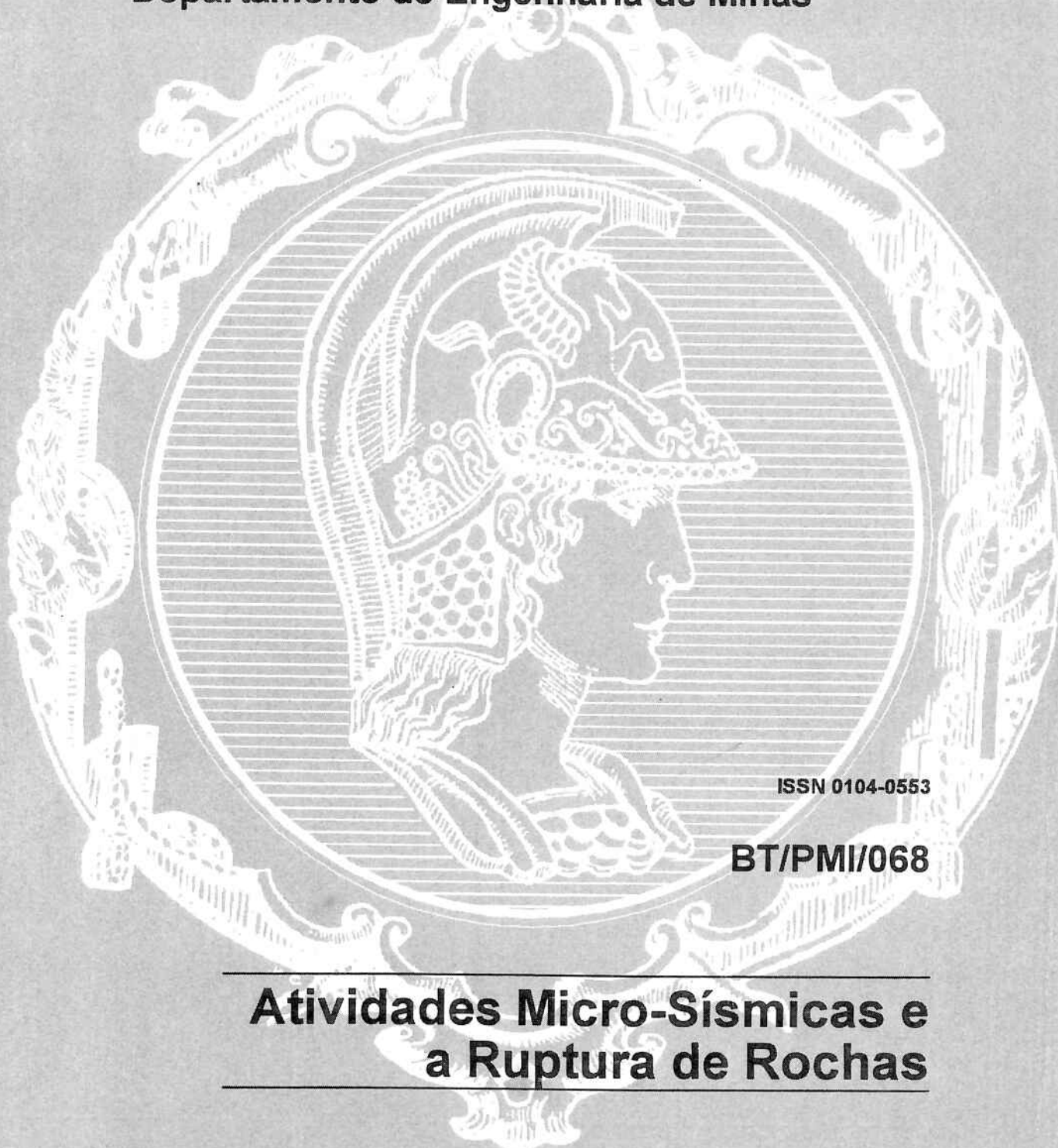


Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP

Departamento de Engenharia de Minas



ISSN 0104-0553

BT/PMI/068

**Atividades Micro-Sísmicas e
a Ruptura de Rochas**

Fernando Fujimura

PMI

Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP

Departamento de Engenharia de Minas

ISSN 0104-0553

BT/PMI/068

1997

**Atividades Micro-Sísmicas e
a Ruptura de Rochas**

Fernando Fujimura

000 974281

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

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Engenharia de Minas

Diretor: Prof. Dr. Célio Taniguchi
Vice-Diretor: Prof. Dr. Eduardo Camilher Damasceno

Chefe do Departamento: Prof. Dr. Lineu Azuaga Ayres da Silva
Suplente do Chefe do Departamento: Prof. Dr. Eldon Azevedo Masini

Conselho Editorial

Prof. Dr. Wildor Theodoro Hennies
Prof. Dr. Antonio Stellin Júnior
Prof. Dr. Arthur Pinto Chaves
Prof. Dr. Laurindo de Salles Leal Filho
Prof. Dr. Sérgio Médici de Eston

Coordenador Técnico

Prof. Dr. Lineu Azuaga Ayres da Silva

Esta é uma publicação da Escola Politécnica da USP/Departamento de Engenharia de Minas, fruto de pesquisas realizadas por docentes e pesquisadores desta Universidade

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

14 3 MAR 1997

ISSN 0104-0553

BT/PMI/068

**Atividades Micro-Sísmicas e
a Ruptura de Rochas**

Fernando Fujimura

São Paulo - 1997

Fujimura, Fernando

Atividades micro-sísmicas e a ruptura de rochas
/ F. Fujimura. -- São Paulo : EPUSP, 1997.

19 p. -- (Boletim Técnico da Escola Politécnica
da USP, Departamento de Engenharia de Minas,
BT/PMI/068)

1. Mecânica de rochas 2. Atividade micro-sísmica 3. Fratura (Resistência dos materiais) I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Minas II. Título III. Série

ISSN 0104-0553

CDU 624.121

539.2:534

620.172.24

Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP

Departamento de Engenharia de Minas



Atividades Micro-sísmicas e a
Ruptura de Rochas

Fernando Fujimura

São Paulo - 1997

ATIVIDADES MICRO-SÍSMICAS E A RUPTURA DE ROCHAS

ABSTRACT

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO

2. ORÍGEN E MECANISMO DA EMISSÃO ACÚSTICA NA ROCHA

2.1 - Principais características dos pulsos micro-sísmicos

2.2 - Esquema de montagem em laboratório

3. COMPORTAMENTO MECÂNICO DOS SISTEMAS INTERNOS DA ROCHA

4. RUPTURA DE ROCHAS

5. TEORIA DE RUPTURA DE GRIFFITH

5.1 - Cálculo da fenda crítica de Griffith

5.2 - Energia associada a propagação da fenda

5.3 -Tensões de cisalhamento

6.- CONCLUSÕES

BIBLIOGRAFIA

ABSTRACT

Acoustic emission (AE) also known as microseismic activity has been studied at least 30 years, however, only recently the modern and high accuracy sensors become available to provide more accurate researches.

In rock, this acoustic event, according to the many specialists, is related to processes of deformation and failure of the solid materials which are followed by sudden release of strain energy. This phenomenon in rock materials is very remarkable and useful to observe, to identify and to monitor the complex behavior of the internal rock system structures.

There are many experiments carried out by using acoustic emission techniques, among them laboratory studies by Brown (1965), field applications by Brady (1973), Kaiser effects by Friedel & Thill (1990) and as a technical method for assessing concrete beam damages by Ouyang et alii (1991).

This paper deals on acoustic emission in rock and analyses the relationship between these activities and rock rupture processes. This technique is suggested as a powerful tool to identify and to follow up the crack propagation and to predict the extent of internal damage of rocks. This knowledge is very important to assess the rock strength and the long term stability of rock masses.

RESUMO

O fenômeno da emissão acústica em materiais sólidos, também conhecido como atividade micro-sísmica, vem sendo pesquisada há pelo menos 30 anos e, só recentemente, com sensores eletrônicos modernos, tornou-se possível estudá-lo com maior rigor.

Segundo vários especialistas no assunto, trata-se de um evento acústico de liberação de energia de deformação que se manifesta quando um corpo material sólido, momentaneamente de constituição cristalina fica sujeito a tensões. É uma característica notável em materiais rochosos e hoje aproveitada para observar, identificar e acompanhar os complexos processos que envolvem o comportamento estrutural de sistemas internos da rocha.

Destaques são os estudos laboratoriais de Brown (1965), aplicações no campo de Brady (1973), determinação do estado original de tensões da rocha pelo "efeito Kaiser" (Friedel & Thill, 1990) e identificação do processo de ruptura e direção da propagação de fendas em vigas de concretos (Ouyang et alii, 1991).

Esta publicação discorre sobre o fenômeno da emissão acústica na rocha e estabelece um paralelo entre tais atividades e o mecanismo de ruptura de materiais rochosos, em escala laboratorial. Sugere a sua aplicação nos ensaios de Mecânica de Rochas como técnica para identificação do início e acompanhamento dos processos de propagação da fenda na ruptura. Esse conhecimento é importante para determinação da resistência mecânica e do estudo da estabilidade a longo prazo do maciço rochoso.

1. INTRODUÇÃO

Os homens interpretam, principalmente quando não se conhece a fonte ou a origem, ruídos audíveis como advertência a um perigo eminente. Em trabalhos de aberturas subterrâneas notadamente profundas, ruídos podem sugerir o início de um processo súbito de liberação de energia armazenada em rocha (rock burst), com consequências às vezes catastróficas, conforme relato de Duvall & Stephenson (1965). Precedendo o período de emissão de ruídos audíveis, há um período mais longo em que ruídos sub audíveis são gerados como consequência da rocha estar sob tensões. Estes ruídos são pulsos sísmicos de pequena duração e de amplitude também pequenas, designadas por Obert & Duvall (1967) como "micro-sismos".

Face à estreita conexão destes eventos com a resistência e colapso de materiais o Laboratório de Mecânica de Rochas da Universidade de Pensylvania vem dedicando o estudo neste campo há vários anos. As aplicações micro-sísmicas em modelos de laboratório e estudos de campo foram bem apresentados por Blake (1970) e Hardy (1971). Esta técnica tem sido utilizada, segundo Hamstad (1986), em análise de danos e propagação de ruptura de materiais sólidos desde há muitos anos e, mais recentemente, para avaliar a extensão de danos estruturais internos do material (Berthelot & Robert, 1987).

2. ORÍGEN E MECANISMO DA EMISSÃO ACÚSTICA NA ROCHA

Embora o mecanismo responsável pela emissão acústica não esteja ainda totalmente esclarecido, sabe-se que é um processo associado a deformação da rocha com liberação da energia elástica de deformação. Acredita-se que os pulsos micro-sísmicos resultem da ruptura de ligamentos micro-cristalinos ou ainda de uma ruptura no próprio grão cristalino. Em materiais policristalinos, aspecto usual nas rochas, os micro-sismos tem origem nas deformações microscópicas, fechamento das micro-fissuras, movimento de grãos fronteirços, modificações na porosidade/permeabilidade e propagação das fraturas através e entre os grânulos minerais.

Esta atividade aumenta de 10 a 100 vezes em instantes antes da ruptura, tornando fácil sua identificação, registro e medição. De fato, isto fornece a base do método para detectar e mapear a zona contendo os focos das emissões acústicas e precisar o instante em que a propagação das fraturas se inicia na rocha.

Alguns investigadores como Cook (1965), Chugh et. al. (1967) e Scholtz (1967) efetuaram medidas de emissões acústicas e notaram que esta técnica pode ser aplicada na maioria das rochas.

2.1 - Principais características dos pulsos micro-sísmicos

São considerados fenômenos acústicos de natureza e intensidade próprias e gerados na rocha sob o efeito de um campo de tensões. Nas rochas heterogêneas a emissão acústica se inicia com a tensão valendo aproximadamente a metade da resistência mecânica máxima e aumenta progressivamente com a tensão até atingir o pico de ruptura. Nas rochas homogêneas, estas atividades surgem com valores de tensão próximos à resistência mecânica máxima do material.

Segundo Obert & Duvall (1967) os pulsos gerados em testes de laboratório dependem principalmente de : a) composição mineralógica; b) tamanho do cristal; c) natureza de ligação entre cristais; d) existência de micro-fissuras, etc. Na escala de maciço rochosos são importantes a presença de: a) juntas; b) fraturas/grau de fraturamento; c) umidade/grau de saturação; d) outras anomalias geológicas do maciço.

Estas manifestações acústicas podem ser caracterizadas, segundo Hardy (1971), através de parâmetros numéricos relacionados a frequência, magnitude e energia associada ao evento de um simples ou a um grupo de micro-sismos, a saber:

- **Accumulated Activity (N)**: O número total de micro-sismos observados durante um período de tempo.
- **Noise Rate (NR)**: O número de micro-sismos (ΔN) observado na unidade de tempo (Δt).
- **Microseismic Energy (E)**: Quadrado da amplitude dos micro-sismos.
- **Accumulated Energy (ΔE)**: Soma da energia micro-sísmica de todos os micro-sismos observados durante um período determinado.
- **Energy Rate (ER)**: Soma da energia micro-sísmica de todos os micro-sismos por unidade de tempo (Δt).

A curva de amplitude vs. tempo, típica, na figura 1, representa a manifestação individual de uma atividade micro-sísmica, como também indicar uma superposição de numerosos sinais senoidais de frequência e amplitude própria.

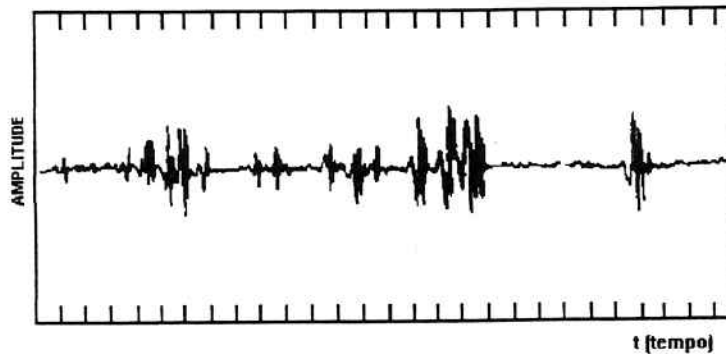


Figura 1 - Exemplo de registro de uma atividade micro-sísmica

Matematicamente a amplitude do sinal pode ser expressa pela seguinte fórmula geral:

$$G(t) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} s(w) \cos [wt + \phi(w)] dw$$

$w = 2\pi f$; f = frequência;

t = tempo

$\Phi(w)$ = fator fase

2.2- Esquema de montagem em laboratório

A figura 2 mostra esquematicamente a montagem utilizada para detecção e registro dos pulsos gerados em estudos de laboratório. Cristais piezoelétricos dos geofones são elementos transdutores de sinais eletromecânicos modulados em amplificadores de alta sensibilidade.

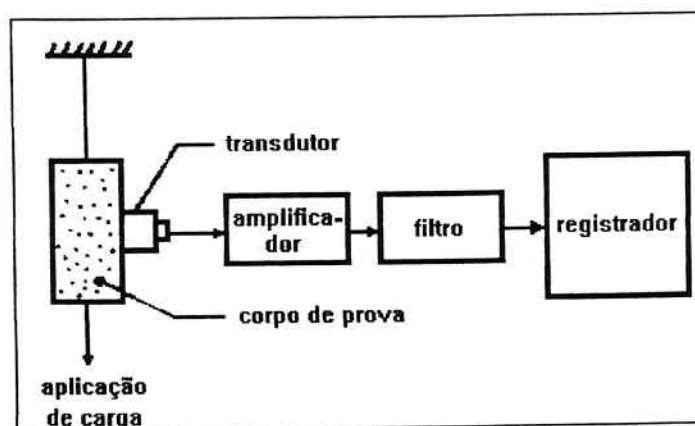


Figura 2 - Montagem esquemática dos equipamentos em laboratório

3 - COMPORTAMENTO MECÂNICO DOS SISTEMAS INTERNOS DA ROCHA

Um dos fatores primordiais para obras construídas em rocha é a garantia da segurança traduzida em termos de estabilidade estrutural do maciço rochoso a longo prazo. Para tal, o conhecimento prévio das propriedades da rocha, isto é, saber como a rocha deforma e se rompe sob a ação de forças atuantes, é imprescindível. A compreensão do comportamento mecânico da rocha, quanto mais próximo da real, é um dos requisitos essenciais para projetar uma estrutura confiável em maciços rochosos.

Em materiais considerados estruturalmente homogêneos tais como metais, plásticos, vidros e etc., as propriedades mecânicas reais não diferem muito daquelas determinadas em laboratório. Permitem, assim, o conhecimento mais preciso das suas reações perante as aplicações de carga e por isso possibilita executar projeto e construção com maior grau de confiança.

A mesma equivalência não existe para as rochas, pois a composição mineralógica variada, fatores de natureza geológica (junta, falha, fratura) e alterações físico-químicas dos minerais as tornam heterogêneas, anisotrópicas e descontínuas. Não obstante, ainda hoje, construções e escavações são frequentemente realizadas assumindo hipóteses simplificadas no projeto, utilizando de propriedades e comportamentos distantes da natureza mecânica das rochas.

Considerando estes fatos vários pesquisadores, já há algum tempo, estão empenhados em desenvolver técnicas especiais, baseadas em solicitações dinâmica e estática, que permitam estudar as propriedades da estrutura interna da rocha, sem introduzir perturbações ou danos físicos no material rochoso.

Dentre estes pode-se citar o trabalho de Gama (1971), onde é estudada a influência das fraturas na atenuação das ondas em experiência de laboratório. A comparação entre as propriedades das rochas intactas (velocidade de propagação de onda, módulo de Young, fator de qualidade Q e decremento logarítmico) e aquelas das fraturadas, fornece a técnica para a interpretação do "status" fissural do maciço rochoso.

Em engenharia sísmica, a atenuação das ondas é normalmente utilizada para analisar as estruturas internas da crosta terrestre. Hardy (1971), seguindo a mesma linha de pensamento, realizou estudos em laboratório e de campo utilizando-se da técnica de ultra-som e conseguiu, com rara felicidade, registrar e acompanhar o processo de fechamento de fendas e micro-fissuras na rocha.

A eficiência da transmissão ultra-sônica, equivalente ao inverso da atenuação, atingiu o valor máximo em níveis de tensão considerados baixos (35 a 60 Kg/cm^2), e se revelou praticamente independente para pressões de confinamento superiores a estas. Os valores estariam associados ao fechamento de micro-fraturas abertas devido ao alívio de tensões ocorrido em consequência da extração de amostras, principalmente aquelas retiradas de grandes profundidades ou de zonas afetadas por tensões anômalas. O resultado obtido foi considerado consistente de acordo com a concepção que admite as rochas como materiais elásticos contendo poros e fissuras. Para três tipos de rocha (calcário, arenito e granito), sob solicitação triaxial, o valor máximo ou nível crítico foi atingido para tensões de aproximadamente 3,5 a 8% da resistência a compressão máxima das rochas.

Utilizando-se do método de permeabilidade ao ar, Perami (1971) analisou o comportamento das fissuras comunicantes sob carregamentos uniaxial, lateral e triaxial. Foi um trabalho que permitiu "visualizar" o mecanismo de fechamento das micro-fissuras com a compressão mecânica da amostra e identificar o início da micro-fissuração e posterior ruptura do material.

Farjallat (1975), estudou basaltos provenientes de Ilha Solteira e Capivara e verificou que mesmo nas tensões mais baixas, a permeabilidade ao ar decrescia indicando fechamento das micro-fissuras da rocha.

Este comportamento revelou-se mais regular para rochas compactas e menos permeáveis do que aquele observado em rochas menos compactas e mais permeáveis. Esta técnica aliada a medidas de deformação usualmente registrada em ensaios de compressão, como mostra a figura 3, tornou-se uma ferramenta auxiliar para determinar o comportamento do estado microfissural das rochas.

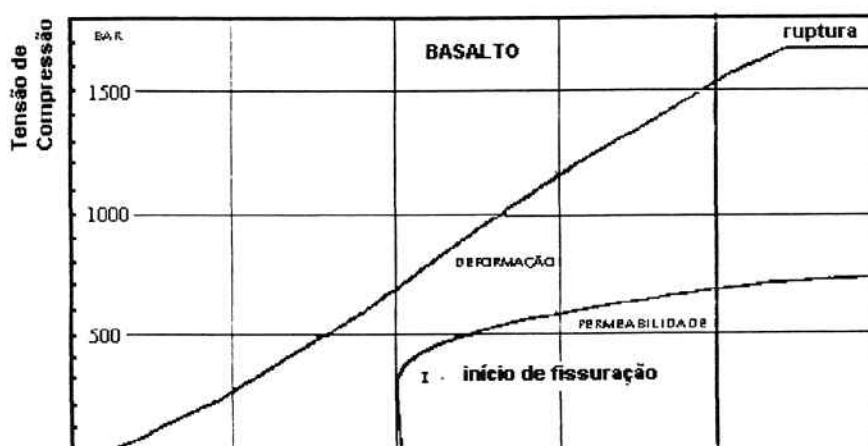


Figura 3 - Permeabilidade ao ar em função da tensão de compressão.

O maior mérito deste trabalho consiste não apenas em poder mostrar a diferença entre início da microfissuração (note o início da fissuração em tensão menor que a metade da resistência à compressão) e a tensão máxima de ruptura, mas também como parâmetro indicador da estabilidade a longo prazo da capacidade de resistência da rocha.

Brown & Hudson (1971) utilizaram o sistema de ensaios desenvolvido, na Universidade de Minnesota de Minneapolis, para a prensa servo-controlada e estudou no laboratório a influência da micro-estrutura, além do tamanho dos grãos cristalinos e a porosidade da rocha, no tipo de ruptura e as características de desvio no comportamento das rochas.

Experimentos relacionados com emissão acústica foram realizados por Brown e Singh (1966), em três tipos de rochas (calcário, arenito e granito), nos quais concluíram que a "microseismic energy (E)" é o fator mais adequado para caracterizar o fenômeno de atividades micro-sísmicas.

A relação entre "accumulated activity (N)" e comportamento anelástico das rochas pesquisadas por Hardy (1971) et. al., em amostras cilíndricas sob cargas axial e triaxial, forneceram regressões do tipo linear, com ótimo coeficiente de correlação entre valores, conforme indicado na figura 4

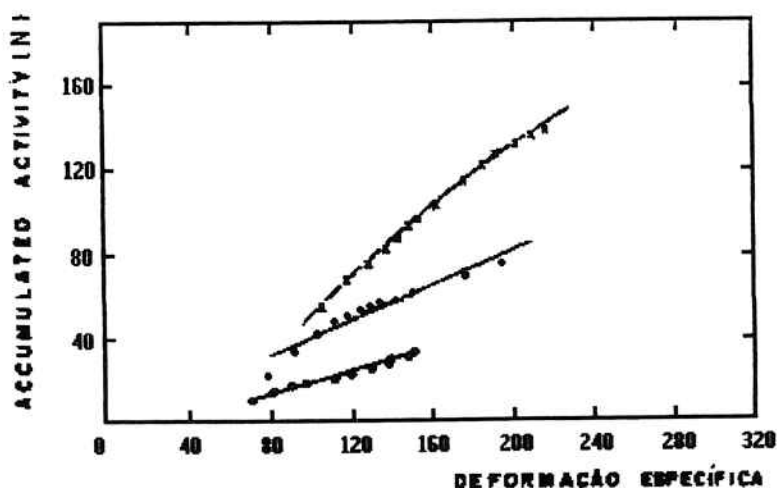


Figura 4 - "Accumulated Activity (N)" observados versus deformação específica

A curva obtida em granito, na qual se relacionam as deformações axiais, próximo a ruptura, e a correspondente atividade micro-sísmica, acha-se representada na figura 5 abaixo.

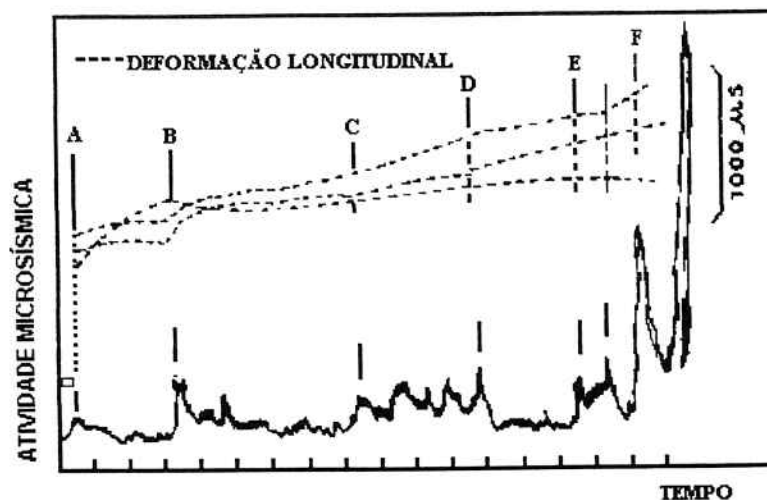


Figura 5 - Atividades micro-sísmicas em momentos antes da ruptura da rocha

O ponto A indica uma tensão de 75 a 80% da resistência máxima. No gráfico nota-se que Noise Rate (NR) oscila durante os incrementos sucessivos de carga, permanecendo em nível baixo até a amostra começar a se deformar rapidamente, ocasião em que a ruptura ocorre com brusco aumento de NR.

Um exame mais detalhado da figura revela que os pontos assinalados entre A e G apresentam pequenos saltos na curva, correspondentes a picos de NR e sugerem pré-rupturas, características típicas de comportamento verificado em início de ruptura de material rochoso, em razão do rompimento das ligações inter ou intra grãos dos cristais constituintes da rocha.

A emissão micro-sísmica em rochas sólidas, conforme já mencionada, começa quando as tensões ultrapassam um certo valor e aumenta de intensidade com o aumento das tensões, estando, portanto, relacionada à deformações que a rocha sofre sob ação de carregamentos. Esta observação indica que momentos como o instante antes ou iminência de ruptura da rocha podem ser detectadas monitorando a emissão de eventos microsísmicos.

4- RUPTURA DE ROCHAS

A ruptura de rochas é um conceito extremamente difícil de precisar, embora a primeira vista pareça ser bastante simples de entender. As condições necessárias para estabelecer um estado de ruptura são, ainda hoje, feitas teoricamente e suas hipóteses são difíceis de serem comprovadas na prática. Em consequência, o estudo da ruptura de rocha constitui um dos assuntos pouco conhecidos dentro da Mecânica de Rochas.

A fratura na rocha entendida como uma separação física entre as partes é uma decorrência do processo de ruptura e se caracteriza por falha na continuidade do material provocada por tensões em uma ou demais partes de um corpo sólido. A experiência tem nos ensinado como evitar a ruptura. No entanto, sabe-se que alguns materiais como rochas, ferro fundido, concreto e solo, têm propriedades drasticamente diferente, dependendo do sentido da força aplicada.

Em 1920, Griffith formulou a hipótese de ruptura dos materiais frágeis, na qual salientou a importância a presença de descontinuidades ou microfissuras pré-existentes submetidas às tensões de tração. Entretanto, os trabalhos de Griffith só começaram a ser utilizados durante a II Guerra Mundial e mais tarde depois de 1950 as suas hipóteses passaram a ser aplicadas em ruptura de rochas. A partir de então, a Teoria de Ruptura de Griffith tem despertado a atenção de vários pesquisadores e, hoje, quase 50 anos depois é ainda encarada como a que melhor se ajusta à explicação do início de ruptura das rochas frágeis.

5 - TEORIA DE RUPTURA DE GRIFFITH

As hipóteses iniciais de Griffith foram enunciadas para explicar o fato da resistência à tração de um material frágil, baseado nas forças inter-moleculares, apresentar resultados teóricos de 10^2 a 10^5 vezes maiores que o valor observado experimentalmente.

É conhecido da experiência que materiais cristalinos contêm micro-fraturas e Griffith desenvolveu a hipótese da concentração de tensões de tração nas extremidades dessas micro-fraturas que provoca a propagação e ruptura do material, com valores bem abaixo do valor teórico.

Foi demonstrado experimentalmente que fendas de 10^{-3} cm de comprimento podem reduzir tensões de ruptura de cerca de 10^2 vezes. Entretanto, tais fendas são pequenas e não possuem interesses práticos. Contudo, mesmo essas fendas sub-microscópicas não são estáveis e aumentam de tamanho, porém muito lento, sob efeito das tensões (Bieniawski e alii, 1969).

Brace (1960) estudou a dimensão crítica das fendas a partir da qual o processo de ruptura ficava extremamente sensível a dimensão da fenda. Esta investigação, realizada principalmente em calcário, revelou uma estreita correlação entre o comprimento da fenda e a máxima dimensão do grão.

Griffith admitiu que as pequenas fendas poderiam ser consideradas como uma fenda elíptica alongada, em material homogêneo elástico de espessura unitária, com eixo maior orientado perpendicularmente à direção dos esforços de tração. Servindo-se das deduções analíticas de Inglis (1913) determinou a tensão de tração máxima σ_{tmax} , nas duas extremidades da fenda, segundo a expressão contida na figura 6.

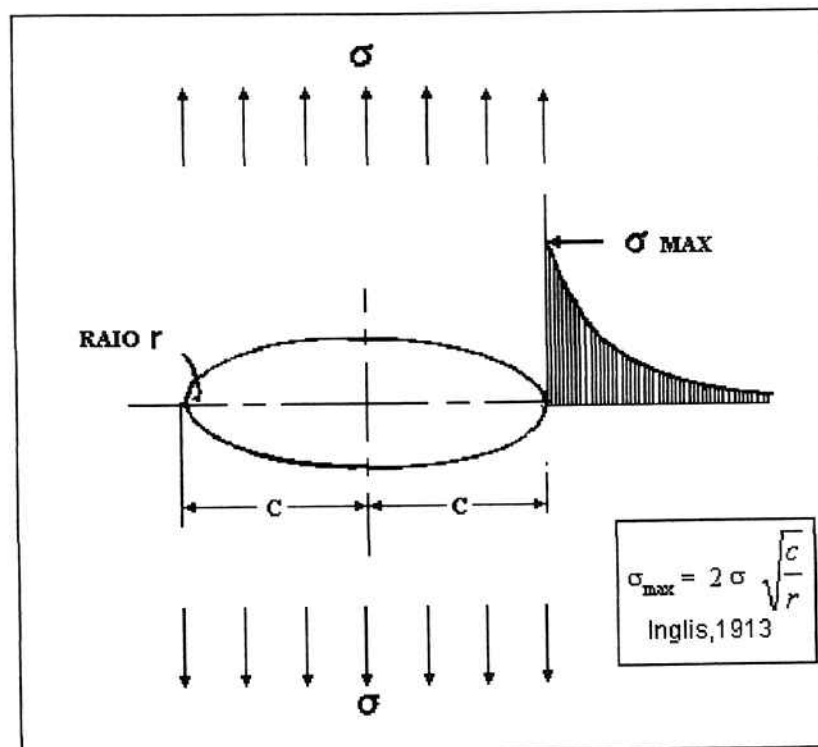


Figura 6 - Elipse alongada para simular uma fenda rochosa sob tensão de tração

em que σ_{tmax} é a tensão de tração máxima na fenda, $2c$ o comprimento da fenda e r o raio da curvatura das extremidades da fenda. Entretanto, dada a impossibilidade de determinar os valores c e r na prática, baseou seus cálculos na energia necessária a propagação de fendas, e obteve a seguinte expressão:

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

Uma das objeções levantadas contra a teoria original de Griffith foi o caráter bidimensional da demonstração, quando o processo de ruptura ocorre no espaço tridimensional.

Bieniawski (1967) estabeleceu conceitos sobre propagação estável e instável de rupturas frágeis. A transição entre esses dois processos na rocha, segundo o autor, é determinada pela liberação da energia crítica durante o fraturamento. Em metais, este conceito introduzido por Irwin(1957) é utilizado para explicar o mecanismo de rupturas frágeis.

O processo de ruptura em compressão uniaxial, pode ser visualizado pela sequência dos eventos notáveis interligados pelas atividades micro-sísmicas correspondentes. A geração de micro-sismos pode estar associada do início ao final do processo. Contudo, algumas manifestações são preponderantes em determinados eventos, como se acham representadas nas figura 7 esquemática, logo abaixo.

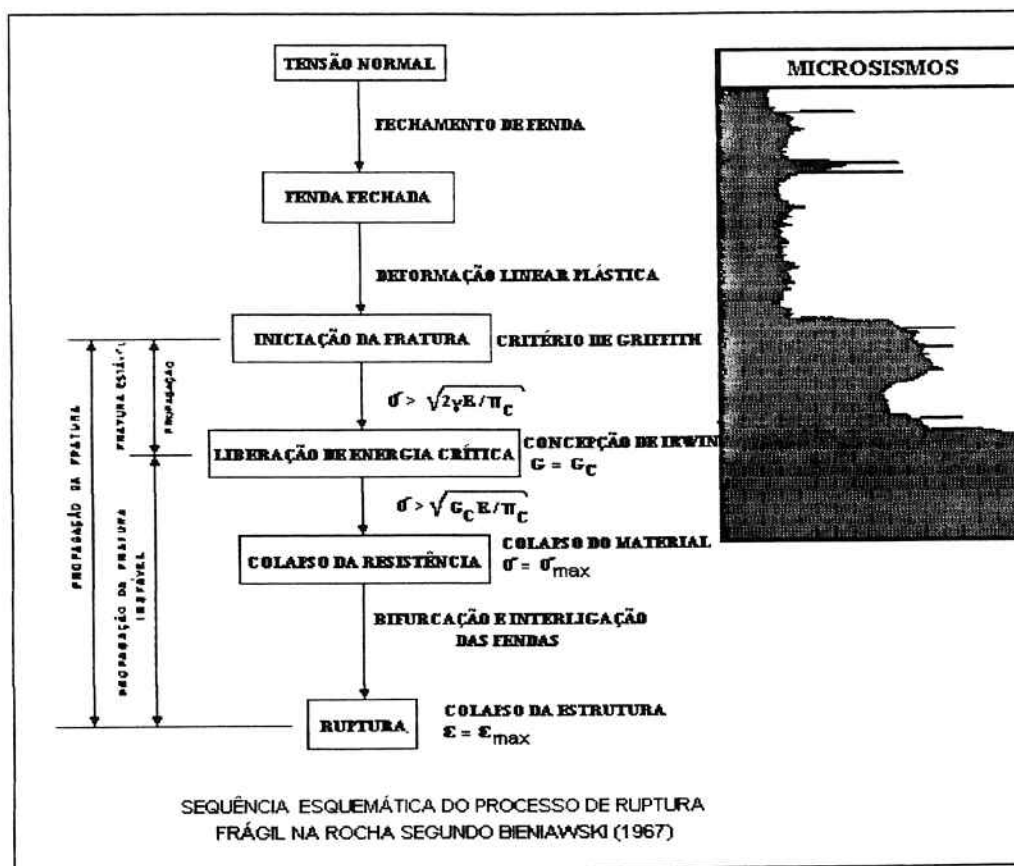


Figura 7 - Correspondência de eventos micro-sísmicos e processo de ruptura de rocha Bieniawski (1967)

Excelente trabalho de análise sobre a energia associada à propagação de fendas de Griffith foi conduzido por Cook (1965). Para uma fenda simples submetida à tração, os resultados foram semelhantes com os obtidos em 1960 por Berry, que considerou nos seus cálculos a energia cinética. Em carregamentos de compressão, Cook obteve expressão coincidente com a do critério de Mohr-Coulomb, para comprimentos críticos da fenda.

5.1 - Cálculo da fenda crítica de Griffith

Utilizando-se da conhecida expressão da conservação da energia por unidade de volume para uma fenda de comprimento $2c$, sob o efeito da **tensão de tração** resultante de uma força de tração externa ao corpo, como apresenta na figura 8, tem-se:

$$\frac{\partial W_t}{\partial c} = \frac{\partial W_d}{\partial c} + \frac{\partial W_f}{\partial c} \quad \text{Teoria de Griffith (1921)} \quad (1)$$

onde:

W_t = energia total fornecida ao sistema
 W_d = energia de deformação elástica
 W_f = energia absorvida pela fenda

definida pela teoria da elasticidade como:

$$W_t = \frac{\sigma \varepsilon}{2} ; \quad W_d = \frac{\sigma^2}{2E} ; \quad W_f = \frac{\pi c^2 \sigma^2 (1 - \nu^2)}{E}$$

Da relação (1) pode ser determinada a deformação específica ε

$$\varepsilon = \frac{\sigma \cdot c^2}{E} \left[1 + \pi (1 - \nu^2) \right] \quad (2)$$

sendo:

σ_t = tensão de tração
 E = módulo de elasticidade
 ν = coeficiente de Poisson
 c = comprimento equivalente das fendas

O início da fraturação e propagação de uma fenda pré-existente, de acordo com Griffith, está condicionado a seguinte relação:

$$\frac{\partial W_f}{\partial c} \geq \frac{\partial W_s}{\partial c} \quad (3)$$

$W_s = 4\gamma c$, energia máxima de superfície capaz de ser armazenada pela fenda.
 γ = energia específica de superfície, constante para uma dada rocha.

Da relação (3) pode ser obtido a dimensão crítica da fenda, expressa por:

$$c_{cr} = \frac{2\gamma E}{\pi(1 - \nu^2)\sigma_t^2} \quad \therefore \quad \sigma_t^2 c_{cr} = \frac{2\gamma E}{\pi(1 - \nu^2)} = k \text{ (constante)} \quad (4)$$

A figura 8 abaixo apresenta, para diversos valores de c , as curvas tensão-deformação expressas pela equação (2) e o lugar geométrico dos valores de $[\sigma, \varepsilon]$ para os quais valem a relação $\sigma_t^2 c_{cr} = k$ da equação acima. Estas curvas parabólicas indicam, desta forma, a condição necessária para o início da propagação de uma fenda perpendicular à força de tração aplicada ao corpo de prova..

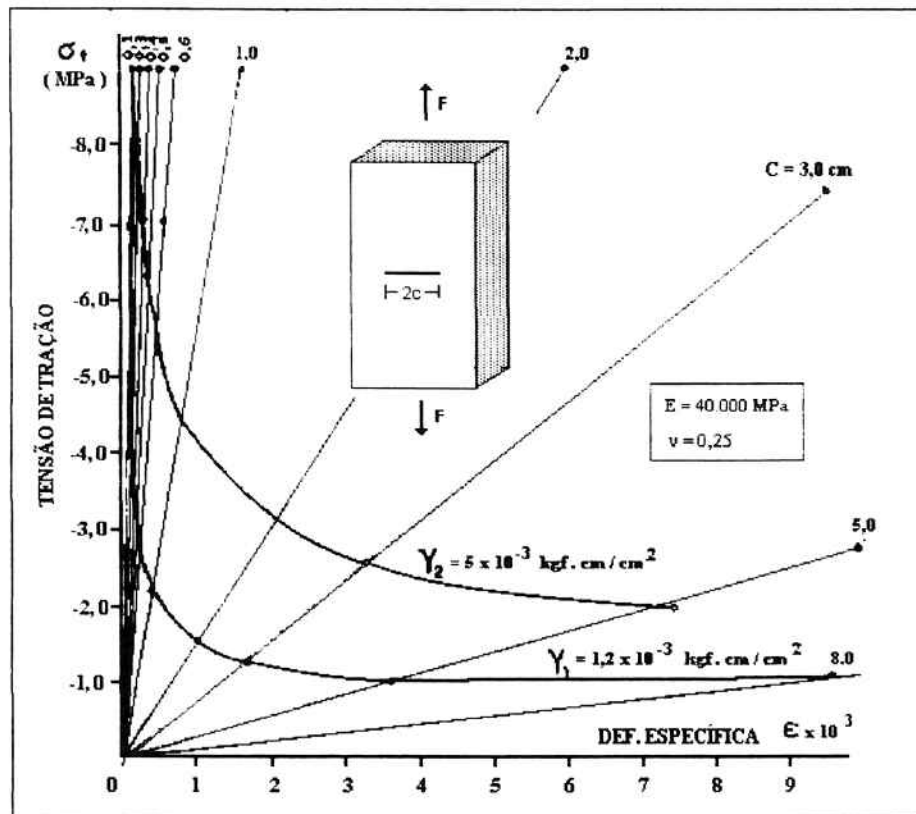
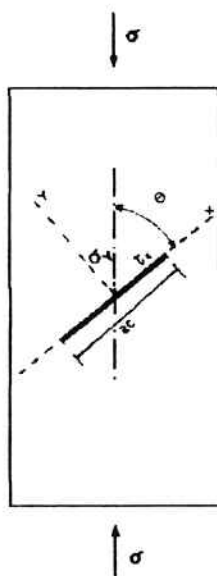


Figura 8 - Lugar geométrico das tensões críticas de tração para diferentes comprimentos $2c$ da fenda

Analogamente, são feitas as mesmas considerações para as **tensões de compressão**, figura 9 abaixo, admitindo que a fenda $2c$ faça um ângulo θ em relação à direção da tensão de compressão.



$$\sigma_y = \sigma \sin^2 \theta$$

$$\tau_x = \sigma \sin \frac{2\theta}{2}$$

O equilíbrio energético permite escrever:

$$\partial W_t = \partial W_d + \partial W_f + \partial W_a / 2$$

$$W_f = \frac{\pi(1-\nu^2)(\tau_x^2 - \mu^2 \sigma_y^2)c^2}{2E}$$

$$W_a = \frac{\pi(1-\nu^2)(\tau_x - \mu \sigma_y)\mu \sigma_y c^2}{E} \text{ (trabalho contra atrito)}$$

onde: ν = coeficiente de Poisson

μ = coeficiente de atrito entre as bordas da fenda.

Figura 9 - Tensão de compressão

Mantido o valor de θ , da expressão (5) pode ser obtida a deformação específica ε em função da tensão de compressão σ , para cada comprimento da fenda $2c$:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{2E} \left[1 + \frac{\pi}{4} (1 - \nu^2) \sin^2 2\theta (1 + \mu \tan \theta - 2\mu^2 \tan^2 \theta) c^2 \right] \quad (6)$$

que dá uma relação linear de tensão x deformação até o instante em que se inicia a propagação da fenda, obedecendo a seguinte relação:

$$\frac{\partial W_e}{\partial c} \geq \frac{\partial W_s}{\partial c} \quad \text{onde:} \quad (7)$$

$$W_e = \frac{\pi}{2E} (1 - \nu^2) (\tau_x - \mu \sigma_y)^2 c^2 \quad (\text{energia de deformação de fechamento da fenda})$$

$$W_s = 4\gamma c \quad (\text{energia de superfície máxima na fenda } 2c)$$

da equação (7), para a condição de igualdade e substituindo as expressões, vem:

$$\tau_x - \mu \sigma_y = \sqrt{\frac{4\gamma E}{(1 - \nu^2)c}} \quad (8)$$

para um comprimento c e valor de θ definido,

$$\tau_x - \mu \sigma_y = k \text{ (coesão)} \quad (\text{Critério de ruptura de Navier-Coulomb})$$

Nota-se que a coesão, de acordo com a equação (8), poderá ser calculada através das constantes elásticas da rocha e para cada valor c . Orientação mais desfavorável da fenda para início da propagação da fenda, para as várias relações σ_3/σ_1 , foi calculada por Griffith e mostrada na figura 10.

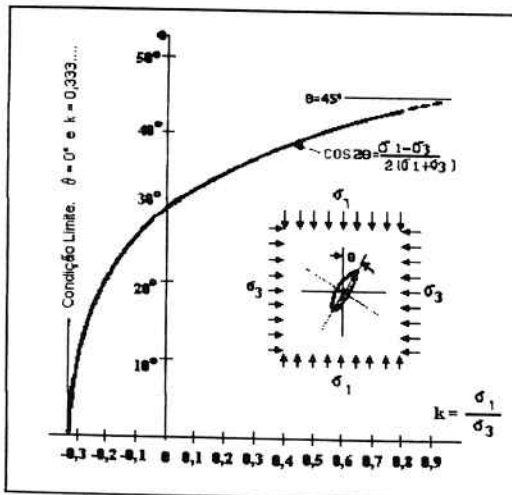


Fig. 10 - Orientação crítica das fendas

Para compressão uniaxial: $\theta = 30^\circ$
Orientação da fenda em que a diferença $\tau_x - \sigma_y$ atinge o valor máximo e satisfazendo o critério de ruptura de Navier-Coulomb, pode ser calculada diferenciando a equação (8) em θ° :

$$\begin{aligned} \text{como: } \mu &= \tan \varphi \\ \tan 2\theta &= \tan (90^\circ - \varphi) \\ \theta &= 45 - \varphi/2 \quad (\text{Mohr-Coulomb}) \end{aligned}$$

A representação gráfica, figura 11, das expressões (6) e (8), ilustra as relações lineares de tensão-deformação, em função do comprimento c , até o início da propagação da fenda, e o lugar geométrico das condições $(\tau_x - \mu \sigma_y)^2 = k \text{ (const.)}$.

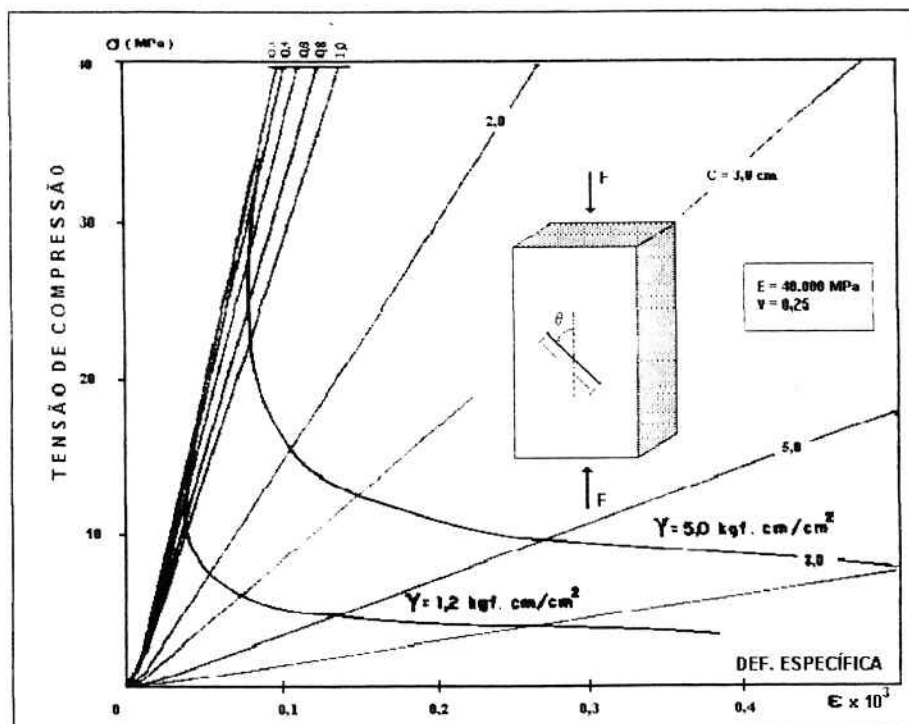


Figura 11 - Lugar geométrico dos níveis críticos de tensão de compressão para diferentes comprimentos C da fenda

As equações (2), (4), (6) e (8) são limitadas para fins práticos, pois elas foram definidas para materiais homogêneos elásticos contendo uma fenda simples. Contudo, para rochas duras com pequena quantidade de fendas, esta análise simplificada, de acordo com Cook (1965), fornece resultados quantitativos coerentes com a experiência; e boa avaliação qualitativa para materiais heterogêneos com maior número de fendas.

5.2- Energia associada a propagação da fenda

O fundamento da teoria se baseia no fato de que a energia potencial externa fornecida ao sistema rochoso é convertida, durante o processo de fraturamento de rocha, em energia de superfície acumulada na fenda e em parte dissipada por atrito. A variação da energia associada a propagação de fendas de Griffith, em ensaios de tração e compressão, acha-se representada nas figuras abaixo, e algumas particularidades desta representação justificam uma análise mais detalhada.

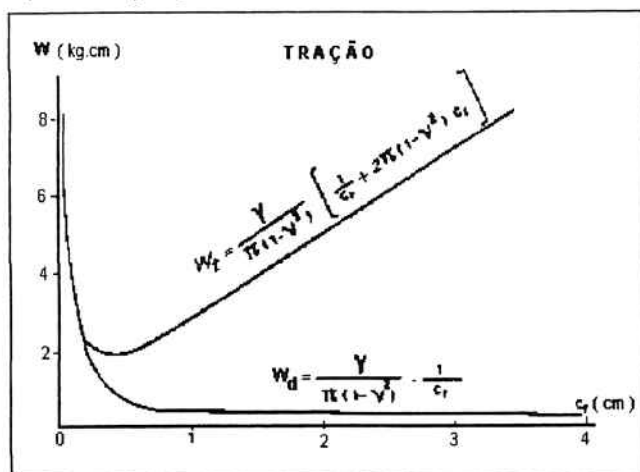


Figura 12 - Energia necessária por unidade de volume p/ início da propagação da fenda

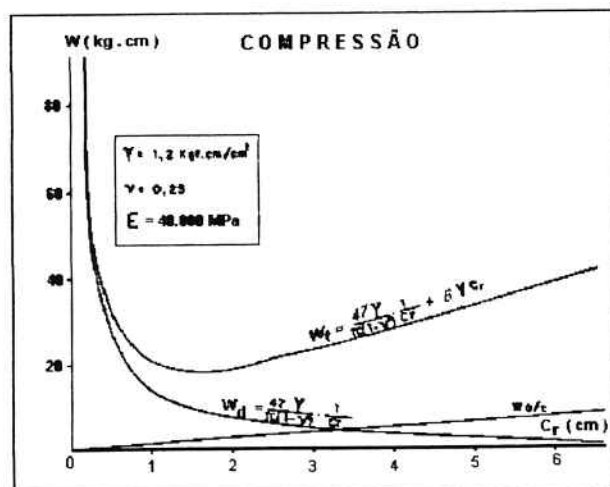


Figura 13 - Energia necessária por unidade de volume p/ início da propagação da fenda

As curvas expressas por W_t , especificam a energia necessária para uma fenda de comprimento c_{cr} possa se propagar. Essa quantidade para fendas pequenas, da ordem de 10^{-2} cm, praticamente coincidem com a energia de deformação total absorvida pelo sistema e decrescem com aumento de c_{cr} até atingir o valor mínimo.

A energia elástica W_d , por sua vez, decresce assintoticamente tendendo a zero. Os valores mínimos de W_t , em tração e compressão, dependem dos comprimentos de c_{cr} e são determinados por:

$$\frac{\partial W_d}{\partial C} = 0, \quad \text{isto é:}$$

$$c_{rt} = \sqrt{\frac{1}{2\pi(1-\nu^2)}} \quad (\text{tração}) \quad c_{rc} = \sqrt{\frac{15}{2\pi(1-\nu^2)}} \quad (\text{compressão})$$

Como se pode notar, a energia mínima, W_{tmin} depende unicamente do coeficiente de Poisson da rocha e, reciprocamente, para rocha de mesmo Poisson a W_{tmin} , estará, teoricamente, associada a um mesmo comprimento de fenda.

Respeitando as constantes elásticas adotadas anteriormente, o semi-comprimento da fenda crítica pode ser obtida, respectivamente para tensões de tração e de compressão

$$c_{rt} = 0,41 \text{ cm} \quad \text{e} \quad c_{rc} = 1,60 \text{ cm}$$

Nota-se que a fenda crítica é aproximadamente quatro vezes menor para ruptura sob tensões de tração. A partir destes, a energia W_t sofre sensíveis acréscimos proporcionais aos valores de C_r . Na análise teórica realizada por Craggs (1960), levando em conta as tensões dinâmicas geradas pela propagação, concluiu que a força necessária para manter a propagação decrescia até se tornar nula, substituída gradativamente pela energia cinética.

No início da propagação, até a velocidade atingir um valor sensível no fenômeno, Bieniawski admite a possibilidade de haver equilíbrio entre a energia de deformação elástica e a superficial. E, na medida com que a energia cinética participe, o fenômeno da ruptura deixa de ser unicamente dependente do valor da tensão e se estabelece a propagação instável na rocha até a ruptura franca.

A análise energética possibilita a identificação das seguintes fases:

- $\frac{\partial W_t}{\partial \alpha_r} < 0$ (condição onde é possível a propagação estável)
- $\frac{\partial W_t}{\partial \alpha_r} = 0$ (comprimento de C_r máximo admissível nas condições de Griffith)
- $\frac{\partial W_t}{\partial \alpha_r} > 0$ (propagação instável envolvendo energia cinética)

5.3- Tensões de Cisalhamento

Partindo da representação tensorial do círculo de Mohr, Griffith obteve a equação da curva intrínseca indicativa das condições de início da ruptura.

$$\tau^2 = 4\sigma_t(\sigma_t - \sigma) \quad (9)$$

τ = tensão de cisalhamento
 σ = tensão normal

σ_t = resistência à tração uniaxial da amostra.

A equação da curva intrínseca é uma parábola, simétrica em relação ao eixo das tensões normais com as seguintes características:

- a) Se $\sigma = 0$ $\tau = 2\sigma_t$ onde $2\sigma_t$ é a tensão mobilizável de corte ou coesão
- b) De acordo com a equação (4)
$$\sigma_t = \sqrt{\frac{2\gamma E}{(1-\nu^2)c_{cr}}}$$

Verifica-se que nesta expressão, dentro dos limites da validade da teoria de Griffith, a resistência à tração é inversamente proporcional a raiz quadrada dos comprimentos das fendas críticas. A substituição desta expressão na equação (9) resultará numa família de parábolas em função do comprimento c_{cr} das fendas críticas.

McClintock e Walsh introduziram a noção de atrito levando em conta o efeito do fechamento das fendas a que elas são submetidas antes de verificarem as rupturas.

Os autores consideram a tensão σ_n , reação nas bordas, uma contra a outra, admitindo que esta tensão seja função da tensão aplicada e σ_{cr} (tensão crítica), suficiente para que as bordas da fenda se encostem.

$\sigma_n = f(\sigma, \sigma_{cr})$ expressa por $\sigma_n = \sigma - \sigma_{cr}$ é definida da seguinte maneira:

$$\sigma_n = 0 \text{ para } \sigma \leq \sigma_{cr}$$

$$\sigma_n = \sigma - \sigma_{cr} \text{ para } \sigma > \sigma_{cr}$$

Este refinamento à teoria de Griffith conduziu a seguinte equação:

$$\tau = \mu(\sigma - \sigma_{cr}) + 2\sigma_t \sqrt{1 - \frac{\sigma_{cr}}{\sigma_t}} \quad (10)$$

Esta expressão intrínseca estudada por McClintock e Walsh apresenta as seguintes peculiaridades:

a) para $\sigma_{cr} = 0$, como é usualmente admitida,

$$\tau = \mu\sigma + 2\sigma_t \text{ (Mohr - Coulomb)}$$

As envoltórias intrínsecas são retas paralelas entre si e diferenciadas uma as outras pelos valores de σ_t .

b) para $\sigma_{cr} = \sigma$, a equação simplifica em

$$\tau^2 = 4\sigma_t (\sigma_t - \sigma) \quad (\text{Envoltória de Griffith})$$

c) para $\sigma < \sigma_{cr}$, resulta $\mu(\sigma - \sigma_{cr}) = 0$

A tensão de cisalhamento, nestas condições, independe do atrito entre as bordas da fenda e a teoria original de Griffith fica mantida.

d) para $\sigma_t = 0$, σ_{cr} será necessariamente igual a zero, e teremos definidas as fendas abertas, juntas, etc., e a tensão de cisalhamento passa a ser expressa por: $\tau = \mu\sigma$

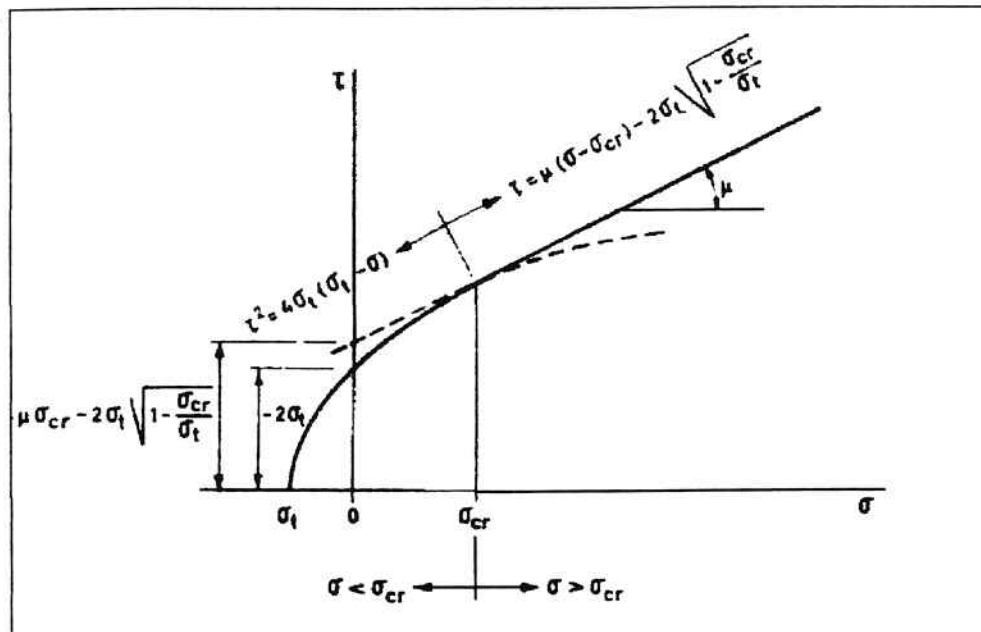


Figura 14 - Envoltórias Intrínsecas de Griffith

6 - CONCLUSÕES

Estes estudos embora necessitem de maior comprovação prática através de maior números de testes laboratoriais em rochas heterogêneas, não há dúvida de que a ruptura em rochas, homogêneas e em algumas heterogêneas (rochas xistosas), resulta do mecanismo que envolve a propagação de fendas pré-existent e, geralmente, de acordo com as previsões teóricas de Griffith.

Tentativas de aplicação do método de elementos finitos ao mecanismo de ruptura tem sido realizadas por Weber (1971), e as soluções numéricas apresentam uma boa correlação com os valores experimentais.

Como a geração de micro-sismos é um processo associado à deformação e ruptura de ligamentos cristalinos, etc.; permitirá, sob a luz da teoria de Griffith, determinar as características estruturais internas da rocha responsáveis pela emissão dos pulsos micro-sísmicos, principalmente relacionados aos eventos notáveis de Bieniawski.

A identificação das diversas fases de fraturamento até a ruptura da rocha e conseqüente "quantificação" das condições mecânicas a que se acham submetidas tornará menos vaga a noção clássica de resistência de uma rocha. As peculiaridades observadas, aliadas às potencialidades do método, justificam uma investigação sistemática para confirmar a aplicabilidade prática das análises teóricas e das sugestões aqui realizadas.

BIBLIOGRAFIA

- Bieniawski, Z.T. (1967). "Stability Concept of Brittle Fracture Propagation in Rock". Engineering Geology, vol. 2, pag. 149-162.
- Bieniawski, Z.T., Denkaus, H.G. and Vogler, U.W. (1969). "Failure of Fractured Rocks". Int. Journal Rock Mech. Min. Sci. vol.6, N 3.
- Blake, W., Leighton, F. (1970). "Recent Developments and Applications of the microseismic Method in Deep Mines", Proc. 11th Symposium on Rock Mechanics.

- Brady, B.T., (1973) "Seismic Precursors Prior Rock Failures in Mines". U.S. Department of Interior, Bureau of Mines, Denver, Colorado.
- Brown, J.W., (1965). An investigation of microseismic activity in rock under tension. M.S. Thesis, Mining Department the Pennsylvania State University.
- Brown, J. W and Singh, M.M. (1966) - An investigation of microseismic activity in rock under tension, Trans. Soc. Mining Eng., 233, pp.255-265.
- Brown, E.T. ; Hudson, J. A . (1971). "The influence of micro-structure on rock fracture on the laboratory scale ". Symposium of the I.S.R.M., Nancy.
- Cook, N.G.W., (1965). "The failure of Rock". Int. Journal of Rock Mechanics Min. Sciences, vol. 2 pag. 389-403.
- Chugh, Y.P. , Hardy, H.R.Jr., (1967). "Microseismic Activity in Rock Under Uniaxial Tension", Trans. Am. Geophysics. - vol. 48.
- Duvall, W.I., Stephenson, D.E.(1965), "Seismic Energy Available from Rockbursts and Underground Explosion". Am. Inst. of Min., Metallurgical and Petroleum Engineers, Transactions, vol. 232., p 235-240.
- Farjallat (1975). "Algumas implicações tecnológicas de medidas de permeabilidade ao ar. Amostras confinadas e não confinadas.". Seminário Nacional de Grandes Barragens - Curitiba.
- Friedel, J.M.; Thill, E.R. (1990), Stress determination in rock using the Kaiser effect. Report of Investigation - RI 9286, United States Department of the Interior, Bureau of Mines, p.19
- Gama, C.D. (1971). - Studying rock fractures by wave attenuation methods. Symposium of the Int. Soc. of Rock Mech., Nancy.
- Hamstad, M. A .(1986) - A review: Acoustic emission, a tool for composite materials studies. Experimental Mechanics., 26(1), 7-13.
- Hardy, R.J. (1971). "Microseismic Techniques - Basic and Applied Research". 20th Geomechanics Colloquy Salzburg, Austria.
- Hardy, H.R. (1971). "Recent Application of Microseismic activity to Experimental Rock Mechanics". Symposium - Soc. Int. Rock Mechanics - Nancy.
- Hardy, H.R. (1971) "Monitoring Crack Closure in Geological Materials Using Ultra-sonics Techniques". Symposium of the Int. Soc. Of Rock Mech.. Nancy.
- Irwin, G.R. (1957) - Analyses of stress and strains near the end of a crack traversing a plate, J. Appl. Mech. 24, 361-364.
- Mello-Mendes, F., (1971). About the Anisotropy of Uniaxial Compressive Strength in Schistose Rocks, Symposium of the I.S.R.M., Nancy.
- Obert, L., Duvall, W.I., (1967). Rock Mechanics and the Design of Structures in Rock. John Wiley & Sons, Inc. - New York, pag. 449-452.
- Ouyang, C.; Landis, E.; Shah, P. S. (1991), Damage assessment in concrete using quantitative acoustic emission - Journal of Engineering Mechanics, vol. 117,nº 11, November.

- Perami, R. (1971). "comportement Mecanique sous Charge Uniaxiale de Roches déjà Micro-fissurée Thermiquement", Symposium of the I.S.R.M., Nancy.
- Scholtz, C.H., (1967). "Frequency-Magnitude Relation of Micro-fracturing Event During the Triaxial Compression of Rock", Trans. Am. Geophy. vol. 48
- Werber, P. (1971). "La Méthode des Éléments Finis, appliquée à la Mécanique de la Fracture. Symposium of the I.S.R.M., Nancy

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 - Aluste 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 Maços Rochosos através de Envolvimentos de Resistência por Tratamento Estatístico utilizando Dados de Laboratório do IPT Simulando Condições Geotécnicas do Maço - 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 Cominuição 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) - WALDEMAR AVRITSCHER, 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

