

CARLOS MAGNO MUNIZ E SILVA

DESENVOLVIMENTO DE TECNOLOGIA ELETROHIDRÁULICA
APLICADA A DESMONTE DE ROCHAS EM ÁREAS URBANAS

Tese apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção do
título de Doutor em Engenharia.

São Paulo

2001

CARLOS MAGNO MUNIZ E SILVA

DESENVOLVIMENTO DE TECNOLOGIA ELETROHIDRÁULICA
APLICADA A DESMONTE DE ROCHAS EM ÁREAS URBANAS

Tese apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção do
título de Doutor em Engenharia.

Área de Concentração:
Engenharia Mineral

Orientador:
Antônio Stellin Júnior

Co-Orientador:
Edson Guedes da Costa (DEE/UFPB)

2001

Aos meus pais, Sebastião Vieira e Indira Maria, minha esposa Ana Ninfa, meu filho Davi,
meus irmãos Ricardo e Samira, meu cunhado Wlademir e meu sobrinho Matheus,
DEDICO.

AGRADECIMENTOS

Ao Orientador Prof. Dr. Antônio Stellin Júnior pelo apoio, confiança e incentivo, bem como ao Prof. Dr. Edson Guedes da Costa do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal da Paraíba (DEE/UFPb) pela co-orientação e colaboração técnico-científica da tecnologia de Alta Tensão despendida à exequibilidade da pesquisa.

A Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo - FAPESP pelo suporte financeiro e científico.

Ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal da Paraíba, especificamente, a Coordenação do Laboratório de Alta Tensão - LAT pelo apoio de infra-estrutura aos ensaios eletrohidráulicos.

Ao Prof. Dr. Wildor Theodoro Hennies, sempre presente às discussões técnicas.

A Companhia Paraíba de Cimento Portland - CIMEPAR pelo apoio logístico aos trabalhos de campo, em particular, ao Eng^o de Minas Waldevino Neto e ao Téc. de Mineração João Caicó.

Aos Professores Aarão de Andrade Lima pelas sugestões geomecânicas e Tumkur Rajarao Gopinath que me acompanha desde o início da minha carreira acadêmica.

Aos colegas de amigos Damásio Fernandes, Lanusse Tuma, Fábio Salvador, Alécio Barreto, Walmeran Trindade, Diana Nobre, Naelcio Carvalho e Noronha, pela amizade e companheirismo acadêmico.

Ao Departamento de Engenharia de Minas da Escola Politécnica da USP e aos funcionários e colaboradores do LAT.

Muito grato!



**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA
TERMO DE JULGAMENTO
DE
DEFESA DE TESE DE DOUTORADO**

Aos 06 dias do mês de setembro de 2001, às 14:00 horas, no Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, presente a Comissão Julgadora, integrada pelos Senhores Professores Doutores Antonio Stellin Junior, orientador do candidato, Wildor Theodoro Hennies, Aarão de Andrade Lima, Valdir Costa e Silva e Fernando Fujimjura, iniciou-se a Defesa de Tese de Doutorado do(a) Sr(a). **CARLOS MAGNO MUNIZ E SILVA.**

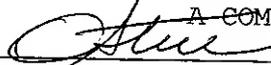
Título da Tese: "DESENVOLVIMENTO DE TECNOLOGIA ELETROHIDRÁULICA APLICADA A DESMONTE DE ROCHAS EM ÁREAS URBANAS".

Concluída a arguição, procedeu-se ao julgamento na forma regulamentar, tendo a Comissão Julgadora considerado o(a) candidato(a):

Prof.Dr. Antonio Stellin Junior.....	(Aprovado)
Prof.Dr. Wildor Theodoro Hennies.....	(Aprovado)
Prof.Dr. Aarão de Andrade Lima.....	(Aprovado)
Prof.Dr. Valdir Costa e Silva.....	(Aprovado)
Prof.Dr. Fernando Fujimjura.....	(Aprovado)

Para constar, é lavrado o presente termo, que vai assinado pela Comissão Julgadora e pela Secretária de Pós-Graduação.

São Paulo, 06 de setembro de 2001.
A COMISSÃO JULGADORA



 Wildor Theodoro Hennies

 Aarão de Andrade Lima

 Valdir Costa e Silva

 Fernando Fujimjura

Secretária: Elisabete Ap^a F.S. Ramos

Obs: Resolução 4476, de 17.09.1997 Altera dispositivos do Regimento Geral da USP Art.109 - Imediatamente após o encerramento da arguição da dissertação ou da tese cada examinador expressará seu julgamento em sessão secreta, considerando o candidato aprovado ou reprovado.

Homologado pela C.P.G. em reunião realizada 17/10/2001.

SUMÁRIO

Lista de figuras	
Lista de tabelas	
Lista de terminologias	
Resumo	
Abstract	
1 INTRODUÇÃO	1
2 MECANISMOS DE FRAGMENTAÇÃO DE ROCHAS	5
2.1 MECANISMOS DE FRAGMENTAÇÃO EM DESMONTE POR EXPLOSIVOS	6
2.2 MECANISMOS DE FRAGMENTAÇÃO EM DESMONTE ELETROHIDRÁULICO	22
3 ESTUDOS GEOMECÂNICOS SOBRE RUPTURA E FRAGMENTAÇÃO DE ROCHAS	30
3.1 INFLUÊNCIA DA ANISOTROPIA NAS PROPRIEDADES GEOMECÂNICAS DAS ROCHAS	31
3.2 FUNDAMENTOS DE RUPTURA DE ROCHAS	37
3.3 CONSIDERAÇÕES E TEORIAS SOBRE ENERGIA DE RUPTURA E/OU DE FRAGMENTAÇÃO DE ROCHAS POR MECANISMOS DINÂMICOS	49
3.4 TEORIAS SOBRE COMINUIÇÃO DE ROCHAS	58
4 MODELO TECNOLÓGICO DE DESMONTE ELETROHIDRÁULICO PARA ÁREAS URBANIZADAS	61
4.1 PARAMETRIZAÇÃO GEOMECÂNICA E ENSAIOS ASSOCIADOS	61
4.2 PARAMETRIZAÇÃO ELETROHIDRÁULICA	67
4.3 APLICAÇÃO DA TECNOLOGIA ELETROHIDRÁULICA DE DESMONTE DE ROCHAS: MATERIAIS E MÉTODOS	73

5 ANÁLISE E DISCUSSÕES DOS RESULTADOS	77
5.1 ASPECTOS GEOMECÂNICOS	77
5.2 ASPECTOS ELETROHIDRÁULICOS	81
5.3 ASPECTOS AMBIENTAIS	84
5.4 VIABILIDADE ECONÓMICA	85
6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES	86
6.1 CONCLUSÕES	86
6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	87
ANEXO 1 - TEORIA DE ENERGIA DE RUPTURA DE ROCHA BASEADO EM MODELO PAREDE CILINDRO ESPESSA	88
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	93

LISTA DE FIGURAS

Fig. 1.1 - Localização da área de estudo.	01
Fig. 2.1.1 – Formas geométricas de propagação da frente de onda de tensão (MORHARD, 1987).	09
Fig. 2.1.2 – Propagação de frente de onda com raio de impedância menor que 1.	10
Fig. 2.1.3 – Propagação de frente de onda com raio de impedância igual a 1.	10
Fig. 2.1.4 – Propagação de frente de onda com raio de impedância maior que 1.	11
Fig. 2.1.5 - Propagação e reflexão de ondas de choque (SCOTT et al, 1996).	12
Fig. 2.1.6 - Elemento de rocha submetido a fraturamento radial (LOPEZ JIMENO et al., 1995; SCOTT et al, 1996).	13
Fig. 2.1.7 - Zonas de tritramento, gretamentos, fraturas radiais e formação de fragmentos (WHITTAKER et al, 1992).	13
Fig. 2.1.8 - Ação da pressão dos gases (SCOTT, 1996).	15
Fig. 2.1.9 – Mecanismo de quebra por flexão (LOPEZ JIMENO et al, 1995).	18
Fig. 2.1.10 - Seqüência de desmonte de rochas baseado em mecanismos de fragmentação (MORHARD, 1987; LOPEZ JIMENO et al, 1995).	19
Fig. 2.1.11 - Quadro resumo de distribuição energética em desmonte de rochas por explosivos (AYRES DA SILVA, 1997).	20
Fig. 2.1.12 - Modelo de partição de energia de detonação de um furo baseado nas fases de fragmentação.	21
Fig. 2.2.1 - Fragmentador eletrohidráulico (EPSHTEYN et al., 1960 apud MAURER, 1968).	24
Fig. 2.2.2 - Diagrama esquemático do circuito elétrico de descarga para fragmentação de rochas (KUTTER, 1969).	25
Fig. 2.2.3 – Diagrama esquemático do equipamento <i>Plasma Blasting</i> (NANTEI; KITZINGER, 1992b).	26
Fig. 2.2.4 – Diagrama esquemático do método eletro-hidráulica EHD (KLICH; RES, 1996).	28
Fig. 3.1.1 Definição de direção de mergulho (ψ) e ângulo de mergulho (α).	35
Fig. 3.1.2 Propriedade de abertura de descontinuidades conforme a ISRM (BRADY; BROWN, 1993).	36
Fig. 3.1.3 Ilustração da propriedade de descontinuidade de persistência (BRADY;	

BROWN, 1993).	36
Fig. 3.2.1 Curvas de tensão-deformação para diferentes tipos de materiais (JAEGER; COOK, 1976; LAMA; VUTUKURI, 1978; SHAH et al., 1995).	38
Fig. 3.2.2 Modelo de propagação de uma fenda pela ruptura de ligações químicas sob tensão externa (KELLY; SPOTWOOD, 1982).	40
Fig. 3.2.3 Modelo de placa com fenda sob tensão de tração (SHAH et al., 1995).	41
Fig. 3.2.4 Fissuras longitudinais em por compressão unidimensional (JAEGER; COOK, 1976).	42
Fig. 3.2.5 Diagrama típico de ruptura por cisalhamento (LAMA; VUTUKURI, 1978).	46
Fig. 3.3.1 Ilustração das condições de ruptura baseado na dinâmica de propagação de ondas elásticas.	54
Fig. 3.3.2 Fluxograma de partição de energia em desmonte eletrohidráulico.	55
Fig. 3.3.3 Mecanismos dinâmicos do processo de ruptura estática de rochas em desmonte eletrohidráulico.	56
Fig.4.1 Face de uma bancada de lavra e seus elementos litológicos e estruturais (Mina Fazenda da Graça).	63
Fig. 4.2 Fluxograma de ensaios geomecânicos do LMR da EPUSP.	64
Fig. 4.3 Foto dos corpos de prova a serem ensaiados.	64
Fig. 4.4 Sistema servo-controlado utilizado nos ensaios geomecânicos (LMR/EPUSP-PMI).	65
Fig. 4.5 Foto de corpos de prova para ensaio de compressão uniaxial.	65
Fig. 4.6 Foto de corpos de prova para ensaio de tração indireta (Método Brasileiro).	66
Fig. 4.7 Gerador de impulso de alta corrente empregado nos ensaios eletrohidráulicos.	70
Fig. 4.8 Circuito centelhador empregado nos ensaios eletrohidráulicos.	71
Fig. 4.9 Sonda usada para descargas elétricas acoplada ao sistema de fixação e vedação eletrodo-rocha.	71
Fig. 4.10 Amostras de rochas calcárias destinadas a ensaios eletrohidráulicos.	74
Fig. 4.11 Preparação e montagem do circuito elétrico gerador de impulso de alta corrente.	75
Fig. 4.12 Montagem do cabo coaxial do gerador à amostra.	75
Fig. 4.13 Mesa de comando do circuito gerador de impulso de alta corrente (LAT/DEF/UFPB).	76
Fig. 5.1 Ruptura típica em compressão uniaxial.	78
Fig. 5.2 Corpos de prova rompidos pelo método brasileiro.	79

Fig. 5.3	Forma de onda de corrente obtidas pelo programa desenvolvido em Fortran.	81
Fig. 5.4	Forma de onda de tensão obtidas pelo programa desenvolvido em Fortran.	81
Fig. 5.5	Forma de onda de potência obtidas pelo programa desenvolvido em Fortran.	82
Fig. 5.6	Forma de onda de energia obtidas pelo programa desenvolvido em Fortran.	82
Fig. 5.7	Formas de ruptura das amostras de ensaios eletrohidráulicos.	83

LISTA DE TABELAS

TABELA 3.1 – Classificação de métodos de fragmentação de rochas baseada na forma de energia aplicada (HARTMAN, 1987).	49
TABELA 3.2 - Valores de energia geomecânica para ruptura simples baseado na expressão 3.17.	57
TABELA 3.3 - Valores de tensão de carregamento do banco de capacitores para desmonte eletrohidráulico baseado na expressão 2.2.1.	58
TABELA 4.1 – Características geométricas das amostras selecionadas para os ensaios eletrohidráulicos.	74
TABELA 5.1 – Resultado dos parâmetros geomecânicos de ensaio de compressão uniaxial.	77
TABELA 5.2 - Resultado dos ensaios de tração indireta (método brasileiro).	78
TABELA 5.3 – Valores de energias nominal (geomecânica corrigida) e efetiva (elétrica) obtidas a partir de ensaios geomecânicos e eletrohidráulicos.	83

LISTA DE TERMINOLOGIAS

Devido aos fenômenos e teorias que cercam os mecanismos de fragmentação ainda não serem totalmente esclarecidos, acarreta confusões quanto aos termos e seus significados propagados pelas diversas fontes de linhas de pesquisa que tratam da Mecânica das Rochas e suas derivações. Neste contexto, são apresentados os diversos termos empregados neste trabalho.

Fragmentação: processo de quebra relacionado à partição de fragmentos;

Fase dinâmica do processo de fragmentação por explosivos: corresponde a ação das ondas de choque. Inicia pela deflagração da reação química do explosivo, termodinamicamente instável;

Fase semi-estática do processo de fragmentação por explosivos: corresponde a ação da pressão dos gases da detonação. Trata-se do trabalho mecânico realizado durante o processo de expansão ou descompressão dos gases da detonação;

Partição de energia no processo de fragmentação por explosivos: corresponde ao aproveitamento energético em desmontes de rochas que se inicia pelo processo de detonação da carga explosiva através de reação química;

Anisotropia: se refere a propriedade que varia segundo a orientação em relação a um dado sistema de eixos;

Descontinuidades: termo coletivo para todos os tipos de juntas, planos de acamamento, planos de xistosidades, planos de cisalhamento, falhas e contatos;

Juntas: definidas como fendas (ou gretas) ou fraturas em rochas, ao longo das quais se apresentam pequenas ou não deslocadas;

Maçãos rochosos: conjunto de blocos monolíticos de rochas, separados por imperfeições geológicas, e que incluem, além do tipo litológico, todas as suas descontinuidades (sistemas de diáclases, planos de acamamento, xistosidades e falhas);

Ruptura: formação de planos de separação no material rochoso que compreende a quebra de ligações dos retículos cristalinos do sólido formando novas superfícies de separação;

Ruptura frágil (ou quebradiça): processo pelo qual a resistência do material é alcançada subitamente, através de um plano seguido de pequena ou nenhuma deformação plástica;

Ruptura franca: aquela em que a massa rochosa se divide em duas porções totalmente desligadas uma da outra (nova face livre). Neste caso, todas as forças que mantinham as partículas adjacentes unidas foram rompidas;

Fratura: termo alternativo, as vezes referido como cavidade de formato complexo preenchida por gás, líquido ou por material sólido mineral;

Faturamento: combinação de fraturas;

Material perfeitamente elástico: quando possui relação proporcional entre tensão e deformação;

RESUMO

Operações de desmonte de rochas por explosivos promovem impactos ambientais adversos como: vibrações de terrenos, ultralanchamentos de fragmentos de rochas, sobrepressão atmosférica, e emissões de ruídos, poeiras e gases. Principalmente, por minerações em áreas urbanas.

O princípio eletrohidráulico pode fragmentar uma rocha, quase que instantaneamente, através da energia de descargas elétricas produzidas por um gerador de impulso de alta corrente. Porém, sem causar os riscos e os incômodos ambientais provocados pelos explosivos, o desmonte eletrohidráulico pode se tornar uma alternativa tecnológica de desmonte secundário para uso em áreas urbanizadas.

O modelo tecnológico de desmonte eletrohidráulico proposto, apoiado em estudos geomecânicos, foi desenvolvido em escala de laboratório (amostras até 150kg) visando aplicação industrial como alternativa de desmonte secundário para rochas calcárias da CIMEPAR. Os estudos envolveram a descrição dos mecanismos de fragmentação de rochas, análise de teorias e critérios geomecânicos, e análise de parâmetros elétricos empregados em geradores de impulso de alta corrente aplicados para ruptura de rochas. Os trabalhos de laboratório reuniram ensaios geomecânicos e eletrohidráulicos. Os resultados mostraram-se satisfatórios com relação a rendimento e perdas energéticas.

ABSTRACT

Conventional rock blasting promotes many negative environmental impacts including ground vibration, flyrock, air blast, and the emission of noise, dust and gases. An unconventional alternative process is the application of eletrohydraulic principles. Electrohydraulic blasting is able to create a fracturing and rupture states in the rock, almost instantly. The energy is produced by a high current impulse generator, without the above environmental impacts caused by conventional explosives. It is particularly suited for application in urban areas mining. The research to joint theoretical analysis of fragmentations mechanism, considerations of the geomechanical criteria of rock failure, laboratory testing, and analysis of the electrical parameters of impulse generators related to rock fragmentation. The laboratory experiments included geomechanical and eletrohydraulic tests on limestone samples of up to 150 kg. The test results show satisfactory efficiency and energy losses of proposed model technological.

1 INTRODUÇÃO

As operações de desmorte de rochas por explosivos promovem riscos e incômodos ambientais tais como: vibrações de terrenos, ultralanchamentos de fragmentos de rochas, sobrepressão atmosférica (ou sopros de ar), emissão de ruídos, poeiras e poluentes gasosos, instabilidade de taludes e de encostas, além de requerer cuidados com transporte e manuseio de materiais e acessórios explosivos. Este quadro de adversidades ambientais, afeta diretamente o bem-estar e segurança da população circunvizinha aos empreendimentos mineiros, principalmente, àqueles situados em perímetros urbanos, bem como aos operadores de desmorte de rochas.

A Companhia Paraíba de Cimento *Portland* – CIMEPAR, está em atividade a mais de 5 décadas. A empresa está circundada pelos bairros residenciais de Cruz das Armas e da Ilha do Bispo, situados no município de João Pessoa, capital do Estado da Paraíba (Fig. 1.1), cuja população é estimada em 600.000 habitantes (IBGE, 2000). Trata-se de um caso típico de mineração de área urbana, cujas operações de lavra de rochas calcárias requerem cuidados constantes.

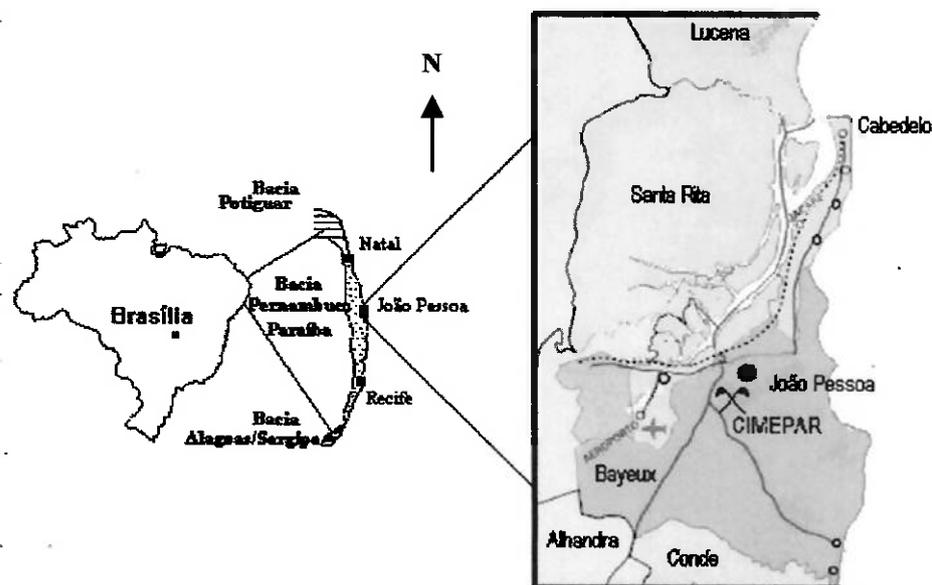


Fig. 1.1 – Localização da área de estudo.

SEGSWORTH; KUHN (1977), INOUE et al. (2000), NANTEL; KITZINGER (1992a e 1992b) e HAMELIN et al. (1993), destacam o interesse nas últimas décadas por métodos e técnicas de perfuração e quebra de rochas, tanto os novos como os antigos

métodos modificados. Alguns métodos são voltados para: redução de custos, maior rapidez, segurança das operações e escavações de rochas de dureza elevada. Visam substituir o desmonte convencional em função de melhores condições de trabalho e minimização de danos ao meio ambiente.

Tratando-se de desmonte de rochas, WILKE; SPACHTHOLZ (1993) destacam a necessidade de desenvolver sistemas que isentem o uso de explosivos, e que acarretem menos poluição e riscos ambientais. A tecnologia de desmonte de rochas convencional vigente, é alvo de crescentes pressões da opinião pública quanto ao controle de ondas de choque responsáveis por sobrepressão atmosférica (sopros de ar) e vibração de terrenos (abalos sísmicos).

Ao classificar os métodos de fragmentação de rochas baseados na forma de energia aplicada à quebra de rochas, HARTMAN (1987) destacou os métodos utilizando energia elétrica, como de caráter experimental e limitados, semelhantes ao método por impacto aplicado na quebra de matacões. SEGSWORTH; KUHN (1977) classificam os métodos de quebra de rochas por uso direto de energia elétrica em: (i) fraturamento magnético usando o princípio de aquecimento por indução; (ii) quebra por aquecimento por alta frequência através de princípios de aquecimento de dielétricos (aquecimento entre placas de capacitores, quebra por microondas e perfuração); (iii) quebra por feixes potentes de elétrons; (iv) fragmentação por intensa explosão energética de elétrons; (v) quebra por aquecimento resistivo de baixa frequência; e (vi) britagem eletrohidráulica.

Por outro lado, a fragmentação de rochas por desmonte convencional não possui conceito unânime sobre os mecanismos de quebra de rochas (SEN, 1995), bem como a quantificação de energia explosiva necessária para fragmentação e a forma de transmissão ao maciço rochoso (FUJIMURA, 1999).

Este contexto motivou o desenvolvimento deste trabalho (Tese) quanto ao estudo de uma alternativa tecnológica de desmonte de rochas que isentasse o uso de explosivos químicos, que contemple qualidade, produtividade e preservação ambiental, e voltada para minerações em perímetros urbanos. Pois, é sabido da crescente competição de ocupação do solo urbano pelas múltiplas formas de uso pelo contingente populacional das médias e grandes cidades.

No Brasil, o emprego do princípio eletrohidráulico em operações unitárias mineiras ainda se encontra sem expressividade científica e comercial. Na literatura internacional, porém, há registros de pesquisas científicas em operações como britagem, perfuração e desmonte secundário de rochas (BERGSTROM, 1961; MAURER, 1968; KUTTER, 1969;

NANTEL et al., 1992; NANTEL; KITZINGER, 1992a e 1992b; HAMELIN et al. 1993; e KLICH; RES, 1996).

A tecnologia de desmonte de rochas envolvendo o princípio eletrohidráulico se baseia em descarga elétrica por centelhamento, imersa em uma solução eletrolítica, no interior do furo da rocha previamente perfurado.

A técnica faz uso de descarga de energia elétrica para transformar uma solução eletrolítica em um volume (ou canal) plasmático de alta temperatura e alta pressão. O plasma gerado pela rápida transferência de energia, se expande com velocidade superior à propagação de velocidade de onda sísmica da rocha. A súbita expansão do volume plasmático gera um campo de tensões (compressão e tração), ocasionando a propagação de ondas de choque que percorre a rocha promovendo a fragmentação e/ou ruptura (NANTEL et al., 1992; NANTEL; KITZINGER, 1992a e 1992b; HAMELIN et al., 1993; KLICH; RES, 1996).

O estado plasmático requer uma descarga de corrente elétrica de alta intensidade no interior do furo da rocha. Utilizando-se um gerador de impulso de alta corrente pode-se produzir a descarga elétrica requerida para o processo de fraturamento da rocha. A descarga é efetuada com auxílio de uma sonda composta de eletrodos concêntricos acoplada por um sistema de fixação e vedação (eletrodo-rocha).

O objetivo geral da Tese é estudar e desenvolver um modelo tecnológico de desmonte secundário de rochas, não-convencional, como alternativa tecnológica ao desmonte secundário de rochas praticado em áreas urbanas, mais limpo e seguro do ponto de vista ambiental, baseado no princípio eletrohidráulico. Quanto aos objetivos específicos, a Tese se baseia nos seguintes propósitos:

- estudar teorias e conceitos geomecânicos sobre ruptura aplicados em processo de fragmentação (eletrodinâmica), considerando os aspectos anisotrópicos da rocha;
- desenvolver modelo metodológico de desmonte eletrohidráulico de rochas em escala de laboratório para amostras até 150kg;
- estudar a viabilidades técnica, operacional, econômica e ambiental de um protótipo de modelo industrial de unidade de desmonte eletrohidráulico para uso em atividades de desmonte de rochas no Brasil;
- auxiliar as operações de desmonte secundário de rochas da CIMEPAR através de uma alternativa tecnológica de desmonte não-convencional apoiada em análises econômica, operacional e ambiental.

Como resultado final, pretende-se contribuir com: (i) estudos geomecânicos sobre processos eletrodinâmicos de ruptura e fragmentação de rochas através de modelos e teorias de mecânica de rochas, que fundamentam o emprego do princípio eletrohidráulico em desmonte de rochas; (ii) considerações energéticas de fragmentação eletrodinâmica: potência, transferência e forma de recepção de energia; (iii) elaboração de modelo metodológico de desmonte eletrohidráulico com base nos condicionantes do caso de estudo; (iv) estudos preliminares de um protótipo de modelo industrial de unidade de desmonte eletrohidráulico de rochas aplicado para áreas urbanas.

Visando alcançar os objetivos propostos, a presente Tese foi desenvolvida em seis capítulos, a saber:

No item 2, são descritos os mecanismos de fragmentação por desmonte de rochas por explosivos, e os mecanismos de fragmentação por desmonte eletrohidráulico via descargas elétricas. Tem o propósito de conhecer o comportamento das propriedades mecânicas das rochas diante dos processos estáticos e dinâmicos incidentes na ruptura e na fragmentação das rochas.

O item 3 corresponde os estudos geomecânicos sobre os processos de ruptura e de fragmentação de rochas apoiados em teorias e modelos de processos eletrodinâmicos, além da influência anisotrópica que cerca os materiais heterogêneos.

A configuração e aplicação do modelo tecnológico de desmonte secundário de rochas baseado no princípio eletrohidráulico, compõe o item 4. Compreende o desenvolvimento do modelo tecnológico proposto, através dos materiais e métodos em escala de laboratório, apresentado com os trabalhos de laboratório: ensaios geomecânicos e ensaios eletrohidráulicos.

Dos resultados laboratoriais obtidos, analisados e discutidos, discorre o item 5. Apresenta a confrontação dos parâmetros geomecânicos e eletrohidráulicos do modelo tecnológico de desmonte eletrohidráulico desenvolvido com dados da literatura levantada. Também são analisadas as implicações ambientais e econômicas.

Finalmente, as conclusões e sugestões, reunidas no item 6, que sintetiza a contribuição final da Tese e suas recomendações para trabalhos futuros.

2 MECANISMOS DE FRAGMENTAÇÃO DE ROCHAS

A fragmentação é um processo de quebra relacionado à partição de fragmentos, porém, de significado distinto de cominuição (FUJIMURA, 1999). O termo cominuição, por sua vez, adquiriu atualmente conceito mais amplo dividido em: (i) desmonte mecânico ou por explosivos; (ii) britagem; e (iii) moagem. Atrela modos de ruptura de acordo com a metodologia de aplicação (FUJIMURA, 1999). O desmonte por explosivo pode ser considerado o primeiro estágio do processo de cominuição (WILLS, 1985).

Fragmentação em desmonte por explosivos é considerado, na prática, um complicado processo que compreende interações como: número de detonações, anisotropismo da rocha, efeitos da frente livres, etc. (WHITTAKER et al., 1992). A teoria envolvida, de acordo com MORHARD (1987), HUDSON (1993) e SEN (1995), é considerada um dos tópicos mais controvertidos da indústria de escavação de rochas e tem sido formulada sobre puras especulações.

Os mecanismos de fragmentação em desmonte de rochas são divididos em 2 fases. Porém, devido as dificuldades em estimar os sucessivos efeitos dos mecanismos atuantes em cada fase de fragmentação, em virtude dos curtíssimos períodos de atuação, KUTTER; FAIRHURST (1971) utilizaram experimentos específicos para estudar cada fase separadamente.

De acordo com WHITTAKER et al. (1992), a fragmentação por desmonte convencional dá-se através de um processo dinâmico do que através de um processo estático.

Neste Capítulo serão descritos os mecanismos de fragmentação atuantes em desmonte por explosivos, e em desmonte eletrohidráulico (por descargas elétricas). O mesmo objetiva identificar e conhecer a dinâmica do processo de fragmentação e/ou de ruptura de rochas.

2.1 MECANISMOS DE FRAGMENTAÇÃO EM DESMONTE POR EXPLOSIVOS

A finalidade do desmonte por explosivos é converter a rocha em vários fragmentos menores capaz de serem transportados ou escavados por equipamento disponível. Para isso, são necessários 2 fatores: (i) fragmentação suficiente; e (ii) deslocamento, movimentação e lançamento (HEMPHILL, 1981).

Segundo AYRES DA SILVA (1997), em desmonte de rochas considerava-se apenas o efeito da expansão dos gases em altas pressões decorrentes da combustão dos explosivos. Os gases abririam fendas no maciço rochoso, que se estenderiam por todas as direções até a face livre, subdividindo o maciço em fragmentos menores. Porém, com a aplicação de técnicas como da fotoelasticidade em modelos físicos, interpretações por modelos matemáticos e testes de campo, foi possível descrever teorias e procedimentos sobre fragmentação, atualmente, agrupados em 2 fases: dinâmica e semi-estática. Todavia, ainda se trata de um tema controverso e sem teoria unânime (HUDSON, 1993; SEN, 1995).

Os esforços dinâmicos e semi-estáticos gerados em uma detonação, resultam de uma reação química muito rápida de uma substância termodinamicamente instável, que geram gases de alta pressão e alta temperatura. A súbita expansão da alta pressão e alta temperatura dos gases, são transmitidos à rocha através das paredes do furo de detonação. A intensidade do processo de explosão depende da velocidade de detonação do explosivo (KUTTER; FAIRHURST, 1971).

Quanto às fases atuantes no processo de fragmentação, KUTTER; FAIRHURST (1971) consideram em termos de zonas de quebra: (i) zona hidrodinâmica (explosão nuclear); (ii) zona não-linear (transicional); e (iii) zona de região elástica. BAUER; CROSBY (1990), porém, dividem os processos atuantes na quebra da rocha durante o desmonte em: (i) fragmentação e lascamentos por reflexão das ondas de tensão; (ii) fraturamento radial; e (iii) ruptura por flexão. O processo de fragmentação por lascamentos, através de reflexão de ondas, geralmente é tido como ausente devido às condições de campo serem adversas para observação.

LOPEZ JIMENO et al. (1995), por sua vez, dividem os mecanismos envolvidos no processo de fragmentação em 8 etapas, enquanto MORHARD (1987) classifica os principais mecanismos de fragmentação baseados em: energia de onda de deformação

(compressão e tração); reflexões da onda de choque em faces livres; pressurização de gás sobre o maciço rochoso circundante ao furo de desmonte; ruptura por flexão; ondas de cisalhamento; intensidade da carga explosiva; nucleação de fendas em falhas e descontinuidades; e colisões de fragmentos no ar. Estes mecanismos são descritos em função dos eventos do progresso de fragmentação, e divididos em 4 períodos, tais como: detonação; propagação da onda de tensão ou de choque; expansão da pressão de gás; e movimentação e deslocamento da rocha.

Considerações teóricas e medidas experimentais sobre pulsos de deformações e sobre pressão de gás, indicaram ser partes de uma variação contínua do período de pressão na rocha, e que podem ser consideradas separadamente. Assim, pode-se supor que a rocha sujeita ao efeito da pressão gasosa tem sido pré-condicionada pelo esforço impulsivo da onda de deformação (KUTTER; FAIRHURST, 1971). Isto reforça considerar que os mecanismos de fragmentação de rochas por explosivos podem ser divididos em duas fases: (i) Fase Dinâmica - ação dos pulsos de ondas de deformação/choque; e (ii) Fase Semi-Estática - ação da pressão dos gases.

2.1.1 FASE DINÂMICA

A fase dinâmica do processo de fragmentação corresponde a ação das ondas de choque. Inicia pela deflagração da reação química do explosivo, termodinamicamente instável (KUTTER; FAIRHURST, 1971). A liberação da energia química do explosivo devido a combinação de seus componentes (combustível + oxidante), transforma a solução sólida em um gás de alta temperatura e alta pressão. Ou seja, a detonação da carga explosiva no furo é resultante da rápida reação exotérmica que se propaga através da coluna explosiva no furo. Esta fase é tida como a fase inicial do processo de fragmentação (MORHARD, 1987).

Nesse contexto, o explosivo é caracterizado como ferramenta de ruptura de rocha devido a sua propriedade em transformar a alta potência concentrada em uma zona confinada e limitada (LANGFORS; KIHLSSTRÖM, 1976).

Para SCOTT (1996), a fase dinâmica corresponde a fase de choque representada pelas ondas de tensão P (compressão) e S (cisalhamento) associadas à rápida aceleração da explosão da parede do furo. A passagem da onda de tensão em volta do furo estabelece um estado de tensão semi-estático.

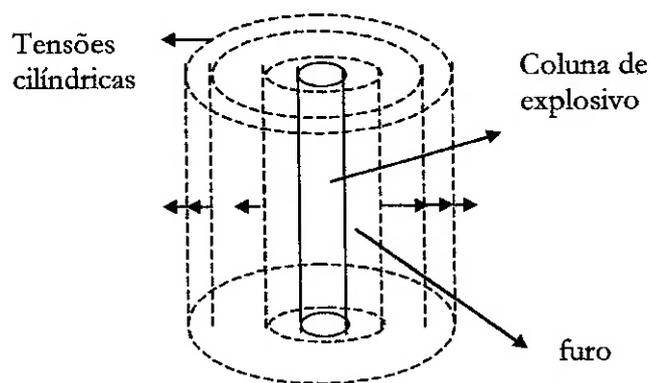
KUTTER; FAIRHURST (1971), COATES (1973), LANGFORS; KIHLSSTRÖM

(1976), HEMPHILL (1981), CROSBY; BAUER (1990) afirmam que a detonação de uma carga explosiva no interior de um furo de desmonte provoca uma explosão que gera uma súbita e rápida liberação de gases a alta pressão (1000 MPa) e a alta temperatura (3000C°) em poucos microssegundos (WHITTAKER et al., 1992). Este efeito produz uma onda de choque que é enviada à rocha através da parede do furo, considerada por WHITTAKER et al. (1992) como tensão compressiva radial.

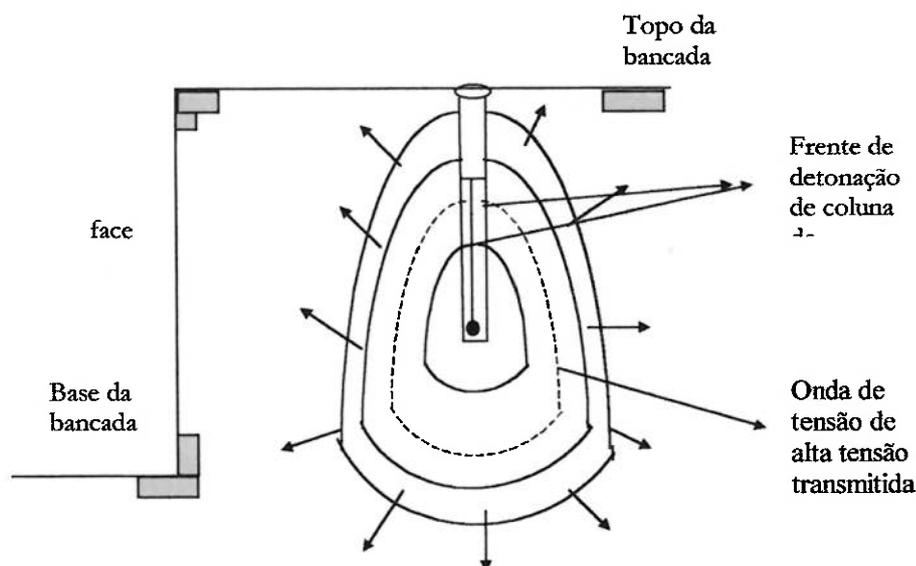
A onda de choque se propaga como onda elástica, a partir do furo para todo maciço imediatamente após a detonação da carga explosiva. Sua velocidade, no entanto, depende da densidade da rocha e/ou do meio de propagação. A velocidade de propagação aumenta com a densidade da rocha (HEMPHILL, 1981; SEN, 1995).

Para BAUER; CROSBY (1990), devido ao formato cilíndrico do furo, a maior parte da energia da frente de onda de choque é direcionada lateralmente ou perpendicularmente ao eixo deste, e não equivale a todas as direções como no caso de carga esférica ideal. ROLIM FILHO (1993), porém, afirma que a onda de choque é tida mecanicamente compressiva de forma esférica, cilíndrica ou tronco-cônica.

MORHARD (1987) destaca que geralmente a geometria da propagação da frente de onda de tensão não depende da forma da carga, mas da relação da propagação do meio perturbado em função da razão entre o comprimento e o diâmetro da coluna explosiva. A fig. 2.1.1. ilustra exemplos específicos de duas das possíveis configurações de forma de propagação de frente de onda de tensão em função da razão entre comprimento da carga e seu diâmetro.



(a) forma de expansão cilíndrica (>6:1);



(b) forma de expansão cilíndrica (<6:1);

Fig. 2.1.1 – Formas geométricas de propagação da frente de onda de tensão (MORHARD, 1987).

A mudança de densidade do meio de propagação, parte da onda retorna ao furo refletida e/ou refratada, e outra parte continua propagando-se compressivamente até amortecer. A cada mudança de densidade do meio, parte do impulso de energia da onda retorna refletida e refratada ao furo, enquanto, o equilíbrio da onda continua através de diferente material até ser totalmente absorvida (HEMPHILL, 1981).

Segundo MORHARD (1987), a partição da energia da frente de onda, que será descrita com mais detalhe adiante, depende do raio de impedância acústica de um meio (ou material) sobre o outro. A impedância η para cada tipo de material é definida pela expressão:

$$\eta = \rho_i V_p \quad (2.1)$$

η_i – impedância acústica do material i ;

ρ_i - densidade do material;

V_p – velocidade sônica do material.

Abaixo são apresentados três casos de modelo de propagação dinâmica da onda choque em função dos meios de interfaces descontínuas (MORHARD, 1987; COATES, 1973; SEN, 1995):

(i) Caso 1 – raio de impedância acústica do material 1 para o material 2 é menor do 1

($\frac{\eta_1}{\eta_2} < 1$). A fig. 2.1.2 ilustra o modelo do caso 1 de propagação de onda de choque. Parte da energia da onda de choque é transferida ao material 2 e parte retorna refletida, ambas continuam compressivas.

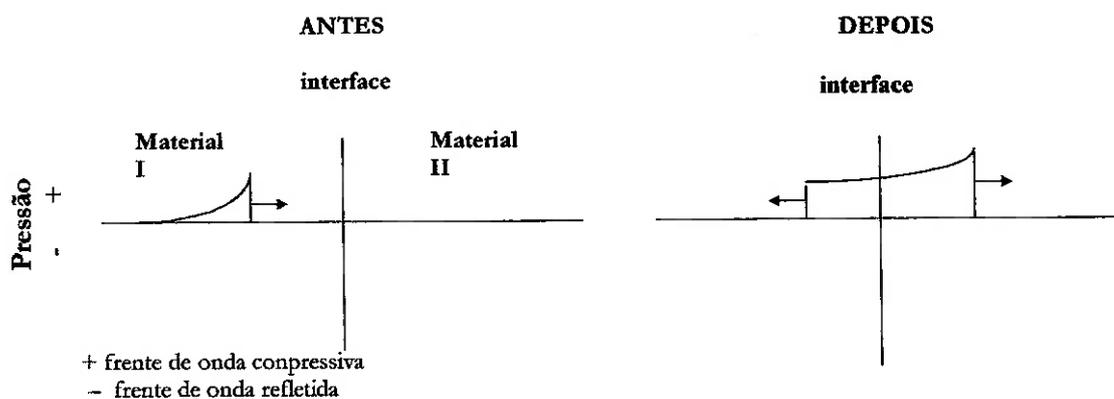


Fig. 2.1.2 – Propagação de frente de onda com raio de impedância menor que 1.

(ii) Caso 2 – raio de impedância acústica é igual a 1 ($\frac{\eta_1}{\eta_2} = 1$). A fig. 2.1.3 ilustra o modelo do caso 2 de propagação de onda de choque. Toda energia da onda é transferida ao material 2 e não ocorre reflexão.

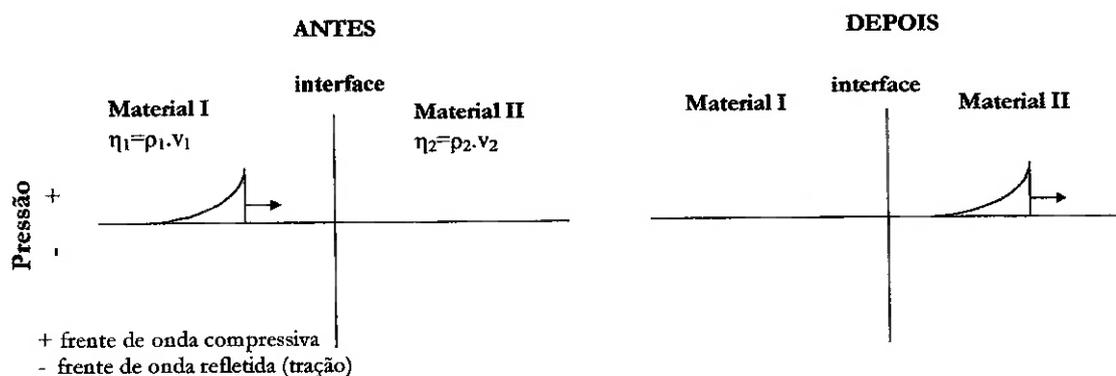


Fig. 2.1.3 – Propagação de frente de onda com raio de impedância igual a 1.

(iii) Caso 3 – raio de impedância acústica é maior que 1 ($\frac{\eta_1}{\eta_2} > 1$). A fig. 2.1.4 ilustra o modelo do caso 3 de propagação de onda de choque. Parte da energia é transferida ao material 2 como onda compressiva, e o restante refletida pela interface como onda de tração (Fig. 2.1.4):

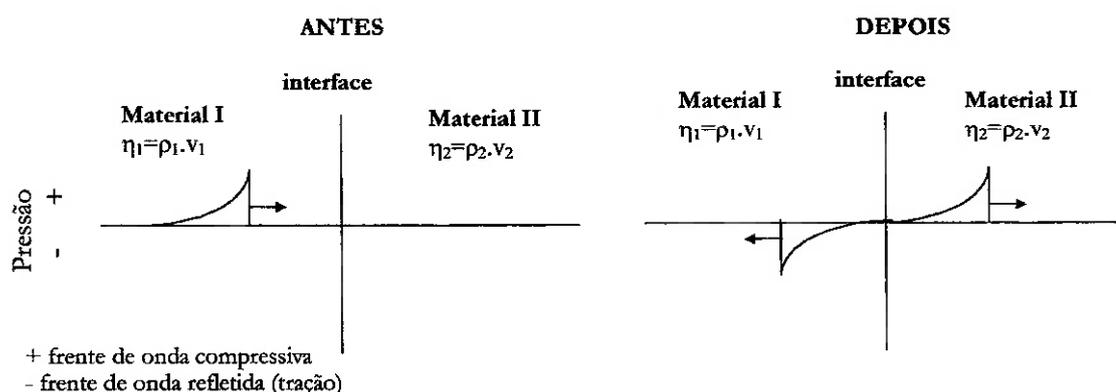


Fig. 2.1.4 – Propagação de frente de onda com raio de impedância maior que 1.

Quando uma onda compressiva percorre a rocha e encontra uma interface como uma frente livre, quase toda a energia será refletida como onda de tração. LOPEZ JIMENO et al (1995), porém, afirmam que uma onda de deformação ao alcançar uma superfície livre, duas ondas são geradas: uma de tração e outra de cisalhamento. Todavia, a magnitude relativa das energias das ondas depende mais do ângulo de incidência da propagação da onda compressiva.

Considera-se que a velocidade de detonação é muito maior que a velocidade de onda elástica da rocha. Como a frente de onda avança a partir do furo, conforme ilustrado na fig. 2.1.1, a mesma tende a comprimir o maciço a medida que altera o volume inicial do furo, conforme mostrado na fig. 2.1.5. Ao se propagar em ângulos retos, a frente de onda compressiva deriva-se em outra componente de tensão transversal. Esta componente, de tensão transversal, segundo LANGEFORS; KIHLSSTRÖM (1976), é responsável pelo surgimento do sistema de gretas radiais que partem do centro do furo, também denominada de rosa de gretas, e podem alcançar desde alguns centímetros até quase 1 metro. Portanto, atribui a ação das ondas de choque as duas primeiras etapas de fragmentação associadas à formação de gretas radiais e o efeito de esmagamento das proximidades do furo.

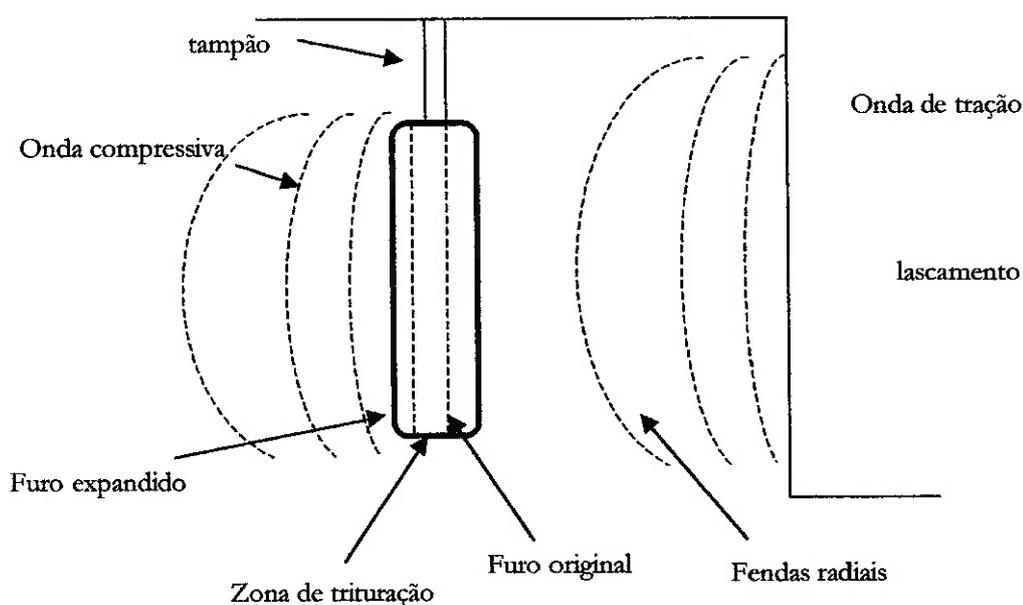


Fig. 2.1.5 - Propagação e reflexão de ondas de choque (SCOTT, 1996).

A fase inicial de propagação da onda de choque produz intenso trituração circundante ao furo, também denominado de trituração anelar (WHITTAKER et al., 1992). KUTTER; FAIRHURST (1971) e LOPEZ JIMENO et al. (1995) consideram como zona hidrodinâmica onde a rigidez elástica da rocha é completamente insignificante.

Sendo a rocha menos resistente a tração do que a compressão, cerca de 1/10 (COATES, 1976; HUDSON, 1993; SEN, 1995), as primeiras fendas se formam principalmente abaixo do limite de tração, resultando em fraturamentos radiais (LANGFORS; KIHLSSTRÖM, 1976). Durante o primeiro período de fraturamento, não se tem praticamente ruptura. Todavia, o surgimento dessas fraturas radiais atenua a energia de propagação da onda de choque reduzindo a capacidade de se estender às demais fendas. Fendas radiais extensas podem estender-se a distâncias além do alcance da tensão transversal excedente a resistência dinâmica da rocha (SCOTT, 1996).

O intenso trituração é atribuído a amplitude da onda de tensão bastante excedente a resistência de compressão dinâmica da rocha (SCOTT, 1996). Este fenômeno é considerado de pequeno uso prático, cujos deslocamentos radiais das ondas elásticas formam um campo de tensão elástica circundante a zona triturada. Este campo de tensões elásticas é composto por tensões radiais de compressão e transversais por tração (WHITTAKER et al., 1992; SCOTT, 1996) em plano normal ao eixo do furo. A fig. 2.1.6 ilustra o campo de tensões elásticas radiais.

Inicialmente, as componentes do campo de tensões elásticas são compressivas. Esta

fase de intensa ruptura permanece até a atenuação da amplitude da onda de tensão alcançar níveis abaixo da resistência dinâmica da rocha. Esta tensão transversal também é conhecida como tensão de arco, que corresponde à resposta elástica induzida a rocha através da onda compressiva radial (SCOTT, 1996).

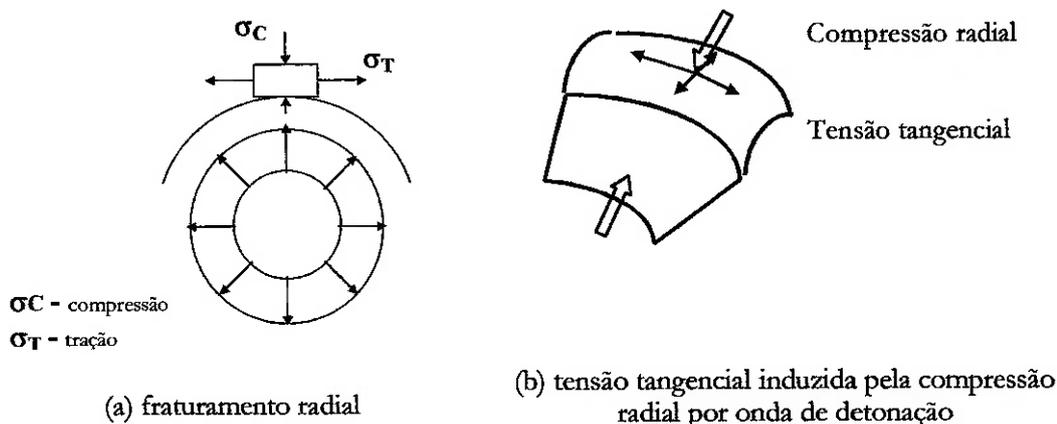


Fig. 2.1.6 - Elemento de rocha submetido a fraturamento radial (LOPEZ JIMENO et al., 1995; SCOTT, 1996).

Quando a onda compressiva é de curta duração, geralmente se estende apenas às pequenas fendas situadas radialmente ao eixo do furo, conforme ilustrado na Fig. 2.1.7. Rochas mais "homogêneas" necessitam de muitas fendas naturais (preexistentes) para que a frente de onda compressiva possa produzir fraturamentos radiais. Porém, como a maioria das rochas possui fendas ou fraturas, são consideradas heterogêneas. Na realidade, a onda de choque inicialmente ajuda estender as fendas existentes, e a conduzir energia mecânica (HEMPHILL, 1981).

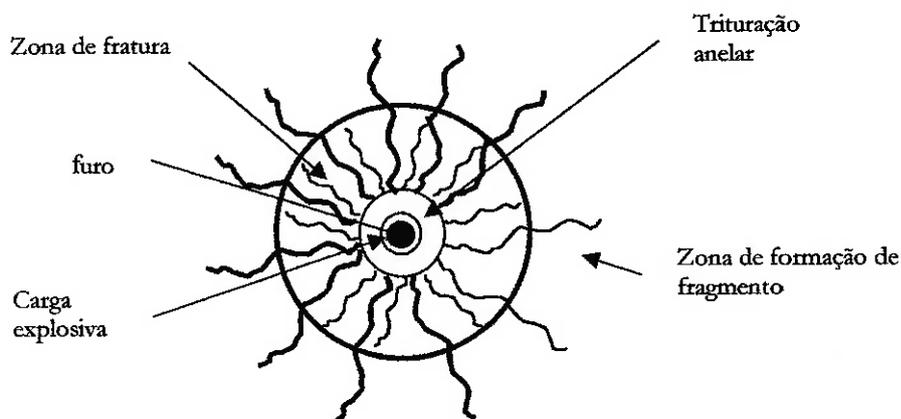


Fig. 2.1.7 - Zonas de trituração, fraturamentos radiais e formação de fragmentos (WHITTAKER et al., 1992).

KUTTER; FAIRHURST (1971) atribuem à componente de tensão tangencial ser muito superior a resistência de cisalhamento, devido ao intenso fraturamento radial e ruptura da rocha que ocorrem nas zonas denominadas não-lineares e elásticas. Em grande intensidade, essas tensões provocam a ruptura da rocha por tração em ângulos retos em relação à direção de propagação (SCOTT, 1996). As grandes rupturas de tração são esperadas a ocorrer no furo onde a tensão tangencial é alta, o suficiente para provocar a ruptura. As componentes compressivas e de tração de uma frente de onda diminuem com distância ao furo (MORHARD, 1987). Decrescem em magnitude inversamente ao quadrado da distância radial em relação à zona de trituração (WHITTAKER et al., 1992).

Com as tensões dinâmicas de onda se propagando, a expansão da combustão dos componentes explosivos parte para penetrar inicialmente as fendas radiais e exercem uma pressão semi-estática sobre o limite da cavidade expandida. Isto resulta no aumento do raio da zona triturada (ou esmagada), desde que o limite alcançado pela resistência estática seja inferior a resistência dinâmica. A ausência das fraturas em maciços rochosos impede a ação destrutiva da fase semi-estática (AYRES DA SILVA, 1995). A extensão das fendas existentes e a possibilidade de criação de novas fendas radiais devido ao arco de tensões elásticas, que também podem ocorrer (KUTTER; FAIRHURST, 1971).

Apesar da importância da fase dinâmica para o processo de fragmentação do maciço rochoso, ela contribui apenas com cerca de 3 a 5% da energia total fornecida ao desmonte de rochas (ROLIM FILHO, 1993; AYRES DA SILVA, 1995). A fase dinâmica finda com o surgimento gradativo das fraturas tangenciais a partir das faces livres.

LANGEFORS; KIHLESTRÖM (1976) afirmam que a onda de choque não é responsável pela ruptura da rocha, mas, proporciona unicamente as condições básicas para este processo. Por outro lado, WHITTAKER et al. (1992) ressalta que a fragmentação por desmonte pode ser considerada como resultado de uma propagação radial de fendas, por interação ou coalescência.

Quando a onda de choque compressiva possui energia suficiente para alcançar a face livre e retornar refletida com amplitude de tensão superior a resistência de tração do maciço rochoso, resulta em fragmentação adequada (HEMPHILL, 1981).

O objetivo final da fase dinâmica é a onda de choque alcançar a face livre e ser refletida como onda de tração. Porém, sua amplitude de tensão de tração deve ser bem superior a resistência dinâmica de tração da rocha, provocando lascamentos e destacamentos da face. O processo de lascamentos, denominado de conceito de HINO (1956) sobre a teoria fragmentação por reflexão, não é considerado como mecanismo

predominante do processo de fragmentação por explosivos em operações mineiras (SCOTT, 1996).

2.1.2 FASE SEMI-ESTÁTICA

Esta fase corresponde a ação da pressão dos gases da detonação. Trata-se do trabalho mecânico realizado durante o processo de expansão ou descompressão dos gases da detonação. Normalmente ocorre a 50ms após a ignição do explosivo (ROLIM FILHO, 1993). Ao percorrerem pelas fendas e pelas microfissuras resultantes da fase dinâmica, os gases gerados da detonação agem através da ação de cunhas, propagando fendas e fraturas, conforme ilustrado na fig. 2.1.8. Assim, separam parte do maciço rochoso em fragmentos de rochas (LOPEZ JIMENO et al., 1995; AYRES DA SILVA, 1997). A medida em que os gases são liberados, ocorre o lançamento dos blocos, promovendo novas fraturas devido à ação de requebramento e choque entre blocos, consumando-se o desmonte de rocha propriamente dito.

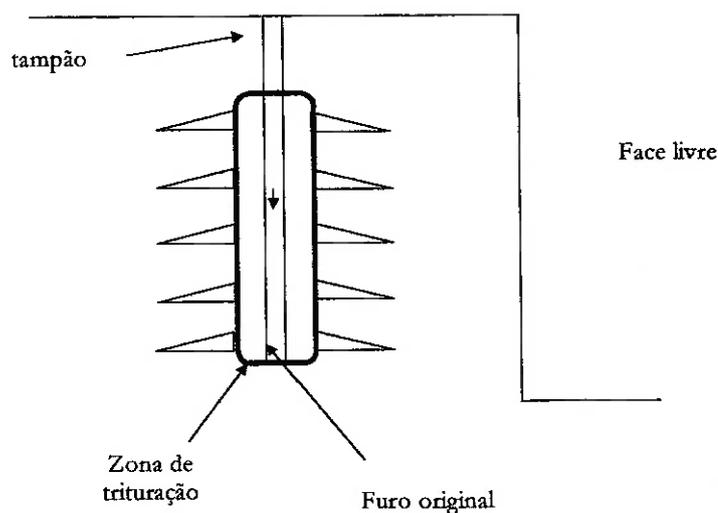


Fig. 2.1.8 - Ação da pressão dos gases (SCOTT, 1996).

Após a passagem da onda compressiva da fase dinâmica, a alta pressão e alta temperatura dos gases produzem um campo de tensão semi-estático na rocha ao redor do furo (KUTTER; FAIRHURST, 1971; MORHARD, 1987; WHITTAKER et al., 1992), tido como estado de equilíbrio semi-estático (LOPEZ JIMENO et al., 1995). Esta fase é considerada mais lenta devido à baixa influência da pressão dos gases da explosão, que se estendem desde as primeiras fendas até a superfície livre e lançamento do material (LANGFORS; KIHLSSTRÖM, 1976).

As fendas radiais produzidas pela fase dinâmica, segundo LOPEZ JIMENO et al. (1995), são prolongadas sob influência das concentrações de tensões em suas extremidades. O número e comprimento das fendas fortemente abertas e desenvolvidas, dependem da pressão dos gases e do escape prematuro pelo tamponamento, bem como pela presença de um plano de fraqueza na face livre que possa ser induzido pela baixa performance da energia explosiva.

O campo de tensão semi-estático é produzido pela pressão dos gases no furo, bem como pelo escape de gás pelo tamponamento (insuficiente), pelas fendas radiais (WHITTAKER et al., 1992) e pelo deslocamento da rocha. SCOTT (1996) se refere ao campo de tensão semi-estático como campo de tensão radial compressivo no maciço rochoso circundante ao furo. Tendo a energia de tensão armazenada, rapidamente liberada originando fraturas de tração e de cisalhamento no maciço rochoso (LOPEZ JIMENO et al., 1995).

A magnitude do campo de tensão semi-estático é menor do que o pico de amplitude da tensão dinâmica da onda de detonação. A resistência estática de tração da rocha é o ponto referencial para a ruptura. Como a resistência estática de tração é menor do que a resistência dinâmica, a tensão semi-estática através da tensão transversal pode iniciar novas fendas radiais. Porém, a teoria mais aceita é que a pressão de gás se propaga através das fendas existentes ao invés de novas fendas (SCOTT, 1996).

É durante a fase semi-estática que surge algumas controvérsias sobre o principal mecanismo de fragmentação. Parte da literatura consideram que todo o sistema de fraturas se distribui por todo o maciço rochoso. A outra parte consideram que o principal processo da fragmentação está apenas se iniciando. Em todos os casos, os gases injetados nas discontinuidades e sistema de fraturas desenvolverão o processo através dos impulsos da detonação que provocam o deslocamento do material (MORHARD, 1987).

O tempo de confinamento da pressão no maciço rochoso varia significativamente dependendo da quantidade e tipo do explosivo, tipo da estrutura rochosa, sistema de fraturas pré-existente, tipo e quantificação de tampão e quantidade de material a desmontar (MORHARD, 1987).

O deslocamento e movimento do material são a última etapa do processo de fragmentação. Ou seja, o principal da fragmentação já foi concluído pelas ondas de tração e de compressão, pressurização dos gases, ou ambos concomitantemente. Porém, um pequeno grau de fragmentação é atribuído, embora lento, à colisão no ar entre fragmentos e choques do material no solo (MORHARD, 1987).

Em rochas de formações sedimentares, por exemplo, quando os planos de acamamento, juntas, etc. possuem diferentes valores dos módulos de elasticidade ou dos parâmetros geomecânicos, a fragmentação é produzida através dos planos de separação devido à passagem da onda de deformação pelos estratos que apresentam valores diferentes (LOPEZ JIMENO et al., 1995).

Durante a propagação da onda de tensão a alta pressão dos gases penetra pelas fendas e induzem o surgimento de fraturamentos do desmonte e fraturamentos naturais no maciço pela ação de cunhas. A ação dessas cunhas tende a dilatar o volume de rocha e remetê-la em direção a face livre. O efeito das cunhas produz esforços de tração sobre a extremidades ou pontas das fendas. Porém, como os gases se propagam através de um sistema de fendas, ao penetrarem, a pressão tende a diminuir. A propagação de fendas será possível desde que a alta pressão dos gases tenha expandido a ponto de estender as fendas tornando-as pouco estáveis. As fendas também podem ser esmagadas devido sua abertura. A rocha adjacente às fendas, sob compressão devido ao efeito de cunha, pode romper por cisalhamento (SCOTT, 1996).

HEMPHILL (1981), por sua vez, considera a fase semi-estática como processo básico da fragmentação de ruptura por flexão, tida como segundo processo da fragmentação de rocha.

A fragmentação por flexão considera que durante e após os mecanismos de fraturamento radial e lascamento (BAUER; CROSBY, 1990), a pressão exercida pelos gases da explosão confinada nas cavidades das fendas radiais ao furo (Fig. 2.1.8) se estendem até a face livre provocando desprendimento e deslocamento da rocha na direção da face livre. Isso faz a rocha atuar como uma viga (ou barra) engastada na base do furo e na área do tampão, como mostrado na fig. 2.1.9, produzindo a deformação e fraturamento pelo fenômeno de flexão (LOPEZ JIMENO et al., 1995). A rocha é flexionada até atingir o limite máximo de tensão de quebra. A rocha rompe segundo a ocorrência de planos de fraqueza: juntas, gretas naturais, camadas, etc. A ruptura de rocha por flexão é análoga ao dobramento (ou arqueamento) e quebra de uma barra. O gás gerado pela detonação é o componente principal para a flexão, tornando-se o item básico da fragmentação (HEMPHILL, 1981).

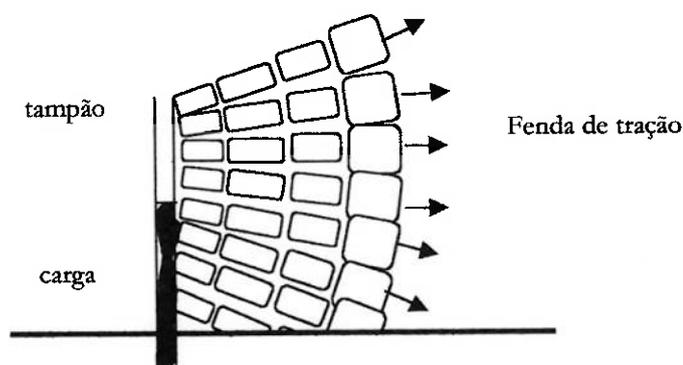


Fig. 2.1.9 – Mecanismo de quebra por flexão (LOPEZ JIMENO et al., 1995).

No processo de fragmentação por flexão, quando há movimentação da superfície frontal, logo ocorre alívio de pressão, provocando aumento da tensão nas fendas primárias, que se inclinam. Em casos de grandes afastamentos, as fendas se estenderão até a superfície livre promovendo o desprendimento total do bloco rochoso. Assim, alcança-se maior efeito por furo/quantidade de carga explosiva, tornando-se importante o estudo da malha e o cálculo de carga explosiva (LOPEZ JIMENO et al., 1995).

Em suma, ROLIM FILHO (1993) e LOPEZ JIMENO et al. (1995) consideram que o processo de fragmentação por explosivos, durante as fases dinâmicas (energia de tensão) e semi-estática (energia dos gases), reúne quatro tipos de fraturamentos característicos:

- (i) fraturas radiais: oriundas de tensões de tração normal aos pulsos de compressão;
- (ii) fraturas tangenciais: por ação cisalhante oriunda de deformações diferenciadas;
- (iii) fraturas paralelas à face livre: por ação das tensões de tração produzidas pelas ondas refletidas na interface rocha-ar;
- (iv) fraturas originadas pela ação combinada: de compressão, tração e flexão.

De modo geral, a fig. 2.1.10 ilustra os mecanismos de fragmentação do maciço rochoso segundo as fases dinâmica e semi-estática descritas acima.

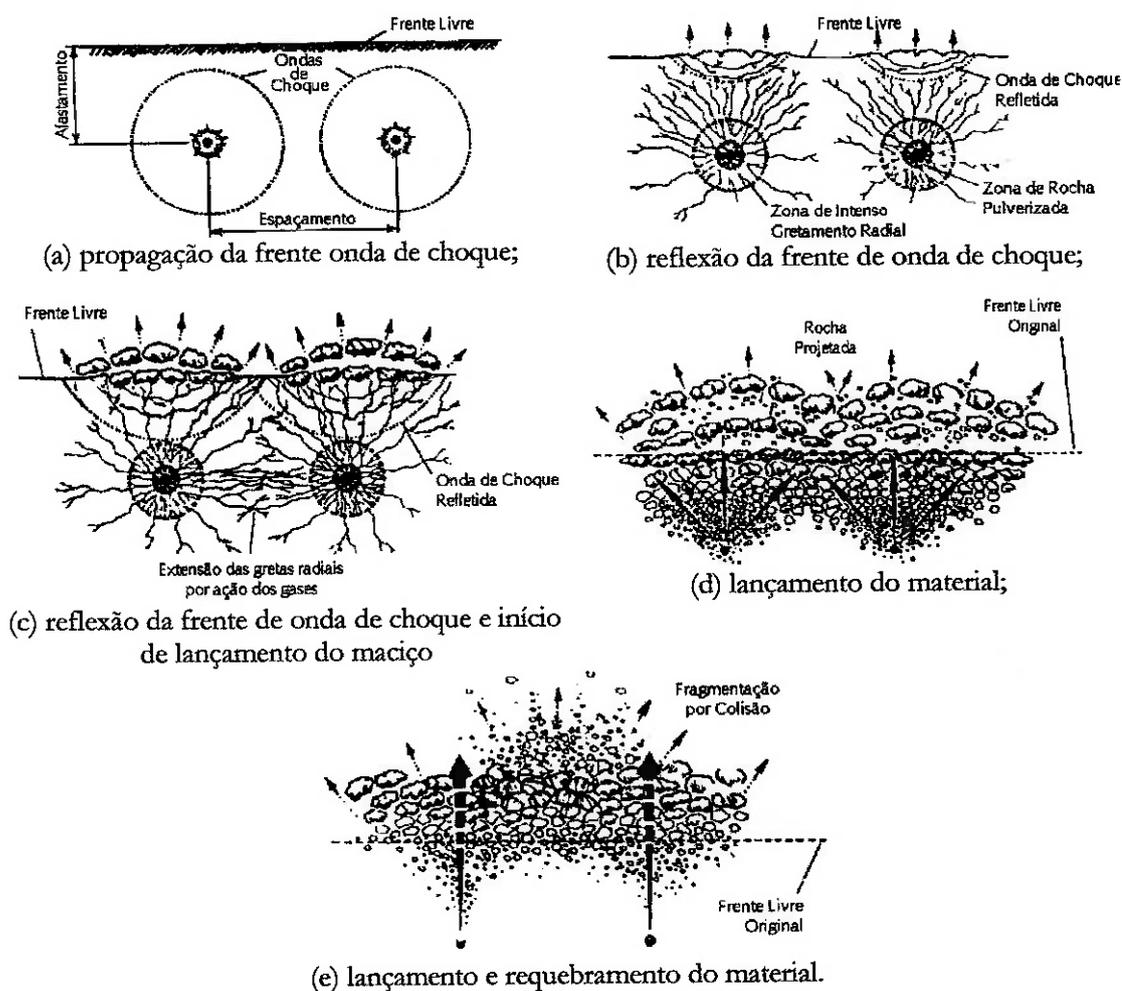


Fig. 2.1.10 - Sequência de desmonte de rochas baseado em mecanismos de fragmentação (MORHARD, 1987; LOPEZ JIMENO et al., 1995; COSTA E SILVA, 1998).

2.1.3 PARTIÇÃO DE ENERGIA NO PROCESSO DE FRAGMENTAÇÃO

O aproveitamento energético em desmontes de rochas por explosivos inicia pelo processo de detonação da carga explosiva através de reação química. Transforma a energia termodinâmica em energia de choque (ondas de deformação), energia dos gases e energia térmica (calor). Apenas as energias cinéticas e potencial realizam trabalho efetivo para o processo de fragmentação. Uma outra forma de energia liberada é através de ruído (SCOTT, 1996).

A fig. 2.1.11 resume o quadro de distribuição das formas de energia empregadas no processo de fragmentação de maciços rochosos em desmonte por explosivos (AYRES DA SILVA, 1997).



Fig. 2.1.11 - Quadro resumo de distribuição energética em desmonte de rochas por explosivos (AYRES DA SILVA, 1997).

A energia cinética é atribuída ao trabalho mecânico das ondas de choque da fase dinâmica relativa ao compartimento do maciço rochoso (trituração, fraturamentos radiais e tangenciais). E a energia potencial ao trabalho mecânico dos gases de detonação da fase semi-estática (separação, movimentação, lançamento dos blocos/fragmentos). A energia associada com a ação da pressão dos gases, é considerada mais "longa", e normalmente chamada de energia de gás do explosivo.

A quantidade de energia presente na onda de choque convertida em ondas de tensão, geralmente é considerada uma pequena fração da energia teórica do explosivo, cerca de 5%-15% (LANGFORS; KIHLSSTRÖM, 1976; SEN, 1995), até 20% (HUDSON, 1993).

Com base em soluções teóricas a partir do princípio da conservação da energia, em fragmentação de rochas a energia é absorvida na forma de fricção, calor e fraturamento (KUTTER; FAIRHURST, 1971). O mecanismo de fragmentação por esmagamento, por exemplo, consome cerca de 30% da energia de propagação da onda de deformação. Isto corresponde a 0,1% do volume total da energia efetiva de fragmentação por furo (LOPEZ JIMENO et al., 1995).

O entendimento do fenômeno de geração de fraturas, provocado pelo processo de fragmentação em desmonte por explosivos, conforme descrito acima, é um parâmetro importante para se idealizar o particionamento da energia durante a detonação de um furo. Pode ser ilustrado a partir do diagrama de um furo pressurizado versus o volume de

expansão do gás ($p \times v$) ou versus o período da expansão ($p \times t$). O diagrama se baseia em modelo simplificado de interação explosivo - rocha (WHITTAKER et al., 1992; SCOTT, 1996).

Modelos de partição de energia apresentados por WHITTAKER et al (1992) e por SCOTT (1996), consideram o particionamento da energia desde o estado inicial da explosão até o gás alcançar uma face livre. Ao atingir a face livre, a pressão dos gases e da temperatura diminuem abaixo da pressão atmosférica e da temperatura ambiente, respectivamente.

A fig. 2.1.12 ilustra o particionamento da energia de detonação de um furo com base nas fases de fragmentação (dinâmica e semi-estática).

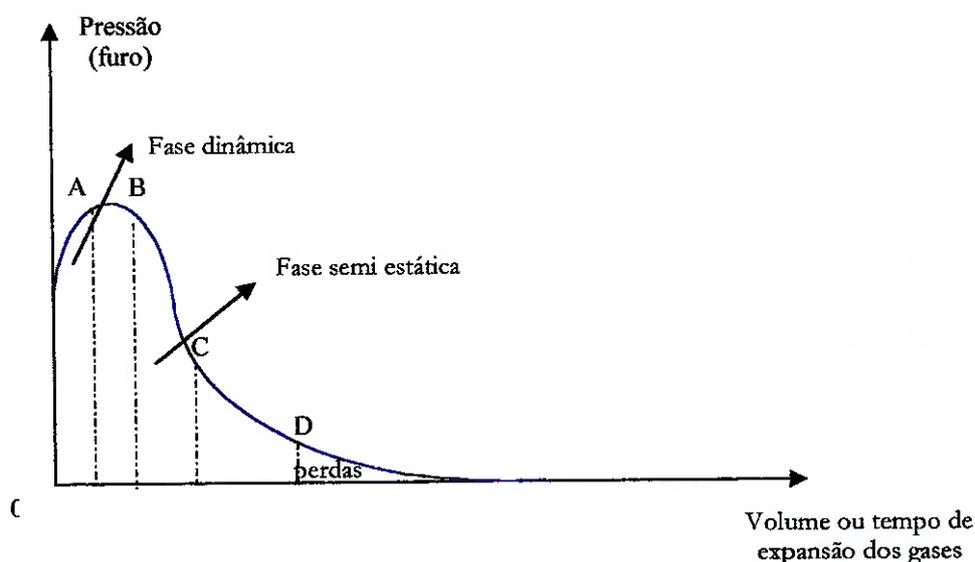


Fig. 2.1.12 - Modelo de partição de energia da detonação de um furo baseado nas fases de fragmentação.

A partir da detonação da carga explosiva, ponto 0, sem expansão de gases até a ignição do explosivo via reação exotérmica, configura o início da fase dinâmica. Nesta fase, ondas de choque são geradas pela coluna explosiva, desta, é propagada pelo maciço através de frente de onda de deformação. Ao alcançar pressão máxima no ponto A com a progressão da reação química do explosivo, finda a fase dinâmica no ponto B. A energia consumida nesta fase é utilizada na expansão do volume inicial do furo, na produção da zona de trituração, de gretas radiais, de lascamento da frente livre e início de compartimentação do maciço devido a reflexão das ondas de deformação.

Com a decompressão da fase dinâmica, do ponto B para o ponto C, é estabelecido um estado de equilíbrio devido a expansão dos gases da detonação pelo volume expandido do furo e pelas fendas radiais provocadas pela passagem da frente de onda de deformação da fase dinâmica. Com isso, se inicia a fase semi-estática. A energia de deformação com a propagação da frente de onda é estimada em 2-20% da energia da carga explosiva.

Com a progressiva expansão dos gases, denominada energia de expansão dos gases, é concluída a fase semi-estática no ponto C. A energia consumida nesta fase corresponde a 40% da energia total do explosivo. A energia é utilizada no destendimento das fraturas existentes e nos esforços hidráulicos (cunhas de empurrão) de compressão para desprendimento e deslocamento da rocha.

A partir do ponto D, o excesso da expansão dos gases será liberado para atmosfera através das fendas geradas, pela boca do furo e pelo tamponamento ineficiente. Esta etapa resulta em ultralançamentos de fragmentos de rocha, vibração de terreno, sobrepressão atmosférica, calor, poeiras e gases, etc. O consumo de energia corresponde a 40-60% da energia total do explosivo.

Enfim, a energia produzida por uma carga explosiva está condicionada as suas características termodinâmicas que, por sua vez, depende de sua composição, produtos de reação e do calor de formação das substâncias envolvidas. É expressa na unidade de MJ/kg (ESTON, 1998). Em outras palavras, razão de carregamento, termo energético usualmente correlacionado aos altos explosivos à base de nitrato de amônio (emulsões, gels e lamas), refere à energia liberada pelo explosivo. Este fator indica a quantidade de energia de explosão associada à fragmentação a um dado volume de rocha. Dependendo do tipo de rocha e do diâmetro do furo, o fator de energia pode variar de 0,9 a 2,3 MJ/m³ (SEN, 1995).

2.2 MECANISMOS DE FRAGMENTAÇÃO EM DESMONTE ELETROHIDRÁULICO

A aplicação do princípio eletrohidráulico em atividades de mineração é referenciada na literatura internacional através de trabalhos experimentais e protótipos industriais. São pesquisas aplicadas para britagem, perfuração e desmonte secundário de rochas, utilizando vários tipos de rochas, como: folhelhos, sílex, arenitos, calcários, mármore e granitos, e em amostras de concreto (BERGSTROM, 1961; MAURER, 1968; KUTTER, 1969;

KITZINGER et al, 1992; NANTEL; KITZINGER, 1992a e 1992b; HAMELIN et al., 1993; KLICH; RES, 1996).

Segundo KUTTER (1969), o pioneirismo do uso do efeito eletrohidráulico para finalidades mineiras, ocorreu em experimentos de perfuração de rochas em escalas de laboratório realizados por YUTKIN et al. (1955), e de cominuição realizados por BERGSTROM (1961). HAMELIN et al. (1993) ainda destacam o trabalho de KENNEDY (1971) referente à fragmentação de rocha.

A corrida pela aplicação do efeito eletrohidráulico para atividades de mineração, deu-se durante as décadas de 50, 60 e 70. Na época, os esforços em pesquisas tecnológicas para a indústria mineral foram dirigidos para escavações por métodos contínuos, para rochas de elevada dureza cujo enfoque básico era o grande apelo econômico, de segurança e manuseio (HAMELIN et al., 1993).

BERGSTROM (1961) destaca o interesse de uso do efeito eletrohidráulico pelo Instituto de Mineração da ex-União Soviética desde 1955. A partir de estudos preliminares realizados pelo Prof. L. A. Yutkin do Instituto Politécnico de Leningrado, as pesquisas resultaram em patente em 1958. Porém, o autor ressalta as pesquisas experimentais realizadas desde 1952 pelo Laboratório de Pesquisa da Allis-Chalmers Manufacturing Corp., Milwaukee-USA.

O efeito eletrohidráulico para quebra de rochas ocorre por descargas elétricas subaquáticas. Pulsos de alta tensão se propagam na rocha causando sua fragmentação. Um potente feixe de elétrons, quase que instantaneamente, pode penetrar na rocha, fundir e fragmentar (SEGSWORTH; KUHN, 1977).

A energia elétrica pode ser usada para fragmentar rocha em número de diferentes caminhos (INOUE et al., 2000). Sob circunstâncias especiais, pode substituir com sucesso o explosivo químico para desmonte de rochas (NANTEL; KITZINGER, 1992a).

Para desmonte de rochas, especificamente, MAURER (1968) menciona o uso do efeito eletrohidráulico aos experimentos realizados por EPSHTEYN et al. (1960). Foi empregado através de centelhamento ("spark") de alta tensão imersos em água para ruptura simples (split) de grandes blocos de granito, calcário e outras rochas, resultantes de desmonte primário. Para isso, foi desenvolvido um sistema denominado de fragmentador eletrohidráulico, ilustrado na fig. 2.2.1.

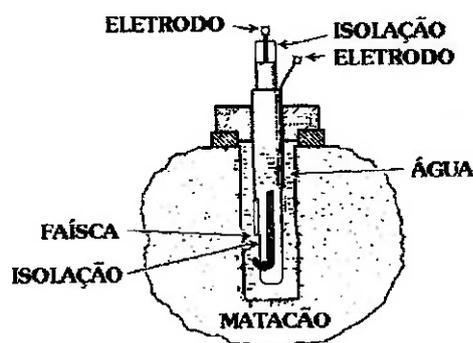


Fig. 2.2.1 - Fragmentador eletrohidráulico (EPSHTEYN et al., 1960 apud MAURER, 1968).

O fragmentador é acionado em pequeno furo perfurado na rocha (bloco) preenchido com água, gerando altas tensões de tração circundante ao furo. Para ruptura de um bloco de granito ou outras rochas, de 1m^3 , por exemplo, foi utilizada capacitância de $4,5\mu\text{F}$ em tensão de carregamento de 65kV . A fragmentação ocorreu sem lançamento de fragmentos, assim, eliminando um dos maiores problemas do desmonte secundário. A energia específica requerida para ruptura de blocos de granito de 1m varia de $0,2$ a $0,5$ J/cm^3 .

No estudo sobre o efeito eletrohidráulico realizado por KUTTER (1969), o princípio eletrohidráulico foi aplicado através de descarga elétrica por centelhamento subaquáticas para gerar um canal de gás ionizado entre os eletrodos (submersos), e portanto, produzir um canal plasmático entre estes (eletrodos). A expansão do canal plasmático provoca uma pressão de impacto explosivo no meio aquoso, circundante a rocha, através de bolhas e vapores gerados que ocasionam fraturas e a quebra da mesma. Quando ocorre centelhamento no ar, a energia gerada é insuficiente para a quebra da rocha, permitindo a expansão da centelha sem criar nível de pressão de quebra suficiente. O circuito gerador de descarga elétrica empregado, mostrado na fig. 2.2.2, consiste de uma fonte de potência alimentado por um capacitor de alta tensão, um circuito de gatilhamento responsável pela liberação da descarga de energia elétrica armazenada, e por vários mecanismos de registros de tensão e de corrente.

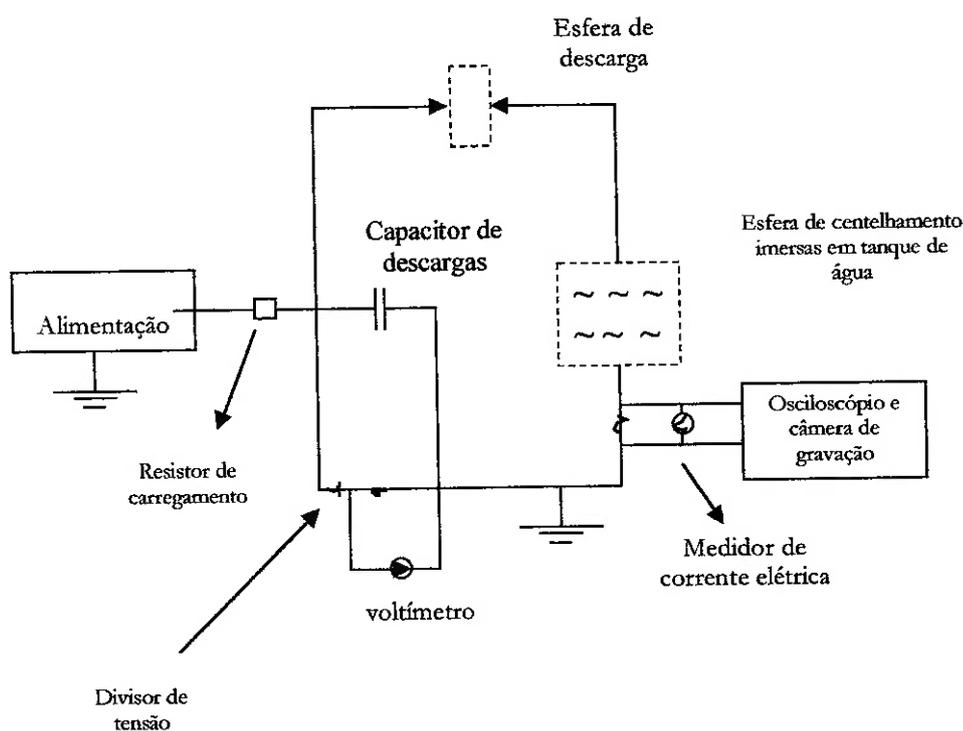


Fig. 2.2.2 - Diagrama esquemático do circuito elétrico de descarga para fragmentação de rochas (KUTTER, 1969).

De acordo com KUTTER (1969) e STELLIN JÚNIOR et al. (1997), a energia total (E) liberada para o centelhamento é proporcional a capacitância (μF) multiplicada pela tensão de carregamento (kV) ao quadrado.

$$E = \frac{1}{2} C V_o^2 \quad (2.2.1)$$

C – capacitância (μF);

V_o – tensão de carregamento (kV).

KUTTER; FAIRHURST (1971) empregaram o princípio eletrohidráulico através de descarga submersas de alta tensão, com o objetivo de estimar o efeito da onda de tensão, separado da fase semi-estática, atuante no desmonte convencional, envolvida pelo complicado processo de geração de fraturas por ondas dinâmicas. Para tanto, foi reproduzida a pressão de pico da fase dinâmica utilizando o efeito eletrohidráulico como fonte explosiva não-química para gerar a onda explosiva. A atuação do efeito eletrohidráulico seguiu o mesmo princípio de ação para ruptura e fragmentação de grandes blocos de rochas conforme descrito na literatura.

Quando uma centelha de alta tensão é descarregada entre o espaçamento do eletrodo, um plasma e um canal de vapor é formado entre os eletrodos. Este canal expande muito rapidamente por causa do campo elétrico concentrado e pela temperatura muito elevada desenvolvida no canal de centelhamento. Em volta do meio perturbado pelas paredes do canal gerado, é produzido um pico de pressão que aumenta com a densidade do meio circundante. No entanto, para produzir pressões de alta explosão, as esferas centelhadoras são submersas em água (meio incompressível). Os picos de pressão, por sua vez, alteram não apenas com a densidade do meio, mas também com a largura das esferas, com a tensão de descarga e outros parâmetros elétricos do circuito gerador das descargas (KUTTER; FAIRHURST, 1971).

KITZINGER et al. (1992), NANTEL; KITZINGER (1992a e 1992b) e HAMELIN et al. (1993), mais tarde, desenvolveram a tecnologia denominada "Plasma Blasting Technology - PBT" para desmonte secundário e protótipos industriais de mineradores contínuas para trabalhos em subsolo. Utilizaram o princípio eletrohidráulico para rochas de dureza elevada (140 MPa a 340 MPa) de 3 a 18 t.

No processo de desmonte por plasma (PBT), ilustrado na Fig. 2.2.3, a energia elétrica é armazenada em um banco de capacitores, e liberada na forma de descarga elétrica de alta corrente através de uma sonda (eletrodo coaxial) em uma pequena quantidade de eletrólito confinado em um furo na rocha previamente perfurado. A ruptura elétrica da corrente que ocorre entre 2 eletrodos, imersos no eletrólito, estabelece um canal de plasma de alta temperatura e alta pressão nos primeiros microssegundos (50-150 μ s) da explosão (HAMELIN et al, 1993). A princípio, ocorrem elevações da temperatura e da pressão, enquanto o volume plasmático permanece constante devido ao estado de confinamento inercial. Sob estas condições, os componentes são completamente dissociados formados o referido plasma (NANTEL; KITZINGER, 1992a).

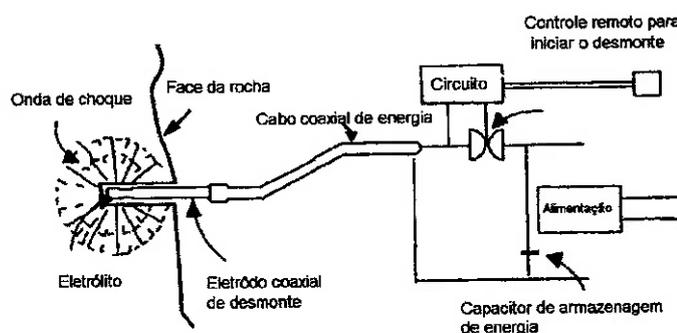


Fig. 2.2.3 – Diagrama esquemático do equipamento *Plasma Blasting* (NANTEL; KITZINGER, 1992b).

A pressão é desenvolvida nas proximidades do canal de plasma devido à rápida expansão de vapor quente do eletrólito ionizado. Este processo é contínuo durante aproximadamente um décimo de milissegundos, devido à dissipação da energia elétrica no canal plasmático. Como a rápida expansão do gás colide no material em volta do furo, ocasiona uma altíssima pressão sobre as paredes do furo gerando uma frente de onda de choque provocando um campo de tensão que, juntamente com a propagação de fendas na zona de explosão, são responsáveis pela fragmentação da rocha (HAMELIN et al., 1993).

Com base em medições indiretas, o nível de pressão pode exceder 2 GPa, suficiente para fraturar rochas duras. A razão típica de energia liberada no eletrólito pode ultrapassar 200 MW/ μ s, e atinge o pico de máxima potência de 3,5 GW (NANTEL; KITZINGER, 1992b).

De acordo com HAMELIN et al. (1993), os experimentos do sistema PBT mostraram que a intensidade do desmorte cresce linearmente com o aumento da energia elétrica fornecida. E a eficiência média de energia fornecida pelo sistema de desmorte por plasma é 60%. Cerca de 40% da energia fornecida é consumido pelos componentes do circuito, geração de calor e pequena fração de ruído.

KUTTER (1969) e HAMELIN et al. (1993) ressaltam a distinção entre a energia armazenada (nominal) e a energia liberada para gerar o plasma (efetiva). Pois, na prática, parte da energia armazenada no banco de capacitores é dissipada nos componentes de transmissão do circuito durante a descarga, proporcional as respectivas resistências (KUTTER, 1969), e que não chega alcançar a rocha. Assim, a expressão 2.2.1 será dada por:

$$E_{\text{centelhamento}} = \frac{1}{2} CV_o \left(\frac{R_{\text{centelha}}}{R_{\text{total}}} \right) \quad (2.2.2)$$

Onde:

R_{centelha} – resistência do centelhamento;

R_{total} – resistência total do circuito.

O eletrólito utilizado no processo de desmorte por plasma (PBT), como meio líquido das descargas elétricas, é composto por uma solução eletrolítica de sulfato de cobre (SO_4Cu_2) a 5%, adicionado com bentonita (NANTEL; KITZINGER, 1992b).

KLICH; RES (1996) aplicaram o efeito eletrohidráulico para quebra de grandes blocos de rochas e de concreto. Justificando o desenvolvimento da tecnologia juntamente

com método de perfuração com jato d'água de alta pressão, devido aos inconvenientes dos métodos tradicionais, crescente demanda de vários tipos de rochas, altos custos de mineração e situações que requer cuidados ambientais e de segurança da população circunvizinha e operadores. Por isso, partiram para investigar métodos físicos para mineração de rochas, especificamente, o método eletrofísico de quebra, denominado "Electro-hydraulic Method-EHD".

O método EHD também apresenta como princípio básico a criação de uma onda de choque a partir de impulso de curta duração (10^{-4} s) de elevada corrente elétrica em um meio líquido. O impulso praticamente não gera gases pós-detonação. A grande concentração de energia provoca enorme pressão destruidora que não se expande para zonas circunvizinhas.

A fig. 2.2.4 mostra o diagrama esquemático da tecnologia EHD desenvolvida para desmonte secundário de rochas de grandes blocos (3 - 6t) e materiais homogêneos como concretos. O princípio de aplicação do equipamento desenvolvido, consiste da introdução de um eletrodo em um meio líquido que preenche o furo de detonação perfurado na rocha. O eletrodo é alimentado com uma corrente de alta tensão que causa a ruptura do líquido e cria um canal plasmático. A expansão do canal gera uma onda de choque que aumenta a pressão do furo, ocasionando a ruptura da rocha. Os principais condicionantes que norteiam a quebra da rocha são: tensão de alimentação do circuito; tipo de rocha a ser fragmentada; volume da rocha; profundidade do furo e percentagem natural de material argiloso na rocha.

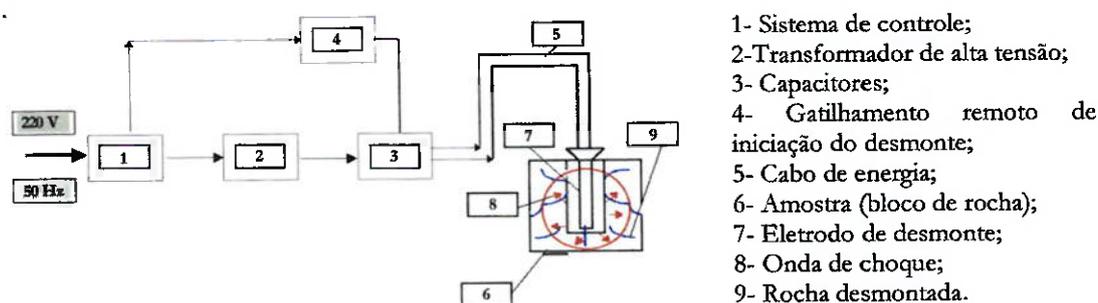


Fig. 2.2.4 – Diagrama esquemático do método eletro-hidráulica EHD (KLICH; RES, 1996).

O processo de desmonte por plasma, comparado com o desmonte convencional (químico), gera menos gases (HAMELIN et al., 1993). Este fato se reflete nos mecanismos

de fragmentação e nos aspectos ambientais. A ausência de grandes quantidades de gases, sugere afirmar, baseado na literatura, que o poder de destruição induzido à rocha, é resultante, principalmente, da intensidade da onda de choque gerada na extremidade da sonda de desmonte (eletrodo). Nos milisegundos iniciais após a descarga (explosão), os fragmentos são sempre empurrados do ponto de impacto no momento de transferência da expansão do plasma, com os gases surgindo para fazer a função marginal na ejeção dos fragmentos.

Por outro lado, a falta de co-produtos gasosos representa vantagens ambientais do método quanto à minimização de vibração do terreno e ultralancamento de rocha, além de da redução de fumos tóxicos para trabalhos em subsolo (HAMELIN et al., 1993).

Ao contrário do desmonte convencional que produz grandes explosões, o desmonte por plasma é uma tecnologia de processo de baixo consumo de energia, pois, requer pouca energia para remover a rocha fragmentada. No entanto, HAMELIN et al. (1993) consideram que a fração de energia fornecida resulta em pouca energia cinética residual dos fragmentos, que por sua vez, não compromete o balanço de energia total do sistema.

A abordagem dos mecanismos de fragmentação apresentada neste capítulo, reuniu variáveis e condicionantes tecnológicos do processo de fragmentação de rochas intrínsecos ao entendimento do princípio eletrohidráulico aplicado a desmonte de rochas. Outrossim, o mesmo alicerça a estruturação do próximo capítulo, Capítulo 3, quanto ao estudo dos processos de ruptura e de fragmentação de rochas baseados em teorias e em modelos energéticos geomecânicos eletro-dinâmicos.

3 ESTUDOS GEOMECÂNICOS SOBRE RUPTURA E FRAGMENTAÇÃO DE ROCHAS

Os estudos geomecânicos relacionam teorias, modelos e critérios das propriedades mecânicas das rochas intrínsecos aos mecanismos de ruptura e de fragmentação sob processos estáticos e dinâmicos.

A determinação da energia necessária à fragmentação de rochas para várias faixas de tamanhos de material é tida como “antiga aspiração” de estudiosos do assunto. Isto se deve ao consumo de energia no processo de fragmentação (KELLY; SPOOTWOOD, 1982; WILLS, 1985; LUZ et al., 1998).

WHITTAKER et al. (1992) afirmam que a fragmentação por desmonte convencional dá-se através de processo dinâmico, ao invés de processo estático. Neste contexto, comparado ao desmonte convencional, HAMELIN et al. (1993) observaram que o processo de desmonte por plasma gera menos gases. Consequentemente, pode-se considerar que o desmonte de rochas baseado no princípio eletrohidráulico, basicamente, é realizado por processo dinâmico de ruptura e/ou de fragmentação.

Os mecanismos dinâmicos de fragmentação em desmonte convencional são divididos em termos de eventos (ou fases) de curta duração, esforço dinâmico do furo pela energia de choque do explosivo, fase de pressão de gás que depende do explosivo, propriedades da rocha e grau de confinamento (SCOTT, 1996).

Os mecanismos de ruptura dinâmica, segundo SCOTT (1996), são pouco conhecidos devido aos desafios envolvidos em estudos de alta intensidade de energia em eventos de fragmentação de curtíssima duração. E justifica que a rocha é um material complexo de engenharia devido sua variabilidade em: composição, estrutura e gênese. Outrossim, ressalta que as propriedades estáticas da rocha são bem tratadas em termos estatísticos do que em valores absolutos, enquanto que, as propriedades dinâmicas são menos definidas, o que leva parte dos vários mecanismos de fragmentação serem pouco conhecidos.

Para estudar as fases de fragmentação separadamente, KUTTER; FAIRHURST (1971) utilizaram o efeito eletrohidráulico como referência da fase dinâmica, no tocante a ação da onda de choque. Com os esforços ocasionados em cada fase, dinâmica e semi-

estática, os autores observaram o processo de fragmentação, desde o surgimento de fendas até a propagação das fraturas. Todavia, a fase dinâmica foi estudada de forma empírica utilizando como amostra material sintético (polímeros), cuja sua resistência de compressão é próxima (ou igual) a sua resistência de tração. Conseqüentemente, os mecanismos de fragmentação por reflexão são certamente esperados a serem apresentados pelas zonas de fendamentos, de fraturas radiais e de fragmentação (zona elástica).

Ao contrário do desmonte convencional que produz grandes explosões, o desmonte por plasma é uma tecnologia de processo de baixo consumo de energia, devido a pequena quantidade de trabalho para remover a rocha fragmentada. É possivelmente, em virtude da ausência da fase semi-estática de pressurização dos gases. Todavia, HAMELIN et al (1993) consideram que a fração de energia fornecida resulta em pouca energia cinética residual dos fragmentos, que por sua vez, não compromete o balanço de energia total do sistema.

Deste contexto, o presente Item tratará de teorias, conceitos e considerações geomecânicas considerando: as implicações anisotrópicas dos materiais rochosos; os processos e teorias de ruptura de rochas; e descrição de teorias de energia relacionadas a processos dinâmicos de ruptura e/ou fragmentação de rochas. Visa obter expressão e valores de energia geomecânica (E_G) de ruptura que serão reproduzidos pelo Gerador de Impulso de Alta Corrente nos ensaios de desmonte eletrohidráulicos – escala de laboratório. Este item também compreende a descrição do mecanismo de ruptura e/ou de fragmentação de desmonte eletrohidráulico do modelo tecnológico ora proposto.

3.1 INFLUÊNCIA DA ANISOTROPIA NAS PROPRIEDADES GEOMECÂNICAS DAS ROCHAS

Anisotropia se refere a propriedade que varia segundo a orientação em relação a um dado sistema de eixos (BRANCO, 1994). A maioria das rochas são anisotrópicas devido as variações de suas propriedades mecânicas com a direção (HUDSON, 1993). Trata-se de variações causadas por acamamentos, planos de xistosidades, foliações, fissuramentos e juntas (AMADEI; STEPHANSSON, 1997). BRADY; BROWN (1993) também atribuem o comportamento anisotrópico de muitas rochas a algumas orientações preferenciais apresentadas pelo material rochoso, sejam de microestrutura, ou sejam devido a presença de acamamento ou a presença de planos de clivagem. Em rocha intacta a anisotropia é

muito menos pronunciada do que em maciço rochoso devido as fissuras e juntas de orientações preferenciais (HUDSON, 1993).

CHERNYSHEV; DEARMAN (1991) definem descontinuidades como um termo coletivo para todos os tipos de juntas, planos de acamamento, planos de xistosidades, planos de cisalhamento, falhas e contatos.

A anisotropia é uma característica geral de rochas metamórficas foliadas (xistos, gnaisses e filitos), rochas sedimentares estratificadas (folhelhos, calcários, arenitos e carvão), e rochas cortadas por um ou mais sistemas de juntas fechadas. Todas essas rochas dispõem claras evidências de anisotropia mostradas em uma ou mais direções aparentes de simetria. Normalmente, a ortotropia e a isotropia transversa são usadas para descrever a simetria de rochas anisotrópicas (AMADEI; STEPHANSSON, 1997). Tais variações em relação as direções apresentadas por rochas sedimentares e por rochas foliadas, podem ser identificadas a partir das tensões e propriedades elásticas. Visto que, esforços de tração e compressão e módulos de elasticidade são geralmente menores em direções perpendiculares a acamamentos ou foliações, do que em direções paralelas, apresentadas pela maior partes das rochas (OBERT; DUVALL, 1967).

A isotropia transversa é mais usada para descrever a simetria das rochas com um sistema dominante de camadas, algumas como rochas foliadas e rochas sedimentares ou, como maciços rochosos com um sistema de juntas predominante (AMADEI; STEPHANSSON, 1997).

As juntas são definidas como fendas (ou gretas) ou fraturas em rochas, ao longo das quais se apresentam pequenas ou não deslocadas (JAEGER; COOK, 1976). As fendas ou fraturas, geralmente ocorrem em grupos, mais ou menos paralelas, e regularmente espaçadas em diferentes direções. As juntas podem ocorrer em várias escalas, e espaçadas de alguns metros à escala microscópica (JAEGER; COOK, 1976).

Todas as rochas tem algum tipo de descontinuidade (JAEGER; COOK, 1976). As rochas sedimentares possuem um fabric deposicional primário, do qual as camadas é na maior parte das vezes o elemento evidente. Porém, outros elementos podem ter sido produzidos pelas correntes de água (transposicionais).

Os estudos petrofábrics abrangem todos elementos de *fabric*: (microscópicos e macroscópicos) sob todas as escalas. Os elementos microscópicos e características de espaçamentos fechados, alguns como fratura em forma de clivagem apresentadas em carvão, são considerados determinantes em elementos de *fabric* entre juntas. Isto produz

anisotropia entre as propriedades elásticas e de resistência dos elementos da rocha (JAEGER; COOK, 1976).

Os estudos de fabric são melhor realizados quando associam medidas petrofabrics e mecânicas. Esta combinação tem a vantagem de ser considerado como padrão anisotrópico de rochas (JAEGER; COOK, 1976). Todavia, estudo completo de *fabric* de juntas e de fraturas em todas as escalas, frequentemente, é usado para indicar as direções das tensões principais, bem como fabric de grande escala do maciço rochoso como um todo (JAEGER; COOK, 1976).

LADEIRA (1976) considera que, a maior parte das rochas sedimentares e metamórficas são anisotrópicas, devido as características atribuídas a gênese das rochas e as disposições preferenciais orientadas dos minerais constituintes, na maior parte dos casos planares. Este fato pode ser notado nas diaclases apresentadas pelas rochas, onde as orientações preferenciais identificadas nos maciços rochosos imprimem uma anisotropia marcante.

GOODMAN (1989) denomina de anisotropia de resistência, a variação da resistência de compressão segundo a direção principal de tensão. E ressalta que, a anisotropia forte é característica de rochas compostas por planos paralelos de minerais de forma achatada como micas, cloritas e argilas, ou por minerais longos como hornblenda. Nestes casos, rochas metamórficas, especialmente xistosas e ardósias, seguem comportamentos marcadamente direcionais.

Em casos de intercalações compostas por diferentes constituintes mineralógicos, a anisotropia também se faz presente, tais como em alternações: arenito/folhelho, sílex/folhelho e ganaises bandeados. Estas feições também implicam em variações contínuas na resistência mecânica segundo uma direção, demonstrando mínima nitidez quando os planos de simetria da rocha são oblíquos a maior tensão principal (GOODMAN, 1989).

Maciços rochosos delineados por grupos de juntas também manifestam anisotropia de resistência, exceto quando os planos de juntas encontram-se inferior a 30° da normal a direção de maior tensão principal. Em suma, a resistência quando o esforço aplicado é paralelo a clivagem, xistosidade ou acamamento, geralmente é maior do que quando a resistência é perpendicular ao esforço aplicado aos planos de fraqueza (GOODMAN, 1989).

LADEIRA (1976) atribui as anisotropias mecânicas das rochas como consequência de seu passado geológico, em particular, a tectônica que promovera o surgimento de

estruturas planares de menor resistência à deformação e à ruptura. O autor distingue a anisotropia em dois tipos:

- 1 - anisotropia primária - relacionada aos processos genéticos das rochas;
- 2 - anisotropia secundária - relacionadas aos aspectos tectônicos ou aos agentes atmosféricos.

ROLIM FILHO (1993) e AYRES DA SILVA (1993), tratam os maciços rochosos como um conjunto de blocos monolíticos de rochas, separados por imperfeições geológicas, e que incluem, além do tipo litológico, todas as suas descontinuidades (sistemas de diáclases, planos de acamamento, xistosidades e falhas).

Todas as rochas encontradas na natureza possuem algum tipo de descontinuidade, microfissuras, macrofissuras, ou ambas. Influenciam nas propriedades físicas e mecânicas das rochas e, conseqüentemente, nos resultados do desmonte de rochas (JIMENO et al., 1995).

A Associação Internacional de Mecânica de Rochas (ISRM), segundo AYRES DA SILVA (1993), propôs a definição de descontinuidades como sendo “termo geral para qualquer descontinuidade mecânica em maciço rochoso, que apresenta baixa ou nenhuma resistência à tração”. O termo abrange a maioria dos tipos de diáclases, juntas, planos de fraqueza de acamamentos, planos de fraqueza das xistosidades, zonas de alteração ou falhas.

As áreas de descontinuidades podem variar entre: planos de acamamento, planos de laminação e de foliações primárias, planos de xistosidades, fraturas e juntas (LOPEZ JIMENO et al., 1995).

As descontinuidades podem ser firmes, abertas ou preenchidas. Por esta razão, podem exibir diferentes graus de transmissão de energia do explosivo. As paredes destas descontinuidades podem até se comportar como superfícies de reflexão de ondas, permitindo a atenuação ou a dispersão destas (LOPEZ JIMENO et al., 1995).

Em estruturas descontínuas como as juntas (fechadas e de baixa coesão), a incapacidade de transmissão de tensão de tração se deve a moderada intensidade de reflexão das ondas de choque, atribuída a diminuição das alterações entre as ondas incidentes e as ondas refletidas (ROLIM FILHO, 1993).

A criação de novas fraturas em juntas abertas ou fechadas, depende da qualidade físico-mecânica da superfície subsequente que esteja na trajetória da onda de choque. Como a taxa de energia dinâmica transmitida através dessas interfaces geralmente é muito

baixa, a propagação de fraturas além da junta, só é possível quando existem microfissuras no bloco subsequente, que por sua vez, se propagam com reduzidas taxas energéticas transmitidas (ROLIM FILHO, 1993).

Segundo LADEIRA (1976), a fragmentação dos maciços rochosos está condicionada a interação energia do explosivo - rocha. Isto se reflete na eficiência e rendimento dos desmontes com explosivos. Para isso, é necessário localizar e descrever as discontinuidades do referido maciço à escala da obra, ou apenas do local da obra. Portanto, a escala das obras associada as discontinuidades do maciço pode ser:

- juntas de estratificação, pseudo-estratificação ou laminação;
- xistosidade;
- diaclases (fraturas sem movimento aparente);
- falhas (fraturas com movimento).

Os parâmetros associados às discontinuidades dos maciços podem ser agrupados nas seguintes propriedades (BRADY; BROWN, 1993):

a) **orientação das discontinuidades** (ou atitude de uma discontinuidade no espaço): definida geometricamente por seu rumo e mergulho ou pela orientação do mergulho, e mergulho mostrados na fig. 3.1.1. A projeção estereográfica é uma poderosa ferramenta para determinação das principais famílias de juntas, bem como suas orientações e mergulhos.

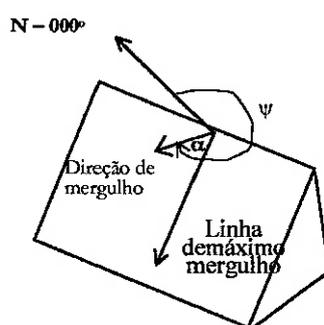


Fig. 3.1.1 Definição de direção de mergulho (ψ) e ângulo de mergulho (α).

b) **espaçamento**: distância perpendicular à direção das juntas adjacentes. O espaçamento define o tamanho dos blocos, influi na forma de ruptura do maciço e tem forte influência na permeabilidade do maciço e nas características de infiltração de água (Fig. 3.2). Em classificação de maciços rochosos para finalidades de engenharia, bem como em diversos esquemas de classificação de maciços rochosos, é comum a citação de valores em termos

de RQD (“*Rock Quality Designation*”), conceito introduzido por DEERE (1968), numa tentativa de quantificar espaçamento descontínuo

c) **abertura**: distância perpendicular que separa as paredes adjacentes de uma descontinuidade aberta, na qual o espaço intermediário contém ar ou água conforme ilustrado na fig. 3.1.2. Também pode ser definido a partir da largura de uma descontinuidade. A fig. 3.1.2 (b e c) mostra aberturas largas que podem ser resultantes de deslocamento cisalhante de descontinuidades de apreciável rugosidade, banhado por materiais de preenchimento, por soluções ou por aberturas extensas. Sua influência é evidente sobre a resistência de cisalhamento da descontinuidade, bem como na verificação da permeabilidade ou condutividade hidráulica da descontinuidade e do maciço rochoso.

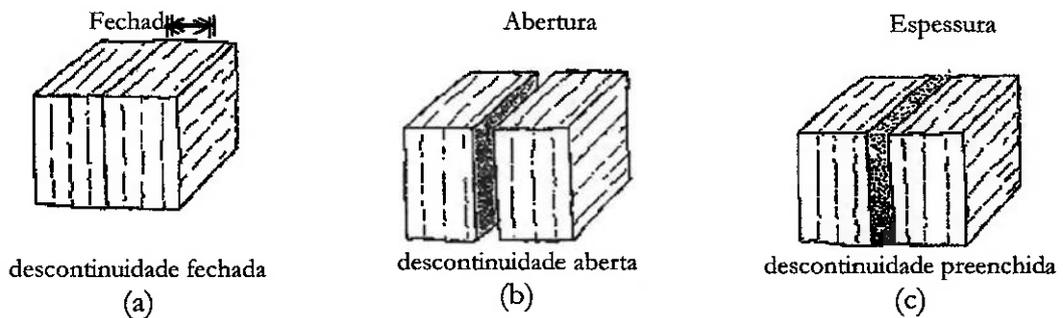


Fig. 3.1.2 Propriedade de abertura de descontinuidades conforme a ISRM (BRADY; BROWN, 1993).

d) **persistência**: extensão com que uma descontinuidade se manifesta, ou, termo usado para descrever a extensão da superfície ou tamanho de uma descontinuidade com um plano. É caracterizada pelo traço da descontinuidade em um plano que a intercepta, e quando obtida em três direções define a área da descontinuidade (Fig. 3.1.3). Pode ser uma característica das famílias de juntas, tendo uma família maior persistência que outra. Esta propriedade tem grande influência sobre a resistência de cisalhamento desenvolvida no plano de descontinuidade e sobre as características de fragmentação, estabilidade (cavabilidade) e permeabilidade do maciço rochoso.

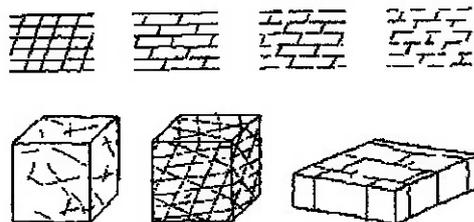


Fig. 3.1.3 Ilustração da propriedade de descontinuidade de persistência (BRADY; BROWN, 1993).

- e) **rugosidade**: caracterizada por um denteamento (grande escala) ou por uma aspereza (pequena escala) que tende a ser eliminada durante os deslocamentos por cisalhamento entre paredes de uma descontinuidade. Potencialmente, é um componente importante de resistência ao cisalhamento, especialmente, no caso de feições sem deslocamento e intertravadas, como no caso de juntas não preenchidas.
- f) **preenchimento**: termo geral para materiais que separam paredes adjacentes de uma descontinuidade. Alguns dos materiais são: calcita, clorita, argila, silte, material falha, brecha, etc. Esta propriedade é relevante quanto a resistência ao cisalhamento, deformabilidade e permeabilidade. Com exceção dos materiais presentes em veios competentes, como calcita, quartzo e pirita, a fig. 3.1.3c ilustra descontinuidades preenchidas que geralmente possuem baixa resistência de cisalhamento do que aquelas sem preenchimento, ou de descontinuidade fechada.
- g) **infiltração de água**: resultante do fluxo de água que percola através das descontinuidades.
- h) **número de famílias**: determina tanto o comportamento mecânico quanto a aparência do maciço rochoso, através do número de famílias que interceptam umas às outras.
- i) **tamanho dos blocos**: parâmetro extremamente importante para indicar o comportamento mecânico da rocha. É determinado pelo espaçamento, número de famílias (sistema) e pela persistência das descontinuidades que delineiam blocos potenciais.

3.2 FUNDAMENTOS DE RUPTURA DE ROCHAS

O comportamento a ruptura de uma dada estrutura ou um material depende do nível de tensão aplicada, presença de fendas, das propriedades do material, e do procedimento do mecanismo de atuação (HERTZBERG, 1996).

A resistência de materiais tidos frágeis e sua facilidade a quebra, é relacionada, provavelmente, a propagação de fendas e microfendas preexistentes devido a concentração de tensões de tração em suas extremidades (PERSSON et al., 1994).

A terminologia usada sobre resistência e sobre ruptura de rochas, segundo BRADY; BROWN (1993), tem causado confusão. A literatura define ruptura e ruptura frágil (ou quebradiça) como: (i) ruptura como a formação de planos de separação no material rochoso que compreende a quebra de ligações dos retículos cristalinos do sólido formando novas superfícies de separação. O começo de uma ruptura não necessariamente

é sinônimo de colapso ou que alcançou a máxima resistência; e (ii) ruptura frágil (ou quebradiça) como processo pelo qual a resistência do material é alcançada subitamente, através de um plano seguido de pequena ou nenhuma deformação plástica.

CHERNYSHEV; DEARMAN (1991) afirmam que todas as rochas são afetadas por fraturas, as quais se intersectam dando aspecto espacial de distribuição. E definem fratura como termo alternativo, as vezes referido como cavidade de formato complexo preenchida por gás, líquido ou por material sólido mineral. Todavia, o termo fratura difere de outras cavidades de rochas, algumas como poros e solução de cavidades. A combinação de fraturas é referida como fraturamento.

Com base na resposta de curvas de tensão-deformação, os materiais de engenharia podem ser categorizados em: frágil (ou quebradiços), dúctil e semi-quebradiços (SHAH et al., 1995). A fig. 3.2.1 ilustra os tipos de materiais e respectivas curvas de tensão-deformação características.

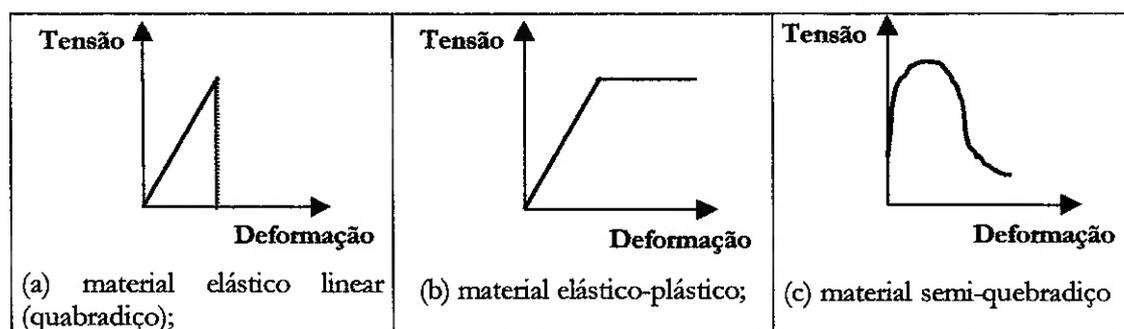


Fig. 3.2.1 Curvas de tensão-deformação para diferentes tipos de materiais (JAEGER; COOK, 1976; LAMA; VUTUKURI, 1978; SHAH et al., 1995).

A fig. 3.2.1a mostra a resposta elástica através da curva de tensão-deformação de um material elástico linear, que finda e subitamente cai para zero ao atingir sua resistência a ruptura. Com exceção de partículas muito pequenas, pode-se considerar uma partícula de minério como um material quebradiço. Pois, mecanicamente, sua deformação é proporcional a tensão aplicada até que ocorra a ruptura.

Para material elástico-plástico, ou materiais dúcteis, mostrados na fig. 3.1b, a tensão aproxima-se a um valor constante após um certo valor de deformação.

Na curva de tensão-deformação mostrada na fig. 3.1c, tipo suave, geralmente é característica de materiais tipo semi-quebradiços (concreto e cerâmicas). São materiais

caracterizados pelo decréscimo gradual da deformação após atingir o limite máximo de tensão suportada (SHAH et al, 1995).

As respostas de curvas de tensão-deformação das rochas se diferem consideravelmente. Depende do tipo de método de teste, razão de tensão aplicada, tamanho do corpo de prova, etc.. As variações das curvas de tensão-deformação são atribuídas as seguintes razões: (i) em altas tensões onde ocorre a compactação das rochas, dos poros e do fechamento de fendas, provocando aumento no valor da elasticidade da rocha; (ii) deformação do componente mineral resistente provocando diminuição desta; e (iii) avarias e quebras de corpos de prova sob elevadas tensões que acarretam grandes deformações.

A reação da rocha à deformação depende de suas estruturas cristalinas, bem como da magnitude da pressão confinante, temperatura, razão de carregamento, e da presença e natureza das soluções intersticiais (LAMA; VUTUKURI, 1978).

A ruptura quebradiça característica, segundo LAMA; VUTUKURI (1978), por definição, é resultante de um processo no qual não se produz alteração permanente na outra parte (ou porção), do que apenas a separação em partes distintas. Neste caso, dois processos básicos geralmente ocorrem juntos, através de comportamento microscópico dúctil.

GRIFFITH em 1952, segundo KELLY; SPOTWOOD (1982), analisou o comportamento de fraturas em materiais considerados quebradiços sob tensão, e atribuiu que a presença de fraturas em um material induz a uma concentração de tensão no sólido. A fig. 3.2.2 ilustra as ligações químicas (retículos cristalinos) em um ponto de extensão de uma fenda (ou fratura), sem tensão a totalmente deformada até o ponto de ruptura. A tensão é requerida para produzir energia necessária para propagação da fenda (ou fratura), e consequentemente, a promoção da nova face livre.

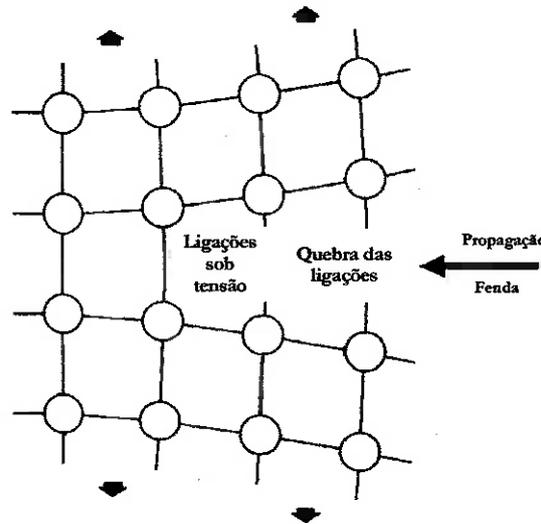


Fig. 3.2.2 Modelo de propagação de uma fenda pela ruptura de ligações químicas sob tensão externa (KELLY; SPOTWOOD, 1982).

A fratura ocorre quando a energia de deformação da extremidade da fenda for suficiente para gerar duas novas faces (superfícies). A tensão crítica considerada, denominada de tensão normal aplicada à fenda, também é conhecida por tensão de Griffith, expressa como:

$$\sigma_G = \left(\frac{2\gamma E}{c} \right)^{1/2} \quad (3.1)$$

E – módulo de Young;

γ - energia de superfície livre por unidade de área da superfície da fenda;

c – semi-comprimento da fenda.

O conceito de Griffith sobre propagação de fendas a partir de fissuras em um material é largamente aceito. GRIFFITH fez uso de princípios energéticos para descrever o comportamento da fratura de uma estrutura através de um modelo de fenda (SHAH et al., 1995). Ele considerou o modelo de uma placa infinita, conforme ilustrado na fig. 3.2.3, de unidade de espessura que contém uma fenda de comprimento $2a$ sujeita a uma tensão de tração uniforme σ_t .

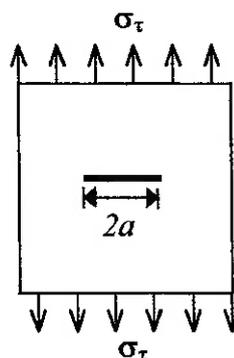


Fig. 3.2.3 Modelo de placa com fenda sob tensão de tração (SHAH et al., 1995).

Todavia, algumas modificações têm sido apresentadas na literatura sobre a energia cinética associada ao campo de tensão propagado até a extremidade da fenda, e ao comportamento plástico localizado do material. Porém, SHAH et al. (1995) ressaltam que, embora o conceito de GRIFFITH é aceito, a energia aplicada não é suficiente para ocorrer a deformação de todos os retículos para alcançar a ruptura, devido a presença de fraturas. Neste caso, é requerido maior tensão para produzir novas faces livres, e para suprir a energia absorvida pelos retículos afastados das superfícies das fraturas sujeitas a deformações (KELLY; SPOTWOOD, 1983; WILLS, 1985).

De acordo com WILLS (1985), a teoria de GRIFFITH mostrou que as rupturas dos materiais se propagam por fraturas quando a energia é liberada pelo relaxamento da energia de tensão envolvida. Principalmente, através da propagação de gretas pelo mecanismo de fluxo plástico, onde os átomos ou as moléculas escorregam umas sobre as outras, e a energia é consumida na distorção da forma do material ocasionando a quebra do material.

A propagação de fraturas também pode ser atenuada pelo encontro com outras fraturas, pelo encontro das bordas dos cristais, e ao atingir o limite de resistência interatômica dos cristais (LUZ et al., 1998). Vale ressaltar que, rochas de granulação fina são geralmente mais resistentes que rochas de grãos grosseiros (WILLS, 1985).

A distribuição da tensão de compressão depende das propriedades geomecânicas individuais dos minerais, e mais importante, da presença de fendas e de fraturas da rocha matriz, que atuam como pontos de concentração de tensão (WILLS, 1985).

TAYLOR (1987) resume os estágios de desenvolvimento da fragmentação da partícula como: (i) propagação das fraturas (estruturais) pré-existent; (ii) propagação das fendas ativadas; (iii) coalescimento (regime plástico) e bifurcação de trincas propagando; e (iv) separação dos fragmentos entre si.

Quando se discute sobre ruptura frágil (quebradiça), a natureza e a descrição das superfícies de rupturas são de relevante importância. Na fig. 3.2.4a é mostrado a situação de compressão não-confinada onde se observa fissuras irregulares longitudinais. Porém, com a pressão de confinamento suficiente e moderada, ocorre fraturamento irregular do corpo através de um plano de ruptura, mostrado na fig. 3.4b, inclinado com ângulo inferior a 45° em relação a direção da tensão aplicada. Este tipo de superfície de ruptura ocorre sob tensão de compressão denominada de ruptura por cisalhamento. Possui feições características de deslocamento cisalhante ao longo da superfície da fratura (LAMA; VUTUKURI, 1978).

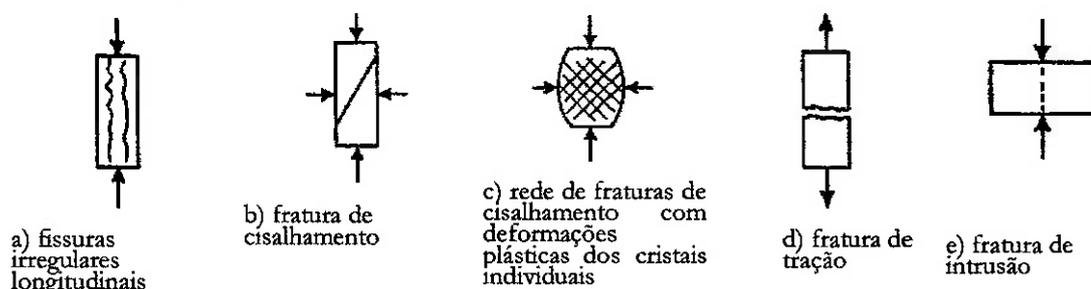


Fig. 3.2.4 Fissuras longitudinais em por compressão unidimensional (JAEGER; COOK, 1976).

GRIGGS; HAUDIN (1960) apud JAEGER; COOK (1976), ao introduzirem uma classificação de fraturas, atribuíram o termo fratura de cisalhamento ao contexto de confinamento experimental. Ou seja, a medida em que aumenta a pressão confinante ao ponto do material tornar-se completamente dúctil, ocorre uma rede de fraturas de cisalhamento aliada a deformações plásticas dos cristais individuais, como apresentado na fig. 3.4c.

Outro tipo básico de ruptura é mostrado na fig. 3.4d, denominado de ruptura por tração. É uma ruptura típica resultante de tração uniaxial. Possui características de separação bem definida entre as superfícies.

Dentre os sistemas de tensão de rupturas, pode-se considerar um sistema que abrange ambos os tipos. Trata-se do sistema exemplificado por meio de uma barra submetida à compressão entre pontos de tensão conforme ilustrado na Fig. 3.4e. Desse sistema, tem-se a ruptura de extensão entre os pontos de compressão. Em casos da compressão promovida por uso de macacos hidráulicos, em volta do material, a ruptura é descrita como ruptura de intrusão (JAEGER; COOK, 1976).

Retornando ao exemplo de ruptura ilustrada na fig. 3.4a, pode-se analisar que as porções principais de separação possuem aparência de ruptura por cisalhamento. Sendo as demais partes, aparentemente, podendo ser consideradas como ruptura de extensão.

TERZAGHI (1945) apud LAMA; VUTUKURI (1978), classificou a quebra dependendo da inclinação dos planos de falha, em: repartida, cisalhante e pseudo-cisalhante. A quebra do tipo repartida pode ser reconhecida pelas fendas paralelas à direção axial da carga aplicada aparentando indicar que as ligações entre grãos quebram por tração. Esta forma de quebra por tração entre grãos adjacentes é causada pela ação agregada dos grãos intermediários. Por outro lado, a quebra por cisalhamento pode ocorrer quando os grãos ligados são deslocados ao longo do plano de deslizamento (plano de cisalhamento). Por último, a quebra pseudo-cisalhante, que representa uma combinação de quebra por tração e quebra por fratura de cisalhamento para produzir uma quebra em “zig-zag”.

GRIGGS; HANDIN (1960) apud LAMA; VUTUKURI (1978), descreveram as deformações macroscópicas de rochas e minerais, sob altas pressões de confinamento em laboratório (testes de compressão triaxial), em três principais categorias de comportamento: ruptura de extensão, ruptura e fluxo uniforme. E definem as rupturas de extensão como a separação de um corpo através de uma superfície normal a direção da máxima tensão principal. A ruptura simples, a superfície de cisalhamento pode ser inclinada de 45° a um menor grau a direção de máxima tensão principal. Neste caso, a máxima tensão pode ou não ser menor do que a resistência do diferencial de tensões. E a ruptura por fluxo uniforme, macroscopicamente, é denotada pelas deformações homogêneas.

Segundo o critério de quebra descrito por LAMA; VUTUKURI (1978), um material é considerado a quebra se ele é permanentemente deformado ou rompido em duas ou mais partes. A quebra é causada pela combinação de tensões. Caso o material esteja completamente isento de tensão, ele não reage por si mesmo à quebra. Se a resistência ao cisalhamento é maior do que a resistência a tração, então o material é quebradiço. Porém, se a resistência a tração é maior do que a resistência ao cisalhamento, o material é considerado dúctil. De modo geral, os materiais raramente são quebradiços ou dúcteis. A quebra de materiais quebradiços geralmente está associada com tensão de tração, ao passo que, a quebra de materiais dúcteis é causada por tensões de cisalhamento.

Para LADEIRA (1976) o efeito básico de ruptura pode ser apontado como a ruptura franca. É aquela em que a massa rochosa se divide em duas porções totalmente desligadas uma da outra (nova face livre). Neste caso, todas as forças que mantinham as partículas adjacentes unidas foram rompidas. Porém, nos casos de materiais rochosos,

podem ocorrer escorregamentos plásticos ao longo dos planos de descontinuidades, por exemplo, ao invés da ruptura, sem que resultem na separação da rocha em duas ou mais porções. Outrossim, pode-se ter os casos em que estes escorregamentos impeçam que determinados níveis de tensões sejam ultrapassados, ocasionando cedência em lugar de ruptura quando o maciço rochoso deixa de resistir aos esforços aplicados (LADEIRA, 1976).

DA GAMA (1986) considera que a ruptura ocorre em diferentes escalas: microscópicas e atômicas. Em escala microscópica as fissuras se propagam em nível dos grãos do material. Em escala atômica a ruptura é produzida sem a ocorrência de deformação plástica, seja através da separação das ligações atômicas (pela clivagem) por meio de um plano perpendicular à ação da máxima tração (ou compressão máxima) ou, seja através de um plano de deslizamento (ou ação de cisalhamento atingir valor crítico). Assim, o autor ressalta que, os processos de ruptura iniciam pelos defeitos das estruturas (fissuras, poros, etc.) que, por sua vez, induzem a ação de tração produzindo microfissuras axiais em direção da ação de compressão máxima. A propagação dessas fissuras promove as macrofraturas. Desse modo, têm-se dois tipos de rupturas: a ruptura frágil produzida sem deformação plástica, e a ruptura dúctil produzida através de deformação plástica.

LAMA; VUTUKURI (1978) atribuem dois modos de quebra que ocorrem em rochas, e que dependem da quantidade de deformação antecedente a quebra. Assim, consideram as rochas como material frágil quando a quebra ocorre sem grande deformação. Caso contrário, são tidas como material dúctil, quando se deformam, consideravelmente, antes da ocorrência de quebra ou, quando se deformam plasticamente.

DA GAMA (1986) afirma que o tipo de ruptura depende das características dos experimentos, que neste caso, reúnem as características intrínsecas do material. Assim, é mais convencional denominar “material à ruptura frágil” e “material à ruptura dúctil”.

Em suma, os diversos métodos (ou Critérios) aplicados com sucesso na definição de ruptura de rochas segundo COOK (1965); OBER; DUVALL (1967), COATES (1973), LADEIRA (1976), JAEGER; COOK (1976); LAMA; VUTUKURI (1978), , JUMIKIS (1983); JUREMIC (1987) e SHAH et al. (1995), relacionam as principais tensões na ruptura e na resistência da rocha, a saber:

- a) Critério de Coulomb (e Critério Coulomb-Navier);
- b) Critério de Mohr;
- c) Critério de Griffith

O Critério de Coulomb tem sido denominado na literatura como Critério de Coulomb-Navier, Coulomb-Mohr, etc.. Todavia, JAEGER; COOK (1976) recomendam tratar as teorias de Coulomb e de Mohr, separadamente.

Critério de Coulomb

O Critério de Coulomb foi estabelecido através de estudos de atrito. Relaciona quebra por cisalhamento de rochas através da tensão de cisalhamento. A ruptura é provocada por meio de um plano submetido a coesão (aderência), e pelo produto de uma constante pela tensão normal aplicada através do plano cisalhante. O critério para ocorrer a ruptura por cisalhamento num plano, é dada pela expressão:

$$|\tau| = S_0 + \mu\sigma \quad (3.2)$$

σ e τ - tensões normal e de cisalhamento, respectivamente;

S_0 - constante inerente a resistência de cisalhamento do material;

μ - coeficiente de fricção interna do material.

JAEGER; COOK (1976) acrescentam que o sinal da expressão 3.2 está associado a direção de cisalhamento.

O Critério de Coulomb é baseado na máxima tensão de cisalhamento. Considera que a ruptura ocorre num ponto da rocha onde a tensão de cisalhamento é máxima. Este critério também é conhecido como Critério de Tresca. A tensão máxima de cisalhamento corresponde a metade da diferença das tensões principais, segundo a expressão:

$$\tau_{máx.} = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) = c \quad (3.3)$$

Este critério é conhecido como critério de "Tersca". Mais tarde, o Critério de Coulomb foi modificado denominando-se de Critério Coulomb-Navier.

O Critério Coulomb-Navier segundo LADEIRA (1976), postula que a ruptura das rochas não ocorre segundo os planos em que a tensão de cisalhamento é máxima, mas segundo os planos em que a tensão cisalhante τ , deduzida da resistência de atrito ($\mu\sigma$), é máxima. Para simplificar, c pode ser denominado de coesão do material. A expressão 3.4 descreve o critério Coulomb-Navier.

$$\tau - \mu\sigma = c \Rightarrow \tau = c + \sigma\mu \quad (3.4)$$

σ - tensão normal aplicada a rocha;

μ - constante característica do material denominada de coeficiente de atrito interno ($\mu = \text{tg}\phi$);

ϕ - ângulo de atrito interno.

Em outras palavras, LAMA; VUTUKURI (1978) descrevem o Critério de Coulomb-Navier através de um modelo bidimensional mostrado na fig. 3.2.5. As tensões normal σ_θ e de cisalhamento τ_θ atuam sobre o plano de quebra. O Critério estabelece que, a quebra ocorrerá quando a magnitude da tensão cisalhante que atua sobre o plano de quebra atingir um valor segundo a expressão:

$$|\tau_\theta| = \tau_c + \mu\sigma_\theta \quad (3.5)$$

τ_c - resistência de cisalhamento do material;

$\mu\sigma_\theta$ - análogo a força de fricção sobre um plano inclinado devido a reação normal;

μ - coeficiente de atrito interno.

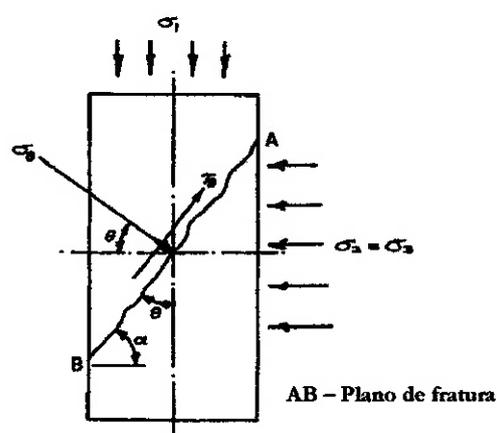


Fig. 3.2.5 Diagrama típico de ruptura por cisalhamento (LAMA; VUTUKURI, 1978).

Neste contexto, LADEIRA (1976) aborda algumas relações empíricas envolvendo as tensões de cisalhamento (τ), de tração (σ_t) e de compressão (σ_c), com relação a resistência das rochas:

(i) $\tau = 2\sigma_c$ - para rochas competentes que apresentam ruptura frágil e comportamento elástico;

(ii) $\tau = \frac{1}{2}\sigma_c$ - para rochas menos competentes que apresentam comportamento elasto-plástico ou plasto-elasto-plástico.

Critério de Mohr

É baseado na relação de ângulo de atrito interno de Coulomb-Navier, e passível de aplicação para rochas e para solos. Este Critério considera que na ruptura as tensões normais e de cisalhamento no plano de ruptura estão relacionados em função das características do material, ou seja, $\tau = f(\sigma)$. Para este critério são admitidos:

(i) as rochas fraturam por planos normais à direção da tensão aplicada (tração), ou por cisalhamento (compressão) segundo planos em que a tensão mobilizável de cisalhamento é máxima;

(ii) o valor da tensão mobilizável de cisalhamento e o valor do coeficiente de atrito interno podem variar para mesma rocha, com mesma tensão confinante (LADEIRA, 1976).

Critério de Griffith

Este critério estabelece que a ruptura das rochas se inicia através das tensões de tração originadas nos topos das microfaturas e fendas situadas no material. Estas fendas são chamadas de fendas de Griffith, e possuem formas elípticas achatadas. Isto levou Griffith a investigar as tensões em volta das fendas elípticas microscópicas através de uma placa delgada de vidro bidimensional sujeita a uma tensão de tração, e assim, estabelecendo a expressão 3.6 para a tensão máxima de tração nas bordas das fendas:

$$\sigma_{máx.} = 2\sigma_t \sqrt{c/r} \quad (3.6)$$

O Critério foi estudado para explicar as grandes diferenças encontradas entre os valores das resistências das rochas determinados em laboratório, e os valores teóricos obtidos através das forças intermoleculares. KELLY; SPOTWOOD (1982) ressaltam que, a diminuição da resistência a tração das rochas são atribuídas às tensões elevadas nas vizinhanças das fendas microscópicas. Porém, os autores afirmam que, na propagação de uma fratura, parte da energia potencial (excesso de energia elástica) é utilizada na geração de deslocamentos nas vizinhanças da fenda que produzem vibrações. A outra parte é

utilizada na geração de energia para criação da nova área de superfície (LAMA; VUTUKURI, 1978).

A teoria de Griffith postula que a condição inicial de propagação de uma fratura, sob tensão de tração, é dada pela expressão:

$$\sigma_t = \sqrt{\frac{2S_e E}{\pi c(1-\nu^2)}} \quad (3.7)$$

Para $\sigma_t = E/10$, tem-se:

$$S_e = \sigma_t^2 \pi c(1-\nu^2) / 2E \quad (3.8)$$

Onde,

S_e - a energia de superfície;

ν - coeficiente de Poisson;

E - módulo de elasticidade;

c - semi-comprimento da fenda

É importante destacar que, o critério de Griffith foi elaborado em modelo bidimensional, visto que a realidade trata de fendas tridimensionais. Assim, SACK (1946) e OROWAN (1949) apud LADEIRA (1976), postularem expressões para casos tridimensionais através da tensão de tração crítica:

$$(i) \sigma_t = \sqrt{\frac{\pi S_e E}{2c(1-\nu^2)}} \quad (\text{SACK, 1946});$$

$$(ii) \sigma_t = \sqrt{S_e E / 2c} \quad (\text{OROWAN, 1949}).$$

As rochas apresentam resistência à compressão (σ_c) muito superior que a resistência à tração (σ_t), da ordem de 10 a 12 vezes (SEN, 1995), ou seja, $\sigma_c = 10$ à $12\sigma_t$. Notadamente, nos casos em que a ruptura dá-se ao longo dos planos de cisalhamento (LUZ et al., 1998).

Com base nos mecanismos de ruptura de rocha, COSTA E SILVA (1998) afirma que a ruptura por cisalhamento em rochas sedimentares ocorre quando os diferentes extratos apresentam módulos elásticos distintos, e conseqüentemente, os demais parâmetros geomecânicos. Este fato leva a provocar ruptura através de planos de separação. Ou seja, o processo de fraturamento por cisalhamento ocorre devido

deslocamento das rochas adjacentes atribuído a gases a altas pressões em períodos ou velocidades diferentes.

3.3 CONSIDERAÇÕES E TEORIAS SOBRE ENERGIA DE RUPTURA E/OU DE FRAGMENTAÇÃO DE ROCHAS POR MECANISMOS DINÂMICOS

Baseado no tipo de energia aplicada à quebra de rochas, pode-se classificar os métodos de fragmentação empregados na mineração segundo a Tab. 3.1 (HARTMAN, 1987). São métodos compreendidos por processos estáticos e/ou dinâmicos de ruptura de rochas. Os métodos baseados em energia elétrica, segundo CLARK (1987), são considerados de caráter experimental e limitados, semelhantes ao método por impacto (“dropball”, “hammer”, etc.) aplicado para quebra de grandes blocos – “matações”. Outros métodos de fragmentação não-convencionais como a laser, eletro-térmico, feixe de elétrons, e demais, na maioria das vezes são tidos como ineficientes (CLARK, 1987).

TABELA 3.1 – Classificação de métodos de fragmentação de rochas baseada na forma de energia aplicada (HARTMAN, 1987).

Forma de aplicação da energia	Método	Agente/equipamento/instrumento
Química	Desmonte convencional	Altos explosivos; acessórios explosivos; oxigênio líquido (LOX); pólvora negra
Mecânica	Pneumático; Escarificação; Impacto	Ar compressivo ou cilindro de dióxido de carbono; Lâmina e dentes Rompedor hidráulico e esfera de impacto
Fluída	Desmonte hidráulico (solo); Desmonte hidráulico para rochas pouco competente	Monitor; Jato hidráulico de alta pressão
Elétrica	Arco-elétrico ou corrente elétrica	Máquinas de eletrofraturamento

A redução granulométrica de uma massa mineral, utilizando mecanismos mecânicos de quebra de rocha, envolve perdas significativas de energia na partição do material. Pois, relaciona intensidade de energia consumida e grau de rendimento da operação (KELLY; SPOTWOOD, 1982; WILLS, 1985; LUZ et al., 1998).

EHRHORN (1993) afirma que a quantidade de energia (direta ou indireta) a ser fornecida para fragmentação de rochas depende das propriedades da rocha e do tipo de

sistema de esforços aplicados. A energia é consumida por três principais mecanismos: (i) na criação da nova área de superfície (energia de superfície); (ii) no atrito (plasticidade); e (iii) na energia de dispersão das ondas elásticas. Diferentemente da forma de consumo em britagem que ocorre por mecanismos esmagamento (compressão por carga externa) e por abrasão.

Considerações sobre valores de energia de deformação para a propagação de fendas (ou fissuras) em rochas, segundo SHAH et al. (1995), partem de princípios análogos aplicados para materiais lineares (elástico linear) e materiais não-lineares (elástico não-linear, elástico plástico, semi-quebradiço).

Para BRANCO (1994), as rochas pertencem ao grupo dos materiais que apresentam elasticidade não-linear. Enquanto JAEGER; COOK (1976) afirmam que a maior parte das rochas apresenta resposta de curva de tensão-deformação aproximadamente de forma linear (ver fig. 3.2.1a). E consideram que a curva tensão-deformação cessa abruptamente após atingir uma descontinuidade (imperfeição) em determinado ponto. Analiticamente, este contexto pode ser representado pela relação $\sigma = E\varepsilon$, onde E é chamado de módulo de Young (ou módulo de deformação). Materiais considerados linearmente elásticos satisfazem a relação tensão-deformação ($\sigma = E\varepsilon$) que fundamenta a Teoria da Elasticidade Linear.

Um material é dito *perfeitamente elástico* quando possui relação proporcional entre tensão e deformação, a qual não precisa ser linear conforme apresentado na fig. 3.2.1a (JAEGER; COOK, 1976). Enquanto, o material é considerado elástico se após a aplicação dos esforços, devido a ausência da carga aplicada, a resposta da curva de tensão-deformação estabelece diferente trajetória da curva sob tensão. Este efeito é denominado de histerises.

A Teoria da Elasticidade, segundo a Lei de Hooke (TIMOSHENKO; GOODIER, 1980), estabelece que a energia de deformação u , por unidade de volume, para materiais elásticos uniformemente tracionados, pode ser expressa por:

$$u = \frac{\sigma_t^2}{2E} \quad (3.9)$$

σ_t - tensão de tração; E - módulo de elasticidade, também conhecido como módulo de Young.

Para a maioria dos materiais homogêneos isotrópicos, o módulo de elasticidade sob tensão de compressão é considerado igual ao módulo de elasticidade sob tensão de tração (COATES, 1973; TIMOSHENKO; GOODIER, 1980).

Considerando a expressão 3.9, por unidade de volume, tem-se que a energia elástica de deformação é dada por:

$$W = \frac{1}{2} \int_v \sigma_t \varepsilon dV \quad (3.10)$$

Como, $\sigma_t = E\varepsilon$, então a expressão 3.10 será dada por:

$$W = \frac{1}{2E} \int_v \sigma_t^2 dV \quad (3.11)$$

Portanto, a energia de deformação elástica em função da unidade de volume do material é dada pela expressão:

$$W = \frac{\sigma_t^2 V_{vol.rocha}}{2E} \quad (3.12)$$

Todavia, a Teoria da Elasticidade é estabelecida para processo estático de deformação devido a baixa razão de aplicação dos esforços (carga/descarga) para produzir a ruptura simples (nova face livre) em um corpo rígido.

Por outro lado, é sabido que um maciço rochoso (ou terreno) quando submetido a esforços dinâmicos por eventos sísmicos, como o caso de uma detonação de uma carga explosiva, a resposta deste meio de propagação (maciço rochoso) está relacionada a intensidade de movimento induzido pela passagem transitória de uma frente de onda. As ondas são produzidas na rocha pelas alterações de pulsos (ou impulsos). Estas alterações são associadas a eventos súbitos de aplicação e alívio de esforços pela detonação do furo.

Durante a propagação da onda, cada partícula executa movimento transitório sobre sua posição de equilíbrio. A velocidade transitória (V) da partícula também está relacionada ao estado transitório de tensão (σ) da onda. Utilizando a Lei de Hooke para um estado uniaxial de tensão longitudinal sobre uma barra, tem-se as seguintes relações de acordo com a dinâmica de movimento de propagação de tensão, de velocidade e de deslocamento da onda:

$$\sigma_{incidente} + \sigma_{refletida} = \sigma_{transmitida} \quad (3.13)$$

Tensão compressiva incidente + Tensão refletida = Tensão transmitida \Rightarrow

Tensão compressiva + Tensão de tração = Tensão refratada;

$$V_{\text{incidente}} + V_{\text{refletida}} = V_{\text{transmitida}} \quad (3.14)$$

Velocidade de partícula de onda compressiva + Velocidade de partícula de onda refletida =
 Velocidade de partícula de onda transmitida \Rightarrow
 Velocidade de partícula de onda compressiva + Velocidade de partícula de onda de tração
 = Velocidade de partícula de onda refratada

Segundo COATES (1973), as propriedades fundamentais do material na transmissão de onda são: módulo de deformação (E), módulo de rigidez (G) e a densidade (ρ). E considera que existem dois tipos básicos de ondas elásticas: (i) ondas principal (de corpo) que se propagam pelo interior do corpo de rocha; e (ii) ondas de superfície que se propagam apenas ao longo da superfície da rocha. As ondas de corpos são divididas em ondas de compressão (ou primária - P) e ondas de cisalhamento (ou secundária - S). As ondas P provocam movimentos oscilatórios longitudinais de partículas, muito similares às vibrações harmônicas pura. Ao atingirem uma frente livre, dentre as demais direções, a resultante do deslocamento da frente de onda P induz a propagação de ondas S , onde as partículas se movem em direção transversal sem comprimir o material.

Os principais parâmetros que afetam a propagação da velocidade de ondas elásticas em rochas são: tipo de rocha, textura, densidade, porosidade, anisotropia, tensão, conteúdo de água e temperatura (LAMA; VUTUKURI, 1978).

Os modelos dinâmicos de ruptura e/ou de fragmentação de rochas encontrados na literatura, basicamente são apresentados utilizando-se simulações numéricas. São modelos computacionais utilizando elementos finitos delimitados por situações divergentes aos casos reais, como por exemplo: considerar a rocha como material homogêneo e isotrópico; utilizar materiais sintéticos como concretos e polímeros para justificar teorias e expressões de energia e mecanismos de quebra.

O princípio eletrohidráulico aplicado para desmonte de rochas envolve impulso de descarga elétrica quase instantânea em período de microssegundos. Trata-se de um processo de ruptura por mecanismos dinâmicos. Neste sentido, buscou-se uma forma simplificada para descrição analítica da teoria de energia geomecânica de ruptura e respectivo mecanismo de fragmentação proposto para o Modelo Tecnológico de Desmonte Eletrohidráulico desta Tese. Assim, utilizou-se o exemplo da dinâmica de propagação de ondas elásticas através de uma barra cilíndrica (HUDSON, 1993).

• **TEORIA DE ENERGIA E FORMULAÇÃO DO MECANISMO DINÂMICO DE RUPTURA E/OU DE FRAGMENTAÇÃO DE ROCHA**

a) **Princípio:** baseado na dinâmica de propagação de pulso de tensão longitudinal sobre uma barra cilíndrica (HUDSON, 1993).

b) **Condições:**

1ª Interface: Líquido (eletrólito) - Rocha, considerar acoplamento “perfeito”, ou seja, como um meio contínuo (razão de impedância = 1);

$$\eta_{1^{\text{a}} \text{Interface}} = \frac{\rho_{\text{água}} V_{\text{água}}}{\rho_{\text{rocha}} V_{\text{rocha}}} = 1$$

2ª Interface (de interesse): ROCHA-AR. Seja a densidade da rocha (ρ_{rocha}) $\neq 0$ e seja a densidade do ar (ρ_{ar}) = 0. Portanto:

$$\eta_{2^{\text{a}} \text{Interface}} = \frac{\rho_{\text{ar}} V_{\text{ar}}}{\rho_{\text{rocha}} V_{\text{rocha}}} = 0$$

A frente de onda compressiva se propaga inversamente proporcional a distância radial ($r \leq 0,5\text{m}$) da fonte de detonação (descarga elétrica), considerando amostras (blocos irregulares) até 150kg;

Tempo curtíssimo de impulso da descarga da corrente elétrica: $>250\mu\text{s}$ (Fig. 5.6);

Razão de impedância igual a zero ($\eta_{2^{\text{a}} \text{Interface}} = \frac{\rho_{\text{ar}} V_{\text{ar}}}{\rho_{\text{rocha}} V_{\text{rocha}}} = 0$), considera-se que

toda frente de onda compressiva será refletida como onda de tração;

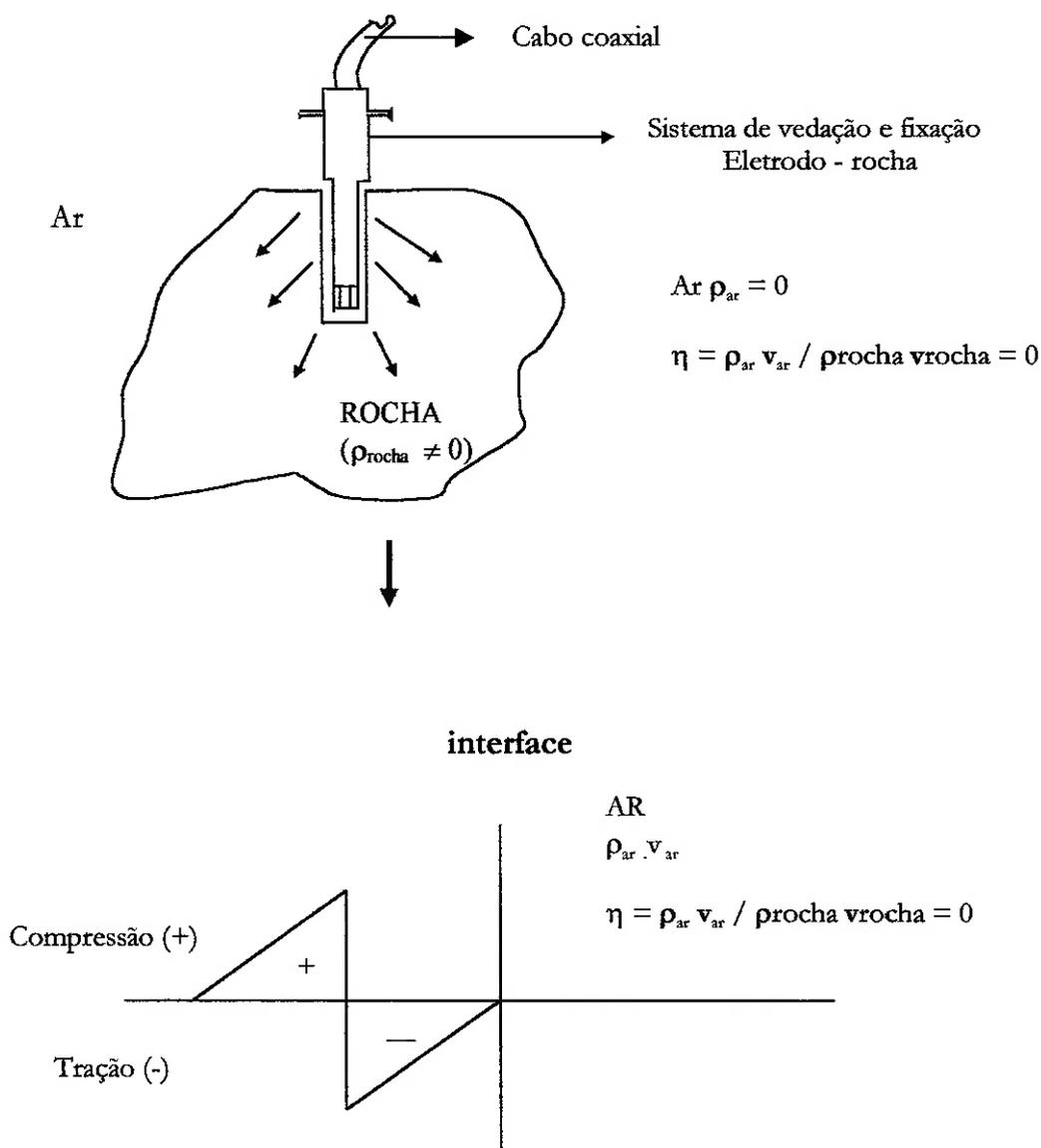


Fig. 3.3.1 Ilustração das condições de ruptura baseado na dinâmica de propagação de ondas elásticas.

c) Solução analítica:

Com base na expressão 3.13, considerando a razão de impedância nula entre os meios ROCHA-AR, tem-se:

$$\sigma_{incidente} + \sigma_{refletida} = \sigma_{transmitida} \Rightarrow \sigma_{incidente} = -\sigma_{refletida} + 0 \Rightarrow \sigma_{incidente} = -\sigma_{refletida}$$

Ou,

$$|\sigma_{incidente}| = |-\sigma_{refletida}| \quad (3.15)$$

De acordo com HUDSON (1993): $V_{refletida} = -[(\eta-1)/(\eta+1)]V_{compressiva} \Rightarrow$

$$V_{\text{compressiva}} = V_{\text{refletida}} \quad (3.16)$$

d) **Partição de energia:**

A partição de energia de um impulso de descarga elétrica (energia elétrica) proposta para o modelo tecnológico de desmote eletrohidráulico, é apresentado no fluxograma a seguir:

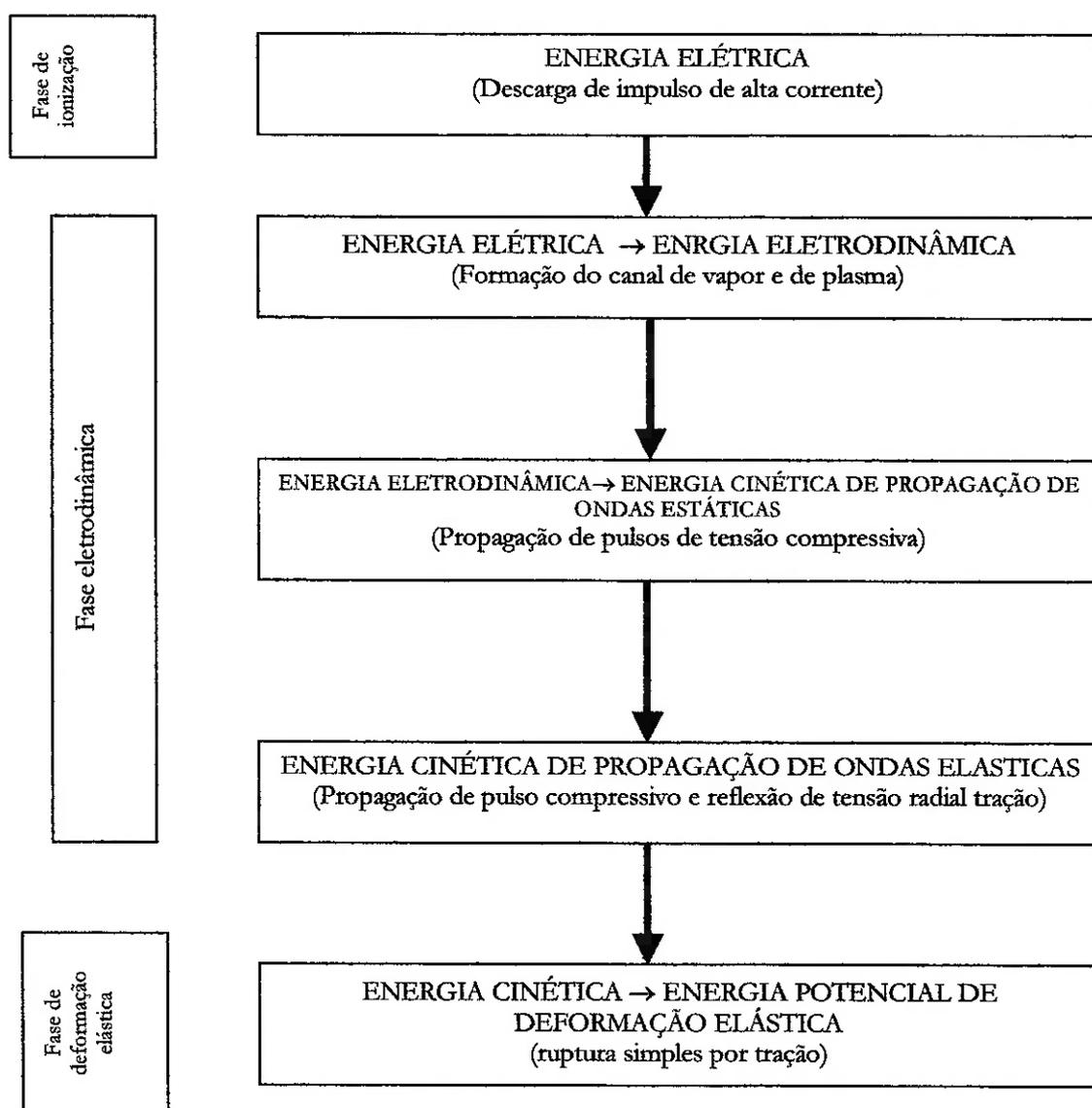


Fig. 3.3.2 Fluxograma de partição de energia em desmote eletrohidráulico.

e) Mecanismo dinâmico de ruptura estática do modelo tecnológico de desmonte eletrohidráulico:

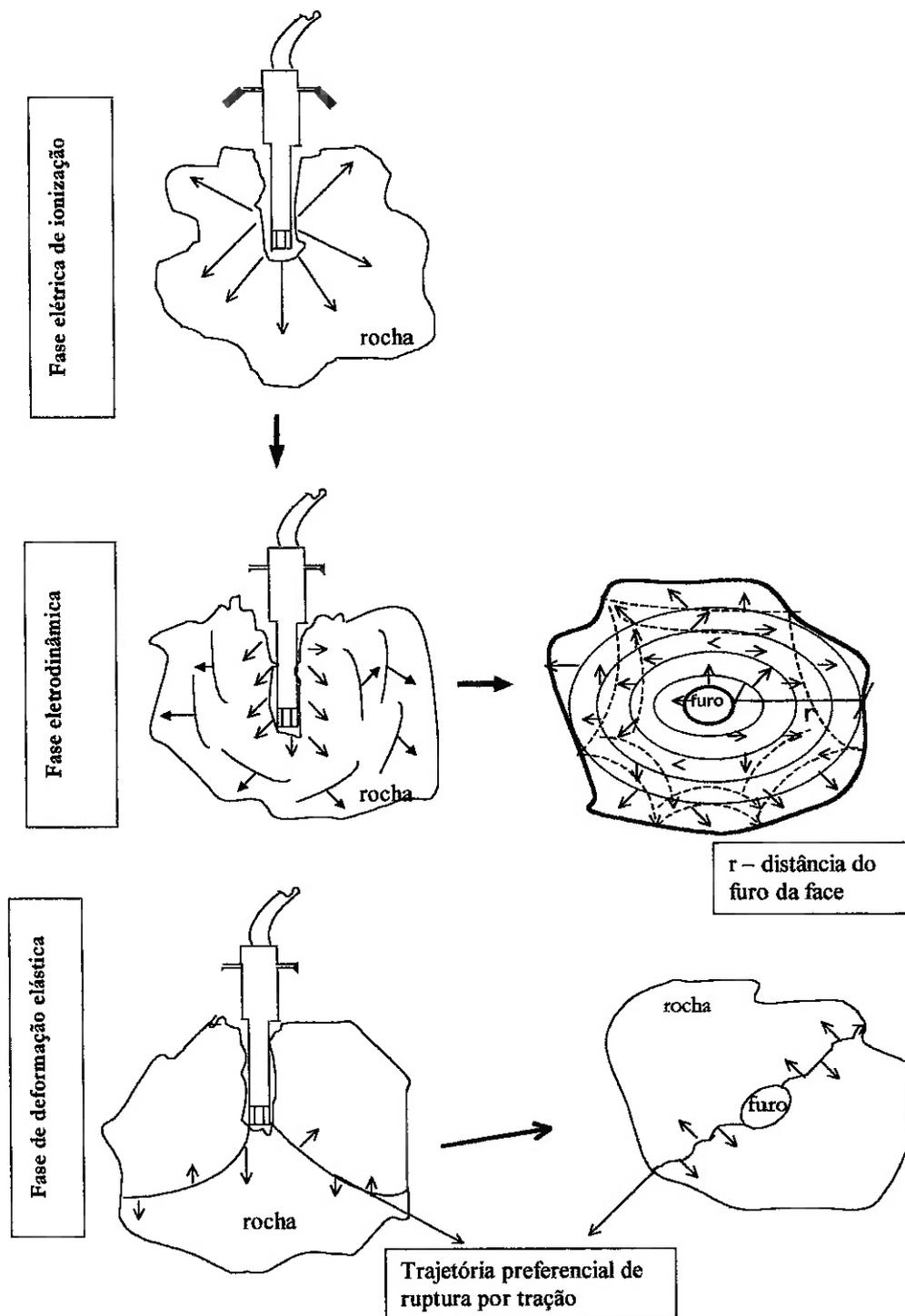


Fig. 3.3.3 Mecanismos dinâmicos do processo de ruptura estática de rochas em desmonte eletrohidráulico.

f) **Conclusão:**

O pulso compressivo da onda incidente é totalmente refletido como pulso de tração, de mesmo módulo de intensidade segundo a expressão 3.5. Como a rocha rompe por tração, e o período de impulso da corrente de descarga elétrica é pequeno, estimado em 250 μ s (RÊGO FILHO, 1999), pode-se considerar que o processo de ruptura ocorre sob fase estática no ponto de inversão dos esforços, conforme ilustrado pela fig. 3.3.1. Porém, o mecanismo de propagação de pulsos de tensão ocorre sob processo dinâmico.

Portanto, a expressão 3.12 de deformação de corpos elásticos por unidade de volumes estabelecida pela Teoria da Elasticidade, será dada por:

$$W = \frac{\sigma_{compressiva}^2 V_{vol.rocha}}{2E} \quad (3.17)$$

O termo tensão compressiva ($\sigma_{compressiva}$) inserido na expressão 3.17 acima, considera que, para produzir energia geomecânica suficiente para o processo de ruptura simples por tração, conforme a Lei de Hooke e considerações acima, será necessário fornecer um pulso compressivo antecedente a reflexão. Portanto, a expressão 3.17 será utilizada para determinação dos valores de energia geomecânica nominal para ruptura simples, conforme mostrados na tabela 3.2., utilizando-se blocos de rochas calcárias até 150kg de formato aleatório.

TABELA 3.2 - Valores de energia geomecânica para ruptura simples baseado na expressão 3.17.

Amostra	Q (t)	V _{vol.} (m ³)	$\sigma_{comp.}$ (MPa)	E (MPa)	W _{nominal} (kJ)	W _{corrigida} (kJ)
24	0,0240	0,0096	51.500.000	9485000000	1,3	3,4
42	0,0420	0,0168	51.500.000	9485000000	2,3	5,9
48	0,0480	0,0192	51.500.000	9485000000	2,7	6,7
22	0,0500	0,0200	51.500.000	9485000000	2,8	7,0
16	0,0520	0,0208	51.500.000	9485000000	2,9	7,3

Seja: Q - peso da amostra; $V_{vol.}$ - volume da amostra; E - módulo de elasticidade; $W_{geomc.Nom.}$ - energia geomecânica nominal; $W_{corrigida}$ - energia geomecânica corrigida (60% de perdas).

O valor de energia geomecânica nominal calculada será corrigida por fator de eficiência de 40%, que será aplicado para determinar a tensão elétrica de carregamento dos capacitores do circuito Gerador de Impulso de Alta Corrente, utilizando a expressão 2.2.1, conforme mostrados na tabela 3.3.

TABELA 3.3 - Valores de tensão de carregamento do banco de capacitores para desmonte eletrohidráulico baseado na expressão 2.2.1.

Amostra	Q (t)	V _{vol.} (m ³)	W _{corrigida} (kJ)	V (kV)	C (10 ⁻⁶ F)	V (kV) quebra
24	0,024	0,0096	3,4	20	16,0	28
42	0,042	0,0168	5,9	27	16,0	30
48	0,048	0,0192	6,7	29	16,0	34
22	0,05	0,0200	7,0	30	16,0	31
16	0,052	0,0208	7,3	30	16,0	31

Seja: Q - peso da amostra; $V_{vol.}$ - volume da amostra; $W_{geomec. Efetiva}$ - energia geomecânica efetiva (corrigida a % de perdas); V - tensão de carregamento nominal; C - capacitância; $V_{ruptura}$ - tensão de carregamento ruptura da rocha.

Com objetivo de auxiliar na obtenção de expressões analíticas para determinação de energia de ruptura simples, foi estudado outra Teoria de Energia Geomecânica para aplicação em amostras cilíndricas, baseado no modelo de Cilindro de Parede Espessa, mostrado no anexo 1.

3.4 TEORIAS DE COMINUIÇÃO DE ROCHAS

As teorias a respeito da cominuição assumem que o material é frágil (quebradiço), e que os cristais de fato podem armazenar energia sem quebrar, e liberar esta energia quando a tensão é cessada (ou removida). Trata-se de materiais de comportamento elástico. A energia não é totalmente absorvida pelo processo assemelhando-se a uma alongação ou contração que ao final não é utilizado na quebra. Todavia, a presença de água, a energia requerida para cominuição diminui (WILLS, 1985).

WILLS (1985) considera que o grande problema da cominuição é o fato da maior parte da energia fornecida às máquinas de britagem ou de moagem ser absorvida pela própria máquina, e apenas uma pequena fração da energia total ser utilizada para quebra do material. Trata-se de uma relação entre a energia requerida para a quebra do material e a

nova superfície produzida no processo. Esta relação pode ser conhecida se a energia consumida na produção da nova superfície (face) puder ser medida separadamente.

Na prática, as partículas apresentam formas irregulares, consideradas como massas não uniformes. A quebra da partícula pode ser: por esmagamento, por impacto ou por atrito. Os modos de fratura (compressão, tração e cisalhamento) dependem das propriedades mecânicas da rocha e do tipo de esforço aplicado (WILLS, 1985). Quando uma partícula é quebrada por compressão, ou por esmagamento, ocorre dois tipos distintos de tamanhos: (a) partículas grossas resultantes da propagação da tensão aplicada pelas fraturas (pre-existent) da rocha; e (b) partículas finas resultantes da compressão das fraturas próximas dos pontos de aplicação dos esforço aplicado ou, por projeções de planos de cisalhamento (WILLS, 1985).

A teoria mais antiga de fragmentação é atribuída a RITTINGER, em 1867, considerada a primeira teoria da fragmentação. Estabelece que a energia consumida na redução de tamanho é proporcional a área da nova superfície produzida. A área da superfície de uma partícula de peso conhecido e de diâmetro uniforme é inversamente proporcional ao diâmetro ao quadrado, dado pela expressão:

$$E = K \left[\frac{1}{D_2^2} - \frac{1}{D_1^2} \right] \quad (3.18)$$

E - a energia fornecida (*input*);

D_1 - tamanho inicial da partícula;

D_2 - tamanho final da partícula;

K - constante.

A segunda teoria da fragmentação, formulada por KICK em 1885, estabelece que o trabalho requerido é proporcional a redução no volume da partícula. A teoria assume que a energia requerida para a cominuição é proporcional a expressão:

$$E = \frac{\log R}{\log 2} \quad (3.19)$$

R - a razão de redução dada por f/p ;

f - diâmetro da partícula da alimentação;

p - diâmetro da partícula do produto obtido.

A teoria de BOND, considerada a terceira lei da fragmentação, surgiu em 1952. Pode ser sintetizada em três princípios:

(i) O trabalho requerido por um moinho é representado pela diferença entre o trabalho requerido pelo produto e o trabalho requerido (previamente) pela alimentação, segundo a expressão:

$$W = 10W_i \left[\frac{1}{P} - \frac{1}{F} \right] \quad (3.20)$$

P - abertura de peneira em micra, onde 80% em peso do produto passante;

F - abertura da peneira em micra, por onde 80% em peso do material da alimentação passante;

(ii) O trabalho absorvido varia em razão inversa das raízes quadradas dos diâmetros das partículas de alimentação, e do produto para o mesmo peso do material cominuído;

(iii) A resistência oferecida pela rocha depende da magnitude caracteriza a resistência mecânica da mesma.

A avaliação quantitativa de fragmentação em desmonte em larga escala, na maioria das vezes, é uma tarefa trabalhosa. A maior parte dos métodos comumente empregados em avaliação de fragmentação por desmonte convencional são: análise visual; método fotográfico; fotogrametria convencional e de alta velocidade; contagem de matações; consumo de explosivos em desmonte secundário; razão de carregamento de carregadeira; dentre outros (SINGH; ROY, 1993).

DURÃES (1976) ressalta que, em relação as quantidades medidas, RITTINGER (1867) se refere a superfície, KICK (1885) se refere a diâmetro de partícula e BOND (1952) se refere a tamanho passante por uma determinada malha. E com relação ao 2º princípio da teoria postulada por BOND (1952), o trabalho (ou energia) requerido na moagem varia com o tamanho da trinca. Isto implica no limite de elasticidade do material e não com a superfície ou com o volume da partícula.

De acordo com DURÃES (1976), a teoria de KICK é melhor aplicada para britagem. Enquanto que a teoria de RITTINGER para moagem e pulverizadores.

LU et al. (1999) considera a teoria de BOND como melhor modelo de fragmentação à ser utilizado para operações de desmonte de rochas.

O conhecimento de teorias, considerações, modelos e expressões de valores de energia de ruptura e/ou de fragmentação de rochas por mecanismos dinâmicos em desmonte eletrohidráulico, balizou os ensaios do modelo tecnológico, ora proposto, que consiste o Item seguinte: Modelo Tecnológico de Desmonte Eletrohidráulico para Áreas Urbanizadas.

4 MODELO TECNOLÓGICO DE DESMONTE ELETROHIDRÁULICO PARA ÁREAS URBANIZADAS

O desenvolvimento do modelo tecnológico de desmonte de rochas utilizando o princípio eletrohidráulico inclui várias áreas de conhecimento da Ciência. Reúne a mecânica das propriedades das rochas e suas implicações em processos de fragmentação; os fenômenos físicos e elétricos do efeito eletrohidráulico para quebra de rochas; os materiais e metodologia de aplicação da tecnologia eletrohidráulica; e as medidas de segurança e manuseio para trabalhos de engenharia de alta tensão. Portanto, a proposição de Modelo Tecnológico de Desmonte Eletrohidráulico deste trabalho está configurado a seguir:

4.1 PARAMETRIZAÇÃO GEOMECÂNICA E ENSAIOS ASSOCIADOS

De acordo com LOPEZ JIMENO et al. (1995) os materiais componentes das rochas possuem características físicas em função de sua origem e processos geológicos envolvidos. O conjunto desses fenômenos abrange: (i) o ambiente e peculiaridades da litologia responsáveis por heterogeneidades devido a adição de minerais policristalinos; (ii) as descontinuidades da rocha matriz, como poros, fissuras, etc.; (iii) o estado geológico que caracteriza o estado de tensão responsável pelas estruturas de descontinuidades, como: planos de acamamentos, fraturas, diabases, juntas, etc..

As constantes elásticas estáticas das rochas representam as relações entre tensões e deformações do material, como: módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson, módulo de rigibilidade, módulo de volume e constante de *Lamé*. As constantes elásticas dinâmicas das rochas são àquelas sujeitas a esforços dinâmico e transitório.

Os valores dos parâmetros geomecânicos estáticos atuantes em processos de ruptura de rochas por desmonte convencional, por exemplo, podem ser determinados através de ensaios geomecânicos como: resistência à compressão uniaxial σ_c ; módulo de elasticidade E ; coeficiente de Poisson ν ; resistência à tração indireta por Método Brasileiro σ_t ; coesão interna c e ângulo de atrito interno ϕ . Os parâmetros geomecânicos dinâmicos

são determinados através de medidas de velocidades de ondas elásticas como: velocidades de ondas longitudinais e torsionais pelo método de ressonância; velocidades de ondas de compressão V_p e de cisalhamento V_s pelo método de pulso ultrassônico. No método de pulso ultrassônico as constantes elásticas são determinadas através da densidade e da velocidade das ondas primária P e secundária S , utilizando-se expressões derivadas da Teoria da Elasticidade.

Para esta pesquisa (Tese) foram utilizados testemunhos de sondagens do 7º Piso da cava da Mina Fazenda da Graça como corpos de prova para os ensaios geomecânicos. O material é caracterizado como calcário calcítico de origem sedimentar (MABESSONE; ALHEIROS, 1988). A seleção e coleta de amostras, blocos de rochas até 150kg, deu-se nas pilhas de material desmontado e nas pilhas “pulmão” de alimentação da Unidade de Britagem.

As Minas Fazenda da Graça e Riacho do Poente são explotadas a céu aberto por método de lavra em cava. As operações unitárias envolvidas são: desmonte por explosivo, carregamento e transporte por pá carregadeiras e caminhões fora-de-estrada, respectivamente. A distância de transporte, do material das frentes de lavra à unidade de britagem, varia segundo a disposição do minério nas bancadas.

Segundo MABESSONE; ALHEIROS (1988) os depósitos minerais são constituídos por rochas calcárias, representadas litologicamente pela Formação Gramame da Bacia Sedimentar Pernambuco-Paraíba. Os depósitos são sotopostos por uma camada de calcário magnesiano (dolomítico) de coloração amarelada e pelos sedimentos areno-argilosos da Formação Barreiras. A origem desses calcários está atribuída a uma bacia sedimentar marinha. Estruturalmente, os calcários apresentam mergulho sub-horizontal de 1º a leste. A fig. 4.1 mostra a face de uma bancada e seu perfil litológico.

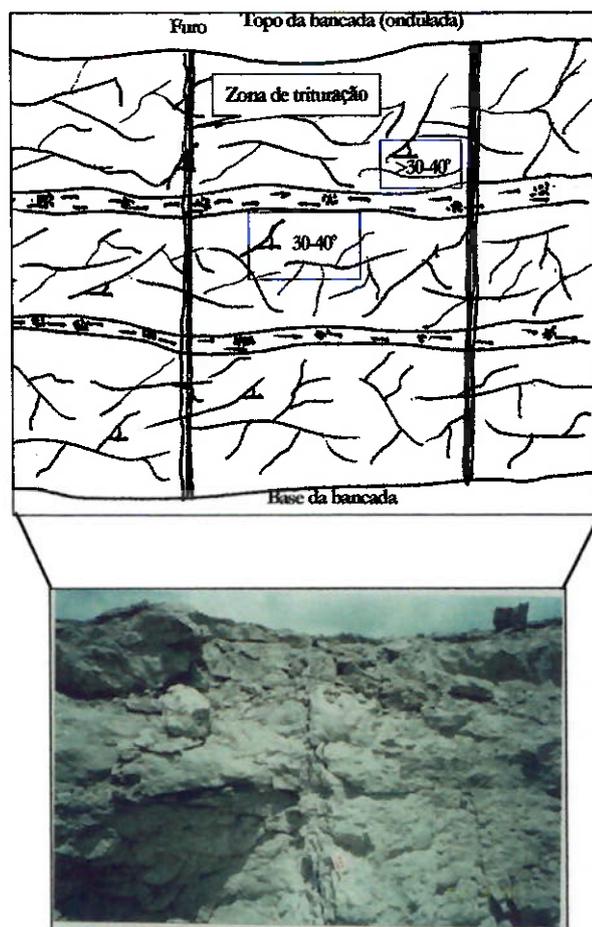


Fig.4.1 Face de uma bancada de lavra e seus elementos litológicos e estruturais (Mina Fazenda da Graça).

O maciço é caracterizado como calcário fossilífero de coloração cinza-claro constituído por minerais secundários de calcita e pirita, matriz circundante argilosa, granulometria fina, contendo estratificação tabular a subhorizontal, com presença de estruturas sedimentares com formas de marcas onduladas envolvendo módulos de argila com dimensão de 1-2cm. O calcário é caracterizado por várias famílias de fraturas, mostrando detalhe em croqui da fig. 4.1, direção entre 30° a 40° .

Os ensaios geomecânicos para determinação das variáveis elásticas dinâmicas, foram efetuados através de método de pulso ultrassônico realizados no Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPT. Enquanto que, os ensaios geomecânicos para as variáveis elásticas estáticas, foram realizados no do Laboratório de Mecânica de Rochas - LMR da Escola Politécnica da USP – EPUSP. Os ensaios realizados no LMR seguiram a seqüência de execução das etapas 1 a 6 mostrada no fluxograma da fig. 4.2.

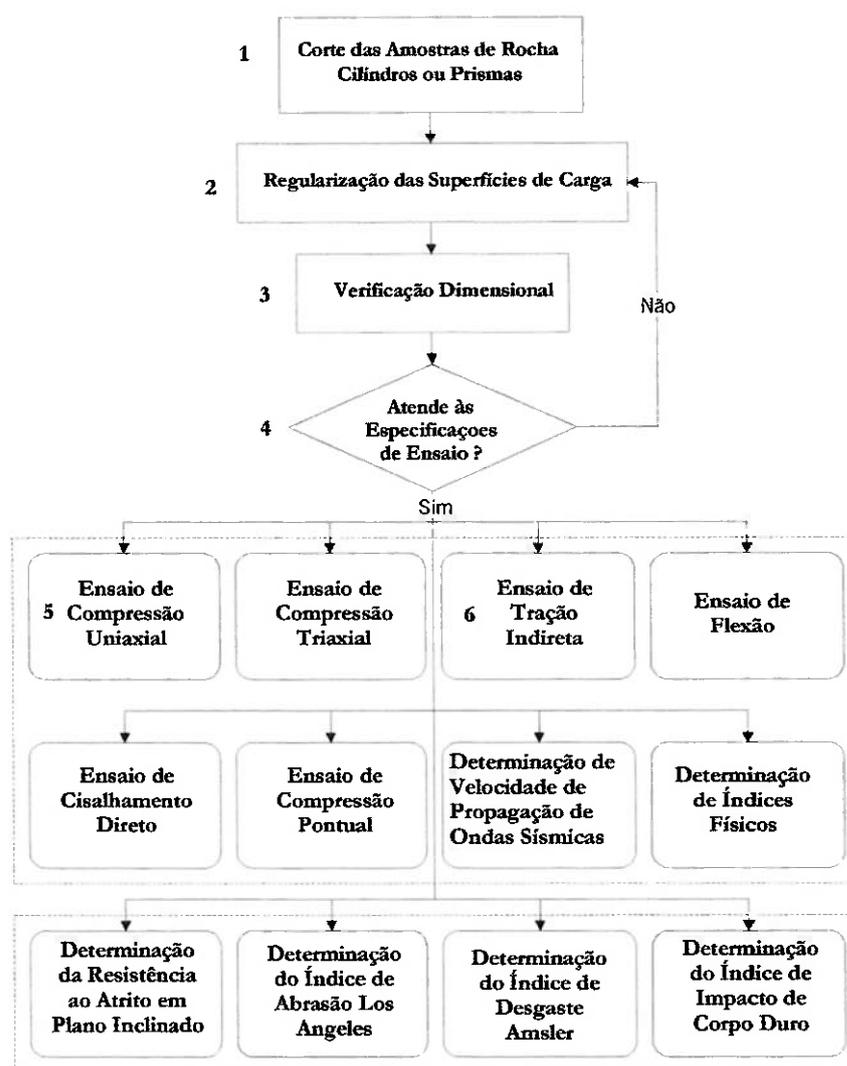


Fig. 4.2 Fluxograma de ensaios geomecânicos do LMR da EPUSP.

A fig. 4.3 mostra corpos de prova usados nos ensaios geomecânicos, cerca de cinco amostras, para ensaios em equipamentos servo-controlados mostrados na fig. 4.4.

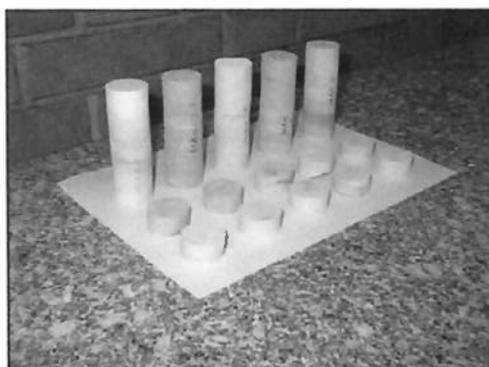


Fig. 4.3 Foto dos corpos de prova a serem ensaiados.

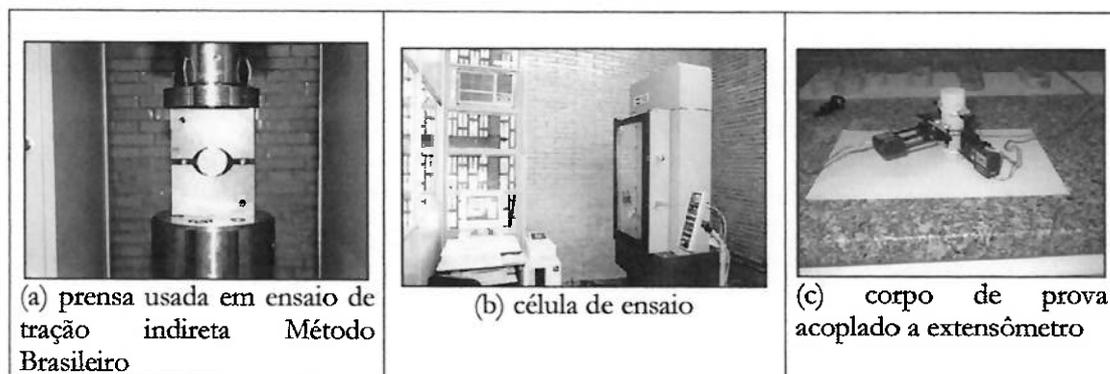


Fig. 4.4 Sistema servo-controlado utilizado nos ensaios geomecânicos (LMR/EPUSP-PMI).

A seqüência de preparação e dos ensaios geomecânicos encontra-se descrita a seguir:

(i) Preparação de Amostras: corte dos testemunhos em serra diamantada conforme especificações mostradas no quadro de resultados de ensaios de compressão uniaxial; retificação de superfícies e controle dimensional. As amostras preparadas estão mostradas na fig. 4.3.

(ii) Descrição dos ensaios:

a) Ensaios de compressão uniaxial: para determinação de parâmetros elásticos, segundo normalização de ensaios estabelecida pela International Society of Rock Mechanics – ISRM, “Suggested Methods for Determining the Uniaxial Compressive Strength and Deformability of Rock Materials”. Foram utilizados corpos de prova cilíndricos, mostrados na fig. 4.5.



Fig. 4.5 Foto de corpos de prova para ensaio de compressão uniaxial.

b) Ensaios de tração indireta (Método Brasileiro): foram utilizados corpos de prova cilíndricos, mostrados na fig. 4.6, para aferição de resistência à tração indireta através do método brasileiro, segundo normalização de ensaios estabelecida pela International Society of Rock Mechanics – ISRM, “Suggested Method for Determining Indirect Tensile Strength by the Brazil Test”.

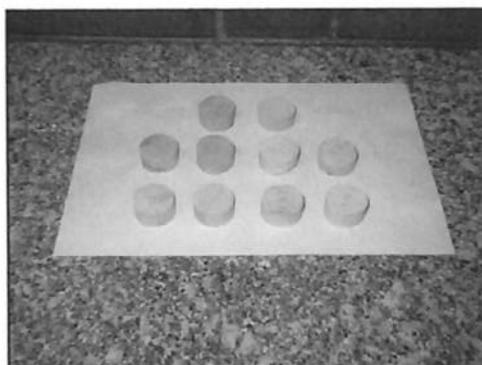


Fig. 4.6 Foto de corpos de prova para ensaio de tração indireta (Método Brasileiro).

c) Metodologia aplicada para determinação dos parâmetros geomecânicos baseado em critérios de ruptura de HOEK; BROWN (1987). Dados: σ_3 : -4,6 MPa; σ_1 : 42,9 MPa.

(i) Critério de Ruptura de Mohr-Coulomb prevê uma envoltória linear para o gráfico τ x σ_N segundo as seguintes expressões:

$$\sigma_1 = \frac{1 + \text{sen} \varphi}{1 - \text{sen} \varphi} \sigma_3 + c \frac{2 \cos \varphi}{1 - \text{sen} \varphi} \quad (4.1)$$

$$\tau = c + \sigma_1 \text{tg} \varphi \quad (4.2)$$

σ_1 = tensão principal maior na ruptura

σ_3 = tensão principal menor na ruptura

τ = tensão de cisalhamento na ruptura

σ_c = resistência à compressão simples da rocha intacta

c = coesão

φ = ângulo de atrito

(ii) Critério de Ruptura de HOEK; BROWN (1987) prevê uma envoltória curvelínea para o gráfico τ x σ_N segundo a seguinte expressão:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{m \sigma_c \sigma_3 + s \sigma_c^2} \quad (4.3)$$

σ_1 = tensão principal maior na ruptura

σ_3 = tensão principal menor na ruptura

σ_c = resistência à compressão simples da rocha intacta

m e s = constantes

4.2 PARAMETRIZAÇÃO ELETROHIDRÁULICA

4.2.1 SOLUÇÃO IONIZÁVEL

As soluções líquidas podem ser classificadas como soluções iônicas e ou soluções moleculares. As partículas do soluto podem conter ou não cargas elétricas (BUENO et al., 1978).

Sais dissolvidos em solventes polares, como a água, por exemplo, as moléculas do solvente (água) irão destruir o retículo cristalino do soluto (sais), e assim, a solução passará a contar com íons móveis, que terá capacidade de conduzir eletricidade (condutância eletrolítica). Nestes casos, as soluções são denominadas soluções iônicas (ou eletrolíticas), sendo o constituinte soluto denominado eletrólito. A maioria dos sais são considerados eletrólitos. Caso contrário, a solução não poderá conduzir eletricidade, sendo denominada de solução molecular ou não-eletrolítica (BUENO et al., 1978).

O princípio eletrohidráulico para desmonte de rochas requer um meio líquido (incompressível) que envolva a sonda, e conseqüentemente, as descargas elétricas. Trata-se de uma solução ionizável (ou eletrolítica) que irá se transformar em um canal de vapor e plasma de alta pressão e alta temperatura que exercerá um campo de tensão responsável pela quebra da rocha (KITZINGER et al., 1992; NANTEL; KITZINGER, 1992a, 1992b; HAMELIN et al., 1993; KLICH; RES, 1996).

Segundo QUAGLIANO; VILLARINO (1979) a quantificação de uma solução eletrolítica é expressa por concentração da substância. Os principais métodos para exprimir a concentração de uma solução, são: base peso/peso; base peso/volume; base volume/volume; base mol/volume (molaridade); base mol/peso (molalidade); e base mol/mol (fração molar).

O método base peso/volume foi adotado nesta pesquisa em virtude da disponibilidade e estado físico dos compostos serem facilmente encontrados no mercado. O método exprime a concentração de solução ionizável através da relação peso do soluto dissolvido em um dado volume do solvente, convenientemente tomado como 1000ml. Trata-se do uso de uma solução ionizável a 5 %, que corresponde a 50g de sulfato de cobre

(Cu_2SO_4) dissolvido em 1000ml de água destilada. Sua condutividade é da ordem de 12,33mS/cm a 25°C.

4.2.2 CONFIGURAÇÃO DO CIRCUITO ELÉTRICO RLC – GERADOR DE IMPULSO DE ALTA CORRENTE: ESCALA DE LABORATÓRIO

A tecnologia de desmonte de rochas envolvendo o princípio eletrohidráulico se baseia numa descarga elétrica através de centelhamento em meio líquido no interior do furo da rocha. Utiliza energia elétrica para transformar uma solução eletrolítica, confinada no furo previamente perfurado na rocha, em um canal de vapor e plasma de alta pressão e alta temperatura (BERGSTROM, 1961; KUTTER, 1969; KUTTER; FAIRHURST; 1971; KITZINGER et al., 1992; NANTEL; KITZINGER, 1992a, 1992b; HAMELIN et al., 1993; KLICH; RES, 1996).

Os circuitos elétricos RLC-série são caracterizados pelos parâmetros elétricos: resistência (R), indutância (L) e capacitância (C). Um Gerador de Impulso de Alta Corrente reúne características típicas de um circuito RLC - circuitos lineares de segunda ordem.

A produção do canal de vapor e do plasma requer uma descarga de corrente elétrica de alta intensidade no interior do furo da rocha. Portanto, um circuito elétrico RLC como um Gerador de Impulso de Alta Corrente, pode produzir descarga elétrica necessária para a ruptura e/ou fragmentação do bloco de rocha. A descarga é efetuada com auxílio de uma sonda (eletrodos concêntricos + sistema de fixação e vedação eletrodo-rocha). Os circuitos RLC apresentados na literatura possuem configurações típicas de um Gerador de Impulso de Corrente (SILVA et al., 2000).

O gerador de impulso de corrente fornece formas de onda de corrente diretamente associadas aos parâmetros R, L e C, características do circuito do gerador (SILVA et al., 2000). Para aplicação em desmonte de rochas, a forma de onda do impulso de corrente deve ser ajustada de forma a produzir uma onda de pressão coerente com as necessidades de intensidade dos desmontes (SILVA et al., 2000).

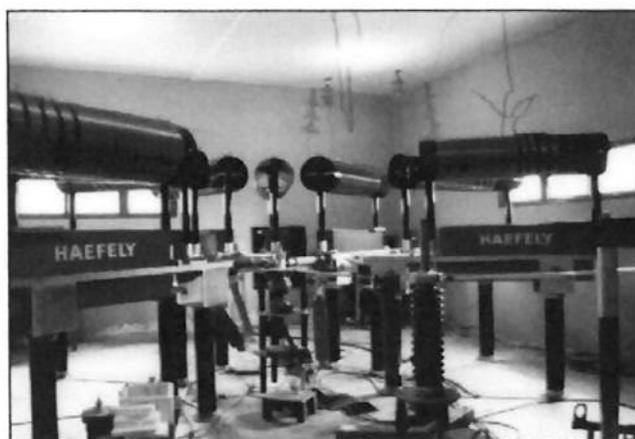
A energia elétrica necessária para a ruptura e/ou fragmentação de rochas é diretamente proporcional à capacitância do banco de capacitores do gerador. A utilização de um gerador de impulso de corrente no processo de desmonte de rochas requer o dimensionamento adequado dos parâmetros R, L e C. Para isso, a pesquisa contou com a colaboração de um Projeto de Iniciação (RÊGO FILHO, 1998-9) que, através de programa

computacional em linguagem Fortran 90 foi possível conhecer os parâmetros elétricos R, L e C do gerador de impulso conforme descritos na literatura.

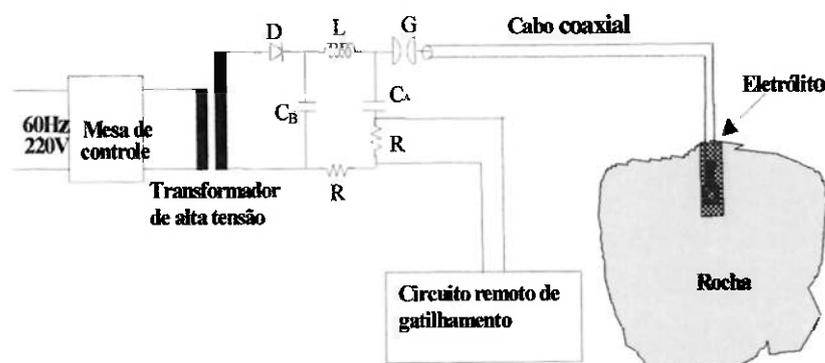
O arranjo estrutural de um gerador de impulso de alta corrente é composto por uma fonte de tensão alternada, seguida de um retificador para alimentar um banco de capacitores com tensão contínua no seu circuito. O controle da descarga da corrente elétrica do gerador, é realizado através de um par de esferas, denominadas esferas centelhadoras. Uma das esferas contém um eletrodo auxiliar que é acionado por um circuito de gatilhamento remoto.

O gerador de impulso de alta corrente deve dispor de um circuito de gatilhamento para garantir a descarga elétrica e para produzir o impulso desejado no momento correto. O circuito de gatilhamento deve garantir alta confiabilidade e segurança aos operadores, bem como possuir um funcionamento preciso, uma vez que operações com altas tensões oferecem riscos de vida.

A fig. 4.7a mostra o gerador de impulso de alta corrente do LAT/UFPB utilizado nos ensaios de desmorte eletrohidráulico em escala de laboratório. O gerador é formado basicamente por: um transformador de alta tensão com diodo retificador, um banco de capacitores, indutores, resistores, um par de esferas centelhadora e uma mesa de controle. O gerador pode ser montado com até 8 estágios (8 capacitores de $2\mu\text{F}$), totalizando uma corrente impulsiva de até 160kA. O equipamento reproduz impulsos de corrente exponenciais normalizados, com formas de onda $4/10\mu\text{s}$ e $8/20\mu\text{s}$ (descargas de alta corrente e descargas atmosféricas) e impulsos de corrente de onda quadrada. Todavia, é possível reproduzir uma grande variedade de outras formas de onda de impulso de corrente variando os parâmetros R, L e C.



(a) gerador de impulso de corrente do LAT/UFPB.



(b) arranjo estrutural do gerador de impulso de corrente aplicado a desmonte eletrohidráulico.

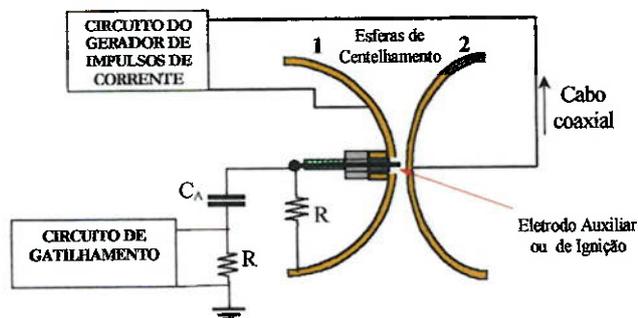
Fig. 4.7 Gerador de impulso de alta corrente empregado nos ensaios eletrohidráulicos.

Na fig. 4.7b é mostrado o arranjo estrutural do gerador de impulso de alta tensão do LAT empregado para a geração de impulsos exponenciais de corrente aplicado à desmonte eletrohidráulico de rochas. O transformador de alta tensão e o diodo D , alimentam um banco de capacitores $C1$. A tensão de carregamento pode ser ajustada para até 100kV. O banco de capacitores é descarregado no corpo-de-prova (rocha) após atingir a tensão determinada. A descarga do banco de capacitores é feita através de um cabo coaxial para isolamento de 15 kV (blindado, de cobre, de 25 mm²) que atua como uma sonda composta por eletrodos concêntricos, acoplado por um sistema de fixação e vedação eletrodo-rocha. O centelhador SFS controla o início da descarga por meio do eletrodo de gatilhamento. O circuito também possui uma indutância de choque L_c , uma resistência de amortecimento de corrente R_d e a resistência do transformador de alimentação R . O objeto de teste do gerador corresponde ao elemento T_0 .

O gerador de impulso possui um centelhador de controle (ou *spark-gap*) formado por duas semi-esferas (centelhadoras) de 200mm de diâmetro, conforme mostrado na fig. 4.8a. A semi-esfera superior é móvel e contém o eletrodo de ignição. A distância entre as esferas tem seu ajuste motorizado controlado à distância através da mesa de comando. O espaçamento máximo entre as esferas é de 330mm. Caso o ajuste de distância esteja no modo automático, as esferas são afastadas ou aproximadas pela mesa de comando, de acordo com o nível de tensão do banco de capacitores.



(a) centelhadores de controle do circuito gerador de impulso de corrente

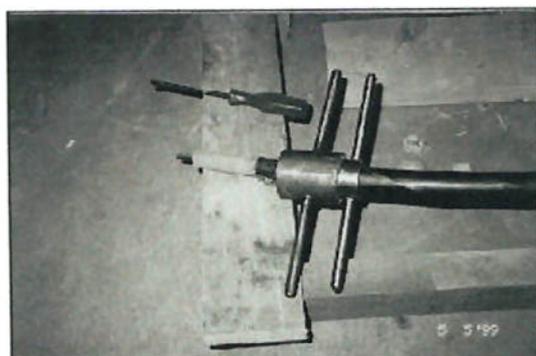


(b) arranjo estrutural dos centelhadores de controle

Fig. 4.8 Circuito centelhador empregado nos ensaios eletrohidráulicos.

4.2.3 ELETRODOS CONCÊNTRICOS E SISTEMA DE FIXAÇÃO ELETRODO-ROCHA

A condução das descargas elétricas do gerador de impulso à rocha se faz através de uma sonda, que corresponde a um cabo coaxial dotado de eletrodos. Conforme o valor da tensão a ser aplicada, a capacidade de isolamento do cabo varia, bem como seu diâmetro. Os eletrodos possuem a finalidade de formação do arco elétrico responsável pelo volume plasmático. A fig. 4.9 mostra os eletrodos, concêntricos isolados entre si, acoplados ao sistema de fixação e vedação especialmente projetado para esta pesquisa.



(a) sonda acoplada por mecanismo de rosca – 3ª versão.



(b) sonda acoplada por mecanismo de encaixe – sistema atual.

Fig. 4.9 Sonda usada para descargas elétricas acoplada ao sistema de fixação e vedação eletrodo-rocha.

4.2.4 ASPECTOS AMBIENTAIS: SEGURANÇA E MANUSEIO

As atividades de mineração em áreas urbanas são regidas pela Norma NBR 9653 da Associação Brasileira de Normas Técnicas. Esta Norma estabelece "metodologia para reduzir riscos inerentes ao desmonte de rocha com uso de explosivos em minerações, estabelecendo parâmetros a um grau compatível com a tecnologia disponível para a segurança das populações vizinhas". Os principais parâmetros de avaliação são: velocidade de partícula ($V_p < 15$ mm/s) e nível de ruído até 134 dB. Porém, considerando o ambiente interno da Mina, segundo LEMOS (2000), o ruído é considerado nocivo à saúde humana quando ultrapassa 85 dB, determinado como limite para exposição diária de oito horas.

Para trabalhos em Alta Tensão em laboratório, alguns procedimentos básicos merecem atenção, a saber:

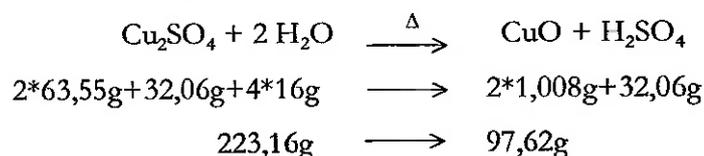
- equipamentos individual de segurança para trabalhos em ambiente de Alta Tensão;
- a área de trabalho deve ser interditada e visivelmente sinalizada;
- as partes de entrada (acesso) ao local de ensaio devem possuir chave fim-de-curso para desligamento automático da bancada de comando de ensaio;
- para desligamento do sistema, deve ser equipado por uma chave-terra responsável pelo aterramento entre as partes componentes de Alta Tensão e do Terra;
- os componentes e terminais metálicos devem ser novamente aterrados manualmente através de outra haste;

Para trabalhos em escala piloto, pode ser recomendado a Norma de Manutenção da CHESF "Planejamento e Execução da Manutenção em Equipamentos de Subestação – NM- MN-SE-S.002". Trata-se de uma norma interna que também contempla os aspectos de segurança e riscos em trabalhos com Alta Tensão.

Outra consideração do ponto de vista ambiental, é o resultado final da transformação da solução ionizável (Cu_2SO_4 a 5%) em plasma, que gera ácido sulfúrico. A quantidade de ácido sulfúrico liberado à atmosfera na forma de gás ou vapor gerados pelas descargas elétricas, é mostrada segundo o balanço estequiométrico das concentrações dos componentes da solução (soluto e solvente):

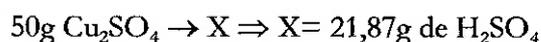
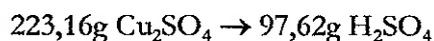
Soluto: sulfato de cobre – Cu_2SO_4 (Cu=63,55g; S=32,06g; O=16g)

Solvente: água destilada – H_2O (H=1,008g; O=16g)



Solução de 1000ml a 5%, tem-se: 950g de H₂O e 50g Cu₂SO₄

Portanto:



Pode-se considerar que, em 1000ml (ou 1000g) de uma solução eletrolítica de concentração de 5% de sulfato de cobre (Cu₂SO₄), libera à atmosfera na forma de gás cerca de 21,87g de ácido sulfúrico (H₂SO₄).

4.3 APLICAÇÃO DA TECNOLOGIA ELETROHIDRÁULICA DE DESMONTE DE ROCHAS: materiais e métodos

Os ensaios eletrohidráulicos relativos a materiais e equipamentos empregados e a metodologia adotada se basearam, inicialmente, na literatura concernente ao tema (BERGSTROM, 1961; KUTTER, 1969; KUTTER; FAIRHURST; 1971; KITZINGER et al., 1992; NANTEL; KITZINGER, 1992a, 1992b; HAMELIN et al., 1993; KLICH; RES, 1996). Este item ainda conta procedimentos de segurança para trabalhos de alta tensão elaborado e adotado pela Companhia Hidro-Energética do São Francisco - CHESF.

4.3.1 MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

- Equipamentos de segurança de proteção individual - EPIs (luvas, capacetes, protetores auriculares, óculos e botas de borracha);
- 18 amostras de rochas de calcário calcítico de 24 à 100kg (Fig. 4.10). Blocos de rochas procedentes das pilhas de material desmontado (ROM);
- Solução ionizável a 5%: soluto - sulfato de cobre (Cu₂SO₄) e água destilada (solvente);
- Dinamômetro (Kratos) de 100kg de capacidade de carga para pesagem das amostras;
 - Marteleto, furadeira de bancada e broca vídia de 1^{1/2} polegada;
 - Sistema de fixação e vedação eletrodo-rocha;
 - Cabo coaxial para isolamento de 15 kV, blindado, de cobre, 25 mm²;
 - Circuito gerador de impulso de alta corrente;

- Circuito de cetelhamento;
- Grade de proteção para amostras (blocos) - gaiola (1,1m X 0,8m X 0,7m);
- Estrado de madeira (1 m X 1,4 m).



Fig. 4.10 Amostras de rochas calcárias destinadas a ensaios eletrohidráulicos.

4.3.2 METODOLOGIA

(i) preparação das amostras: inicialmente procura-se identificar traços de descontinuidades da rocha (estratigrafia, direção dos minerais, etc.) visando o posicionamento da perfuração do bloco. Os furos são executados por martelete com diâmetros de 1½” perpendicularmente a direção de estratificação, com profundidades entre 10 à 15cm, que correspondem 1/3 a 1/2 da altura dos blocos. Em seguida, pesa-se as amostras com dinamômetro individualmente. Por último, as amostras são dispostas sobre o estrado de madeira que as isolam do solo. A Tab. 4.1 resume as características geométricas dos corpos-de-prova ensaiados.

TABELA 4.1 – Características geométricas das amostras selecionadas para os ensaios eletrohidráulicos.

Amostra	Peso (kg)	Volume (m ³)	Altura da amostra H (m)	Profundidade do furo h (m)
Amostra 24	24,00	0,01	0,260	0,130
Amostra 42	42,00	0,0168	0,230	0,160
Amostra 48	48,00	0,0192	0,285	0,120
Amostra 22	50,00	0,02	0,280	0,120
Amostra 16	52,00	0,0208	0,34	0,18

(ii) preparação da solução ionizável: as soluções são preparadas a uma concentração de 5% de soluto (sulfatos de cobre - Cu₂SO) através do método base peso/volume que corresponde a 50g de Cu₂SO₄ dissolvido em 1000ml de água destilada.

(iii) preparação do circuito gerador de impulso de alta corrente: o circuito é montado com oito estágios de capacitores em paralelo, com capacitância nominal de $2 \mu\text{F}$ cada, conforme mostrado na fig. 4.11. Em seguida, efetua-se o acionamento da fonte de alta tensão por diodo. A conexão da rocha ao indutor é feita através do cabo coaxial.



Fig. 4.11 Preparação e montagem do circuito elétrico gerador de impulso de alta corrente.

(iv) montagem do cabo coaxial (gerador à amostra): após a montagem do cabo no gerador de impulso, acopla-se o sistema de fixação e vedação à amostra mostrado nas figs. 4.12a e 4.12b. Em seguida, insere-se a solução ionizável no interior do furo da rocha juntamente com o eletrodo fixado a sonda, acoplando-o à amostra a ser ensaiada. Posteriormente, coloca-se a grade de proteção sobre o bloco, deixando-o pronto para a execução do desmonte, conforme mostrado na fig. 4.12c.



(a) eletrodos acoplados ao sistema de fixação e vedação eletrodo-rocha



(b) montagem dos eletrodos na rocha



(c) rocha (ensaiada)

Fig. 4.12 Montagem do cabo coaxial do gerador à amostra.

(v) Calibração do gerador de impulso de alta corrente: a fig. 4.13a mostra a alimentação do transformador de alta tensão controlado pela mesa de comandos. A alta tensão é retificada de acordo com valores da Tab. 3.3 do Item 3, e o banco de capacitores C_B é alimentado em tensão contínua. Os valores de C_B , L e da resistência do eletrólito definem a

forma de onda do impulso de corrente. A potência da fonte de alimentação com tensão retificada determina o tempo mínimo de carregamento do banco de capacitores (HAFFLEY, 1981). Quando a tensão nos capacitores atinge o valor pré-estabelecido, aciona-se um comando que promove a descarga elétrica no eletrólito – uma descarga por amostra. A descarga causa um intenso fluxo de elétrons entre os 2 eletrodos (concêntricos e isolados entre si) de uma sonda especialmente desenvolvida para esta finalidade.



(a) mesa de comando de controle do LAT



(b) esquema alternativo de uma mesa de controle de um gerador de impulso de corrente

Fig. 4.13 Mesa de comando do circuito gerador de impulso de alta corrente (LAT/DEE/UFPB).

A fig. 4.13b representa o esboço alternativo de uma mesa de controle de um gerador de impulso de corrente. A mesa contém um voltímetro para medição da tensão de carregamento, um indicador de nível de energia líquida disponível para o rompimento da rocha, e um indicador do valor do banco de capacitores utilizado. A indicação do valor do banco de capacitores torna-se efetivo para o cálculo da energia armazenada, que multiplicada pelo fator de eficiência 0,5 (50%), produz a energia líquida fornecida a rocha. A mesa é dotada de terminais de regulação de elevação e abaixamento da tensão de carregamento. O acionamento do gatilhamento da corrente é feito através de uma chave geral.

Os resultados e discussões da aplicação do modelo tecnológico de desmonte eletrohidráulico proposto, resumem o Item seguinte.

5 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Este item corresponde aos resultados e estudos acerca do modelo tecnológico de desmonte eletrohidráulico proposto, com base na literatura levantada, nos estudos geomecânicos, nos ensaios de laboratório, bem como as implicações econômicas e ambientais.

5.1 ASPECTOS GEOMECÂNICOS

Os ensaios geomecânicos foram baseados em metodologias de ensaios sugeridos pela ISRM - *International Society of Rock Mechanics*. Os ensaios apresentaram os seguintes resultados:

a) **Ensaio de compressão uniaxial:** determinação de parâmetros elásticos como resistência de compressão σ_c , módulo de elasticidade E e coeficiente de Poisson ν . Os parâmetros obtidos foram: $\sigma_c = 51,5$ MPa (máxima); $E = 9.485$ MPa; $\nu = 0,23$. Os resultados são apresentados na Tab. 5.1. A fig. 5.1 mostra as formas de ruptura obtidas segundo planos cisalhantes.

TABELA 5.1 – Resultado dos parâmetros geomecânicos de ensaio de compressão uniaxial.

CP	ϕ (mm)	H (mm)	σ_c (MPa)	E (MPa)	ν	Observações
CP01	29,84	90,33	51,5	9.462	0,20	
CP02	29,54	89,44	16,3	1.470	0,19	Resultados Desprezados
CP03	29,74	90,88	42,7	12.931	0,31	
CP04	29,71	88,16	39,8	9.265	0,23	
CP05	29,84	90,43	37,6	6.280	0,16	
Média	29,71	89,70	42,9	9.485	0,23	

Na Tab. 5.1 considerou-se o valor máximo de resistência uniaxial para determinação da energia geomecânica nominal de ruptura simples através da expressão 3.17.

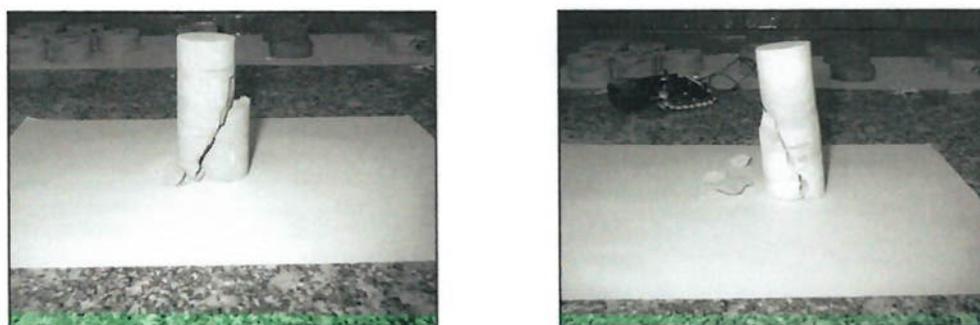


Fig. 5.1 Ruptura típica em compressão uniaxial.

b) **Ensaio de tração indireta (Método Brasileiro):** aferição de resistência à tração indireta através do método brasileiro. O parâmetro geomecânico obtido foi: $\sigma_T = 4,6$ MPa. A Tab. 5.2 apresenta os resultados dos ensaios de resistência à tração do material. A fig. 5.2 mostra as formas de quebra do material ensaiado.

TABELA 5.2 - Resultado dos ensaios de tração indireta (método brasileiro).

CP	ϕ (mm)	H (mm)	F (KN)	σ_T (MPa)
CP06	29,65	14,45	3,2	4,7
CP07	29,63	14,41	3,7	5,6
CP08	29,77	14,08	3,0	4,6
CP09	29,58	14,35	4,5	6,7
CP10	29,59	14,34	2,9	4,3
CP11	29,63	14,18	2,9	4,5
CP12	29,59	14,08	2,7	4,1
CP13	29,63	14,44	2,1	3,1
CP14	29,65	14,43	2,3	3,5
CP15	29,77	14,26	3,2	4,8
Média	29,65	14,30	3,1	4,6

O princípio eletrohidráulico aplicado para quebra de rochas envolve pulsos de descargas quase instantâneas da ordem de microssegundos. Emprega mecanismos dinâmicos de propagação de frente de onda compressiva, semelhante aos mecanismos de fragmentação desenvolvidos pela tecnologia de desmonte convencional. Por outro lado, sabe-se que a fase dinâmica no processo de fragmentação em desmonte convencional consome pouca energia, cerca de 5-15% da energia total do explosivo. Desta energia, apenas 1/3 é aproveitado de forma útil e o restante dissipado no ar e no interior do maciço (FUJIMURA, 1999). Nos casos de fragmentação por britagem e moagem, a eficiência do aproveitamento de energia é aproximadamente de 1%, o restante é convertido em calor e ruído (FUJIMURA, 1999), enquanto o processo de quebra dá-se por compressão (esmagamento) e por atrito.

Vale ressaltar que os mecanismos dinâmicos de ruptura atuantes através da propagação de ondas de choque, não permitem as fendas, trincas e fraturas se manifestarem a tempo. Daí a necessidade de valores energéticos elevados para ruptura da rocha. Neste sentido, buscou-se um fator de correção de eficiência de energia geomecânica de ruptura simples (energia de deformação) para processo estático conforme teoria proposta no Item 3. Por outro lado, o modo de ruptura, segundo a fig. 5.7 adiante, ocorre com maior frequência por tração. Este modo ruptura é denominado por FUJIMURA (1999) de Modo I (tração simples), tido como mais importante e mais comum encontrado nas situações práticas. Embora também são encontrados para diversas estruturas rochosas o Modo II (cisalhamento), bem como o modo misto I e II (FUJIMURA, 1999).

Outra questão relevante é o fator escala, no tocante a representatividade da amostra de rochas calcárias de origem sedimentar. Os blocos utilizados como corpos de prova podem ser considerados como rocha intacta, que em média, são compostos por um sistema de família de fraturas, e conseqüentemente, as implicações anisotrópicas são menos preponderantes. Enquanto o maciço (bancada) é composto por vários sistemas de famílias de fraturas, e portanto, o fator anisotrópico é mais interferente na fragmentação.

Os valores de energia geomecânica corrigida mostrada na Tab. 3.2 balizaram a determinação dos valores de tensão de carregamento, mostrados na Tab. 3.3, a serem fornecidas ao gerador de impulso de alta corrente para os ensaios eletrohidráulicos.

5.2 ASPECTOS ELETROHIDRÁULICOS

Os parâmetros elétricos R , L , C , apresentados na literatura, foram determinados a partir de simulação de curvas experimentais apresentadas por KLICH; RÈS (1996) utilizados em desmante de blocos de granitos de 6 toneladas. A simulação numérica forneceu os seguintes valores: capacitância igual a $1700 \mu\text{F}$, indutância igual a $13,3 \text{ mH}$ e resistência de eletrólito igual a $38,6 \text{ m}\Omega$. As Figs. 5.3, 5.4, 5.5 e 5.6 mostram, respectivamente, as formas de onda da corrente, da tensão, da potência e da energia foram obtidas por simulação computacional. As curvas mostraram semelhanças com as curvas apresentadas por KLICH; RÈS (1996).

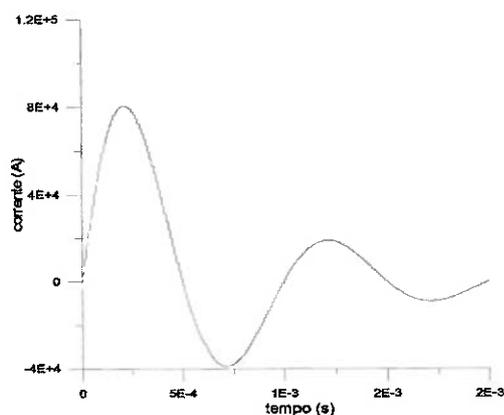


Fig. 5.3 Forma de onda de corrente obtidas pelo programa desenvolvido em Fortran (FARRER; BECKER, s.d.).

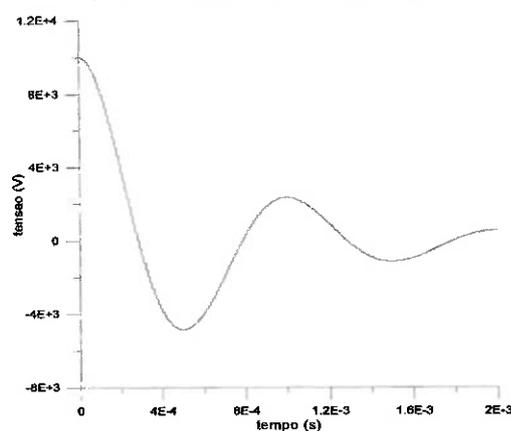


Fig. 5.4 Forma de onda de tensão obtidas pelo programa desenvolvido em Fortran (FARRER; BECKER, s.d.).

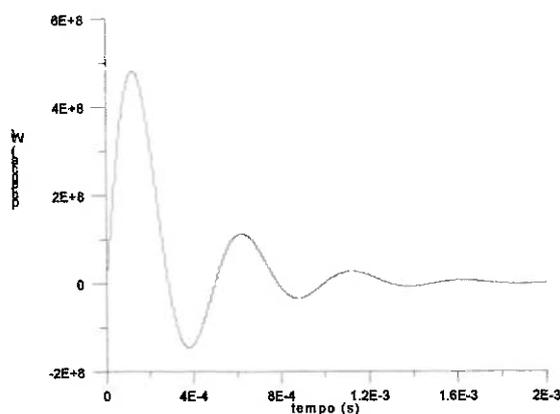


Fig. 5.5 Forma de onda de potência obtidas pelo programa desenvolvido em Fortran (FARRER; BECKER, s.d.).

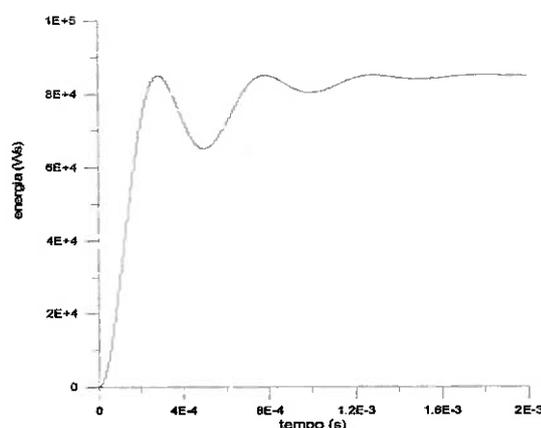


Fig. 5.6 Forma de onda de energia obtidas pelo programa desenvolvido em Fortran (FARRER; BECKER, s.d.).

O banco de capacitores fornecido pelo programa da simulação para reproduzir os dados apresentados por KLICH; RES (1996), apresentou valor extremamente alto para utilização em rocha calcária pouco competente. Este fato justificou a utilização do gerador de impulso de corrente (HAEFELY, 1981), com banco de capacitores de $16\mu\text{F}$ com isolamento para 100kV, para a realização dos ensaios eletrohidráulico em escala de laboratório para amostras de volume reduzido até 150kg.

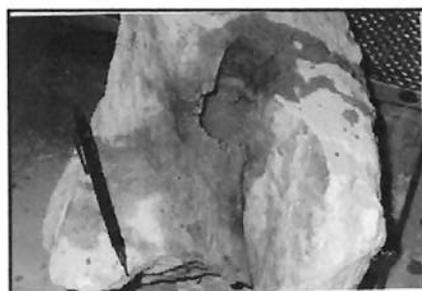
Os valores de tensão (kV) de carregamento do banco de capacitores, mostrados na Tab. 3.3, foram determinados a partir de correlação entre a os valores de energia geomecânica corrigida e a energia elétrica efetiva de quebra da amostra calculada pela expressão 2.2.1.

Para os ensaios eletrohidráulicos foi selecionado 5 amostras: amostra 24, amostra 42, amostra 48, amostra 22 e amostra 16. Os ensaios serviram para a validação e calibração

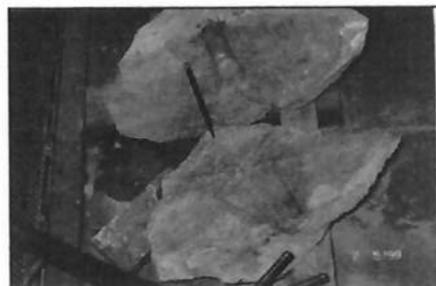
da tecnologia proposta, apoiado nos estudos geomecânicos descritos no item 3. Os resultados dos ensaios eletrohidráulicos se mostraram satisfatórios, conforme valores mostrados na Tab. 5.3, e formas de ruptura ilustradas na fig. 5.7.

TABELA 5.3 – Valores de energias nominal (geomecânica corrigida) e efetiva (elétrica) obtidas a partir de ensaios geomecânicos e eletrohidráulicos.

Amostra	Energia geomecânica corrigida (kJ)	Energia elétrica (kJ)	Erro (%)
24	3,40	6,27	45,77
42	5,90	7,20	18,05
48	6,70	9,25	27,57
22	7,00	7,67	8,74
16	7,30	7,67	4,82



amostra 24



amostra 42



amostra 22



amostra 48



amostra 16

Fig. 5.7 Formas de ruptura das amostras de ensaios eletrohidráulicos.

KITZINGER et al. (1992), NANTEL; KITZINGER (1992a e 1992b), HAMELIN et al. (1993) alcançaram rendimento médio de 60%.

As considerações sobre as perdas e erros apresentados na Tab. 5.7, quanto a energia nominal (geomecânica corrigida) e a energia efetiva (elétrica) de quebra das amostras pelos ensaios eletrohidráulicos, estão relacionados a:

- (i) vazamentos de eletrólitos que ocasionam descargas elétricas ("*sparks*") no ar, produzindo volume plasmático insuficiente para gerar o campo de tensões (compressão e tração) para a ruptura e/ou fragmentação;
- (ii) pouco volume plasmático gerado devido o comprimento médio de exposição do eletrodo no furo, o que elevaria a expansão do plasma a promover melhor ruptura e/ou fragmentação;
- (iii) irregularidades dos furos que comprometem o funcionamento do sistema de fixação e vedação eletrodo-rocha;
- (iv) estudo mais detalhado de uma sonda e solução eletrolítica ideais;
- (v) aspectos anisotrópicos do material de estudo, tais como microtrincas e porosidade do calcário sedimentar.

A falta de co-produtos gasosos apresentado nos ensaios de desmonte eletrohidráulico, representa vantagens ambientais do princípio eletrohidráulico quanto a minimização de vibração do terreno e ultralancamento de fragmentos, além da redução de gases tóxicos, tornando-se promissor também para outras aplicações como em trabalhos de subsolo.

5.3 CONSIDERAÇÕES AMBIENTAIS

Com base na sequência metodológica empregada nos ensaios de laboratório (eletrohidráulicos), as etapas que apresentam riscos e desconfortos ambientais a serem monitoradas, são:

- (i) preparação das amostras – perfuração: mesmo os trabalhos de perfuração sendo realizados na Mina, não isenta os cuidados quanto ao período de exposição de ruídos contínuos gerados pela perfuratriz manual;
- (iii) preparação do circuito gerador de impulso de corrente de alta tensão e (v) Calibração do gerador de impulso de alta corrente: trabalhos com Alta Tensão re restritos a manuseio

de geradores de impulso de alta corrente, requer cuidados excessivos. Por isso, estão sendo levantadas na literatura técnica, e empresas e concessionárias de energia, normas e metodologias de segurança do trabalho para este tipo de operação. Como medida básica de atenuação dos riscos, são o uso de Equipamentos de Proteção Individual – EPI, mais alguns acessórios isolantes como luvas e botas para trabalhos de alta tensão. O pico de ruído (tiro) provocado pela descarga elétrica na rocha é amortecido pela mesma, desde que o sistema de fixação e vedação eletrodo-rocha esteja adequadamente acoplado.

5.4 VIABILIDADE ECONÔMICA

NANTEL; KITZINGER (1992a e 1992b) atribuem entre as vantagens da tecnologia de desmorte PBT em escala industrial, os baixos custos de energia estimados entre 0,19 a 0,48 kwh/m³, que correspondem a US\$ 10/t, aproximadamente.

Com base nos valores de energia elétrica fornecidas pelo gerador de impulso de alta corrente (Tab. 5.7), em escala de laboratório, foi possível estimar os seguintes custos:

- Volume médio por amostra: 0,0172 m³ (43kg)/amostra
- Mão-de-obra especializada (LAT) em trabalhos de alta tensão: R\$ 100/h ⇒ um funcionário por ensaio de 5 minutos ⇒ R\$ 8,3/amostra;
- Acessórios (sistema de fixação/vedação + eletrodo, solução eletrolítica): R\$ 5,00/amostra
- Perfuração + ar comprimido: R\$ 2,98/m (CIMEPAR) ⇒ R\$ 0,4/amostra
- Consumo médio de energia por amostra: 7,62kJ/amostra ⇒ 0,0021 kwh/amostra ⇒
Consumo médio de energia por m³: 0,12kwh/m³
- Custo de energia por kwh: R\$ 0,2 (CELB/PB – Cia de Eletrificação da Borborema)
- Custo de energia elétrica por amostra: R\$ 0,00042/amostra
- Custo final em escala de laboratório por amostra de 0,0172m³ : R\$ 13,7/0,0172m³ ⇒

Custo de desmorte eletrohidráulico em escala de laboratório: R\$ 796,5/m³

Pode-se observar que o consumo médio de energia elétrica resultante da aplicação do modelo tecnológico de desmorte proposto está abaixo dos valores apresentados na literatura (NANTEL; KITZINGER, 1992a e 1992b).

6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

6.1 CONCLUSÕES

O princípio eletrohidráulico abordado neste trabalho foi dirigido para operações de desmonte de rochas. Um modelo tecnológico de desmonte para áreas urbanizadas foi proposto com base em estudos teóricos e estudos experimentais. Foram utilizados blocos de rocha calcária de origem sedimentar como material de estudo de um caso típico de mineração de área urbana - CIMEPAR.

Além da revisão da literatura, os estudos teóricos também contaram com simulações computacionais obtendo-se parâmetros elétricos para a configuração básica do circuito RLC utilizado para os ensaios de desmonte eletrohidráulico (RÊGO FILHO, 1999). As formas das ondas resultantes das simulações, apresentadas no item 5, indicaram a aplicação de um Gerador de Impulso de Alta Corrente para quebra de rochas através de descargas elétricas de alta intensidade. Os estudos geomecânicos estabeleceram relações e considerações sobre valores de energia de quebra de rocha, além da proposição de teoria do processo ruptura simples e mecanismos propagação atuantes. Também foi projetado um sistema mecânico para vedação e fixação da sonda na rocha desenvolvido ao longo de 4 versões.

Os estudos experimentais envolveram ensaios geomecânicos e ensaios de desmonte eletrohidráulico em escala de laboratório. Os resultados indicaram o rumo da pesquisa aos seus objetivos. Os ensaios geomecânicos, somados ao conjunto de considerações conceituais apresentados nos estudos teóricos, demonstraram a relevância dos estudos geomecânicos como ferramenta básica ao desenvolvimento de uma tecnologia de desmonte de rochas não-convencional.

Os ensaios eletrohidráulicos mostraram resultados satisfatórios quanto a validação do efeito eletrohidráulico aplicado para quebra de rochas, à configuração do circuito elétrico Gerador de Impulso de Alta Corrente, e ao arranjo metodológico do modelo tecnológico proposto.

As dificuldades encontradas entre as realidades teórica e prática durante a pesquisa, ressaltaram a importância das teorias geomecânicas quanto aos processos de ruptura de rochas, seja por mecanismos estáticos, ou seja por mecanismos dinâmicos. Este contexto se reflete nos mecanismos de fragmentação e nos aspectos ambientais do modelo tecnológico de desmonte eletrohidráulico proposto. A ausência de grandes quantidades de gases sugere afirmar que o poder de destruição induzido a rocha é diretamente relacionado, principalmente, pela intensidade da onda de choque gerada na extremidade da sonda de desmonte (eletrodo). Isso se deve à ruptura e/ou fragmentação que ocorre nos milissegundos iniciais após o pulso da descarga (explosão), quase instantaneamente, através da ionização da solução eletrolítica no momento de transferência da expansão do plasma.

6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Analogia entre ruptura dinâmica e processo físico de propagação de ondas eletromagnéticas em linhas de transmissão;

Estudos de formas de ondas precisas através de simulações computacionais;

Estudos e projeções de sondas baseado em fenômeno de eletrodo: princípios e aplicações;

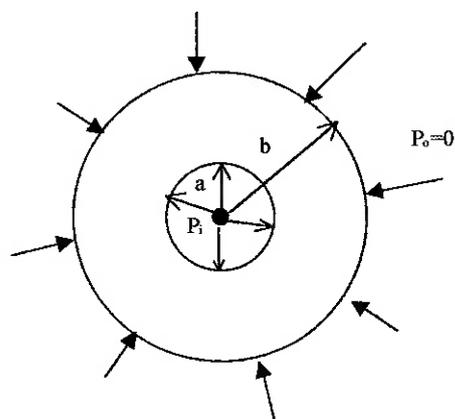
Comportamento dinâmico de arcos elétricos aplicados para fragmentação ou para cortes de rochas;

Estudo de processos dinâmicos de ruptura de rochas utilizando elementos finitos.

ANEXO 1

TEORIA DE ENERGIA DE RUPTURA DE ROCHA BASEADO EM MODELO PAREDE CILINDRO ESPESSA

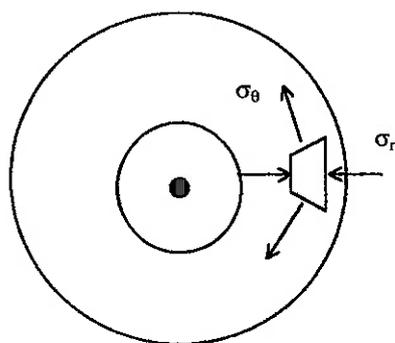
Trata-se de um processo de ruptura estática, que se baseia em um sistema de pressão uniforme (interna e externa) de uma parede cilíndrica denominado Cilindro de Parede Espessa (OBERT; DUVAL, 1967; JAEGER; COOK, 1976; HENNIES, 1970; BRADY; BROWN, 1993).



- a – raio do furo;
- b – raio do cilindro;
- r – distância do centro (coordenadas);
- p_i – pressão interna;
- p_o – pressão externa nula.

Fig. A.1 Cilindro de parede espessa sem pressão externa.

Análise estática das tensões atuantes na forma de coordenadas polares é ilustrada pela fig. A.2:



- σ_θ - tensão de tração;
- σ_r - tensão de compressão.

Fig. A.2 Ilustração da análise de tensões em cilindro de camada espessa.

Determinação do estado de tensões:

Seja:

$$\sigma_r = \frac{a^2 p_i - b^2 p_0}{b^2 - a^2} + \frac{1}{r^2} \left[\frac{a^2 b^2 (p_0 - p_i)}{b^2 - a^2} \right] \quad (1)$$

$$\sigma_\theta = \frac{a^2 p_i - b^2 p_0}{b^2 - a^2} - \frac{1}{r^2} \left[\frac{a^2 b^2 (p_0 - p_i)}{b^2 - a^2} \right] \quad (2)$$

Como $\tau_{r\theta} = 0$ é nula, as componentes polares de tensões σ_r e σ_θ , são consideradas tensões principais (compressão e tração). Para o caso desta pesquisa, o modelo cilindro de parede espessa é sujeito apenas a pressão interna ($p_i \neq 0$ e $p_o = 0$) sob processo estático. Assim, a determinação das expressões de energia para ruptura ou para a fragmentação, são estabelecidas pelas seguintes condições:

(i) **caso de estudo $P_o = 0$** : Trata-se do caso inverso apresentado para problema de túneis ou *shafts* submetidos a um campo de tensão hidrostático. A determinação das condições de tensões são conhecidas usando as expressões (1) e (2):

$$\sigma_r = \frac{a^2 p_i}{b^2 - a^2} - \frac{1}{r^2} \frac{a^2 b^2 p_i}{b^2 - a^2} \Rightarrow \sigma_r = \frac{a^2 p_i}{b^2 - a^2} \left(1 - \frac{b^2}{r^2} \right) \quad (3)$$

$$\sigma_\theta = \frac{a^2 p_i}{b^2 - a^2} + \frac{1}{r^2} \frac{a^2 b^2 p_i}{b^2 - a^2} \Rightarrow \sigma_\theta = \frac{a^2 p_i}{b^2 - a^2} \left(1 + \frac{b^2}{r^2} \right) \quad (4)$$

(ii) **ruptura completa sob processo estático de tensões**: considera-se $\sigma_\theta = \sigma_r$ (tensão de tração) em $r=b$. Utilizando a expressão (4), determina-se a pressão interna para o processo de ruptura:

$$\sigma_{\theta} = \frac{2a^2 p_i}{b^2 - a^2} = \sigma_r$$

Portanto,

$$p_i = \frac{\sigma_r (b^2 - a^2)}{2a^2} \quad (5)$$

(iii) **deslocamento da parede interna:** considera-se as imposições de simetria apresentadas pelo modelo e com base em deslocamentos da parede interna do cilindro radialmente. A expressão de deslocamento da tensão radial é dada por:

$$\frac{\partial u}{\partial r} = \frac{1}{E(b^2 - a^2)} \left[(a^2 p_i - b^2 p_0)(1 - r) + \frac{a^2 b^2 (p_0 - p_i)(1 + r)}{r^2} \right] \quad (6)$$

Integrando em relação r , tem-se:

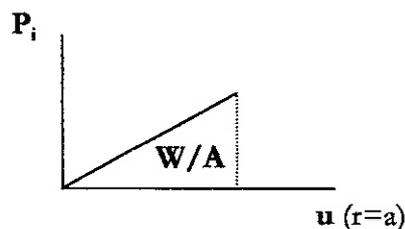
$$u = \frac{1}{E(b^2 - a^2)} \left[(a^2 p_i - b^2 p_0)(1 - \nu)r - \frac{a^2 b^2 (p_0 - p_i)(1 + \nu)}{r} \right] \quad (7)$$

Para $p_0 = 0$ e $r = a$, obtém-se:

$$\begin{aligned} u &= \frac{1}{E(b^2 - a^2)} \left[(a^2 p_i)(1 - \nu)r + \frac{a^2 b^2 p_i}{r} (1 + \nu) \right] \Rightarrow \\ u &= \frac{a^2 p_i}{E(b^2 - a^2)} \left[(1 - \nu)r + \frac{b^2}{r} (1 + \nu) \right] \\ \Rightarrow u &= \frac{a^2 p_i}{E(b^2 - a^2)} \left[(1 - \nu)a + \frac{b^2}{a} (1 + \nu) \right] \end{aligned} \quad (8)$$

A energia W de ruptura simples por processo estático por unidade de volume é obtida por:

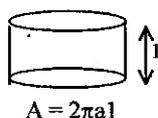
$$\frac{W}{A} = \frac{1}{2} p_i u(r), \text{ em } r=a$$



Para o caso de uso de amostras de rochas de formato cilíndrico, tem-se:

$$A = 2\pi a l$$

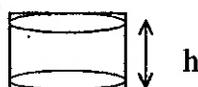
Como $r=a$



Portanto:

$$\frac{W}{A} = \frac{1}{2} p_i u(r) A \Rightarrow W = \frac{1}{2} p_i u A \Rightarrow W = \pi a p_i u \quad (9)$$

Então, $W_{ruptura} = Wh$



A expressão analítica de energia de ruptura de um volume cilíndrico de camada espessa é dada por:

$$\begin{aligned} W_T &= \pi a p_i u h \Rightarrow \\ W_T &= \pi a p_i u h \Rightarrow W_T = \pi a h p_i \left[\frac{a^2 p_i}{E(b^2 - a^2)} \left[(1-\nu)a + \frac{b^2}{a}(1+\nu) \right] \right] \\ W_T &= \pi a h p_i^2 \left[\frac{a^2}{E(b^2 - a^2)} \right] \left[(1-\nu)a + \frac{b^2}{a}(1+\nu) \right] \Rightarrow \\ W_T &= \pi a h \left[\frac{\sigma_c^2 (b^2 - a^2)^2}{2a^2} \right] \left[\frac{a^2}{E(b^2 - a^2)} \right] \left[(1-\nu)a + \frac{b^2}{a}(1+\nu) \right] \end{aligned} \quad (10)$$

A expressão (10) foi utilizada para determinação dos valores de energia geomecânica para ruptura simples de amostras de blocos cilíndricos, e respectiva tensão de carregamento, a serem utilizadas nos ensaios eletrohidráulicos, conforme valores apresentados nas tabs. 1 e 2.

TABELA 1 – Valores de energia geomecânica de ruptura simples

	Q (t)	V _{vol.} (m ³)	E (Pa)	W _{gcom.} (kJ)	W _{Corrigida} (kJ)
Amostra A	0,130	0,0520	9485000000	3,6	6,0
Amostra B	0,113	0,0452	9485000000	2,9	4,8

Nota: os valores de energia geomecânica foram corrigidos com fator de eficiência de 60%, com base na literatura.

TABELA 2 – Valores de tensão de carregamento com base na energia geomecânica corrigida.

	Q (t)	V_{vol.} (m³)	V (kV)	C (10⁻⁶ F)
Amostra A	0,130	0,052	27	16,0
Amostra B	0,113	0,045	25	16,0

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMADEI, B.; STEPHANSSON, O. **Rock stress and its measurement**. Cambridge, University Press/ Chapman & Hall, 1997. 490p.
- AYRES DA SILVA, L. A. **Ação dos explosivos**. São Paulo, EPUSP, 1997. 12 p. /Curso apostilado/
- AYRES DA SILVA, L. A. **Mecânica de rochas aplicada à mineração II**. São Paulo, EPUSP, 1995. 120 p. /Curso apostilado/
- BAUER, A.; CROSBY, W. A. **Blasting**. Surface Mining. 2nd Ed. AIME. USA. B. A. KENNEDY Editor. Jakarta, Indonesia. 1990. Pp. 540-583
- BERGSTROM, B. H. The electrohydraulic crusher. **Engineering Mining Journal**, v. 162, n. 2, p. 134, Feb. 1961.
- BRADY, B. H. G.; BROWN, E. T. **Rock mechanics for underground mining**. 2. ed. London, Chapman & Hall, 1993. 571 p.
- BRANCO, C. A. G. M. **Mecânica dos materiais**. 2. ed. Lisboa, Fundação Calouste Gulbekian, 1994. 1098 p.
- BUENO, W.; BOODTS, J. F.C.; DEGREVE, L.; LEONE F. A. **Química geral**. São Paulo, McGraw-Hill do Brasil, 1978. 734 p.
- CHERNYSHEV, S. N.; DERMAN, W. R. **Rock fractures**. London, Butterworth-Heinemann, 1991. Part 1, chap. 1.
- CLARK, B. G. **Principles of rock fragmentation**. New York, John Wiley, 1987.
- COATES, D. F. **Fundamentos de mecânica de rochas**. Madrid, Blume, 1973. 577p.
- COSTA E SILVA, V. **Curso de desmonte de rochas com explosivos**. S.L., Instituto de Educação e Tecnologia, 1998. p. 29-31.
- DA GAMA, E. M. **Comportement mécanique des charbons et des grès; application aux phénomènes dynamiques**. Lorraine, 1986. 193 p. Tese (Doutorado) - Institut National Polytechnique de Lorraine, Centre de Recherches en Mécanique et Hydraulique des Sols et de Roches.
- DURÃES DA SILVA, S. **Manual de moagem**. Departamento de Pelotização – DFPI/DIPRI. Manual de Treinamento operacional da Moagem. CVRD. Set. 1976. 263p.
- FARRER, H.; BECKER, C. G. **Fortran estruturado**. Rio de Janeiro, Ed. Guanabara, s.d.

- FUJIMURA, F. **Mecânica de rochas aplicada à cominuição de rocha**. São Paulo, 1999. 19 p. Tese (Livres Docência) - Departamento de Engenharia de Minas da Escola Politécnica da USP.
- GOODMAN, R. E. **Introduction to rock mechanics**. 2. ed. New York, John Wiley, 1989. 562 p.
- HAEFELY. **Impulse current plant 100 kV**. Switzerland, 1981. /Catálogo de Operação e Funcionamento/
- HAMELIN, M.; ASIKAINEN, L.; KITZINGER, F. Blasting with electricity: paving the way into 21 st century mining. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON MINE DESIGN, Kingston, 1993. **Innovative mine design for the 21 st century**. Rotterdam, Balkema, 1993. p. 805-12.
- HEMPHILL, G. B. **Blasting operations**. Cap. 6. McGraw-Hill, 1981, pp. 83-9.
- HENNIES, W. T. **Mecânica de rochas aplicada à mineração**. São Paulo, Departamento de Engenharia de Minas da EPUSP, 1970. /Curso apostilado/
- HERTZBERG, R. W. **Deformation and fracture mechanics of engineering materials**. 4. ed. New York, John Wiley, 1996. 786 p.
- HOEK, E.; BROWN, E. T. **Practical estimates of rock mass strength**. S.L., s.n., 1987.
- HUDSON, J. A. **Comprehensive rock engineering, principles, practice & projects**. Cap. 2, vol. 4. Pergamon Press, U.K. 1993.
- INOUE, H.; LISITSYN, I. V.; AKIYAMA, H.; NISHIZAWA, I. **Drilling of hard rocks by pulsed power**. IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 16, No. 3, pp. 19-25, May/June 2000.
- JAEGER, J. C.; COOK, N. G. W. **Fundamentals of rock mechanics**. 2. ed. New York, Halsted Press, 1976. 585 p.
- JEREMIC, M. L. **Ground mechanics in hard rock mining**. Chapter 3. Balkema, Rotterdam. 1987.
- JUMIKIS, A. R. **Rock mechanics**, 2ª ed. TTB. New Jersey. USA. 1983.
- KELLY, E. G.; SPOTTISWOOD, D. J. **Introduction to mineral processing**. New York, John Wiley, 1982. Cap. 7, p. 113-23.
- KENNEDY, P. A. **An analysis of rock breakage by high voltage electrical discharge**. Belfast, 1971. Thesis (Philosophical Doctor) - Queen's University of Belfast.
- KITZINGER, F.; NANTEL, J. H.; HAMELIN, M. Progress in plasma blasting. **CADDET Newsletter**, p. 18-20, Nov. 1992. Special issue.

- KLICH, A.; RES, J. Innovative mining method - crushing cohesive rocks. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON MINE PLANING AND EQUIPMENT SELECTION, 5., São Paulo, 1996. **Mine planning and equipment selection 1996: proceedings**. Rotterdam, Balkema, 1996. p.369-73.
- KUTTER, H. K. **The electrohydraulic effect: potential application in rock fragmentation**. Wahington, U. S. Department of the Interior, Bureau of Mines, 1969. (U.S. Bureau of Mines. Report of Investigations, 7317)
- KUTTER, H. K., FAIRHURST, C. **On the fracture process in blasting**. International Journal Rock Mechanics Mining and Science, vol. 8, p. 181-202. Pergamon Press. 1971. UK.
- LADEIRA, F. L. **Curso de mecânica de rochas**. Ouro Preto, Escola de Minas da UFOP, Departamento de Mineração, 1976. 83 p. /Curso apostilado/
- LANGFORS, U.; KIHLSSTRÖM, B. **Tecnica moderna de voladura de rocas**. Bilbao, Urmo, 1976. 425 p.
- LEMOS, J. E. G. **Avaliação de ruído em mineração de área urbana – caso CIMEPAR – João Pessoa**. Campina Grande, 2000. 96 p. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Mineração e Geologia, Universidade Federal da Paraíba.
- LOPEZ JIMENO, C.; LOPEZ JIMENO, E.; AYALA CARCEDO F. J. **Drilling and blasting of rocks**. Rotterdam, Balkema., 1995. Cap. 16-18, p. 154-78.
- LUZ, B. A.; POSSA, M. V.; ALMEIDA, S. L. **Tratamento de minérios**. 2. ed. rev. e amp. Rio de Janeiro, CETEM/CNPq/MCT, 1998. Cap. 4.
- MABESSONE, J. M. ; ALHEIROS, M. M. Origem da bacia sedimentar costeira Pernambuco Paraíba. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 18, n.4, p. 476-82, 1988.
- MAURER, W.C. **Novel drilling techniques**. Oxford, Pergamon Press, 1968. 114 p.
- MORHARD, R. C. **Explosives and rock blasting**. Atlas Powder Company, Field Technical Operations. Dallas, USA, 1987.
- NANTEL, J. H.; KITZINGER, F. Plasma blasting techniques. **CADDET Newsletter**, p. 79-82, Nov. 1992a. Special issue.
- NANTEL, J.; KITZINGER, F. Environmental impact of eletric blasting. **CADDET Newsletter**, p. 75-7, Nov. 1992b. Special issue.
- OBERT, L.; DUVALL, W. I. **Rock mechanics and the design of structures in rock**. New York, Wiley, 1967.

- PERSSON, P-A.; HOLMBERG, R.; LEE, J. **Rock blasting nad explosives engineering**. CRC Press, 1994, 540p.
- QUAGLIANO, J. V.; VILLARINO, L. M. **Química**. 3. ed. Rio de Janeiro, Guanabara Dois, 1979. Cap. 19.
- ROLIM FILHO, J. **Considerações sobre desmonte de rochas com ênfase aos basaltos feições entablamento**. São Carlos, 1993. 216p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- SCOTT, A. **Open pit blast design - analysis and optimisation**. Austrália, 1996. JKMRC. 339p.
- SEGSWORTH, R. S.; KUHN, K. **Electrical rock breaking**. IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. IA-13, No. 1, pp. 53-57, January/February 1977.
- SEN, G. C. **Blasting technology - for mining and civil engineers**. Sydney, University of New South Wales Press, 1995. 142 p.
- SHAH, S. P.; SWARTZ, S. E.; OUYANG, C. **Fracture mechanics of concrete: applications of fracture mechanics to concrete, rock, and other quasi-brittle materials**. New York, John Wiley, 1995. 552 p.
- SILVA, C.M.M.; STELLIN JR., A.; COSTA, E.G.; HENNIES, W.T. Electrohydraulic rock blasting for mining in urban áreas. **Environmental Management and Health**, v. 12, n.1, p. 26-34, 2001.
- SINGH, B.; ROY, P.P. **Blasting in ground excavations and mines**. Rotterdam, Balkema, 1993. Cap. 8, p. 114-33: Rock fragmentation due to blasting.
- STELLIN JUNIOR, A.; HENNIES, W. T.; MUNIZ e SILVA, C. M.; COSTA, E. G. The electro-hydraulic principle as blasting alternative in urban areas. In: WORLD MINING CONGRESS, 17., Acapulco, 1997. **Technical papers**. S. L., s. ed., 1997. p. 49-56.
- TAYLOR, M. **Particle attrition: state-of-the-art review**. Clausthal-Zellerfeld, Trans Tech, 1987. (Series on Bulk Materials Handling. British Materials Handling Board, v. 5)
- TIMOSHENKO, S. P.; GOODIER, J. N. **Teoria da elasticidade**. Rio de Janeiro, Guanabara Dois, 1980.
- WHITTAKER, B. N.; SINGH, R. N.; SUN, G. **Rock fracture mechanics: principles, design and applications**. Amsterdam, Elsevier Science Publishers, 1992. Cap. 13, 570p.

- WILKE, F. L.; SPACHTHOLZ, F. Development of a non-explosive mining system for underground hard rock mining. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON GEOMECHANICS 93. /**Proceedings**/ Rotterdam, Balkema, 1994. p. 393-400.
- WILLS, B. A. **Mineral processing technology**. 3. ed. Oxford, Pergamon Press, 1985. Cap. 5.