio, K-feldspato, quartzo, hornblenda, biotita e acessórios de apatita, zircão e epídoto.

O plagioclásio (35%), tipo oligoclásio (32% da molécula anortita), encontra-se em cristais em geral subhedrais tabulares a anedrais maciços com geminação *carlsbad* localmente, com tamanho de até 2 cm, de cor branca, com incipiente processos de saussuritização dispersos homoganeamente em toda rocha;

O quartzo (25%) ocorre em cristais anedrais, maciços, preenchendo interstícios com tamanho na escala de ordem milimétrica;

O K-feldspato (20%), tipo microclina, ocorre em cristais anedrais maciços de cor levemente rosada dispersos aleatoriamente na rocha;

Hornblenda (13%) aparece em cristais anedrais irregulares de até 2mm, dispersos homoganeamente em toda rocha sempre em associação com lamelas de biotitas.

Localmente encontra-se *microshear zonas* marcada por rochas de granulometria fina, lepidoblástica, hipidioblástica, porfiroblástica composta essencialmente de minerais lamelares tais como biotita > clorita com blastos em forma de *augen*.

Estruturalmente apresenta uma foliação, tipo xistosidade penetrativa marcada por biotita e clorita. Sua gênese pode ser devida a um enclave de biotita-gnaiss que foi obliterado por processos deformacionais e metassomáticos gerando os blastos de plagioclásio, Figura (5.5).

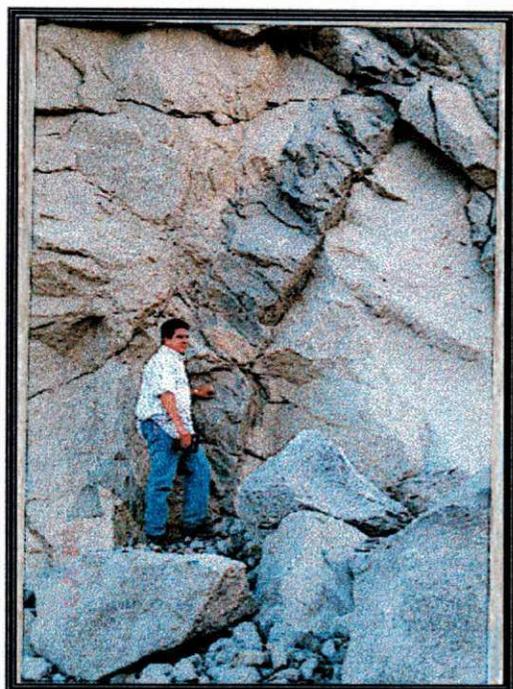


Figura (5.5) – Biotita-Hornblenda Granodiorito

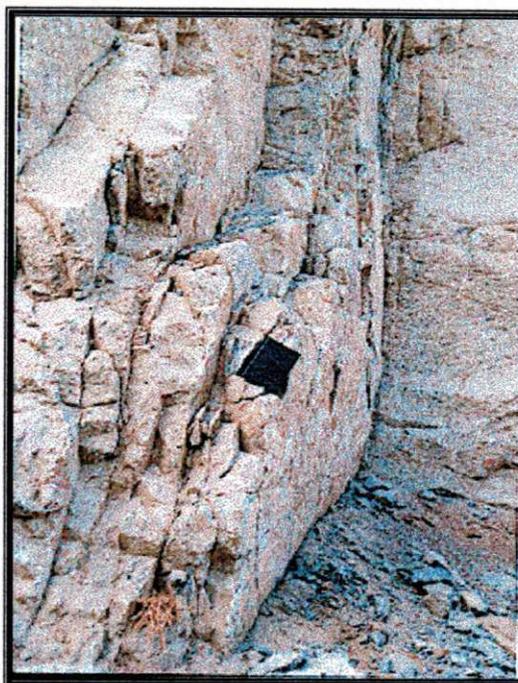


Figura (5.6) – Rocha Magmatítica com predomínio da fácies nebulítica

A Figura (5.6), trata-se de uma rocha migmatítica com predomínio da fácies nebulítica em cuja porção neossomática é marcada por uma composição granodiorítica, e os filmes negros observado são *schlierens* de biotitas, restitos da rocha protolítica, possivelmente biotita gnaisses da formação Jucurutu.

## 5.6 DESCRIÇÃO E INTERPRETAÇÃO DAS FACES DAS BANCADAS:

### INFERIOR

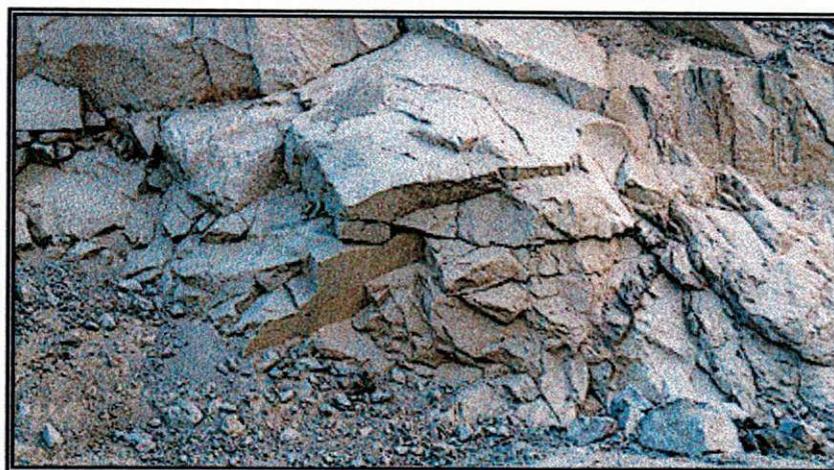


Figura (5.7) – Xenólito de Rochas Básica com Tonalidade Escura

Nesta Figura (5.7), o aspecto geral da faixa pouco espessa do xenólito de rocha básica com tonalidade escura, apresenta direção oscilando em torno de leste – oeste e destaca mergulho forte-vertical a subvertical, localmente com inclinação da ordem de  $70^{\circ}$  / N-NE. Ocorre em meio a uma zona bastante afetada pelo tectonismo rúptil expresso pelo adensamento de inúmeras juntas de mergulho fortes e subhorizontalizados em suas cercanias. O trecho de rochas básicas, de granulometria média metamorfisadas e transformadas, caracterizadas por uma tonalidade escura a cinza-esverdeada e/ou preta-esverdeada, pela predominância de minerais máficos em sua composição, apresenta espessura pouco inferior a (1) metro e são absolutamente concordantes com as foliações do Biotita-Hornblenda Granodiorito.

Localmente encontra-se microshear zones marcada por rochas de granulometria fina, lepidoblástica, hipidioblástica, porfiroblástica composta essencialmente de minerais lamelares tais como biotita > clorita com blastos em forma de augen.

Estruturalmente apresenta uma foliação, tipo xistosidade, bastante penetrativa marcada por biotita e clorita. Sua gênese pode ser devida a um enclave de biotita-gnaiss que foi obliterado por processos deformacionais e metassomáticos gerando os blastos de plagioclásio.

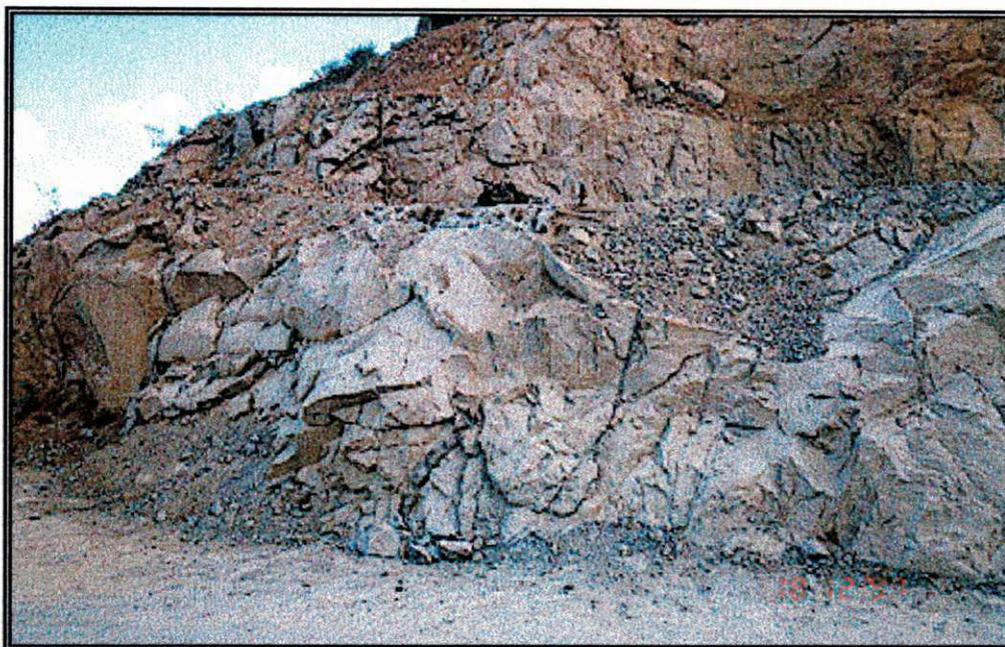


Figura (5.8) – Bancadas de Frente de Lavra da Zona Granítica de Queimadas

Aspecto geral da exposição das bancadas de frente de lavra da zona granítica de Queimadas, onde os dobramentos praticamente não podem ser reconstituídos e a tectônica dominante é raptural, evidenciada pela textura cataclástica de dominância geral e pela freqüente ocorrência de pequenas “falhas” e “fraturas” dispersas em todo o conjunto, predominante sub-verticais de direção Este-Oeste, como mostra a Figura (5.8).

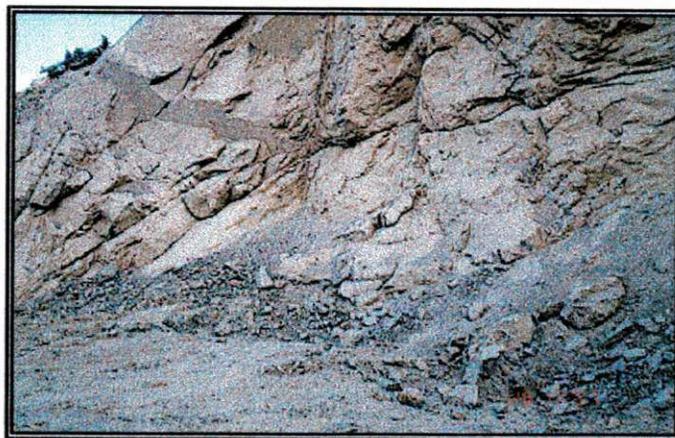


Figura (5.9) Sistema de juntas de direção E-W

Sistema de juntas de direção aproximadamente E-W (em torno de  $250^{\circ}$  AZ) sub-verticais e o sistema sub-horizontalizado expostos segundo a bancada inferior da pedra. Ver Figura (5.9)

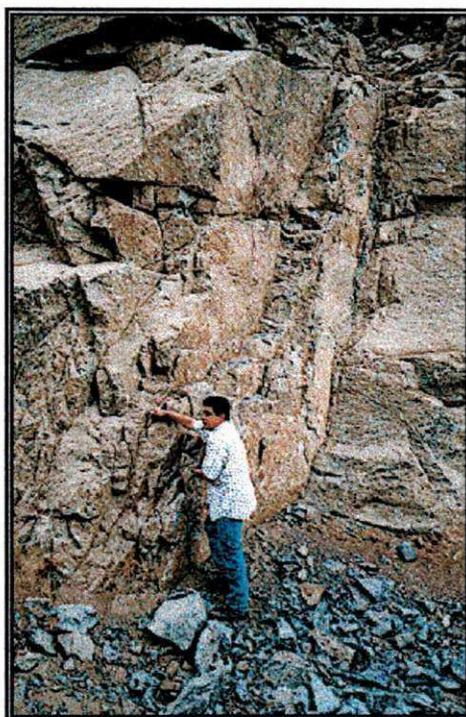


Figura (5.10) Leitões cataclásticos milonitizados, paralelo a feição do granito.

Faixas subverticalizadas de direção Este-Oeste, migmatíticas, apresentando diversos leitões bastantes cataclásticos milonitizados, paralelo a feição do “granito”. Ver Figura (5.10)

Evidencia-se, também, o nível cataclástico compartilhados por leitos decimétricos sub-paralelos e verticalizados de rocha migmatítica com predominância as fácies nebulítica em cuja porção neossomática é marcada por uma composição granodiorítica.

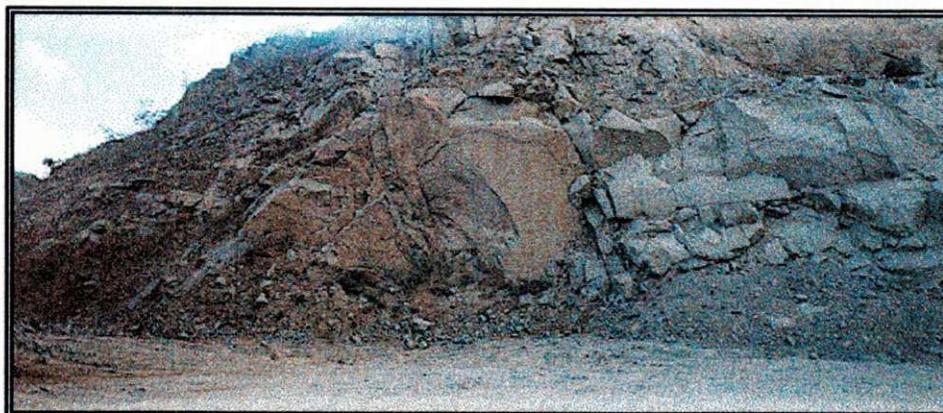


Figura (5.11) Interceccionamento de juntas na bancada inferior

A Figura (5.11) mostra a exposição da bancada inferior da pedreira em que se observa o denso interceccionamento de juntas com direções gerais E-NE / W-SW ( $240^{\circ}$  a  $260^{\circ}$  AZ) e NE ( em torno de  $320^{\circ}$  AZ) apresentando atitudes subverticalizados superiores a  $70^{\circ}$  , ora NW ora SE.

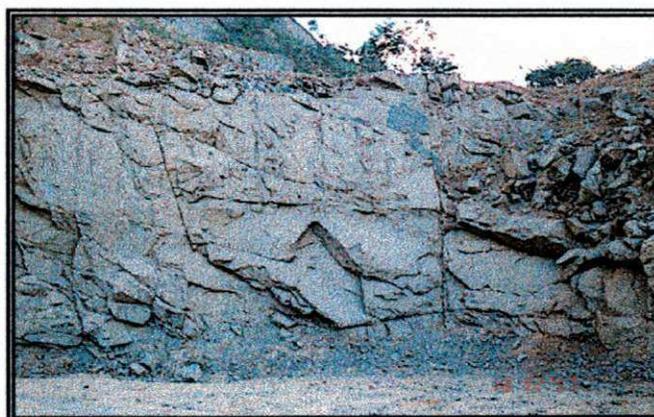


Figura (5.12) Sistema de juntas subverticalizadas subhorizontais

Apresenta zona marcada por um espaçamento menos denso entre os sistemas de juntas de direção N-S e E-NE / W-SW (aproximadamente  $75^{\circ}$  AZ) subverticalizadas e subhorizontais com suave inclinação SW. Ver Figura (5.12)

## SUPERIOR



Figura (5.13) Milonitos e ultramilonitos dobrados e retorcidos.

A Figura (5.13) mostra que no interior dos migmatitos são encontrados leitos centimétricos de milonitos e de ultramilonitos dobrados e retorcidos em cujos planos subverticalizados observam-se “*Sriken sides*” que evidenciam deslocamentos “dextrais”, contidos em zonas marcadas por uma tectônica bastante movimentada e que foi fortemente influenciada pelos efeitos resultantes do cisalhamento do lineamento paraíba.

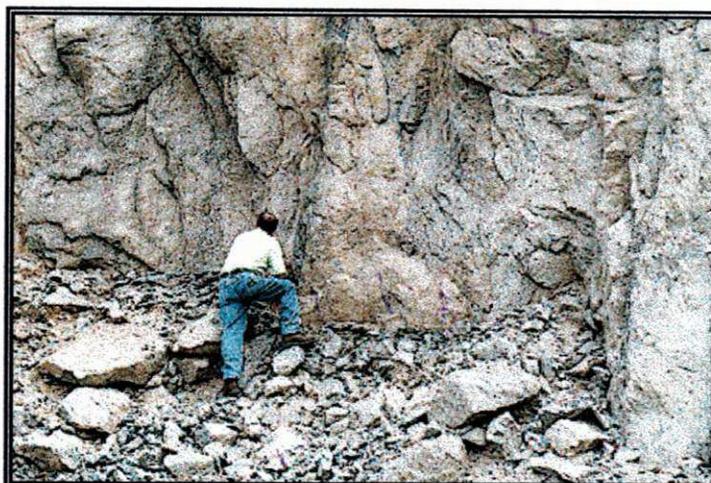


Figura (5.14) Faixa mineralógica concordante com as foliações dos migmatitos.

A Figura (5.14) apresenta uma estreita faixa centimétrica, subvertical de direção E- W, com tonalidade escura, concordante com as foliações dos migmatitos.

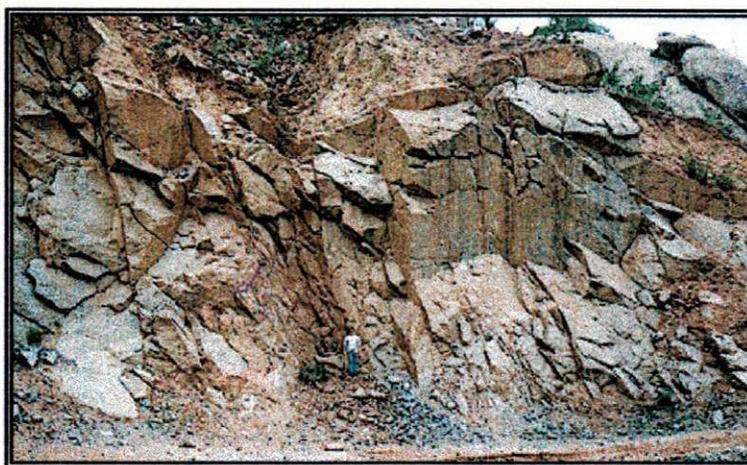


Figura (5.15) Orientação gnaissóide de granulação média.

Faixas marcadas por exposição de rochas predominantemente composta por migmatitos e por rochas gnaissicas megascópicas mais comuns ofalmiticas, possuindo ainda uma orientação gnaissóide, de granulação média e sua composição nas partes mais escuras de feldspato, quartzo e máficos, enquanto os leitos mais esbranquiçados mostram quase que exclusivamente minerais felsícos. Ver Figura (5.15)

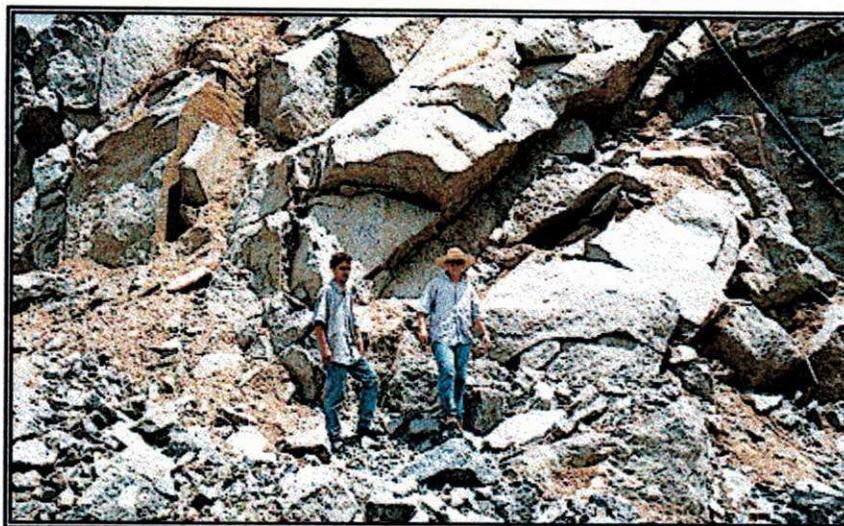


Figura (5.16) Atitudes subverticalizadas

A Figura (5.16) apresenta sistema de fraturamento de direção N-NW ( em torno de  $340^{\circ}$  AZ) aproximadamente N-S, destaca-se com atitude subvertical.



Figura (5.17) Face da bancada extremamente fraturada

Face da bancada extremamente fraturada, com direção NE-SW (aproximadamente  $45^{\circ}$  AZ). Altura de bancada muito alta, dificultando o processo de lavra. Ver Figura (5.17)



Figura (5.18) Juntas semi-paralelas tangenciais a foliação

A Figura (5.18) mostra zona não mapeável considerado como faixa gnaíssica, onde ocorrem tanto gnaisses variadamente migmatizados e que estão freqüentemente associados com os migmatíticos. Tratam-se de rochas que em geral se apresentam sem orientação, com leitos alongados de coloração esbranquiçada, alternados com finas faixas de cor preta. Sua granulação varia entre média a grossa, sempre constituídos por feldspatos, quartzo e anfibólio, além de micas. Verificam-se sistema de juntas semi-paralelas tangenciais a foliação da massa migmatítica- granítica subverticalizada a direção N / NW-S / SW que se alongam conforme o talude da praça inferior da lavra.

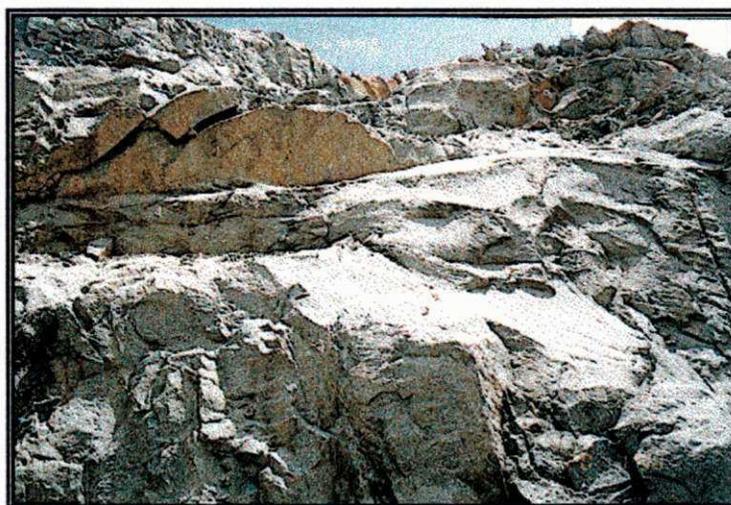


Figura (5.19) Rocha tectonicamente deformada e exibem microdobras

Na Figura (5.19) evidencia-se expressão comum do “ granitoíde de Queimadas” no âmbito da Pedreira Pedraq, associado ao complexo Gnáissico-Migmatítico apresentando características texturais e mineralógicas comuns, marcada por uma rocha de granulação grosseira, com textura Cataclástica dominante, leucocrática, bem orientada, formada por fenocristais róseos ou brancos de feldspatos circundantes por fim leitões de quartzo e de materiais máficos. No conjunto esse litotipo apresenta-se tectonicamente deformado e exibem microdobras e microfraturas uma vez que esse corpo plutônico se posiciona na faixa a influência da zona de cisalhamento ao lineamento Paraíba.



Figura (5.20) Juntas de direção geral N-S

Figura (5.20), mostra juntas de direção geral N–S subverticalizadas e o sistema de fraturamento horizontal a subhorizontal com inclinação máxima de  $25^{\circ}$  SW expostas na bancada superior da pedreira.

## 5.7 ASPECTOS GERAIS DA LAVRA

O método de lavra condiciona os custos e a escala de produção da pedreira. Todo o planejamento e a coordenação necessária aos trabalhos da lavra são conseguidos devido ao plano de lavra ou plano de aproveitamento econômico da lavra,

obedecendo as seguintes tarefas: Planejamento, dimensionamento e execução dos trabalhos. Para isso, é necessário um entendimento nas relações entre essas tarefas e a harmonia dos equipamentos dimensionados para tal. Com a finalidade de obter a granulometria e pilha de material ideal.

O método de lavra adotado na área em estudo, é a céu aberto com bancadas em flancos, sendo que a maioria dos elementos que fazem parte do plano de fogo são modificados a cada fogo conforme Anexos (8 a 17).

A determinação da escolha do local ideal no maciço rochoso para exploração é determinado de acordo com a disponibilidade de acesso para o equipamento de perfuração executar um maior número de furos possíveis, sem obstruir o acesso a novas frentes de ataque. Além deste fator, é considerado a toponímia local.

A pedreira dispõe de um rock- 301, sobre esteira, com diâmetro de broca de 3" e comprimento da haste de 3m. Teoricamente possui capacidade de perfurar 15m, que é alimentado por dois compressores: um BT4 com capacidade de 566 ft<sup>3</sup>/minuto acionado por motor elétrico de 100HP e outro BT5 com capacidade de 212 ft<sup>3</sup>/minuto acionado por motor elétrico de 60HP.

Os trabalhos de limpeza constituem na remoção do material desmontado abaixo de 0,70m pela pá carregadeira caterpillar 966, com capacidade de 2,32m<sup>3</sup>, duas carregadeiras michigam uma modelo 152 com capacidade de 2,00m<sup>3</sup> e outra modelo 55 com capacidade de 1,60m<sup>3</sup> e dois caminhões de um eixo, com capacidade de 6m<sup>3</sup>, movido a óleo diesel.

Os blocos fora de especificações gerado após a detonação, são colocados em um determinado local na praça de lavra para futuros fogos secundários.

A metodologia aplicada na lavra da referida pedreira é realizada de forma aleatória. Observa-se a falta de controle estrutural do jazimento. A lavra deveria ser orientada pelo fator morfológico do maciço rochoso, para facilitar a determinação da altura ideal dos bancos, com relação aos equipamentos disponíveis, conseguindo, assim, uma maior recuperação do material desmontado, uma vez que esses fatores, dentre outros, são condicionantes para atingir uma grande escala de produção com granulometria ideal.

### 5.7.1 CLASSIFICAÇÃO DO MACIÇO

O maciço foi classificado através do sistema RMR ("The Rock mass Rating"), Bieniawski (1989):

1- Parâmetro de resistência,  $\sigma$  168Mpa

Índice 12

2- RQD, recuperação média 80%

Índice 17

3- Espaçamento das juntas 5 metros em média

Índice 20

4- Condições das juntas, mediamente rugosas

Índice 25

5- Condições de água, completamente seco

Índice 15

Índice cumulativo 89, classe 1 , maciço muito competente.

### 5.8 ANÁLISES E INTERPRETAÇÕES DOS DESMONTES PRIMÁRIOS

Foram monitorados dez fogos primários durante o período da pesquisa, no qual se terá uma visão geral dos resultados dos desmontes, relativo aos tamanhos dos blocos produzidos em cada fogo, Tabela (5.2).

Tabela (5.2) – Tabela geral dos desmontes primários

EXPLOSIVOS		Total de Carga	Volume "In situ" m <sup>3</sup>	Volume Empolado m <sup>3</sup>	Volume Empolado > 0,70 m	(%) do Volume de Rocha > 0,70 m	FOGOS
C. fundo	C. Coluna		1860,48	2976,76	834,54	28,04	10
Piroforte 2 <sup>1/4</sup> x 24"	Powermix-MG						
150 Kg	544 Kg	694 Kg					
C. fundo	C. Coluna		1827,84	2924,54	1561,83	53,40	4
Powergel 1 x 16"	Powermix-MG						
10 Kg	720 Kg	730 Kg					
C. fundo	C. Coluna		1610,00	2576,00	1488,59	57,79	6
Mag-gel 2 <sup>1/4</sup> x 24"	Magnum LM						
100 Kg	440 Kg	540 Kg					
C. fundo	C. Coluna		1844,52	2951,23	1724,69	58,44	1
Magnum Lm	Magnum Hd						
425 Kg	425	850 Kg					
C. fundo	C. Coluna		1472,00	2355,20	1419,72	60,28	5
Powergel 2 <sup>1/4</sup> x 24"	Powermix-MG						
100 Kg	500 Kg	600 Kg					
C. fundo	C. Coluna		1780,41	2848,66	1759,04	61,75	2
Mag-gel 1" x 16"	Powermix-MG						
20 Kg	893 Kg	913 Kg					
C. fundo	C. Coluna		2240,41	3584,00	2498,08	69,70	3
Mag-gel 1" x 16"	Powermix-MG						
12 kg	859 Kg	871					
C. fundo	C. Coluna		806,00	1289,60	906,08	70,26	8
Powergel 2 <sup>1/4</sup> x 24"	Powermix-MG						
50 Kg	223 Kg	273 Kg					
C. fundo	C. Coluna		2258,43	3613,50	2538,89	70,30	9
Powergel 2 <sup>1/4</sup> x 24"	Powermix-MG						
150 Kg	411 Kg	561 Kg					
C. fundo	C. Coluna		1799,21	2878,74	2024,30	70,32	7
Powergel 2 <sup>1/4</sup> x 24"	Powermix-MG						
100 Kg	418 Kg	518 Kg					

### 5.8.1 ANÁLISE GLOBAL DO DESMONTE

Para uma análise mais detalhada dos fogos, foi necessário transformar toda carga explosiva em energia. A metodologia adotada foi:

- Considera-se a energia absoluta em kcal/kg (impressa no catálogo do fabricante), multiplica-se pela quantidade de explosivo do fogo, obtendo-se a quantidade em

kcal em cada fogo. A seguir, faz-se a divisão desta energia pelo volume de rocha "in situ", obtendo-se a quantidade de energia dinâmica em kcal/m<sup>3</sup> por fogo, Tabela (5.3).

Tabela (5.3) – Quantidade de energia dinâmica por fogo

Fogos	Energia absoluta Kcal	Volume de Rocha In situ /m <sup>3</sup>	Total de Energia Kcal/m <sup>3</sup>
Fogo10	620.132,00	1860,48	333,32
Fogo4	639.980,00	1827,84	350,13
Fogo6	503.700,00	1610,00	312,86
Fogo1	771.375,00	1844,52	418,20
Fogo5	517.200,00	1472,00	351,36
Fogo2	803.054,00	1780,41	451,05
Fogo3	759.902,00	2240,00	339,24
Fogo8	234.894,00	806,00	291,43
Fogo9	478.158,00	2258,43	211,72
Fogo7	445.204,00	1799,21	247,00

- Conquanto, para transformar a quantidade de explosivo em volume gasoso, deve-se considerar o volume gasoso em litros/kg de um determinado explosivo (impresso no catálogo do fabricante), multiplicar pela quantidade de explosivos de cada fogo e obtém-se a quantidade, em litros, de explosivos em cada fogo. Este valor em litros é dividido pelo volume de rocha "in situ", obtendo-se a quantidade de energia semi-estática em litros/m<sup>3</sup> por fogo, Tabela (5.4).

Tabela ( 5.4) – Quantidade de Energia semi-estática por fogo

Fogos	Volume gasoso litros	Volume de rocha In situ /m <sup>3</sup>	Total de energia litros/m <sup>3</sup>
Fogo10	667.740,00	1860,48	358,91
Fogo4	700.300,00	1827,84	383,13
Fogo6	616.200,00	1610,00	382,73
Fogo4	700.300,00	1827,84	383,13
Fogo5	571.000,00	1472,00	387,91
Fogo2	876.680,00	1780,41	492,40
Fogo3	830.460,00	2240,00	370,74
Fogo8	259.580,00	806,00	322,06
Fogo9	531.060,00	2258,43	235,15
Fogo7	492.280,00	1799,21	273,61

Dividindo-se a quantidade de energia dinâmica pela energia semi-estática de cada fogo, obtém-se os resultados expressos na Tabela (5.5).

Tabela ( 5.5) – Resultados energéticos Dinâmicas/semi-estática dos fogos

Fogos	Energia Dinâmica Kcal/m <sup>3</sup>	Energia Semi-estática Litros/ m <sup>3</sup>	Energia Dinâmica/semi- estática	% do volume de rocha >0,70m
10	333	358	0,93	28,04
4	350	383	0,91	53,40
6	312	382	0,82	57,79
1	418	495	0,84	58,44
5	351	387	0,91	60,28
2	451	492	0,92	61,75
3	339	370	0,92	69,70
8	291	322	0,90	70,26
9	211	235	0,90	70,30
7	247	273	0,90	70,32

O somatório da energia dinâmica com a semi-estática, obtém-se a energia total dos fogos que estão resumidas na tabela (5.6).

Tabela( 5.6) - Resultados totais energéticos por fogo

Fogos	Total de Energia	% do volume de rocha . 0,70m
10	691	28,04
4	733	53,40
6	694	57,79
1	913	58,44
5	738	60,28
2	943	61,75
3	709	69,70
8	613	70,26
9	446	70,30
7	520	70,32

### 5.8.2 CONSIDERAÇÕES ENERGÉTICAS

No primeiro, segundo e terceiro fogo a energia dinâmica e a energia semi-estática utilizada, resultou que a zona sísmica do maciço rochoso foi bastante reduzida, proporcionando taxa de perda da pressão gasosa muito elevada. Evitando desta forma o requebramento pela ação semi-estática dos gases.

No quarto, quinto e sexto fogo, entre os desmontes monitorados, obteve-se um percentual de blocos fora especificação relativamente baixo, isto implica que a energia

dinâmica utilizada está adequada e a melhoria da fragmentação resulta da fragmentação natural do maciço rochoso.

No sétimo, oitavo e nono fogo, a energia dinâmica empregada foi bastante reduzida, não produzindo força suficiente para realizar a fragmentação necessária, gerando grandes percentuais de blocos fora de especificações.

No décimo fogo, foi empregada energia dinâmica e energia semi-estática adequada, proporcionando ótima fragmentação e bom lançamento. Podendo-se tomar como padrão para fogos futuros.

### 5.8.3 SUGESTÕES

Ao analisar os fatores geradores dos grandes percentuais da alta granulometria do material, sugere-se:

- Executar plano de fogo, considerando as fraturas como sendo pontos da face livre, o que resulta no desmonte com malhas e cargas diferenciadas. Utilizando razão energética de carga dinâmica, tem-se como exemplo, a Figura (5.21), que para as feições A e C, deverá ser usado um índice energético dinâmico mais elevado do que na feição B. A razão para este fato reside em que na feição B entre fraturas, a compartimentação natural do maciço absorve grandes quantidades de energia dinâmica, não executando portanto, o trabalho desejado empregado para este tipo de energia. Já o nível de energia semi-estática desenvolvido pelo explosivo terá maior aproveitamento propagando-se entre as micro fissuras pré existentes na feição B. Para as feições A e C onde o maciço apresenta baixos índices de fraturas pré existentes, se faz necessário a ação dinâmica dos explosivos mais efetiva (teoria de Griffith), onde a energia necessária para propagação de uma fratura é menor que a energia necessária para formá-la. Este fato leva a que, a ação dos gases de detonação seja mais efetivo quando as fraturas estão formadas pela fase dinâmica do processo de detonação (Ver capítulo 4).

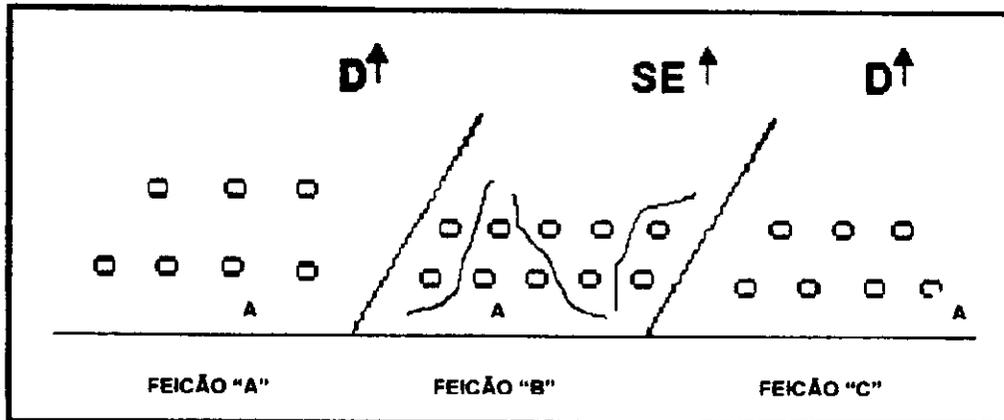


Figura (5.21) - Desmontes diferenciados

- Nos pontos em que os furos sejam interceptados por fraturas preencher com deking tamponado para evitar fulga de energia semi-estática nestes pontos.
- Inicializar com carga pontual (na interface da carga de fundo/coluna ), com booster mais energético e escalonar cargas entre o explosivo semi-estático.
- Propor altura de bancada com no máximo 10 metros, ou seguir a estrutura morfológica do maciço rochoso.
- Utilizar relação energética dinâmica/semi-estática adequada para a rocha em questão.
- Como proposta de planejamento verifica-se no campo, que o acesso para as partes mais elevadas da pedreira está comprometido, pois as bancadas estão estranguladas e para conseguir este acesso, deve-se inverter o quadro atual, ou seja, detonar os afloramentos virgem existentes, com a finalidade de realizar o aterro, diminuindo o percentual que está em torno de 40% na parte mais íngreme para 12% (corte e aterro), tomando os devidos cuidados para não obstruir o acesso

da bancada subsequente. Como exemplo pode-se citar que se a altura da rampa está em torno de 20 metros, é necessário considerar um acomodamento natural em torno de 1/1.5 (projeção Vertical/Horizontal), que resulta em 30 metros, pois ao contrário a rampa projetada não terá grandes estabilidades e podem ocorrer acidentes futuros. E se não houver condições de efetuar esta saia do talude, será obrigado a aumentar a área de detonação dos afloramentos naturais.

O desmonte destes afloramentos serão primários e secundários, aproveitando o próprio material como aterro facilitando o projeto da nova rampa.

## 5.9 DISCUSSÃO ENÉRGICAS

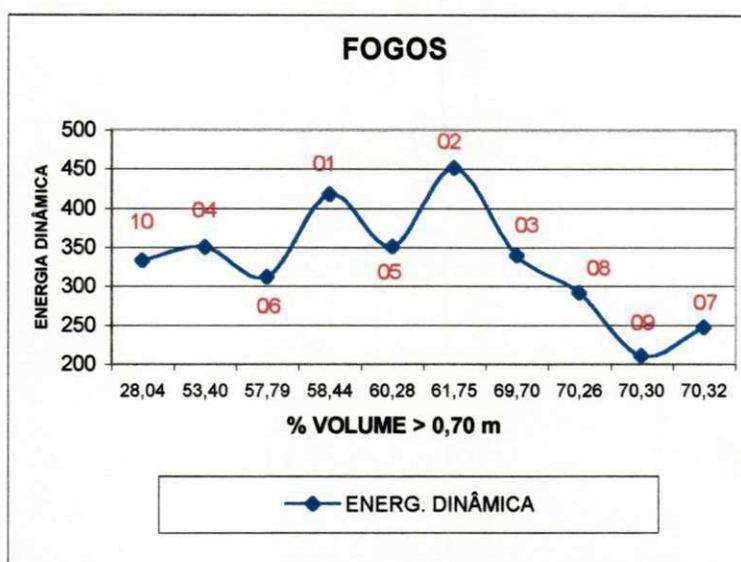


Figura (5.22) – Gráfico energia dinâmica X % volume > 0,70 m

Analisando-se a Figura (5.22), decorrente da Tabela (5.3), observa-se no eixo das abcissas que a menor percentagem em volume de blocos maiores que 0,70 m é obtido com energia dinâmica em torno de 300 a 350 Kcal/m<sup>3</sup>. Verifica-se, também, que

para níveis energéticos dinâmicos maiores que  $350 \text{ Kcal/m}^3$  (Fogos 01 e 02) e menores que este valor  $300 \text{ Kcal/m}^3$ , geram grandes blocos  $> 0,70 \text{ m}$ .

A razão para tal fato, existe porquê para os níveis mais altos, a zona sísmica fica bastante reduzida, liberando a pressão gasosa em curto intervalo de tempo, o que reduz o trabalho por este produzido. Já para valores energéticos menores que  $300 \text{ Kcal/m}^3$  a zona dinamicamente fraturada fica muito reduzida, conseqüentemente a ação dos gases não são suficientes para realizar boa propagação das fraturas e produção de novas feições de fraturas; isto resulta, também na formação de grandes blocos.

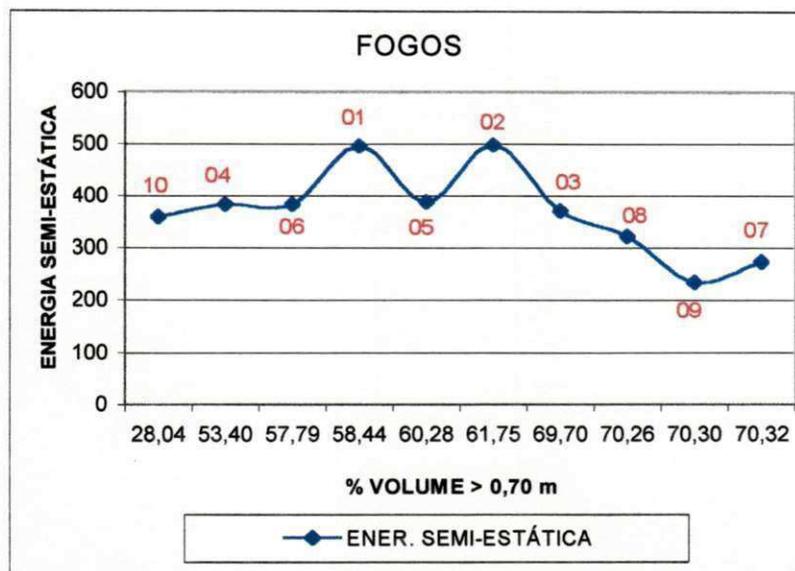


Figura (5.23) – Gráfico energia semi-estática X % volume  $> 0,70 \text{ m}$

Conforme Tabela (5.4), a Figura (5.23), destaca a ação dos gases sobre feições da fragmentação do maciço rochoso. Fica demonstrado para os fogos 10, 04 e 06 o grande efeito da ação dinâmica da detonação, favorecendo a ação dos gases na fase semi-estática de detonação. Para os fogos 01,05,02,03,08, 09 e 07, resulta a mesma explicação já fornecida no item da Figura (5.22).

Os fogos (05 e 03) tratam-se de uma anomalia de detonação, pois apesar de está com níveis energéticos compatíveis com a rocha em seu estado intacto, foi gerado grandes percentagens de blocos > 0,70 m. A explicação para tal fato, é que o maciço neste local está próximo a zonas já fraturadas (blocos de partição natural), ocasionando grande absorção dinâmica e baixa ação dos gases. Sugere-se neste caso, utilizar uma melhor redistribuição da malha de perfuração.

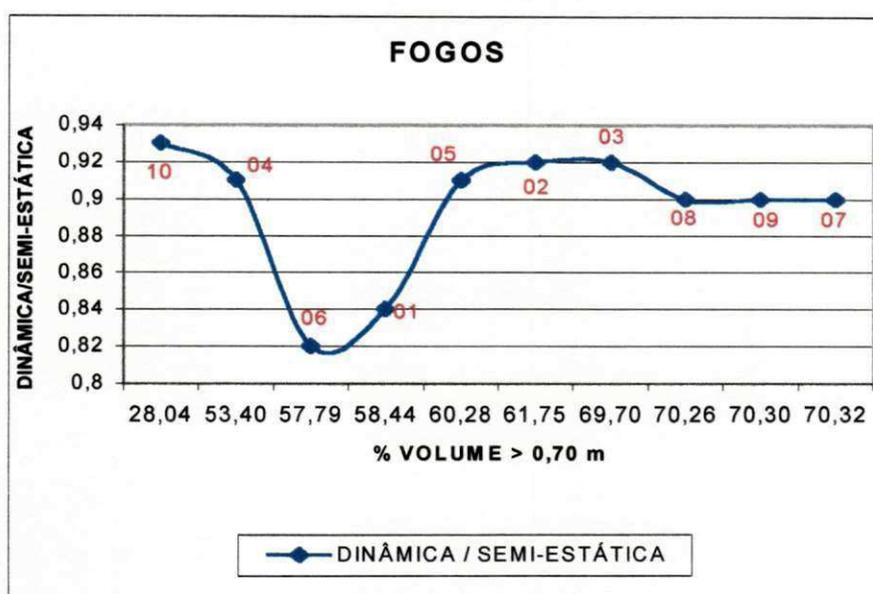


Figura (5.24) – Gráfico Energia dinâmica/semi-estática X % volume > 0,70 m

Na Figura (5.24), gerada da Tabela (5.5), verifica-se pelos fogos 01 e 02, já realizada pré análise nas Figuras (5.22) e ( 5.23), que a relação energética dinâmica/semi-estática (Kcal/litro), gira em torno de 0,92 para conseguir realizar o máximo rendimento energético. Sugere-se após análise direta das Figuras (5.22) e (5.23), que seguindo as relações destas figuras, o valor da relação energética dinâmica/semi-estática na parte não fraturada "in situ", o valor entre 0,92 e 0,94 seja ideal para ser utilizado.

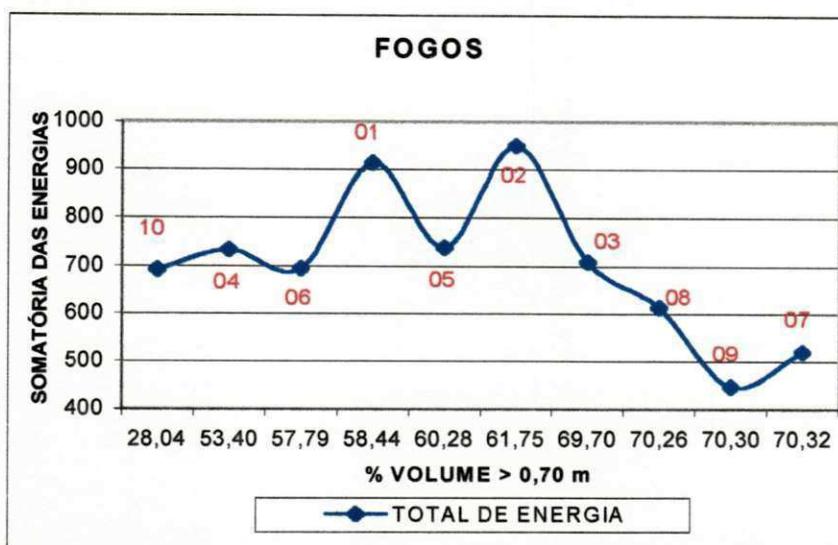


Figura (5.25) – Gráfico da energia total X % volume > 0,70 m

Na Figura (5.25), decorrente da Tabela (5.6), encontram-se analisados a ação energética total (Kcal/Kg + Litro de gás/Kg). Observa-se como na Figura (5.22), que os valores ideais para a rocha pesquisada, encontra-se em torno de 700 para o fogo 03, que ainda situa-se nesta faixa a razão de formação de grandes blocos, resultando assim, como no fogo 05, a ação da zona intensamente fraturada.

## CONCLUSÕES GERAIS

Para as análises da ação dos explosivos sobre o maciço rochoso da área pesquisada em parte não fraturada e considerando-se a mesma malha de perfuração ou distribuição energética. Conclui-se que, os explosivos ideais são aqueles que em seu conjunto (carga de fundo + carga de coluna), apresentam: energia dinâmica em Kcal/Kg em torno de 300; volume gasoso aproximadamente de 358 litros/ Kg; relação energética de 0,94, para uma energia total de 700, utilizando-se explosivo com velocidade de detonação de 3000 m/Seg. e densidade em torno de 1.2.

No que refere-se a resistência à água, deve-se verificar a presença desta no furo, quando utilizar explosivo granulado. Para iniciação sugere-se de acordo com FOURMAINTRAUX (1983), que esta seja feita com o sistema nonel (iniciação pontual) ou utilizando cordel NP<sub>5</sub> com NP<sub>10</sub> envolvendo a carga de booster.

## **5.10 SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS**

Como a pesquisa em questão foi baseado na parte da pedreira não ou pouco particionada, sugere-se que as próximas pesquisas sejam cobertas de maiores informações de desmontes, incluindo-se as feições fraturadas, assim como, estudo de melhoria da malha de forma a proporcionar um melhor e mais econômico modelo de desmonte na Pedraç – Pedreira Queimadas. Assim como, poder propor a partir deste, um modelo computacional para uso comercial em outras pedreiras, onde seja incluída com maior rigor os parâmetros físicos/mecânicos e particional do maciço, compatibilizando-os com o plano de fogo (geometria de desmonte e explosivo).

**REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- ABAMS, W. W., Wrenn, V. E. & Hurton, L. S. U. S Government Tech. Paper 635, (1943), U.S. Bureau of Mines and Mineral Market Report. M.M.S. pp 16-56, 1787, 1908 e 1950.
- ANON. Hi. Fi. Probe in Bore Rales Spots Voids. Cool Age, pp 121. March, 1978.
- ASH, R.L., The Influence of Geological Discontinuities on Rock Blasting. PHD Dissertation, University of Minnesota Minneapolis, 1973.
- ASH, R.L. & Smith N. S. Changing Bore Hole Lenght to in Prove Breakage, In Proc. Second Conf. Explosives and Blasting Tecniques Society of Explosives Engineers Louis Ville. 1976.
- ASSEHTON, R. History of Explosives 2nd Ed. Institute of Makers of Explosives. New York. 1940.
- BARTOLOME. F. A. Los Explosives Y sus aplicaciones. Tomo 1. Fluxo Unidimensional Plano. Madrid pp 566. 1972.
- BELLAND, J. M. Struture as a Control in Rock Fragmentation can min Metall bull, Montreal, Vol 59, pp 323. March.1966.
- BERGMANN, O. R. , RIGGLE, J. W. & WU, F. C. , Model Rock Effect of Explosives, Properties and Other Variables na Blasting Results, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Vol 10. , N° 6, pp 585- 612; Press Britain, 1973.

- BIENIAWSKI, Z. T. Engineering Rock Mass Classifications, Wiley, New York, pp 251, 1989.
- CARPENTER, S. H. , Wiltman, R. H. & Ottos H. E., Explosion., Walding Research at the University of Denver Pergamon Press, Oxford and New York. 1971.
- CHURCH, H. K. Escavation hand book, cap 11., Mc. Graw Hill. Pp irreg. 1981.
- CINTRA, B. H. Desmonte Escultural. pp 59-64, 1986.
- CLARK, G. B. Principles of Rock Fragmentation New York, Wiley. Pp 334-578, 1982.
- COATES, D. F. Fundamentos de Mecânica das Rocas., Madrid, Cap 8 pp 369-454, 1973.
- COOK, M. A. The Science of Hight Explosives, Reirhold Publishing Corp, Robert e Hrieger inc Huntington. New York pp 440, 1958 e 1971.
- DINIS DA GAMA, C. Otimização do Arranque de Rochas com Explosivos. Luanda pp 1-120, 1971.
- DINIS DA GAMA, C. Influência da Compartimentação de Maciço Rochosos na Fragmentação dos Desmontes com Explosivos. In I Cong. Bras. De Geol. De Eng. Vol II pp 245-257, 1976.
- DURVAL, G. E. & FOWLES, G. R. Shock Waver in Hitgh Pressures Physics and Chemistry., Im Bradley R. S. Ed. New York. Ed. Academic V. 2 pp 209-291, 1963.

- FRANKLIN, J. A. ; and DUSSEAULT, M. B. Rock Engineering McGraw-Hill, New York, pp 62-64, 1989.
- FOGELSON, D. E. ; Duval, W. I. & Atchinson, T. C. Strain Energy in Explosion Generated Strain Pulsos. U. S. Bureau of Mines Report of Investigations 5514, 1959.
- FOUMAINTRAUX, D.; SIFRE, Y.; & BEDAUX, R. Terrassement du Rocher: Le Sautage à l'explosif (french) Ver. Gen. Routes V. 57 N° 593, pp 24-50, 1983.
- GUILHERME, C. & Ricardo, H. S. Manual Prático de Escavações; Ed Mc Graw Hiel, São Paulo Brasil, 1989.
- HAGAN, T. N. The Control of Fines Through Blast Design. Austral. Inst. Min. Met. Proc. N° 217, pp 09-20, 1979.
- HAGAN, T. N. The Effects of Some Structural Properties of Rocks on the Design and Results of Blasting. In. Proc. Third. Austral. N. Z. Conf. Geomech. Wellington. N. Z. Vol. 2, pp 205-213, 1980.
- HEMPHILL, G. B. Blasting Operations, Mc. Graw Hill, New York. Pp 258, 1981.
- HERRMANN, C. Manual de Perfuração de Rocha, Ed. Poligono, São Paulo, pp 416, 1972.
- HOEK E. & BRAY, J. Rock Slope Engineering Ed. London IMM. Cap. 11 pp 271-307, 1977.
- IBID. Buffer Blasting Techniques in Open Pit Mines, Society of Explosives Engineers; Annual Meeting; St. Louis, Missouri pp 74, 73,75 e 77, 1979.

ICI Explosives. Curso Interno de Explosivos e Suas Aplicações, pp 56-59, 1997.

ITO, I. & SASSA, K. On The Detonation Pressure Produced at The Inner Surface of a Charge Hole, International Symposium on Mining Research Pergamon New York. 1962.

JONES, D. E. Metal Reponse Under Explosives Loading. Sandia Laboratories., Albuquerque., New Mexico. 1968.

KAUFMAN, I. A. Simulation of the Structure of a Rock Mass For Investigating the Effect of na Explosion With the aid of Models From Equivalent Materials. Sov Min Sci, pp462, July August. 1971.

LANG, L. C. & FAVREAU, R. F. A Moder Approachto Open – Pit Blast Design and Analysis C.I.M. Bulletin June, 1972.

LANGEFORS, U. Voladura de Rocas Bilbao Urmo pp 425, 1963.

MARVIN, G. Blasting Design Criteria. Civil Engineering (ASCE), pp 54-55, January, 1964.

MENDES, F. M. Mecânica das Rochas., Lisboa: Instituto Técnico Superior pp 541, 1967.

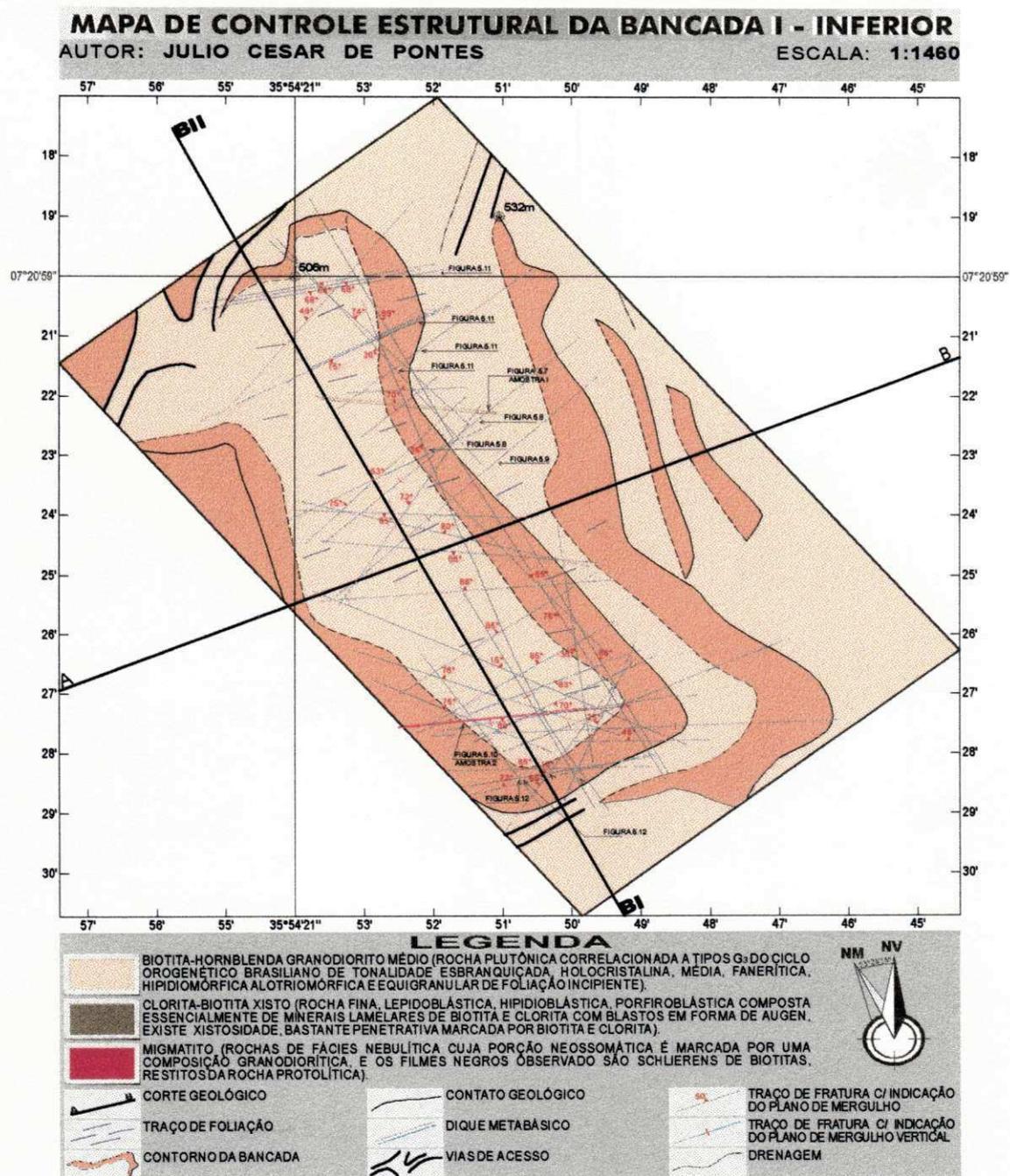
NIEBLE, C. M. A Segurança Nos Desmontes Com Explosivos. São paulo-SP, pp 04, 1974.

PAYMAN. Test for Permissibility and Suitability. Washington, Title 30 – Mineral Resouces, 1981.

- PERSSON, P. A. ; JOHNNSSON, C. H. Detonics of High Explosives Academic Press., New York, pp330, 1970.
- PERSSON, P. A. ; LUNDBORG, N. & JOHANSSON, C. H. The Basic Mechanisms in Rock Blasting, In Proc. 2<sup>nd</sup> Congr. Int. Soc. Rock Mech., Belgrade, Theme 5, n<sup>o</sup> 3. Pp 24, 1970.
- PERROT. Higt Explosives and Propellants. 1 Ed. Oxford, Pergmon Press, Cap. 7. Pp81-91, 1978.
- QUEEN, R. G. et all. The Equation of State of Solids From Shock Waves Studies, in High Velocity Impact Phehomena, R. Kinslon., Ed. Academic Press., New York, 1970.
- RENEHART, J. S. Dynamuc Frature Strengths of Rocks. In Symposium on Rock Mechanics, Pennsylvania State University, (Clororado School of Mines: Colorado and American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers: New York, 1965.
- ROLIM, F<sup>o</sup>. J. L. . Considerações Sobre Desmontes de Rochas Com Ênfase aos Basaltos Feição Entablamento, pp 17; 54; 57; 64; 76; 102 e 109. Escola de Engenharia de São Carlos SP.1993.
- RUNE, G. Blasting Technique., Dynamite Nobel., Wien, pp 325, 1981.
- SAMPAIO, O. A. L. Desmonte de minério de Ferro da Cia Vale do Rio Doce, Geologia E Metarlurgia , n<sup>o</sup> 33, São Paulo-SP, pp II.1 –II. 65, 1973.

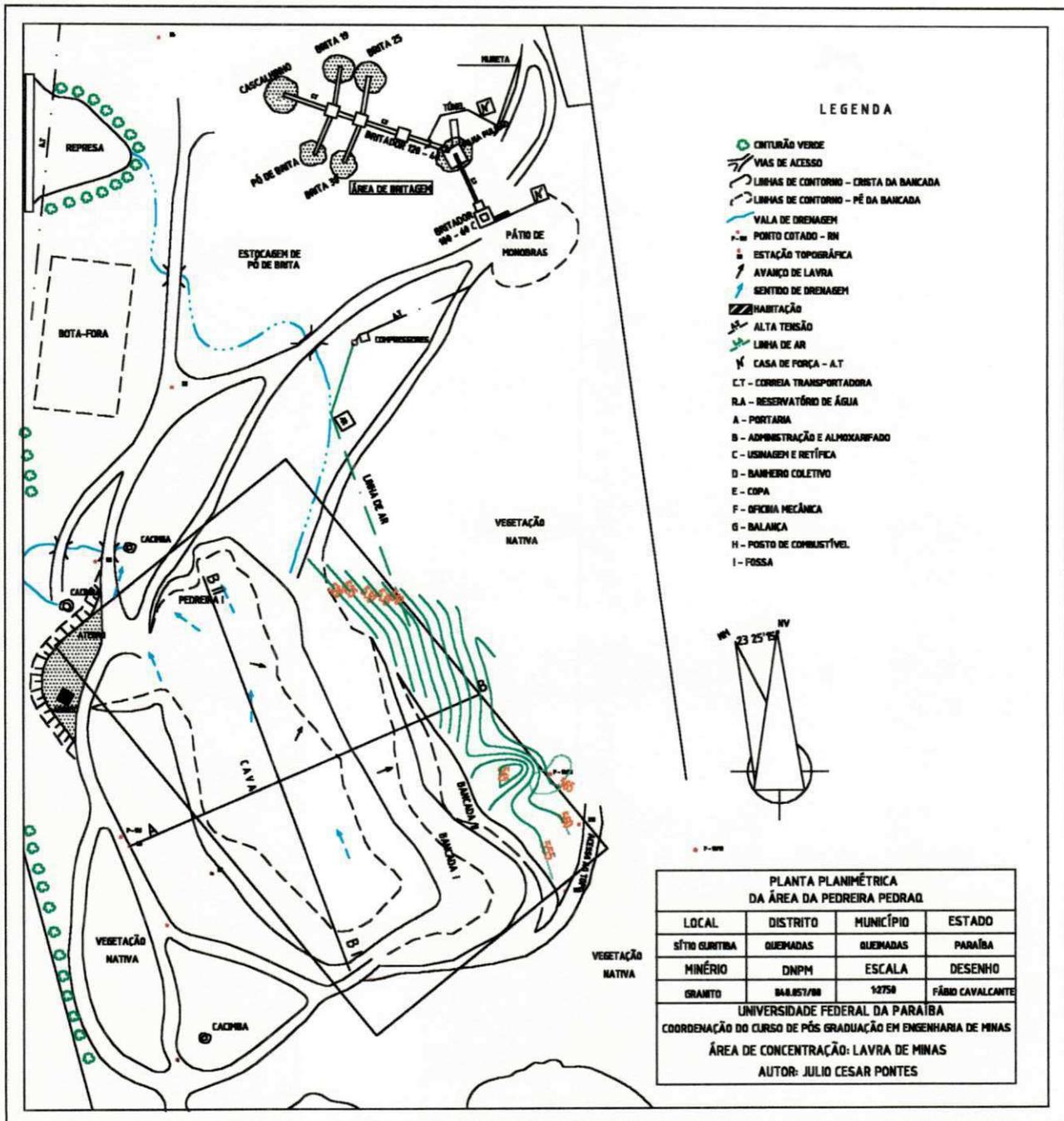
# **ANEXOS**

## ANEXO 01 – MAPA DE CONTROLE ESTRUTURAL DA BANCADA INFERIOR

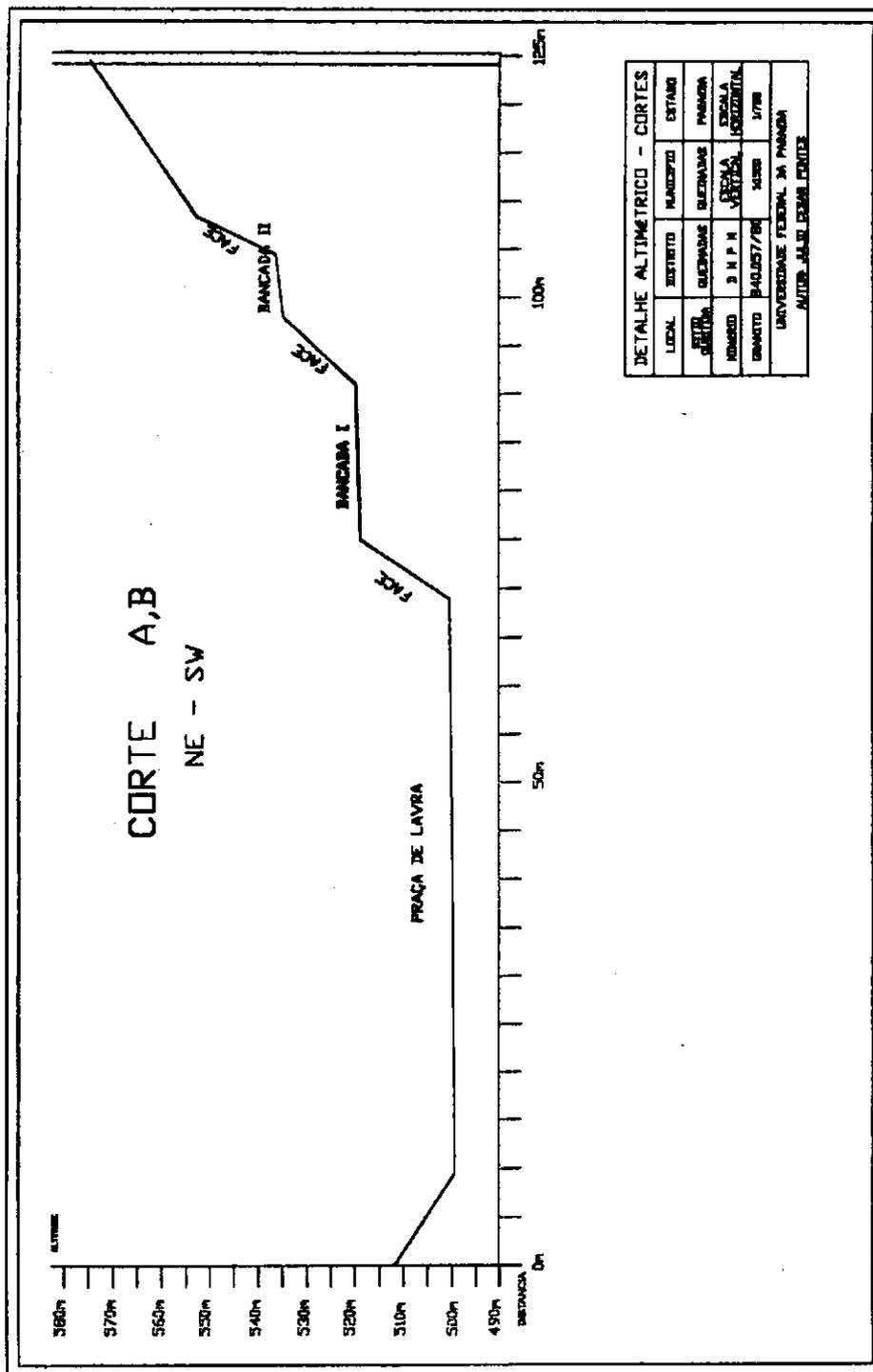




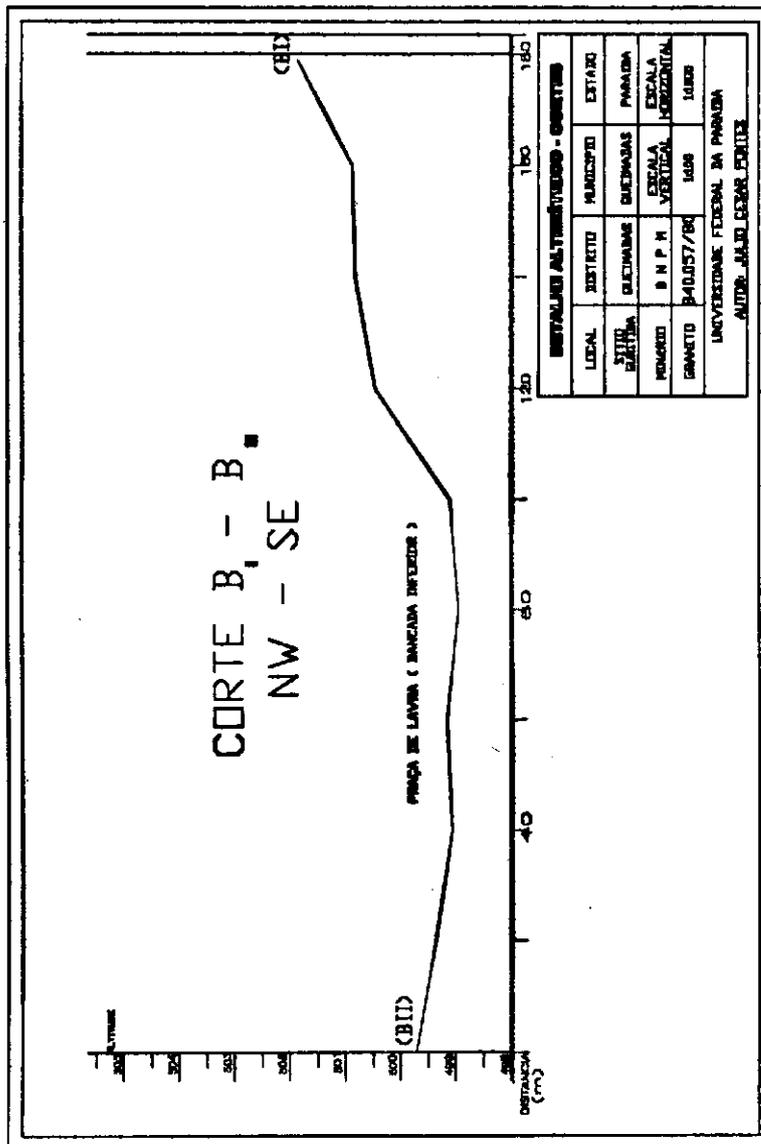
# ANEXO – 03 PLANTA PLANI-ALTIMÉTRICA



ANEXO 04 – CORTE TOPOGRÁFICO A – B

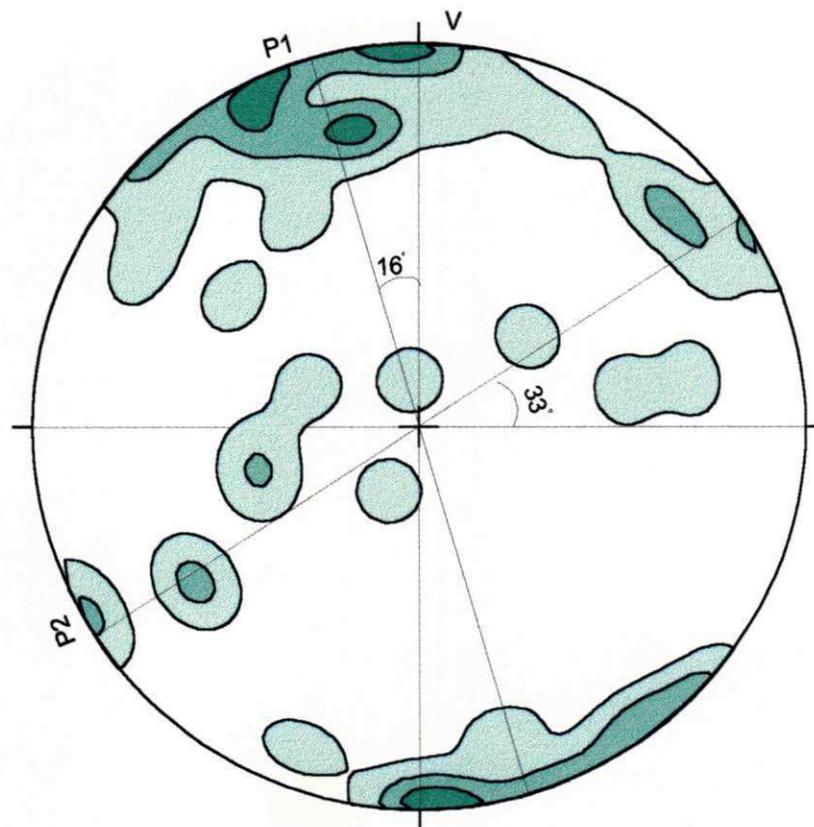


ANEXO 05 – CORTE TOPOGRÁFICO B<sub>I</sub> - B<sub>II</sub>



## ANEXO 06 – PROJEÇÕES HEMISFÉRICAS DOS PÓLOS DAS JUNTAS CONTIDAS NA BANCADA INFERIOR

### PROJEÇÃO HEMISFÉRICA DOS POLOS DAS JUNTAS DA BANCADA INFERIOR



#### Família 1

\* Azimute dos polos =  $344^{\circ}$

\* Azimute dos vetores de mergulho =  $74^{\circ}$

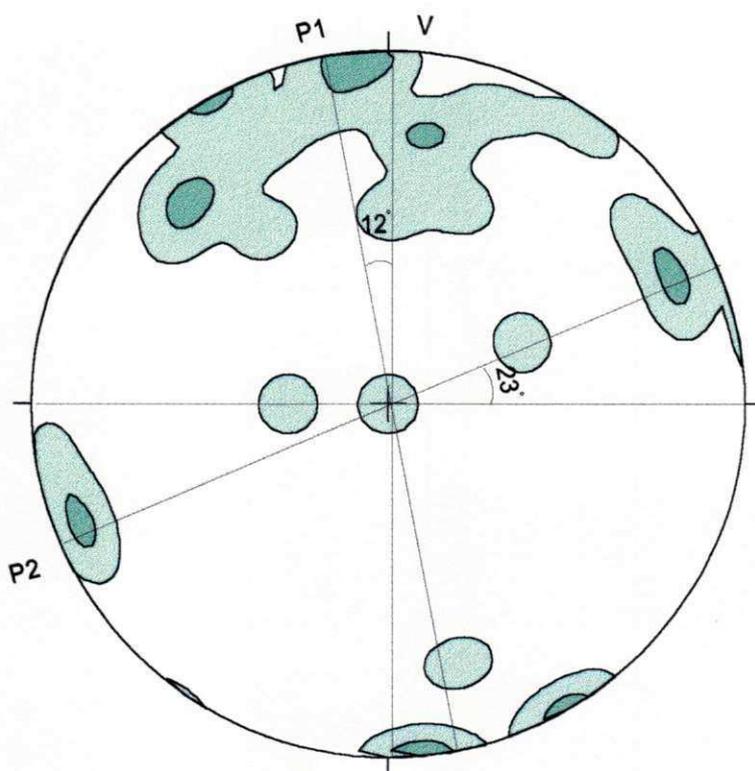
#### Família 2

\* Azimute dos polos =  $57^{\circ}$

\* Azimute dos vetores de mergulho =  $147^{\circ}$

## ANEXO 07 – PROJEÇÕES HEMISFÉRICAS DOS PÓLOS DAS JUNTAS CONTIDAS NA BANCADA SUPERIOR

### PROJEÇÃO HEMISFÉRICA DOS POLOS DAS JUNTAS DA BANCADA SUPERIOR



#### Família 1

\* Azimute dos polos =  $348^\circ$

\* Azimute dos vetores de mergulho =  $78^\circ$

#### Família 2

\* Azimute dos polos =  $61^\circ$

\* Azimute dos vetores de mergulho =  $158^\circ$

## ANEXOS 08 À 17 – RELATÓRIO DE FOGO PRIMÁRIO

### RELATÓRIO DE FOGO - ANEXO 08

FOGO - 01			
AFASTAMENTO (m):	1,80	SUB. FURAÇÃO (m):	0,80
ESPAÇAMENTO (m):	3,20	INCLINAÇÃO DOS FUROS:	15°
ALTURA DE BANCADA (m):	11,36	EMPOLAMENTO:	1,6
Nº DE FUROS (unidade):	31	TAMPÃO (m):	2,00
PROFUNDIDADE DOS FUROS (m):	10,33	Ø DOS FUROS:	3"

CARGA DE COLUNA:	EXPLOSIVOS UTILIZADOS		TOTAL (kg)
	Kg	CARGA DE FUNDO: Kg	
Magnum LM	425	Magnum HD 425	850
			0
			0
			0

VOLUME DE ROCHA IN SITU (m³):	1.884,52
VOLUME DE ROCHA EMPOLADO:	2.951,23
RAZÃO DE CARREGAMENTO (g/m3):	288

### RELATÓRIO DE FOGO - ANEXO - 09

FOGO - 02			
AFASTAMENTO (m):	1,8	SUB. FURAÇÃO (m):	0,8
ESPAÇAMENTO (m):	3,2	INCLINAÇÃO DOS FUROS:	15°
ALTURA DE BANCADA (m):	14,05	EMPOLAMENTO:	1,6
Nº DE FUROS (unidade):	22	TAMPÃO (m):	1,5
PROFUNDIDADE DOS FUROS (m):	14,05	Ø DOS FUROS:	3"

CARGA DE COLUNA:	EXPLOSIVOS UTILIZADOS		TOTAL:
	Kg	CARGA DE FUNDO: Kg	
Powermix	893	Mag Gel 1" x 16" 20	913
			0
			0
			0

VOLUME DE ROCHA IN SITU (m³):	1.780,41
VOLUME DE ROCHA EMPOLADO:	2.848,66
RAZÃO DE CARREGAMENTO (g/m3):	320

## RELATÓRIO DE FOGO - ANEXO 10

FOGO - 03			
AFASTAMENTO (m):	4,00	SUB. FURAÇÃO (m):	-----
ESPAÇAMENTO (m):	2,00	INCLINAÇÃO DOS FUROS:	25°
ALTURA DE BANCADA (m):	20,00	EMPOLAMENTO:	1,6
Nº DE FUROS (unidade):	14	TAMPÃO (m):	2,00
PROFUNDIDADE DOS FUROS (m):	20,00	Ø DOS FUROS:	3"

EXPLOSIVOS UTILIZADOS				
CARGA DE COLUNA:	Kg	CARGA DE FUNDO:	Kg	TOTAL (kg)
Powermix	859	Mag Gel 1" x 16"	6	865
				0
				0
				0

VOLUME DE ROCHA IN SITU (m³): 2.240,00  
 VOLUME DE ROCHA EMPOLADO: 3.584,00  
 RAZÃO DE CARREGAMENTO (g/m³): 243

## RELATÓRIO DE FOGO - ANEXO - 11

FOGO - 04			
AFASTAMENTO (m):	4,00	SUB. FURAÇÃO (m):	0,8
ESPAÇAMENTO (m):	2,00	INCLINAÇÃO DOS FUROS:	25°
ALTURA DE BANCADA (m):	19,04	EMPOLAMENTO:	1,6
Nº DE FUROS (unidade):	12	TAMPÃO (m):	1
PROFUNDIDADE DOS FUROS (m):	19,04	Ø DOS FUROS:	3"

EXPLOSIVOS UTILIZADOS				
CARGA DE COLUNA:	Kg	CARGA DE FUNDO:	Kg	TOTAL:
Powermix	720	Powegel 1" x 16"	10	730
				0
				0
				0

VOLUME DE ROCHA IN SITU (m³): 1.827,84  
 VOLUME DE ROCHA EMPOLADO: 2.924,54  
 RAZÃO DE CARREGAMENTO (g/m³): 250

## RELATÓRIO DE FOGO - ANEXO 12

## FOGO - 05

AFASTAMENTO (m):	4,00	SUB. FURAÇÃO (m):	0,80
ESPAÇAMENTO (m):	2,00	INCLINAÇÃO DOS FUROS:	20°
ALTURA DE BANCADA (m):	23,00	EMPOLAMENTO:	1,6
Nº DE FUROS (unidade):	8	TAMPÃO (m):	1,20
PROFUNDIDADE DOS FUROS (m):	23,00	Ø DOS FUROS:	3"

CARGA DE COLUNA:		EXPLOSIVOS UTILIZADOS		TOTAL (kg)
	Kg	CARGA DE FUNDO:	Kg	
Powermix	500	Powergel 800 2 <sup>1/4</sup> x 24"	100	600
				0
				0
				0

VOLUME DE ROCHA IN SITU (m<sup>3</sup>): 1.472,00  
 VOLUME DE ROCHA EMPOLADO: 2.355,20  
 RAZÃO DE CARREGAMENTO (g/m<sup>3</sup>): 255

## RELATÓRIO DE FOGO - ANEXO - 13

## FOGO - 06

AFASTAMENTO (m):	4,00	SUB. FURAÇÃO (m):	0,8
ESPAÇAMENTO (m):	2,50	INCLINAÇÃO DOS FUROS:	20°
ALTURA DE BANCADA (m):	23,00	EMPOLAMENTO:	1,6
Nº DE FUROS (unidade):	7	TAMPÃO (m):	1,5
PROFUNDIDADE DOS FUROS (m):	23,00	Ø DOS FUROS:	3"

CARGA DE COLUNA:		EXPLOSIVOS UTILIZADOS		TOTAL:
	Kg	CARGA DE FUNDO:	Kg	
Magnum LM	440	Mag Gel200 2 <sup>1/4</sup> x 24"	100	540
				0
				0
				0

VOLUME DE ROCHA IN SITU (m<sup>3</sup>): 1.610  
 VOLUME DE ROCHA EMPOLADO: 2.576  
 RAZÃO DE CARREGAMENTO (g/m<sup>3</sup>): 207

## RELATÓRIO DE FOGO - ANEXO 14

## FOGO - 07

AFASTAMENTO (m):	4,50	SUB. FURAÇÃO (m):	0,80
ESPAÇAMENTO (m):	2,50	INCLINAÇÃO DOS FUROS:	20°
ALTURA DE BANCADA (m):	17,77	EMPOLAMENTO:	1,6
Nº DE FUROS (unidade):	9	TAMPÃO (m):	2,00
PROFUNDIDADE DOS FUROS (m):	17,77	Ø DOS FUROS:	3"

CARGA DE COLUNA:		EXPLOSIVOS UTILIZADOS		TOTAL (kg)
	Kg	CARGA DE FUNDO:	Kg	
Powermix	418	Powergel 800 2 <sup>1/4</sup> x 24"	100	518
				0
				0
				0

VOLUME DE ROCHA IN SITU (m³):	1.799,21
VOLUME DE ROCHA EMPOLADO:	2.878,74
RAZÃO DE CARREGAMENTO (g/m³):	180

## RELATÓRIO DE FOGO - ANEXO - 15

## FOGO - 08

AFASTAMENTO (m):	4,00	SUB. FURAÇÃO (m):	0,8
ESPAÇAMENTO (m):	2,50	INCLINAÇÃO DOS FUROS:	20°
ALTURA DE BANCADA (m):	16,12	EMPOLAMENTO:	1,6
Nº DE FUROS (unidade):	5	TAMPÃO (m):	1,5
PROFUNDIDADE DOS FUROS (m):	16,12	Ø DOS FUROS:	3"

CARGA DE COLUNA:		EXPLOSIVOS UTILIZADOS		TOTAL:
	Kg	CARGA DE FUNDO:	Kg	
Powermix	223	Powergel 800 2 <sup>1/4</sup> x 24"	50	273
				0
				0
				0

VOLUME DE ROCHA IN SITU (m³):	806
VOLUME DE ROCHA EMPOLADO:	1.290
RAZÃO DE CARREGAMENTO (g/m³):	212

## RELATÓRIO DE FOGO - ANEXO 16

FOGO - 09			
AFASTAMENTO (m):	4,50	SUB. FURAÇÃO (m):	0,80
ESPAÇAMENTO (m):	2,50	INCLINAÇÃO DOS FUROS:	20°
ALTURA DE BANCADA (m):	18,25	EMPOLAMENTO:	1,6
N° DE FUROS (unidade):	11	TAMPÃO (m):	1,50
PROFUNDIDADE DOS FUROS (m):	18,25	Ø DOS FUROS:	3"

EXPLOSIVOS UTILIZADOS				
CARGA DE COLUNA:	Kg	CARGA DE FUNDO:	Kg	TOTAL (kg)
Powermix	411	Powergel 800 2 <sup>1/4</sup> x 24"	150	561
				0
				0
				0

VOLUME DE ROCHA IN SITU (m <sup>3</sup> ):	2.258,43
VOLUME DE ROCHA EMPOLADO:	3.613,50
RAZÃO DE CARREGAMENTO (g/m <sup>3</sup> ):	155

## RELATÓRIO DE FOGO - ANEXO - 17

FOGO - 10			
AFASTAMENTO (m):	4,00	SUB. FURAÇÃO (m):	0,8
ESPAÇAMENTO (m):	2,00	INCLINAÇÃO DOS FUROS:	20°
ALTURA DE BANCADA (m):	19,38	EMPOLAMENTO:	1,6
N° DE FUROS (unidade):	12	TAMPÃO (m):	2
PROFUNDIDADE DOS FUROS (m):	19,38	Ø DOS FUROS:	3"

EXPLOSIVOS UTILIZADOS				
CARGA DE COLUNA:	Kg	CARGA DE FUNDO:	Kg	TOTAL:
Powermix	544	Pirofort 2 <sup>1/4</sup> x 24"	150	694
				0
				0
				0

VOLUME DE ROCHA IN SITU (m <sup>3</sup> ):	1.860
VOLUME DE ROCHA EMPOLADO:	2.977
RAZÃO DE CARREGAMENTO (g/m <sup>3</sup> ):	233