

Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP
Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo

ISSN 0104-0553

BT/PMI/152

**Desenvolvimento de Tecnologia
Eletrohidráulica Aplicada a Desmonte
de Rochas em Áreas Urbanas**

**Carlos Magno Muniz e Silva
Edson Guedes da Costa
Antonio Stellin Júnior**

São Paulo - 2001

1228081

O presente trabalho é uma versão abreviada da tese de doutorado apresentada por Carlos Magno Muniz e Silva, sob a orientação do Prof. Dr. Antonio Stellin Júnior e co-orientação do Prof. Dr. Edson Guedes da Costa, "Desenvolvimento de Tecnologia Eletrohidráulica Aplicada a Desmonte de Rochas em Áreas Urbanas" com defesa realizada em 06/09/01, na EPUSP.

A íntegra da tese encontra-se à disposição dos interessados com o autor e na Biblioteca do Depto. de Engenharia de Minas e de Petróleo da Escola Politécnica da USP.

FICHA CATALOGRÁFICA

Silva, Carlos Magno Muniz e

Desenvolvimento de tecnologia eletrohidráulica aplicada a desmonte de rochas em áreas urbanas / C.M.M. e Silva, A. Stellin Jr. – São Paulo : EPUSP, 2001.

26 p. – (Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Minas, BT/PMI/152)

1. Desmonte de rochas I. Stellin Junior, Antonio II. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Minas III. Título IV. Série

ISSN 0104-0553

CDU 622.235



**Desenvolvimento de tecnologia eletrohidráulica
aplicada a desmonte de rochas em áreas urbanas**

Carlos Magno Muniz e Silva

Antônio Stellin Júnior

Edson Guedes da Costa¹

¹ Co-orientador Prof. Dr. Do Departamento de Engenharia Elétrica da UFPb.

Desenvolvimento de tecnologia eletrohidráulica aplicada a desmonte de rochas em áreas urbanas

Resumo

Abstract

1 Introdução	1
2 Mecanismos de fragmentação de rochas	
2.1 Mecanismos de fragmentação em desmonte convencional	1
2.2 Mecanismos de fragmentação em desmonte eletrohidráulico	3
3 Considerações geomecânicas sobre ruptura de rochas	4
3.1 Aspectos anisotrópicos	5
3.2 Fundamentos de ruptura de rochas	5
3.3 Considerações e teoria de energia de ruptura de rochas	7
4 Modelo tecnológico de desmonte eletrohidráulico para áreas urbanizadas	13
4.1 Parâmetros geomecânicos e ensaios associados	13
4.2 Parâmetros eletrohidráulicos	14
4.3 Tecnologia eletrohidráulica de desmonte de rochas: materiais e métodos	18
5 Análise e discussões dos resultados	20
6 Conclusões	23
Referências bibliográficas	24

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.

RESUMO

Operações de desmonte de rochas por explosivos promovem impactos ambientais adversos. 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, sem causar os riscos e os incômodos ambientais provocados pelos explosivos. Assim, o desmonte eletrohidráulico pode se tornar uma alternativa tecnológica de desmonte secundário para uso em áreas urbanizadas.

O modelo tecnológico de desmonte proposto, baseado 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.

1. INTRODUÇÃO

As operações de desmonte de rochas por explosivos promovem riscos e incômodos ambientais como: vibrações de terrenos, ultralanchamentos de fragmentos de rochas ("flyrocks"), sobrepressão atmosférica/sopros de ar ("air blast"), emissão de ruídos, emissões de poeiras e poluentes gasosos, instabilidade de taludes e encostas. Tais adversidades ambientais motivaram o estudo tecnológico de uma alternativa de desmonte de rochas para áreas urbanizadas, mais limpa e segura do ponto de vista ambiental, e isenta do uso de explosivos convencionais. Neste contexto, o desmonte secundário de rochas utilizando o princípio eletrohidráulico, poderá ser adequado para a mineração de rochas calcárias para fabricação de cimento Portland em João Pessoa, capital do Estado da Paraíba.

A tecnologia de desmonte eletrohidráulica se baseia numa descarga elétrica de grande intensidade em meio líquido no interior do furo da rocha a ser fragmentada. A técnica faz uso da 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 (KITZINGER et al, 1992; NANTEL; KITZINGER, 1992a e 1992b; HAMELIN et al, 1993; KLICH; RES, 1996).

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

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 desmonte por explosivo pode ser considerado o primeiro estágio do processo de cominuição (WILLS, 1985).

2.1 MECANISMOS DE FRAGMENTAÇÃO EM DESMONTE CONVENCIONAL

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 abriam 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).

A fase dinâmica do processo de fragmentação corresponde à ação das ondas de choque. Inicia pela deflagração da reação química do explosivo, termodinamicamente instável (KUTTER; FAIRHURST, 1971). As ondas de choque se propagam como ondas elásticas a partir do furo para todo maciço imediatamente após a detonação da carga explosiva. A velocidade de propagação depende da densidade da rocha e/ou do meio de propagação (HEMPHILL, 1981; SEN, 1995). Na realidade, a onda de choque inicialmente ajuda estender as fendas existentes, e a conduzir energia mecânica (HEMPHILL, 1981).

Mudança de densidade do meio de propagação, parte da onda retorna refletida e/ou

refratada ao furo, e outra parte continua propagando-se compressivamente até amortecer. Todavia, a magnitude relativa da energia da onda de choque depende mais do ângulo de incidência da propagação da onda compressiva.

LANGEFORS; KIHLSSTRÖM (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) ressaltam que a fragmentação por desmonte pode ser considerada como resultado de uma propagação radial de fendas, por interação ou coalescência.

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) apud SCOTT (1996) sobre a teoria fragmentação por reflexão, não é considerado como mecanismo predominante do processo de fragmentação por explosivos em operações mineiras.

A fase semi-estática corresponde à ação da pressão dos gases da detonação. Trata-se do trabalho mecânico realizado durante o processo de expansão ou descompressão dos gases da detonação.

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. 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.

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.

ROLIM FILHO (1993) e LOPEZ JIMENO et al. (1995) consideram que o processo de fragmentação por explosivos durante as fases dinâmica e semi-estática, 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.

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 cinética 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 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).

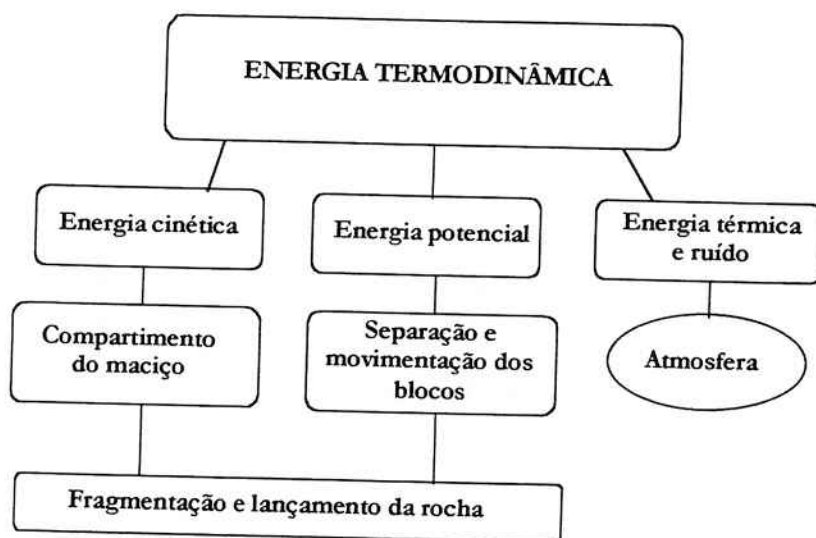


Fig. 2.1 Quadro resumo de distribuição energética em desmonte de rochas por explosivos (AYRES DA SILVA, 1997).

2.2 MECANISMOS DE FRAGMENTAÇÃO EM DESMONTA ELETROHIDRÁULICO

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). Neste sentido, HAMELIN et al (1993) ainda destacam o trabalho de KENNEDY (1971) referente à fragmentação de rochas.

O efeito eletrohidráulico para quebra de rochas ocorre por descargas elétricas subaquáticas. Pulsos de alta tensão se propagam na rocha causando a fragmentação. Um potente feixe de elétrons, quase que instantaneamente, pode penetrar, fundir e fragmentar a rocha (SEGSWORTH; KUHN, 1977). A energia elétrica pode ser usada para fragmentar rocha em diferentes formas. E sob circunstâncias especiais, pode substituir com sucesso o explosivo químico para desmonte de rochas (NANTEL e KITZINGER, 1992a).

KUTTER (1969) estudou o efeito eletrohidráulico como ferramenta para fragmentação e perfuração de rocha. O princípio eletrohidráulico foi aplicado através de descarga elétrica por centelhamento subaquático, gerando um canal plasmático entre 2 eletrodos. A expansão do canal plasmático provoca uma pressão de impacto explosivo no meio aquoso que, através de bolhas e vapores gerados, ocasionam fraturas e quebra da rocha. 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.

No processo de desmonte por plasma (PBT), desenvolvido por KITZINGER et al (1992), NANTEL; KITZINGER (1992a e 1992b) e HAMELIN et al (1993), 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). Em princípio, ocorrem elevações da temperatura e da pressão, enquanto o volume

plasmático permanece constante devido o estado de confinamento inercial. Sob estas condições, os componentes são completamente dissociados formando o referido plasma (NANTEL; KITZINGER, 1992a).

KLICH; RES (1996) também aplicaram o efeito eletrohidráulico para quebra de grandes blocos de rochas e de concreto, denominado de tecnologia Electro-hydraulic Method-EHD. A tecnologia é conjugada com método de perfuração com jato d'água de alta pressão. O desenvolvimento da tecnologia EHD é atribuído 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 de empreendimentos mineiros situados em perímetros urbanos.

A energia total E liberada para o centelhamento é proporcional à capacitância C multiplicado pela tensão de carregamento V ao quadrado (KUTTER, 1969; STELLIN JÚNIOR et al, 1997):

$$E = \frac{1}{2} CV_o^2 \quad (2.1)$$

C – capacitância (μF);

V_o – tensão de carregamento (kV).

O eletrólito utilizado no processo de desmonte por plasma (PBT), como meio líquido das descargas elétricas, é uma solução eletrolítica (BUENO et al, 1978) de sulfato de cobre (SO_4Cu_2) a 5% adicionada com bentonita (NANTEL; KITZINGER, 1992b).

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 fragmentar a rocha. No entanto, HAMELIN et al (1993) consideram que a fração de energia fornecida resulta em pouca energia cinética residual dos fragmentos que não compromete o balanço de energia total do sistema.

3. CONSIDERAÇÕES GEOMECÂNICAS

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

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. Assim, pode-se considerar que o desmonte de rochas baseado no princípio eletrohidráulico é realizado por mecanismos dinâmicos de ruptura e/ou de fragmentação.

Os mecanismos dinâmicos de ruptura 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 melhor interpretadas 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.

3.1 ASPECTOS ANISOTRÓPICOS

Anisotropia se refere à propriedade que varia segundo a orientação em relação a um dado sistema de eixos (BRANCO, 1994). A maioria das rochas é anisotrópica 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 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. Tais variações em relação as direções apresentadas por rochas sedimentares e por rochas foliadas, podem ser identificadas a partir das tensões e propriedades elásticas. Pois, esforços de tração, de 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; DUVAL, 1967).

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 dos mecanismos de tensão atuantes (HERTZBERG, 1996).

A resistência de materiais tidos frágeis e sua facilidade a quebra, é relacionada, provavelmente, a propagação de fendas e microfendas preexistentes devido à 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, e definem 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. E ruptura frágil (ou quebradiça) o processo pelo qual a resistência do material é alcançada subitamente, através de um plano seguido de pequena ou nenhuma deformação plástica.

Com base na resposta de curvas de tensão-deformação, os materiais de engenharia podem ser categorizados em: frágil (ou quebradiços), dútil e semi-frágeis (SHAH et al, 1995). A fig. 3.1 ilustra os tipos de materiais e respectivas curvas de tensão-deformação características.

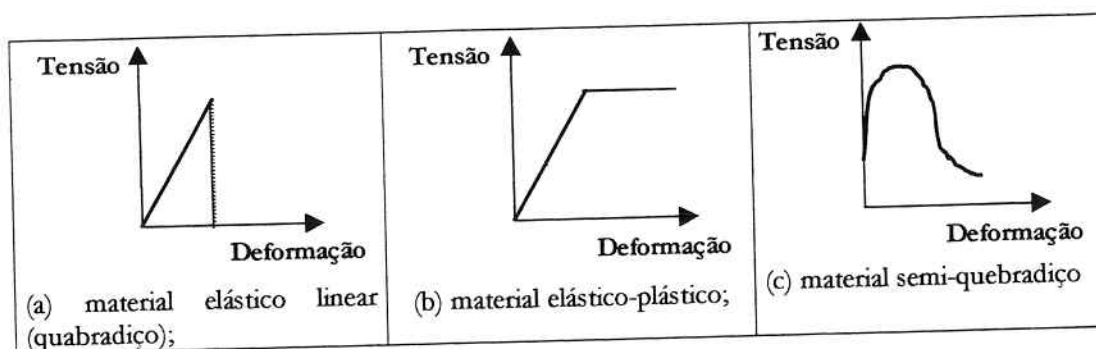


Fig. 3.1 Curvas de tensão-deformação para diferentes tipos de materiais (JAEGER; COOK, 1976; LAMA; VUTUKURI, 1978; SHAH et al, 1995).

A fig. 3.1a 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 à ruptura. Material elástico-plástico, ou materiais dúcteis, são mostrados na fig. 3.1b, a tensão aproxima-se a um valor constante após um certo valor de deformação. E na fig. 3.1c, tipo suave, geralmente é característica de materiais tipo semi-frágeis (concreto e cerâmicas). São materiais caracterizados pelo decréscimo gradual da deformação após atingir o limite máximo de tensão suportada (SHAH et al, 1995).

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).

Segundo o critério de quebra apresentado por LAMA; VUTUKURI (1978), um material é considerado a quebrar se ele é permanentemente deformado ou rompido em duas ou mais partes. A quebra é causada pela combinação de tensões. Se a resistência ao cisalhamento é maior do que a resistência à tração, então o material é quebradiço. Porém, se a resistência à 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, pode 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.

Em suma, os diversos métodos aplicados com sucesso na definição de ruptura de rochas relacionam as principais tensões na ruptura e na resistência da rocha segundo os

principais critérios: Critério de Coulomb (e Critério Coulomb-Navier); Critério de Mohr; Critério de Griffith.

3.3 CONSIDERAÇÕES E TEORIAS SOBRE ENERGIA DE RUPTURA DE ROCHAS

Com base 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).

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	Desmante 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
Fluida	Desmante hidráulico (solo); Desmante hidráulico para rochas pouco competente	Monitor; Jato hidráulico de alta pressão
Elétrica	Arco-elétrico ou corrente elétrica	Máquinas de eletrofraturamento

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).

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 se propagando; (iv) separação dos fragmentos entre si.

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). Analiticamente, este contexto pode ser representado pela relação $\sigma = E\varepsilon$, onde E é o 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 (Lei de Hooke).

Baseado na Teoria da Elasticidade (TIMOSHENKO; GOODIER, 1980), a energia de deformação elástica em função da unidade de volume de um material é dada por:

$$W = \frac{\sigma_t^2 V_{vol.rocha}}{2E} \quad (3.1)$$

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

Por outro lado, um maciço rochoso quando submetido a esforços dinâmicos por eventos sísmicos, 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 longitudinal, por exemplo, tem-se as seguintes relações de acordo com a dinâmica de movimento de propagação de tensão, de velocidade e de deslocamento da onda:

$$\sigma_{incidente} + \sigma_{refletida} = \sigma_{transmitida} \quad (3.2)$$

$$V_{incidente} + V_{refletida} = V_{transmitida} \quad (3.3)$$

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 deste trabalho. Portanto, utilizou-se o exemplo da dinâmica de propagação de ondas elásticas através de uma barra cilíndrica (HUDSON, 1993).

De acordo com a fig. 3.2, tem-se a interface Líquido (eletrólito) - Rocha, por simplificação, considera-se como acoplamento “perfeito”, ou seja, como um meio contínuo

que representa uma razão de impedância unitária: $\eta_{1^{*}Interface} = \frac{\rho_{\acute{a}gua} V_{\acute{a}gua}}{\rho_{rocha} V_{rocha}} = 1$. Em seguida,

tem-se a interface Rocha -Ar. Considerando a densidade da rocha diferente de zero ($\rho_{rocha} \neq 0$) e a densidade do ar igual a zero ($\rho_{ar} = 0$), tem-se uma razão de impedância nula:

$\eta_{2^{*}Interface} = \frac{\rho_{ar} V_{ar}}{\rho_{rocha} V_{rocha}} = 0$. Neste contexto, também considera-se: (i) a frente de onda

compressiva se propagando inversamente proporcional a distância radial ($r \leq 0,5m$) da fonte de detonação (descarga elétrica); (ii) curto período de impulso da descarga da corrente elétrica:

$>250\mu s$; (ii) como a razão de impedância igual a zero ($\eta_{2^{*}Interface} = \frac{\rho_{ar} V_{ar}}{\rho_{rocha} V_{rocha}} = 0$) da interface

rocha-ar, considera-se que toda frente de onda compressiva será refletida como onda de tração.

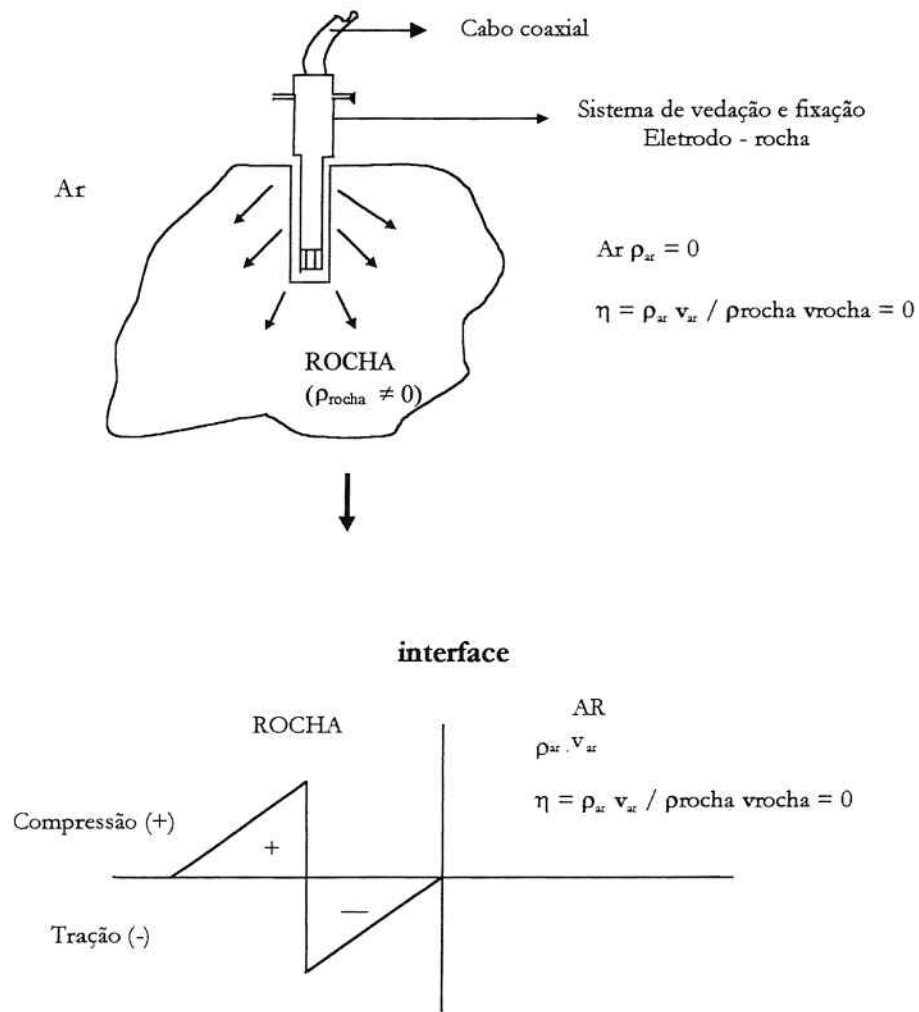


Fig. 3.2 Ilustração das condições de ruptura baseado na dinâmica de propagação de ondas elásticas.

Neste caso, o modelo de partição de energia de um impulso de descarga elétrica (energia elétrica) e respectivos mecanismos de fragmentação propostos para o modelo tecnológico de desmonte eletrohidráulico, são apresentados na figs. 3.3 e 3.4, respectivamente.

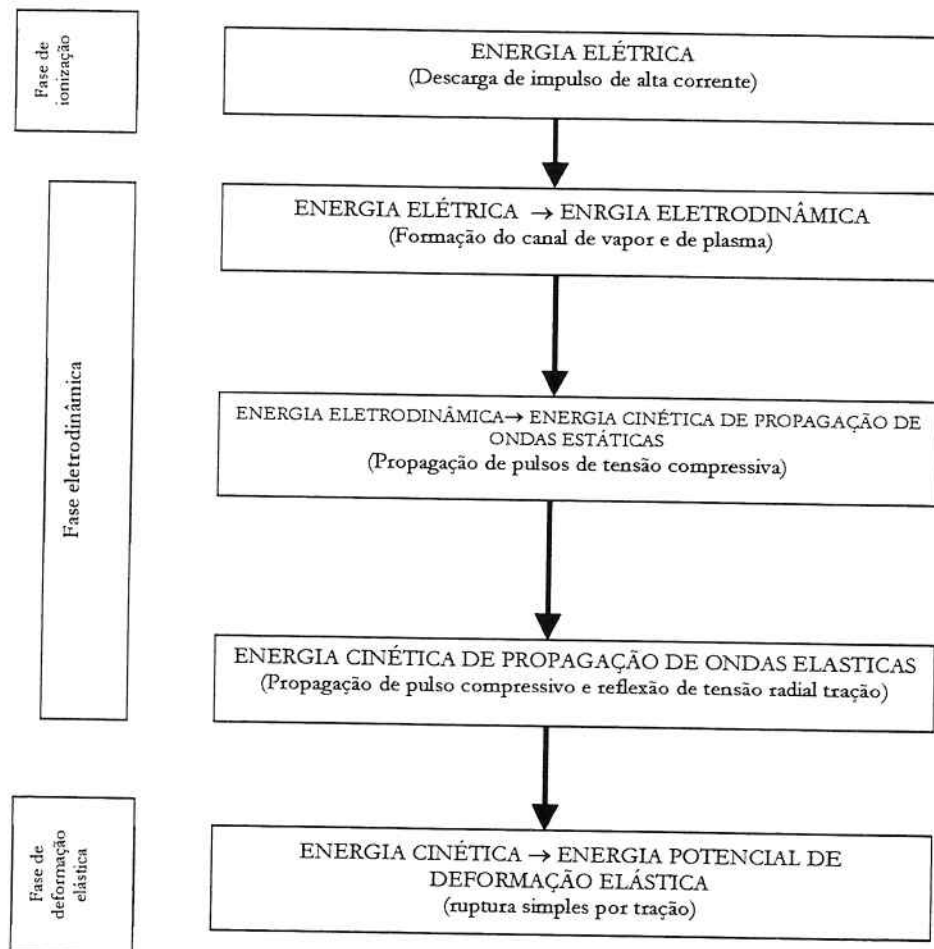


Fig. 3.3 Fluxograma de partição de energia em desmonte eletrohidráulico.

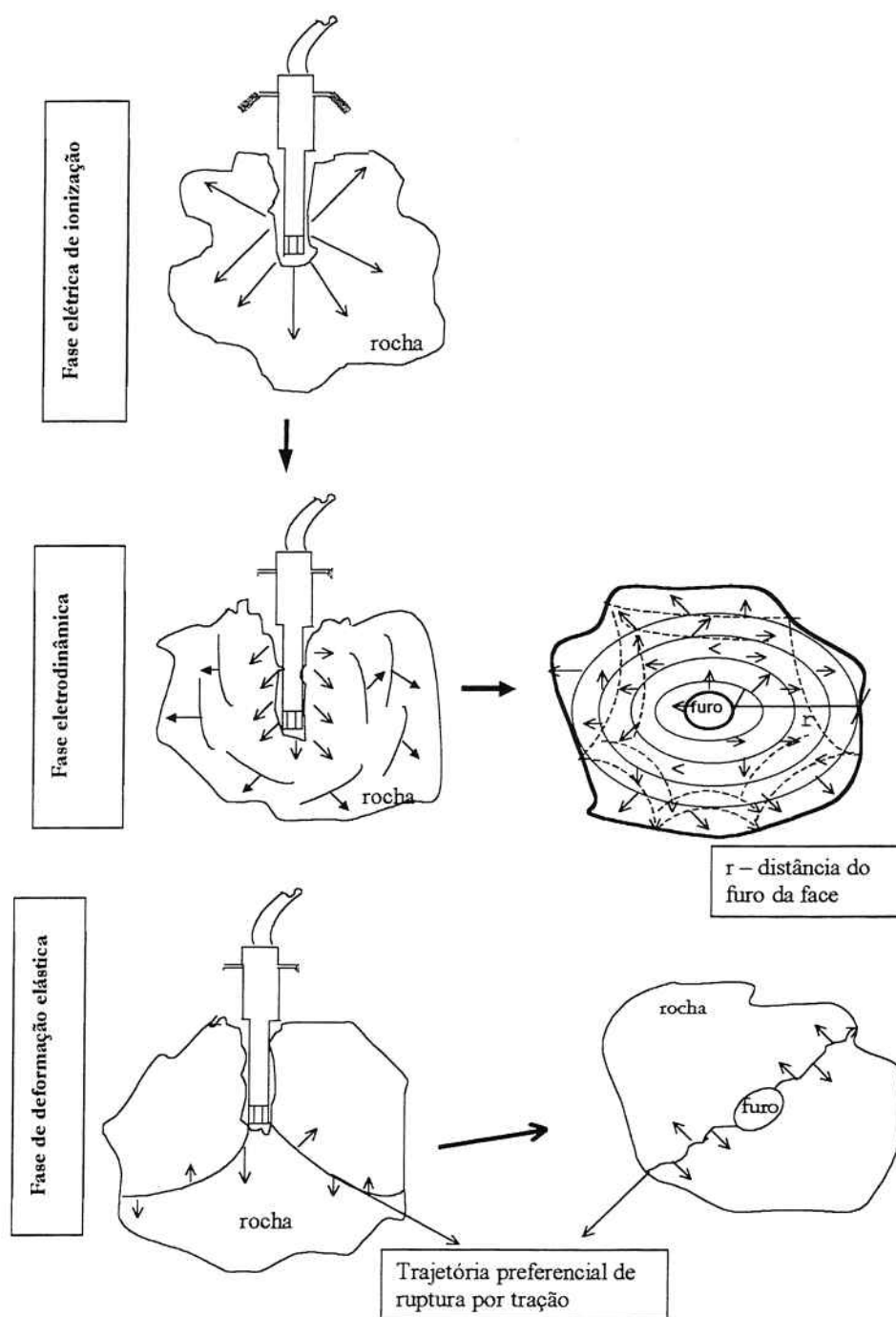


Fig. 3.4 Mecanismos dinâmicos do processo de ruptura estática de rochas em desmonte eletrohidráulico.

O pulso compressivo da onda incidente, conforme mencionado e ilustrado na fig. 3.2, é totalmente refletido como pulso de tração, de mesmo módulo de intensidade segundo a expressão 3.2. 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. Todavia, a propagação de pulsos de tensão ocorre sob mecanismos dinâmicos. Portanto, a expressão 3.1 de deformação de corpos elásticos por unidade de volume estabelecida pela Teoria da Elasticidade, será:

$$W = \frac{\sigma_{compressiva}^2 V_{vol.rocha}}{2E} \quad (3.4)$$

O termo tensão compressiva ($\sigma_{compressiva}$) inserido na expressão 3.4, considera que para produzir energia geomecânica para o processo de ruptura simples por tração, conforme a Lei de Hooke e demais considerações, será necessário fornecer um pulso compressivo dinâmico suficiente antecedente a reflexão. Portanto, a expressão 3.4 será utilizada para determinação dos valores de energia geomecânica nominal para ruptura simples, conforme mostrado na Tab. 3.2, para ser aplicada em ensaios eletrohidráulicos usando como amostras blocos de rochas calcárias até 150kg de formato aleatório.

TABELA 3.2 - Valores de energia geomecânica para ruptura simples baseado na expressão 3.4.

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

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

Os valores de energia geomecânica nominal calculados na tabela 3.2 são corrigidos com 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, conforme a expressão 2.1, mostrados na Tab. 3.3.

TABELA 3.3 - Valores de tensão de carregamento do banco de capacitores para desmonte eletrohidráulico baseado na expressão 2.1.

Amostra	Q (t)	V _{vol.} (m ³)	W _{corrigida} (kJ)	V (kV)	C (μ 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

Q - peso da amostra; V_{vol.} - volume da amostra; W_{corrigida} - energia geomecânica corrigida a 60% de perdas; V - tensão de carregamento, para quebra da rocha; C - capacitância.

4. MODELO TECNOLÓGICO DE DESMONTE ELETROHIDRÁULICO PARA ÁREAS URBANIZADAS

O desenvolvimento do modelo tecnológico de desmonte de rochas utilizando o princípio eletrohidráulico 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.

4.1 PARÂMETROS GEOMECÂNICOS 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, tais como: (i) o ambiente e peculiaridades das litologias 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..

Os parâmetros geomecânicos estáticos atuantes em processos de ruptura de rochas por desmonte convencional, por exemplo, são 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 àquels sujeitas a esforços dinâmico e transitório. 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 cisalhamento V_s pelo método de pulso ultrassônico utilizando-se expressões derivadas da Teoria da Elasticidade.

Para este trabalho 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.

Segundo MABESSONE; ALHEIROS (1988) os depósitos minerais das Minas Fazenda da Graça e Riacho do Poente 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 1° a leste. 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 1-2 cm. O calcário é caracterizado por várias famílias de fraturas, com 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 utilizando equipamentos servo-controlados.

Os ensaios geomecânicos foram realizados segundo a sequência de preparação, a saber:

- (i) preparação de mostras: corte dos testemunhos em serra diamantada conforme especificações mostradas no quadro de resultados de ensaios de compressão uniaxial; retificação de superfícies e controle dimensional;
- (ii) descrição dos ensaios: (i.1) ensaios de compressão uniaxial para determinação de parâmetros elásticos; (i.2) ensaios de tração indireta para aferição de resistência à tração indireta através do método brasileiro;
- (iii) metodologia de determinação dos parâmetros geomecânicos baseada em critérios de ruptura de Mohr-Coulomb e HOEK; BROWN (1987).

4.2 PARÂMETROS ELETROHIDRÁULICOS

Solução ionizável

As soluções líquidas podem ser classificadas como soluções iônicas 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), com o constituinte soluto denominado eletrólito. A maioria dos sais é considerada 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, portanto, 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).

O método base peso/volume (QUAGLIANO; VILLARINO, 1979) foi adotado para este trabalho 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.

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.

A energia elétrica é utilizada 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).

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 (SILVA et al, 2000). A descarga é efetuada com auxílio de uma sonda (eletrodos concêntricos + sistema de fixação e vedação eletrodo-rocha).

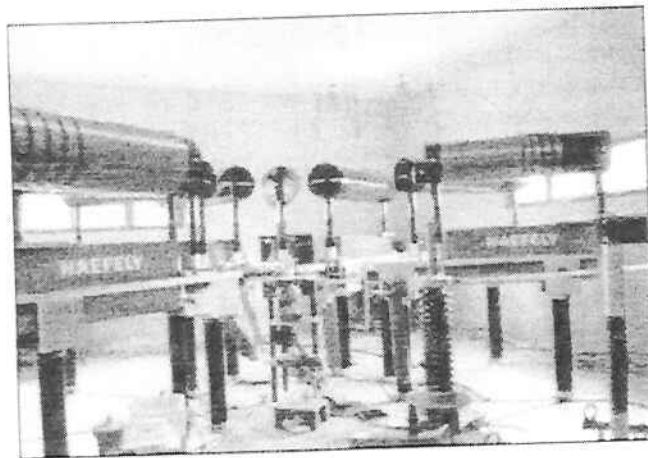
Para aplicação em desmonte de rochas, a forma de onda do impulso de corrente deve ser ajustada de forma a produzir uma onda de pressão coerente com as necessidades de intensidade dos desmontes (SILVA et al, 2000).

A utilização de um gerador de impulso de corrente no processo de desmonte de rochas requer o dimensionamento adequado dos parâmetros R , L e C . Segundo (RÊGO FILHO, 1998-9) foi possível conhecer os parâmetros elétricos R , L e C do gerador de impulso conforme descritos na literatura através de simulações computacionais em Fortran 90.

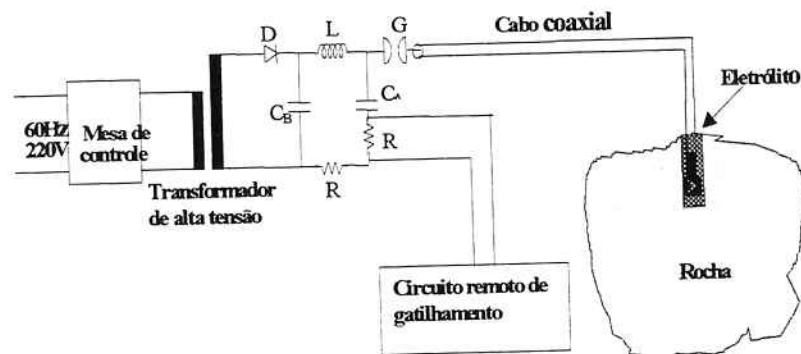
O arranjo estrutural de um gerador de impulso de alta corrente é composto por uma fonte de tensão alternada, seguida de um retificador para alimentar um banco de capacitores com tensão contínua no seu circuito. O controle da descarga da corrente elétrica do gerador, é realizado através de um par de esferas, 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. 4.1a mostra o gerador de impulso de alta corrente do LAT/UFPB utilizado nos ensaios de desmonte 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 centelhadoras 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. 4.1 Gerador de impulso de alta corrente empregado nos ensaios eletrohidráulicos.

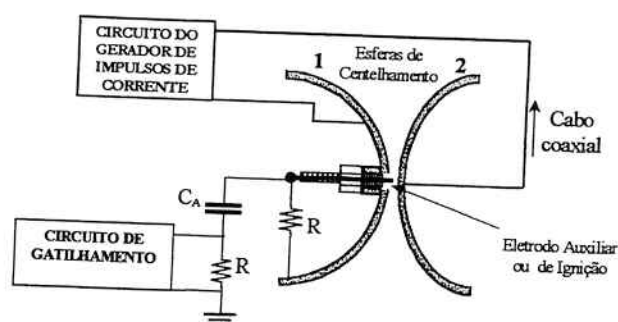
Na fig. 4.1b é mostrado o arranjo estrutural do gerador de impulso de alta tensão do LAT empregado para a geração de impulsos exponenciais de corrente aplicado à desmonte eletrohidráulico de rochas. O transformador de alta tensão e o diodo D , alimentam um banco de capacitores $C1$. A tensão de carregamento 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 acoplada 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 To .

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. 4.2. 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. 4.2 Circuito centelhador empregado nos ensaios eletrohidráulicos.

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 dois eletrodos concêntricos isolados entre si. 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. 4.3 mostra os eletrodos acoplados ao sistema de fixação e vedação especialmente projetado para este trabalho.

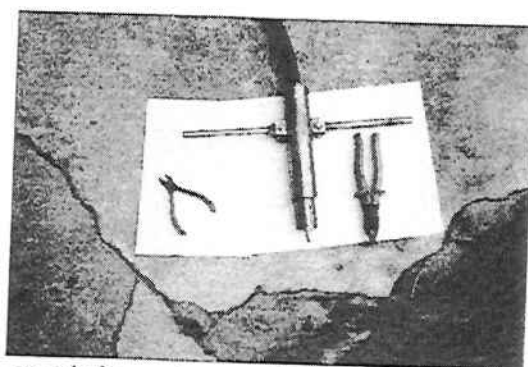


Fig. 4.3 Sonda acoplada ao sistema de fixação e vedação eletrodo-rocha.

Aspectos ambientais: segurança e manuseio

As atividades de mineração em áreas urbanas são regidas pela Norma NBR 9653 da Associação Brasileira de Normas Técnicas. A norma estabelece metodologia para reduzir riscos inerentes ao desmonte de rocha com uso de explosivos em minerações. Os principais parâmetros de avaliação são: velocidade de partícula ($V_p < 15 \text{ mm/s}$) e nível de ruído até 134

dB. Todavia, 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;
- setores de 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.

O resultado final da transformação da solução ionizável, Cu_2SO_4 a 5% em plasma, gera ácido sulfúrico. A quantidade de ácido sulfúrico liberado à atmosfera na forma de gás ou vapor gerados pelas descargas elétricas, é estimada com base em balanço estequiométrico das concentrações dos componentes da solução (soluto e solvente). Pode-se considerar que, em 1000ml de uma solução eletrolítica de concentração de 5% de sulfato de cobre (Cu_2SO_4), libera à atmosfera na forma de gás cerca de 21,87g de ácido sulfúrico (H_2SO_4).

4.3 TECNOLOGIA ELETROHIDRÁULICA DE DESMONTE DE ROCHAS: materiais e métodos

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. São blocos de rochas procedentes das pilhas de material desmontado (ROM);
- Solução ionizável a 5%: sulfato de cobre (Cu_2SO_4) e água destilada;
- 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 centelhamento;
- Grade de proteção para amostras (blocos) - gaiola (1,1m X 0,8m X 0,7m);
- Estrado de madeira (1 m X 1,4 m).

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 marteleto com diâmetros de 1^{1/2}" perpendicular 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 para ensaios eletrohidráulicos.

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 em concentração de 5% de soluto (sulfato de cobre - Cu_2SO_4) através do método base peso/volume que corresponde a 50g de Cu_2SO_4 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 μF cada, conforme mostrado na fig. 4.4. 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.

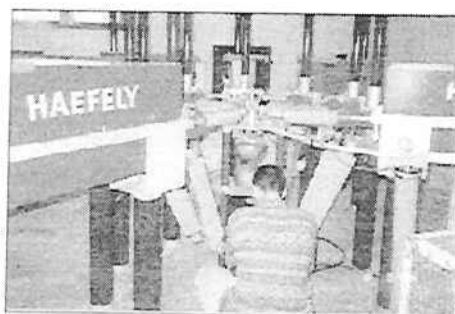


Fig. 4.4 Preparação e montagem do circuito elétrico gerador de impulso de alta corrente.

(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. 4.5a e 4.5b. Em seguida, insere-se a solução ionizável no interior do furo da rocha juntamente com o eletrodo fixado a sonda, acoplado-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 a fig. 4.5c.



Fig. 4.5 Montagem do cabo coaxial do gerador à amostra.

(v) Calibração do gerador de impulso de alta corrente: a alimentação do transformador de alta tensão é controlado por uma mesa de comandos. A alta tensão é retificada de acordo com valores da Tab. 3.3, 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 eletrodos da uma sonda.

5. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os ensaios geomecânicos foram baseados em metodologias de ensaios sugeridos pela ISRM - *International Society of Rock Mechanics*. Os ensaios apresentaram os seguintes resultados: (i) ensaio de compressão uniaxial: σ_c máximo = 51,5 MPa; (ii) módulo de elasticidade $E = 9.485$ MPa; (iii) coeficiente de Poisson $\nu = 0,23$; (iv) ensaio de resistência à tração indireta através do método brasileiro $\sigma_T = 4,6$ MPa; (v) ângulo de atrito interno $\phi = 53,7^\circ$; (vi) coesão do material $c = 7,02$ MPa.

Os resultados dos ensaios geomecânicos indicam a presença de elementos anisotrópicos característicos de rochas sedimentares (AMADEI; STEPHANSSON, 1997), evidenciados pelas variações dos valores dos parâmetros geomecânicos obtidos durante os ensaios. Estas variações influenciam o rendimento energético da propagação de ondas atuantes nos mecanismos de quebra (LOPEZ JIMENO et al., 1995).

Os valores de energia geomecânica nominal para ruptura simples, corrigidos com fator de eficiência de 40%, são apresentados na Tab. 3.2, baseados na expressão 3.4. HERTZBERG (1996) ressalta que a Lei de Hooke pode ser generalizada de acordo com as condições de esforços multiaxial aplicados, bem como para materiais anisotrópicos.

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 semelhantes aos mecanismos de fragmentação desenvolvidos pela tecnologia de desmonte convencional. Por outro lado, de acordo com a literatura, 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 que 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. 5.1 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 o Modo II (cisalhamento) também sejam encontrado em diversas estruturas rochosas, 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 que, o maciço (bancada) é composto por vários sistemas de famílias de fraturas e, portanto, o fator anisotrópico é mais interferente na fragmentação.

Os parâmetros elétricos R , L , C apresentados na literatura, foram determinados a partir de simulação de curvas experimentais apresentadas por KLICH; RÊS (1996) utilizados para desmonte de blocos de granitos de 6 toneladas. A simulação numérica forneceu os seguintes valores: capacitância igual a 1700 μF , indutância igual a 13,3 mH e resistência do eletrólito igual a 38,6 $\text{m}\Omega$. As formas de ondas da corrente, da tensão, da potência e da energia foram obtidas por simulação computacional. As curvas mostraram semelhanças com as curvas apresentadas por KLICH; RÊS (1996).

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 μF 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 2.1. Os valores da Tab. 3.3 são fornecidos ao gerador de impulso de alta corrente para os ensaios eletrohidráulicos.

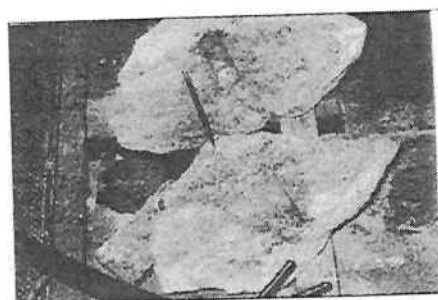
Para os ensaios eletrohidráulicos foi selecionado 5 amostras: amostra 24, amostra 42, amostra 48, amostra 22 e amostra 16. Os ensaios serviram para a validação e calibração da tecnologia proposta, apoiado nos estudos geomecânicos descritos no item 3. Os resultados dos ensaios eletrohidráulicos se mostraram satisfatórios, conforme valores mostrados na Tab. 5.1, e formas de ruptura ilustradas na fig. 5.1.

TABELA 5.13 – 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



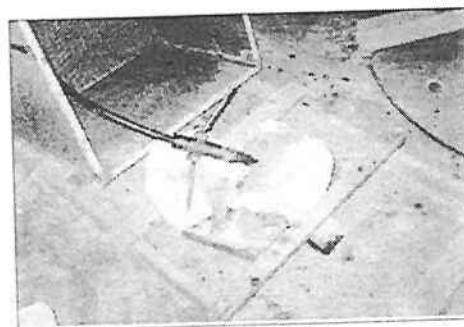
amostra 24



amostra 42



amostra 22



amostra 48



amostra 16

Fig. 5.1 Formas de ruptura das amostras de ensaios eletrohidráulicos.

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

Considerações sobre perdas e erros apresentados na Tab. 5.1, 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 e finos observados nos ensaios de desmonte eletrohidráulico, representa vantagens de uso do princípio eletrohidráulico do ponto de vista ambiental, bem como a minimização de vibração do terreno e ultralançamento de fragmentos, tomando-se promissor também para outras aplicações como em trabalhos de subsolo.

NANTEL; KITZINGER (1992a e 1992b) atribuem entre as vantagens da tecnologia de desmonte 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. Porém, com base nos valores de energia elétrica fornecidas pelo gerador de impulso de alta corrente mostrados na Tab. 5.1, foi possível estimar o consumo médio de energia e o custo do m³ desmontado em escala de laboratório em 0,12kWh/m³ e R\$ 796,5/m³, respectivamente. Pode-se observar que o consumo médio de energia elétrica resultante da aplicação do modelo tecnológico de desmonte proposto está abaixo dos valores apresentados na literatura (NANTEL; KITZINGER, 1992a e 1992b), porém, o custo médio por metro cúbico obtido foi muito superior aos valores encontrados na literatura.

6. 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.

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 de propagação de ondas elásticas atuantes.

Os resultados dos estudos experimentais (geomecânicos e eletrohidráulico) indicaram o rumo da pesquisa aos seus objetivos. 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.

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/
- 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.
- FUJIMURA, F. **Mecânica de rochas aplicada à cominuição de rocha**. São Paulo, 1999. 19 p. Tese (Livre Docência) - Departamento de Engenharia de Minas da Escola Politécnica da USP.
- 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.
- HARTMAN, H. L. **Introductory mining engineering**. 1987. J. Wiley & Sons, Alabama, EUA. 633p.
- HEMPHILL, G. B. **Blasting operations**. Cap. 6. McGraw-Hill, 1981, pp. 83-9.
- 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.
- JAEGER, J. C.; COOK, N. G. W. **Fundamentals of rock mechanics**. 2. ed. New York, Halsted Press, 1976. 585 p.

- KENNEDY, P. A. **An analysis of rock brekage 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. **Técnica moderna de voladura de rocas.** Bilbao, Urmo, 1976. 425 p.
- LEMOES, 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.
- 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.
- 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 emgineering.** CRC Press, 1994, 540p.
- QUAGLIANO, J. V.; VILLARINO, L. M. **Química.** 3. ed. Rio de Janeiro, Guanabara Dois, 1979. Cap. 19.
- RÊGO FILHO, M. A. **Projeto e construção de um gerador de impulso de corrente aplicado ao desmonte secundário de rochas (Relatório final).** Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica – PIBIC/CNPq. Campina Grande-PB. 1998. DEE/UFPB. 45p.
- 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.** Autralia, 1996. JKMRC. 339p.
- SEGSWORTH, R. S.; KUHN, K. **Electrical rock breaking.** IEEE Transations 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.; COSTA, E.G.; M. A. R. FILHO; A., STELLIN JR.; HENNIES, W.T. **Gerador de impulso de alta corrente aplicado às atividades de desmonte de rochas**. III Encontro Nacional de Engenharia de Alta Tensão. 4-7 junho. UFPB/CCT/DEE. Campina Grande, Paraíba. Brasil. 2000.
- 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.
- WILLS, B. A. **Mineral processing technology**. 3. ed. Oxford, Pergamon Press, 1985. Cap. 5.

BOLETINS TÉCNICOS - TEXTOS PUBLICADOS

- BT/PMI/001 - Características Geométricas da Escavação Mecânica em Mineração: Exemplo de Escavadora de Caçamba de Arraste - ANTONIO STELLIN JUNIOR
- BT/PMI/002 - Prospecção Geoquímica Experimental na Ocorrência de Ouro Tapera Grande - PAULO BELJAVSKIS, HELMUT BORN
- BT/PMI/003 - Estudo de Processo de Dupla Flotação visando o Beneficiamento do Minério Carbonático de Fosfato de Jacupiranga - JOSÉ RENATO BAPTISTA DE LIMA, EDUARDO CAMILHER DAMASCENO
- BT/PMI/004 - Desenvolvimento de um Equipamento Não-Convencional em Beneficiamento Mineral: A Célula Serrana de Flotação Pneumática - RICARDO NEVES DE OLIVEIRA, EDUARDO CAMILHER DAMASCENO
- BT/PMI/005 - Ajuste de Modelos Empíricos de Operação de Ciclones - HOMERO DELBONI JUNIOR, ARTHUR PINTO CHAVES
- BT/PMI/006 - Contribuição ao Estudo dos Explosivos Permissíveis - AMILTON DOS SANTOS ALMEIDA, WILDOR THEODORO HENNIES
- BT/PMI/007 - Contribuição ao Dimensionamento de Pilares em Minas Subterrâneas de Manganês - LINEU AZUAGA AYRES DA SILVA, ANTONIO STELLIN JUNIOR
- BT/PMI/008 - Exploração Mineral: Conceitos e Papel do Estado - LUIZ AUGUSTO MILANI MARTINS, EDUARDO CAMILHER DAMASCENO
- BT/PMI/009 - Otimização do Projeto de Pátios de Homogeneização através do Método da Simulação Condicional - FLAVIO MOREIRA FERREIRA, ARTHUR PINTO CHAVES
- BT/PMI/010 - Considerações Gerais sobre Desmonte de Rocha: Análise de Custo - Índice de Produtividade e Otimização da Malha de Perfuração - MARCO ANTONIO REZENDE SILVA, FERNANDO AMOS SIRIANI
- BT/PMI/011 - Aglomeração de Rejeitos de Fabricação de Brita para sua Reciclagem - ARTHUR PINTO CHAVES, BRADDLEY PAUL
- BT/PMI/012 - Método de Dimensionamento de Peneiras para a Classificação Granulométrica de Rochas ou Minérios - FERNANDO AMOS SIRIANI
- BT/PMI/013 - Processo de Beneficiamento para Obtenção de uma Carga Mineral Nobre a partir do Fosfogesso - WALTER VALERY JUNIOR, ARTHUR PINTO CHAVES
- BT/PMI/014 - Estudo da Carboxi-Metil-Celulose como Aglomerante para Pelotização - JOSÉ RENATO BAPTISTA DE LIMA, ARTHUR PINTO CHAVES
- BT/PMI/015 - A Influência do Amido de Milho na Eficiência de Separação Apatita/Minerais de Ganga Via Processo Serrana - LAURINDO DE SALLES LEAL FILHO, ARTHUR PINTO CHAVES
- BT/PMI/016 - Beneficiamento de Criolita Natural - Estado da Arte - HENRIQUE KAHN, ARTHUR PINTO CHAVES
- BT/PMI/017 - Estudo da Variação do Índice Energético Específico - W_i , segundo a Granulometria do Ensaio, Obtida através de um Moinho de Bolas Padrão, em Circuito Fechado - MARIO SHIRO YAMAMOTO, FERNANDO AMOS SIRIANI
- BT/PMI/018 - Fluorita - FERNANDO FUJIMURA, WILDOR THEODORO HENNIES
- BT/PMI/019 - O Aproveitamento de Recursos Minerais: Uma Proposta de Abordagem a Nível Nacional - CELSO PINTO FERRAZ, EDUARDO CAMILHER DAMASCENO
- BT/PMI/020 - Comparação de duas Metodologias - A de Bieniawski e a de Panek, para Dimensionamento de Tirantes em Galerias Subterrâneas de Seção Retangular em Camadas Estratificadas - NESTOR KENJI YOSHIKAWA, LINEU AZUAGA AYRES DA SILVA
- BT/PMI/021 - Caracterização de Maciços Rochosos através de Envoltórios de Resistência por Tratamento Estatístico utilizando Dados de Laboratório do IPT Simulando Condições Geotécnicas do Maciço - NESTOR KENJI YOSHIKAWA, WILDOR THEODORO HENNIES
- BT/PMI/022 - Avaliação de Impactos Ambientais na Mineração de Combustíveis Fósseis Sólidos - GILDA CARNEIRO FERREIRA, ANTONIO STELLIN JUNIOR
- BT/PMI/023 - O Lado Nocivo do Elemento Quartzo no Desgaste Abrasivo de Mandíbula de Britadores - FERNANDO FUJIMURA
- BT/PMI/024 - Conceitos Básicos de Iluminação de Minas Subterrâneas - SÉRGIO MEDICI DE ESTON, WILDOR THEODORO HENNIES
- BT/PMI/025 - Sistema Computadorizado para Ajuste de Balanço de Massas e Metalúrgico - ANTONIO CARLOS NUNES, ARTHUR PINTO CHAVES
- BT/PMI/026 - Caracterização Mineralógica/Tecnológica das Apatitas de alguns Depósitos Brasileiros de Fosfato - SARA LAIS RAHAL LENHARO, HELMUT BORN
- BT/PMI/027 - Classificação de Maciços quanto à Escarificabilidade - GUILHERME DE REZENDE TAMMERIK, EDUARDO CAMILHER DAMASCENO, LINDOLFO SOARES

- BT/PMI/028 - Análise Comparativa de Métodos de Amostragem de Depósitos Auríferos - FÁBIO AUGUSTO DA SILVA SALVADOR, HELMUT BORN
- BT/PMI/029 - Avaliação da Qualidade de Corpos Moedores para o Minério Fosfático de Tapira - MG - GERALDO DA SILVA MAIA, JOSÉ RENATO B. DE LIMA
- BT/PMI/030 - Contribuição ao Estudo da Cominação Inicial à Partir da Malha de Perfuração - MARCO ANTONIO REZENDE SILVA, WILDOR THEODORO HENNIES
- BT/PMI/031 - Análises Químicas na Engenharia Mineral - GIULIANA RATTI, ARTHUR PINTO CHAVES
- BT/PMI/032 - Usos Industriais da Atapulga de Guadalupe (PI) - SALVADOR LUIZ MATOS DE ALMEIDA, ARTHUR PINTO CHAVES
- BT/PMI/033 - Minerais Associados às Apatitas: Análise de sua Influência na Produção de Ácido Fosfórico e Fertilizantes Fosfatados - ROBERTO MATTIOLI SILVA, ANTÔNIO EDUARDO CLARK PERES
- BT/PMI/034 - Beneficiamento dos Caulins do Rio Capim e do Jari - ADÃO BENVINDO DA LUZ, ARTHUR PINTO CHAVES
- BT/PMI/035 - Dimensionamento de Suportes em Vias Subterrâneas - LINEU AZUAGA AYRES DA SILVA, WILDOR THEODORO HENNIES
- BT/PMI/036 - Estudos da Modelagem Matemática da Moagem com Seixos para Talco de Diversas Procedências - MARIO VALENTE POSSA, JOSÉ RENATO BAPTISTA DE LIMA
- BT/PMI/037 - Mecânica de Rochas Aplicada ao Dimensionamento do Sistema de Atirantamento em Minas Subterrâneas - LEONCIO TEÓFILO CARNERO CARNERO
- BT/PMI/038 - Geometria de Minas a Céu Aberto: Fator Crítico de Sucesso da Indústria Mineral - FÁBIO JOSÉ PRATI, ANTÔNIO JOSÉ NAGLE
- BT/PMI/039 - Substituição do Aço por Polímero e Compósitos na Indústria Automobilística do Brasil: Determinantes e Consequências para o Mercado de Minério de Ferro - WILSON TRIGUEIRO DE SOUSA, EDUARDO CAMILHER DAMASCENO, ANTONIO JOSÉ NAGLE
- BT/PMI/040 - Aplicação de uma Metodologia que Simule em Moinho de Laboratório Operações Contínuas de Moagem com Seixos para Talco - REGINA COELI CASSERES CARRISSO, JOSÉ RENATO BAPTISTA DE LIMA
- BT/PMI/041 - A Indústria Extrativa de Rochas Ornamentais no Ceará - FRANCISCO WILSON HOLLANDA VIDAL, ANTONIO STELLIN JÚNIOR
- BT/PMI/042 - A Produção de Fosfato no Brasil: Uma Apreciação Histórica das Condicionantes Envolvidas - GILDO DE A. DE SÁ C. DE ALBUQUERQUE, EDUARDO CAMILHER DAMASCENO
- BT/PMI/043 - Flotação em Coluna - Estado de Arte - JULIO CESAR GUEDES CORREIA, LAURINDO SALIES LEAL FILHO
- BT/PMI/044 - Purificação de Talco do Paraná por Flotação e Alveamento Químico - IVAN FALCÃO PONTES, LAURINDO SALLES LEAL FILHO
- BT/PMI/045 - Pequena Empresa - A Base para o Desenvolvimento da Mineração - GILSON EZEQUIEL FERREIRA, EDUARDO CAMILHER DAMASCENO
- BT/PMI/046 - Máquinas de Flotação - ROGÉRIO CONTATO GUIMARÃES, ANTÔNIO EDUARDO CLARK PERES
- BT/PMI/047 - Aspectos Tecnológicos do Beneficiamento do Carvão de Candiota (RS) - ANTONIO RODRIGUES DE CAMPOS, ARTHUR PINTO CHAVES
- BT/PMI/048 - Efeito das Dimensões de Provetas no Dimensionamento de Espessadores - ELDON AZEVEDO MASINI, ARTHUR PINTO CHAVES
- BT/PMI/049 - Água no Processamento Mineral - RODICA MARIA TEODORESCU SCARLAT, ARTHUR PINTO CHAVES
- BT/PMI/050 - Drenagens Ácidas do Estéril Piiritoso da Mina de Urânio de Poços de Caldas: Interpretação e Implicações Ambientais - VICENTE PAULO DE SOUZA, LUIS ENRIQUE SÁNCHEZ
- BT/PMI/051 - "Caracterização Tecnológica de Minérios Auríferos. Um Estudo de Caso: O Minério Primário da Jazida de Salamangone, AP." - MARIA MANUELA MAIA LÉ TASSINARI, HENRIQUE KAHN
- BT/PMI/052 - Ensino de Engenharia de Minas - WILDOR THEODORO HENNIES
- BT/PMI/053 - Redistribuição de Tensões e Desenvolvimento da Zona Clástica em Túneis Circulares - FERNANDO FUJIMURA
- BT/PMI/054 - Projeto de Barragem para Reservação de Mistos de Minerais Pesados Rejeitados pelo Beneficiamento de Cassiterita na Mina do Pitinga - MARCELO PIMENTEL DE CARVALHO, EDER DE SILVIO, LINDOLFO DE SILVIO
- BT/PMI/055 - A Segurança e a Organização do Trabalho em uma Mineração Subterrânea de Carvão da Região de Criciúma - Santa Catarina - DORIVAL BARREIROS, WILDOR THEODORO HENNIES
- BT/PMI/056 - Diagnóstico de Lixiviação para Minérios de Ouro - VANESSA DE MACEDO TORRES, ARTHUR PINTO CHAVES
- BT/PMI/057 - O Estado da Arte em Tratamento de Minérios de Ouro - RONALDO DE MOREIRA HORTA, ARTHUR PINTO CHAVES

- BT/PMI/058 - Vias Subterrâneas em Rocha - Escavação por Explosivos - WILDOR THEODORO HENNIES, LINEU AZUAGA AYRES DA SILVA
- BT/PMI/059 - Aumento da Seletividade na Separação da Fluorita/Calcita/Barita/Apatita por Flotação. Jazida de Mato Preto - PR - MONICA SPECK CASSOLA, ARTHUR PINTO CHAVES
- BT/PMC/060 - Desenvolvimento de Processo para Extração de Gálio do Licor de Bayer por Resinas de Troca-Iônica de Poli (Acrilamidoxima) - WALDEMARA VITTSCHER, LAURINDO DE SALLES LEAL FILHO
- BT/PMI/061 - Estudo de Aspectos Geomecânicos Aplicados ao Projeto de Minas Subterrâneas - EDUARDO CÉSAR SANSONE, LINEU A. AYRES DA SILVA
- BT/PMI/062 - Avaliação da Recuperação de Áreas Degradadas por Mineração na Região Metropolitana de São Paulo - OMAR YAZBEK BITAR, ARTHUR PINTO CHAVES
- BT/PMI/063 - Avaliação Técnica dos Processos de Cianetação/Adsorção da Mina de Fazenda Brasileiro - ÁUREA MARIA DIAS, ARTHUR PINTO CHAVES
- BT/PMI/064 - A Nova Configuração da Indústria de Fertilizantes Fosfatados no Brasil - YARA KULAIF, EDUARDO CAMILHER DAMASCENO
- BT/PMI/065 - Estudos de Flotação em Coluna com Finos de Fosfato da Ultrafertil em Escala Piloto - JOSÉ PEDRO DO NASCIMENTO, LAURINDO DE SALLES LEAL FILHO
- BT/PMI/066 - Flotação da Apatita da Jazida de Tapira - MG - LUIZ A. F. BARROS, LAURINDO DE SALLES LEAL FILHO - LUIZ A. F. BARROS, LAURINDO DE SALLES LEAL FILHO
- BT/PMI/067 - Minerais Industriais: Conceituação, Importância e Inserção na Economia - FRANCISCO REGO CHAVES FERNANDES, EDUARDO CAMILHER DAMASCENO
- BT/PMI/068 - Atividades Micro-Sísmicas e a Ruptura de Rochas - FERNANDO FUJIMURA
- BT/PMI/069 - Metodologia para Caracterização Tecnológica de Matérias Primas Mineraias - LÍLIA MASCARENHAS SANT'AGOSTINO, HENRIQUE KAHN
- BT/PMI/070 - Aplicação de Modelos Numéricos ao Projeto de Escavação por Explosivos de Túneis e Galerias - LUIZ CARLOS RUSILO, LINEU AZUAGA AYRES DA SILVA
- BT/PMI/071 - O Estado da Arte da Cianetação de Minérios Auríferos - ROBERTO GOULART MADEIRA, EDUARDO CAMILHER DAMASCENO
- BT/PMI/072 - Revisão da Indústria Mineral de Titânio - ANTÔNIO HELENO DE OLIVEIRA, EDUARDO CAMILHER DAMASCENO
- BT/PMI/073 - Sistematização de Casos de Instabilidades em Encostas Rochosas no Município de Santos, Através de Nova Metodologia de Avaliação de Estabilidade - NESTOR KENJI YOSHIKAWA, WILDOR THEODORO HENNIES
- BT/PMI/074 - A Minerio-Metalurgia e suas Ligações com a Geologia e suas Engenharias de Minas, Metalúrgica e Química - RICARDO ALVARES DE CAMPOS CORDEIRO, EDUARDO CAMILHER DAMASCENO
- BT/PMI/075 - A Redução da Umidade de Minérios de Ferro com o Emprego de Microondas - FERNANDO LEOPOLDO VON KRÜGER, ANTÔNIO EDUARDO CLARK PERES
- BT/PMI/076 - Estimativa de Parâmetros do Modelo Cinético de Moagem - CLÁUDIO FERNANDES, ANTÔNIO EDUARDO CLARK PERES
- BT/PMC/077 - A Bauxita e a Indústria do Alumínio - JOSÉ CRUZ DO CARMO FLÔRES, EDUARDO CAMILHER DAMASCENO
- BT/PMC/078 - Técnicas de Tratamento de Minérios para Reciclagem de Vidro - CLEUSA CRISTINA BUENO MARTHA DE SOUZA, ARTHUR PINTO CHAVES
- BT/PMI/079 - Comparação entre Cylpebs e Bolas na Moagem Secundária da Samarco Mineração - JOAQUIM DONIZETTI DONDA, ANTONIO EDUARDO CLARK PERES
- BT/PMI/080 - Calcários Dolomíticos da Região de Ouro Preto para usos na Metalurgia e como Rochas Ornamentais - MARCÍLIO DIAS DE CARVALHO, PAULO ROBERTO GOMES BRANDÃO
- BT/PMI/081 - Estudo de Reoxidação e Redução de Ferro Contido em Caulins - ADÃO BENVINDO DA LUZ, ARTHUR PINTO CHAVES
- BT/PMI/082 - Recuperação do Gálio Existente no Licor de Bayer de Poços de Caldas por Flotação Iônica: Estudo dos Coletores - ANA MARGARIDA MALHEIRO SANSÃO, LAURINDO DE SALLES LEAL
- BT/PMI/083 - Contribuição ao Conhecimento de Argilas de Cuba - GUILLERMO RUPERTO MARTÍN CORTÉS, WILDOR THEODORO HENNIES
- BT/PMI/084 - Determinação da Rugosidade da Superfície de Descontinuidades Rochosas - JOSÉ MARGARIDA DA SILVA, LINEU AZUAGA AYRES DA SILVA
- BT/PMI/085 - Serragens de Granitos para Fins Ornamentais - ANTONIO STELLIN JR
- BT/PMI/086 - Evolução Magmática e Modelo Metalogenético dos Granitos Mineralizados da Região de Pitinga, Amazonas, Brasil - SARA LAIS RAHAL LENHARO, HELMUT BORN

- BT/PMI/087 – Considerações sobre o Dimensionamento de Equipamentos de Carga e Transporte em Mineração a Céu Aberto – IESO DO COUTO COUTINHO, EDUARDO CAMILHER DAMASCENO, GIORGIO FRANCESCO CESARE DE TOMI
- BT/PMI/088 – Tratamento do Minério de Transição de Cobre e Ouro de Igarapé Bahia, Carajás, PA – DACILDO RODRIGUES DE SOUZA, PAULO ROBERTO GOMES BRANDÃO
- BT/PMI/089 – Variáveis que Interferem nos Problemas Ambientais Gerados Durante os Desmontes de Rochas – VALDIR COSTA E SILVA, LINEU AZUAGA AYRES DA SILVA
- BT/PMI/090 – Caracterização Mineralógica do Minério de Cobre e Ouro Secundário de Igarapé Bahia – LUIS RODRIGUES ARMÔA GARCIA, PAULO ROBERTO GOMES BRANDÃO
- BT/PMI/091 – O Topázio na Região de Ouro Preto: Minas do Vermelhão e Capão do Lana – JAIR MAZON JÚNIOR, HELMUT BORN
- BT/PMI/092 – A Mineralização Aurífera de Fazenda Brasileiro – BA Aspectos Geológicos e Planejamento de Lavra – MARCO ANTONIO DE MORAES SILVA, HELMUT BORN
- BT/PMI/093 – Estudo dos Mecanismos de Adsorção em Meio Ácido dos Metais Chumbo e Zinco em uma Turfa de Jacaré – RJ – MARIA DIONÍSIA COSTA DOS SANTOS, LAURINDO DE SALLES LEAL
- BT/PMI/094 – Cartografia de Riscos Geológicos Associados a Escorregamentos no Município de Embu – RMSP – CÉLIA MARIA GARIBLADI, LINDOLFO SOARES
- BT/PMI/095 – Revisão da Teoria para Projeto de Taludes Heterogêneos em Minas a Céu Aberto – FLÁVIO MOREIRA FERREIRA, LINEU AZUAGA AYRES DA SILVA
- BT/PMI/096 – Estratégias para Remediação de um Sítio Contaminada por Metais Pesados: Estudo de Caso – JOSÉ ÂNGELO SEBASTIÃO ARAUJO DOS ANJOS, LUIS ENRIQUE SÁNCHEZ
- BT/PMI/097 – Estudo dos Elementos Abrasivos de Fios Diamantados para a Lavra de Granitos do Ceará – FRANCISCO WILSON HOLLANDA VIDAL, ANTONIO STELLIN JÚNIOR
- BT/PMI/098 – Caracterização Mineralógica do Depósito de Terras no Complexo Alcalino – Carbonatítico de Barra do Itapirapua (SP/PR) – Área de Detalhe I – Maria de Lourdes Lorenzi, Henrique Kahn
- BT/PMI/099 – Considerações sobre a Seleção de Equipamentos para o Transporte de Minérios – ALEXANDRE DE SANT'ANNA, WILDOR THEODORO HENNIES
- BT/PMI/100 – Desgaste Abrasivo em Britadores de Mandíbulas – NILSON MAR BARTALINI, FERNANDO FUJIMURA
- BT/PMI/101 – Viabilidade do Emprego de Finos de Basalto em Concreto Compactado a Rolo – KLEBER DA SILVA MENDES, LINDOLFO SOARES
- BT/PMI/102 – Sistema Especialista para o Processamento de Minérios de Ouro – VANESSA DE MACEDO TORRES, ARTHUR PINTO CHAVES
- BT/PMI/103 – Desenvolvimento de Eletrodos de Pasta de Carbono Modificados com a Resina Poliamidoxima (ES-346) para a Determinação Potenciométrica de Gálio – MARCO ROGÉRIO BARRIOS, ARTHUR PINTO CHAVES
- BT/PMI/104 – Desenvolvimento de Processo para o Aproveitamento do Feldspato Contido em Finos de Pedreira de Nefelina Sienito – PAULO FERNANDO ALMEIDA BRAGA, LAURINDO DE SALLES LEAL FILHO
- BT/PMI/105 – Os Recursos Minerais e a Economia Internacional: Uma Reavaliação das Teorias – FRANCISCO REGO CHEVES FERNANDES, EDUARDO CAMILHER DAMASCENO
- BT/PMI/106 – Importância dos Aspectos Geológico-Geotécnicos em Obras Implantadas na Serra do Mar – Uma Metodologia de Manutenção Preventiva – ORIOVALDO CUNHA MARTINEZ, FERNANDO FUJIMURA
- BT/PMI/107 – Lixiviação e Adsorção em Fazenda Brasileiro – CVRD: Uma Questão de Produtividade – ÁUREA MARIA DIAS GOMES, ARTHUR PINTO CHAVES
- BT/PMI/108 – Análise Quantitativas por Difração de Raios-X em Engenharia Mineral – Aplicação dos Métodos de Rietveld e do Padrão Interno – GABRIELA CAMPOS FRONZAGLIA, HENRIQUE KAHN
- BT/PMI/109 – Avaliação das Principais Causas de Acidentes em Barragens de Contenção de Rejeitos Devido a Fatores Geológicos e Geotécnicos – FERNANDO IVAN VÁSQUEZ ARNEZ, LINDOLFO SOARES
- BT/PMI/110 – Problemas Relacionados a Tensões Naturais Durante a Lavra de Rochas Ornamentais – HUGO ANTONIO MERCONCHINI VEGA, LINEU AZUAGA AYRES DA SILVA
- BT/PMI/111 – Sistemas de Classificação na Análise da Estabilidade de Taludes em Maciços Brandos – ANDREA CRISTINA Y. DE MATTOS, LINDOLFO SOARES
- BT/PMI/112 – Metodologia para Amostragem de Material Particulado em Suspensão (MPS) – IVO TORRES DE ALMEIDA, SERGIO MÉDICI DE ESTON
- BT/PMI/113 – Viabilização da Recuperação de Ouro de Minério Primário por Lixiviação em Pilha Mediante o uso de Britadores não Convencionais: Um Estudo de Caso: O Minério Primário da Mina de Almas-Paiol, TO – SALOMÃO SOLINO EVELIN, ARTHUR PINTO CHAVES
- BT/PMI/114 – Aplicação de Aditivos Químicos à Filtragem de Polpas de Minerais – LUIZ GUSTAVO ESTEVES PEREIRA, LAURINDO DE SALLES LEAL FILHO
- BT/PMI/115 – Proposta de Gerenciamento Ambiental de uma Área Degradada nos Municípios de Mauá e Ribeirão Pires – Região Metropolitana de São Paulo – ÁLVARO GUTIERREZ LOPEZ, LUIZ ENRIQUE SÁNCHEZ

- BT/PMI/116 – Experiência de Gerenciamento da Reforma e Adequação de um Moinho de Bolas de 4000 HP para nova Aplicação – AROLD DUTRA GARCIA, ARTHUR PINTO CHAVES
- BT/PMI/117 – Efeitos da Viscosidade no Processo de Deslamagem com Microciclones em Polpa Não-Newtoniana de Rocha Fodfática – MARIO VALENTE POSSA, JOSÉ RENATO BAPTISTA DE LIMA
- BT/PMI/118 – Caracterização Tecnológica de Depósitos de Cromita da Província de Camagüey, República de Cuba – JULIÁN ANDRÉS MÉNDEZ GARCÉS, HENRIQUE KAHN
- BT/PMI/119 – Garimpo de Ouro no Brasil: Desafios da Legalização – MARIA LAURA TAVEIRA DA MOTA GERALDES DE CARVALHO BARRETO, EDUARDO CAMILHER DAMASCENO
- BT/PMI/120 – Contribuição ao Projeto de Reatores de Ácido Fosfórico para Processamento de Concentrados Apatíticos Brasileiros – ROBERTO MATTIOLI SILVA, EDUARDO CAMILHER DAMASCENO
- BT/PMI/121 – Lixiviação em Pilhas de Minérios Oxidados de Cobre – GEYSA SANTOS DE PONTES PEREIRA, ELTON AZEVEDO MASINI
- BT/PMI/122 – Produção de Agregado como Alternativa para Produtores de Corretivo de Solo da Grande Curitiba – PLÍNIO CRISTIANO CAMBOIM DE OLIVEIRA, ANTÔNIO JOSÉ NAGLE
- BT/PMI/123 – A Competitividade da Mineração Nacional com Ênfase no Minério de Ferro – GILSON EZEQUIEL FERREIRA, EDUARDO CAMILHER DAMASCENO
- BT/PMI/124 – Aplicação de Turfa na Recuperação de Solos de Degradados pela Mineração de Areia – JOSÉ GUILHERME FRANCHI, JOSÉ RENATO BAPTISTA DE LIMA
- BT/PMI/125 – Aproveitamento de Materiais Fosfáticos Marginais para a Produção de Fertilizantes Organo-Fosfatados – CARLOS ALBERTO IKEDA OBA, ARTHUR PINTO CHAVES
- BT/PMI/126 – Abordagem Participativa na Gestão de Recursos Minerais – CARLOS C. PEITER, ROBERTO C. VILLAS BÔAS
- BT/PMI/127 – A Importância dos Condicionantes Geológicos-Geotécnicos na Recuperação de Áreas Degradadas por Lavra de Minas a Céu Aberto – RICARDO DEGUTI DE BARROS SILVA, FERNANDO FUJIMURA
- BT/PMI/128 – Determinação de Indicadores de Impactos Ambientais Cumulativos Decorrentes da Mineração de Areia no Vale do Paraíba Através de Geoprocessamento – EDER LUIZ SANTO, LUIS HENRIQUE SÁNCHEZ
- BT/PMI/129 – Tecnologia de Corte de Rocha Ornamental com Fio Helicoidal – FERNANDO FUJIMURA, ANTONIO STELLIN JUNIOR
- BT/PMI/130 – Diagnóstico da Degradação do Meio Físico e Proposição de Medidas de Recuperação em Áreas de Mineração Abandonadas na Bacia do Guarapiranga, Região Metropolitana de São Paulo – MARIA MARTA TEIXEIRA VASCONCELOS, LUIS ENRIQUE SANCHEZ
- BT/PMI/131 – A Integração Competitiva do Setor Mineral Brasileiro no Cenário Internacional Estudo de Caso: O Setor de Aços Especiais Inoxidáveis – MANOEL RODRIGUES NEVES, EDUARDO CAMILHER DAMASCENO
- BT/PMI/132 – Contribuição à Implantação de um Novo Pólo de Fertilizantes no Nordeste do Brasil – GILDO DE ARAÚJO SÁ C. DE ALBUQUERQUE, EDUARDO CAMILHER DAMASCENO
- BT/PMI/133 – Metodologia Construtiva do Poço de Produção da Mina Fazenda Brasileiro – LEONCIO TEÓFILO CARNERO CARNERO, FERNANDO FUJIMURA
- BT/PMI/134 – Aproveitamento de Finos Gerados nas Ferragens de Mármore e Granitos – IVAN FALCÃO PONTES, ANTÔNIO STELLIN JÚNIOR
- BT/PMI/135 – Aspectos Hidrodinâmicos na Flotação de Partículas Grossas – WENDEL JOHNSON RODRIGUES, LAURINDO DE SALLES LEAL FILHO
- BT/PMI/136 – Aproveitamento de Rejeitos de Pedreiras de Santo Antônio de Pádua – RJ para Produção de Brita e Areia – SALVADOR LUIZ DE MATOS DE ALMEIDA, LAURINDO DE SALLES LEAL FILHO
- BT/PMI/137 – Análise Crítica do Desenvolvimento de Processos de Cianetação em Tanques Agitados – RINALDO PEDRO NARDI, ARTHUR PINTO CHAVES
- BT/PMI/138 – A Utilização de Finos de Pedreira em Solo-Cimento Ensacado – EDILSON PISSATO, LINDOLFO SOARES
- BT/PMI/139 – Dessulfuração de Finos de Carvão de Santa Catarina por Concentradores Centrífugos – ANTÔNIO RODRIGUES DE CAMPOS, ARTHUR PINTO CHAVES
- BT/PMI/140 – Estereoquímica de Polissacarídeos e sua Influência na Seletividade da Separação Apatita/Calcita por Flotação Aniônica Direta – JULIO CESAR GUEDES CORREIA, LAURINDO DE SALLES LEAL FILHO
- BT/PMI/141 – Avaliação do Desempenho Ambiental – Proposta Metodológica e Diretrizes para Aplicação em Empreendimentos Cíveis e de Mineração – FRANCISCO NOGUEIRA DE JORGE, LINDOLFO SOARES
- BT/PMI/142 – Formação de Barreira Geoquímica para o Abatimento de Drenagens Ácidas de Estéril Piritoso – VICENTE PAULO DE SOUZA, LUIS ENRIQUE SÁNCHEZ
- BT/PMI/143 – Técnicas de Preparação de Areia para uso na Construção Civil – WILLIAM WHITAKER, ARTHUR PINTO CHAVES
- BT/PMI/144 – Inovação Tecnológica e Setores da Indústria: O Contexto da Indústria Extrativa e de Transformação Mineral – MARIA HELENA MACHADO ROCHA LIMA, EDUARDO CAMILHER DAMASCENO

- BT/PMI/145 – Determinação e Análise Estatística dos Índices Físicos de Pedras Ornamentais Brasileiras – ANTONIO STELLIN JUNIOR, EDUARDO CESAR SANSONE, MARIA RENATA MACHADO STELLIN
- BT/PMI/146 – Avaliação de Impacto Ambiental de Projetos de Mineração n Estado de São Paulo: A Etapa de Acompanhamento – ELVIRA GABRIELA C. S. DIAS, LUIS E. SÁNCHEZ
- BT/PMI/147 – Contribuição ao Estudo do Corte de Rochas por Jato D'Água Abrasivo – CARLOS TADEU LAUAND, WILDOR THEODORO HENNIES
- BT/PMI/148 – Competitividade na Exploração Mineral – Um Modelo de Avaliação – JOSÉ GUEDES DE ANDRADE, EDUARDO CAMILHER DAMASCENO
- BT/PMI/149 – Caracterização Tecnológica do Depósito de Terras Raras de Catalão I, GO. Áreas: Córrego do Garimpo e Lagoa Seca – MARIA MANUELA MAIA LÉ TASSINARI, HENRIQUE KAHN
- BT/PMI/150 – Contribuição ao Método de Determinação do Índice de Abrasividade de Bond (A. i.) à Luz de Outros Materiais Metálicos – JOSÉ BRUNO NETO, JOSÉ RENATO BAPTISTA DE LIMA
- BT/PMI/151 – Fabricação de Termofosfato Utilizando Fosfogesso – REYNALDO ARBUE PINI, ARTHUR PINTO CHAVES