

## PARTE IV

### ESTABILIZAÇÃO DE ESCAVAÇÕES SUBTERRÂNEAS

#### RESUMO

São realçados os conceitos geomecânicos mais importantes no processo de manutenção da estabilidade de cavidades subterrâneas, do tipo túnel ou do tipo de escavações para a lavra de minérios.

O comportamento dos maciços rochosos e a influência das descontinuidades geológicas são abordados em conjunção com as técnicas de dimensionamento do vão seguro e de outras estruturas subterrâneas, como os pilares de rocha.

Dada a sua crescente importância, são descritos vários métodos de observação e instrumentação para acompanhamento das condições de estabilidade, assim como para controle de segurança das escavações ao longo do tempo.

Finalmente, são fornecidas regras práticas para o dimensionamento de diferentes tipos de suportes, mencionando-se o uso dos suportes em função do tipo de rocha, da forma e dimensões da escavação e das circunstâncias geológicas e hidrológicas locais.

#### INTRODUÇÃO

A construção de cavidades subterrâneas tem evoluído através dos seus métodos de escavação e dos seus processos de suporte, com o auxílio da Mecânica de Rochas moderna.

Até muito recentemente executavam-se escavações com base apenas em métodos empíricos, onde as soluções técnicas eram implantadas por tentativas, devido à falta de conhecimentos científicos acerca dos comportamentos das rochas em profundidade, dos estados de tensão criados em torno das cavidades, da atuação dos sistemas de suporte, etc.

Grandes progressos tem sido realizados neste domínio, embora continuem a existir dúvidas sobre as propriedades mecânicas dos maciços rochosos e sua determinação "in situ", assim como os efeitos reais provocados pelos vários processos de estabilização neles instalados.

Contudo, pode-se dizer que hoje na generalidade dos casos a concepção, o projeto e a construção de escavações subterrâneas (sejam para mineração, ou para transporte, ou até para armazenamento) pode ser conduzida de maneira eficiente, garantindo a segurança de pessoas e equipamentos que nelas trabalhem, ao mesmo tempo que alcançam custos relativamente baixos, podendo assegurar a recuperação econômica dos minérios a extrair do subsolo. Presentemente quase não existem dificuldades construtivas insuperáveis do ponto de vista técnico na escavação de cavidades subterrâneas embora no aspecto econômico possam ainda subsistir alguns problemas. Em especial depois da II Guerra Mundial, quando foram estabelecidas as bases da Mecânica de Rochas, ficaram padronizados vários testes para a determinação das propriedades das rochas e dos maciços rochosos, e o esforço que vem sendo desenvolvido na medição das tensões e deformações no interior dos maciços, permitem avaliar cada vez melhor os seus reais comportamentos mecânicos, antes e depois da escavação de cavidades. Por outro lado, a análise teórica e os métodos fotoclasticos (no princípio) e os modelos computacionais (posteriormente) possibilitaram a determinação das distribuições de tensões e de deformações em torno de cavidades subterrâneas simples ou múltiplas, com diversas formas geométricas e incorporando os seus sistemas de suporte. Confrontando tais tensões com as resistências apresentadas pelas rochas (conforme os casos, as resistências antes ou após a rotura) é possível estabelecer critérios de projeto, atendendo simultaneamente a considerações de segurança e de estabilidade, com as respectivas incidências econômicas. A procura dos compromissos mais equilibrados entre esses dois tipos de considerações constitui geralmente o procedimento mais utilizados na concepção dessas obras. Na prática, porém, a maior parte das vezes são desconhecidos os verdadeiros parâmetros dos maciços rochosos, especialmente no que se refere à sua compartimentação por meio de descontinuidades geológicas de vários tipos e assim os métodos teóricos são incompletos, pois se baseiam em resultados obtidos sobre parâmetros arbitrados. Outras vezes esses parâmetros só se conhecem depois da escavação ser realizada, segundo um processo (conhecido por "as built design") que origina soluções técnicas apressadas, improvisadas e quase sempre com suportes superdimensionados, e conseqüentemente mais caras, em comparação com as soluções emergentes de projetos fundamentados em informações levantadas previamente "in situ" <sup>(1)</sup>.

O importante papel que desempenha a experiência também não pode ser esquecido, visto que a extrapolação dos conhecimentos obtidos em escavações semelhantes é de grande valia para os projetos, desde que essa extrapolação seja feita com o esforço de conceitos teóricos adequados. Por estas razões, concluiremos que a estabilização de escavações subterrâneas é um domínio em que se combinam informações experimentais com desenvolvimentos teóricos, de maneira a alcançarem-se melhores decisões, do que se poderiam esperar pelo uso exclusivo da intuição do empirismo.

## II. — PRINCIPAIS PROBLEMAS

### II.1. — Generalidades

A escavação de cavidades subterrâneas (sejam elas túneis, poços, galerias, cavernas, etc.) origina sempre problemas mais ou menos complexos de estabilização, que poderemos enumerar na seguinte ordem:

- a) Quedas de blocos de rocha.
- b) Limpeza e saneamento das zonas fraturadas em torno das escavações.
- c) Previsão das forças que atuam sobre os suportes e dimensionamento destes em conformidade.
- d) Influência da água subterrânea.
- e) Subsidiências, golpes de terreno e outras conseqüências das escavações.

Estes problemas podem ter enorme repercussão na segurança das cavidades, refletindo negativamente nos respectivos custos de escavação e de estabilização. Por estas razões, passaremos em revista esses tópicos, enfocando principalmente os seus aspectos práticos.

Para melhor entendimento desses conceitos será conveniente relembrar noções simples da Teoria da Elasticidade, que são aplicáveis à previsão dos estados de tensão e de deformação em torno de cavidades.

O caso mais elementar se refere ao problema de uma escavação circular de eixo horizontal, aberta a determinada profundidade  $h$ . Geralmente o estado de tensão que se verificava antes da escavação, pode ser caracterizado por duas componentes  $\sigma_v$  (vertical) e  $\sigma_h$  (horizontal) que desprezando ações tectônicas podem-se calcular, atendendo apenas ao peso dos terrenos, pelas expressões:

$$\sigma_v = \gamma h$$

$$\sigma_h = \frac{\nu}{1 - \nu} \gamma h$$

onde  $\gamma$  representa o peso específico médio dos terrenos e  $\nu$  o respectivo coeficiente de Poisson.

Depois de aberta a escavação, aquele estado de tensão é perturbado, passando a ser definido pelas seguintes componentes (em coordenadas polares) — ver Fig. 1.

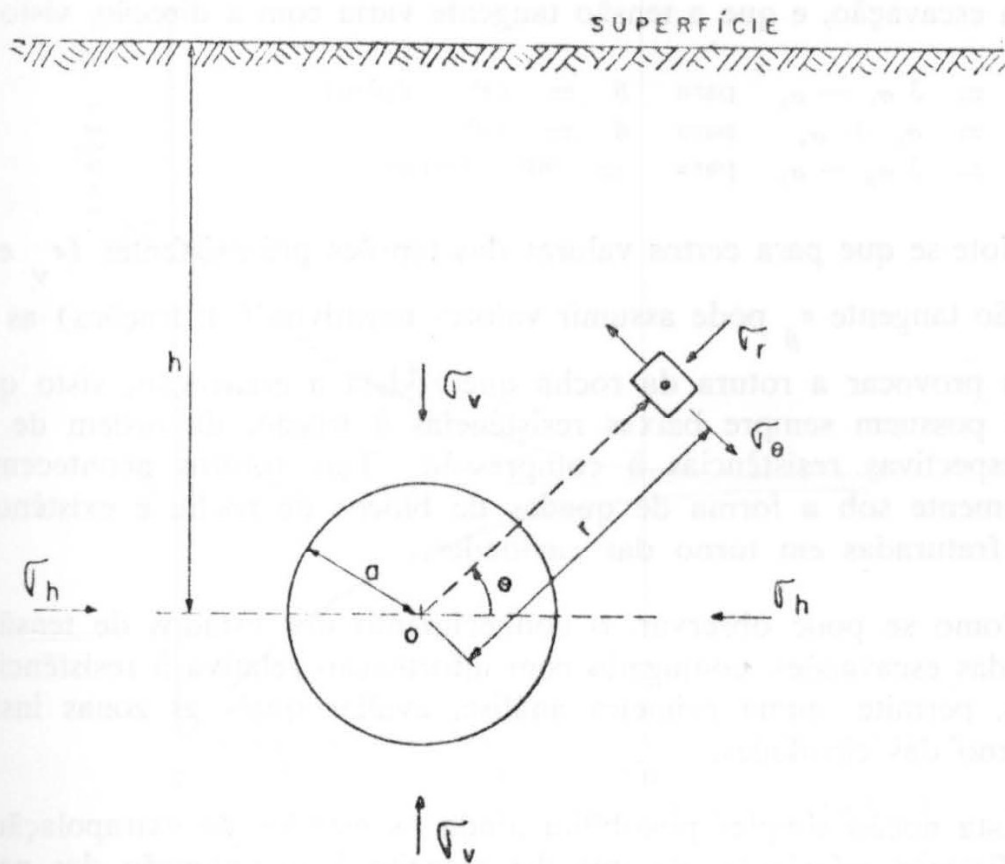


Fig. 1

$$\sigma_r = \frac{\sigma_h + \sigma_v}{2} \left(1 - \frac{a^2}{r^2}\right) + \frac{\sigma_h - \sigma_v}{2} \left(1 - \frac{4a^2}{r^2} + \frac{3a^4}{r^4}\right) \cos 2\theta$$

$$\sigma_\theta = \frac{\sigma_h + \sigma_v}{2} \left(1 + \frac{a^2}{r^2}\right) - \frac{\sigma_h - \sigma_v}{2} \left(1 + \frac{3a^4}{r^4}\right) \cos 2\theta$$

$$\delta r \theta = \frac{\sigma_v - \sigma_h}{2} \left(1 + \frac{2a^2}{r^2} - \frac{3a^4}{r^4}\right) \sin 2\theta$$

Nestas relações,  $a$  representa o raio da escavação (túnel ou galeria),  $r$  a distância radial no ponto onde se calcula o estado de tensão e  $\theta$  o ângulo medido a partir da horizontal no sentido anti-horário.

Nas paredes da cavidade obtém-se o seguinte estado de tensão (fazendo evidentemente  $r = a$ ):

$$\begin{aligned} \sigma_r &= 0 \\ \sigma_\theta &= \sigma_h + \sigma_v - 2(\sigma_h - \sigma_v) \cos 2\theta \end{aligned}$$

significando que não se transmitem tensões na direção radial para o inte-



rior da escavação, e que a tensão tangente varia com a direção, visto que:

$$\begin{aligned}\sigma_{\theta} &= 3 \sigma_v - \sigma_h & \text{para } \theta &= 0^{\circ} & (\text{piso}) \\ \sigma_{\theta} &= \sigma_h + \sigma_v & \text{para } \theta &= 45^{\circ} \\ \sigma_{\theta} &= 3 \sigma_h - \sigma_v & \text{para } \theta &= 90^{\circ} & (\text{teto})\end{aligned}$$

Note-se que para certos valores das tensões pré-existentes ( $\sigma_v$  e  $\sigma_h$ ), a tensão tangente  $\sigma_{\theta}$  pode assumir valores negativos (ou trações) as quais podem provocar a rotura da rocha que rodeia a escavação, visto que as rochas possuem sempre baixas resistências à tração, da ordem de 10% das respectivas resistências à compressão. Tais roturas acontecem frequentemente sob a forma de quedas de blocos de rocha e existência de zonas fraturadas em torno das cavidades.

Como se pode observar, o conhecimento dos estados de tensão em torno das escavações, conjugado com informação relativa à resistência das rochas, permite, numa primeira análise, avaliar quais as zonas instáveis em torno das cavidades.

Esta noção simples possibilita ainda os estudos de extrapolação que atrás fizemos referência, no que diz respeito à manutenção das necessidades de segurança nas escavações, ao longo do tempo.

Como caso particular interessante, citamos a situação em que o túnel é aberto num campo de tensões hidrostático (onde  $\sigma_v = \sigma_h = S$ ), circunstância que ocorre às grandes profundidades, ou em maciços rochosos muito deformáveis, possuindo altos coeficientes de Poisson (próximos de 0,5). Tem-se então:

$$\begin{aligned}\sigma_r &= S \left( 1 - \frac{a^2}{r^2} \right) \\ \sigma_{\theta} &= S \left( 1 + \frac{a^2}{r^2} \right)\end{aligned}$$

e na periferia da escavação:

$$\begin{aligned}\sigma_r &= 0 \\ \sigma_{\theta} &= 2S\end{aligned}$$

A respectiva variação destas tensões com a distância encontra-se representada na Fig. 2.

Note-se então que a uma distância de cerca de dois diâmetros além da parede da escavação circular, o estado de tensão tende para os valores

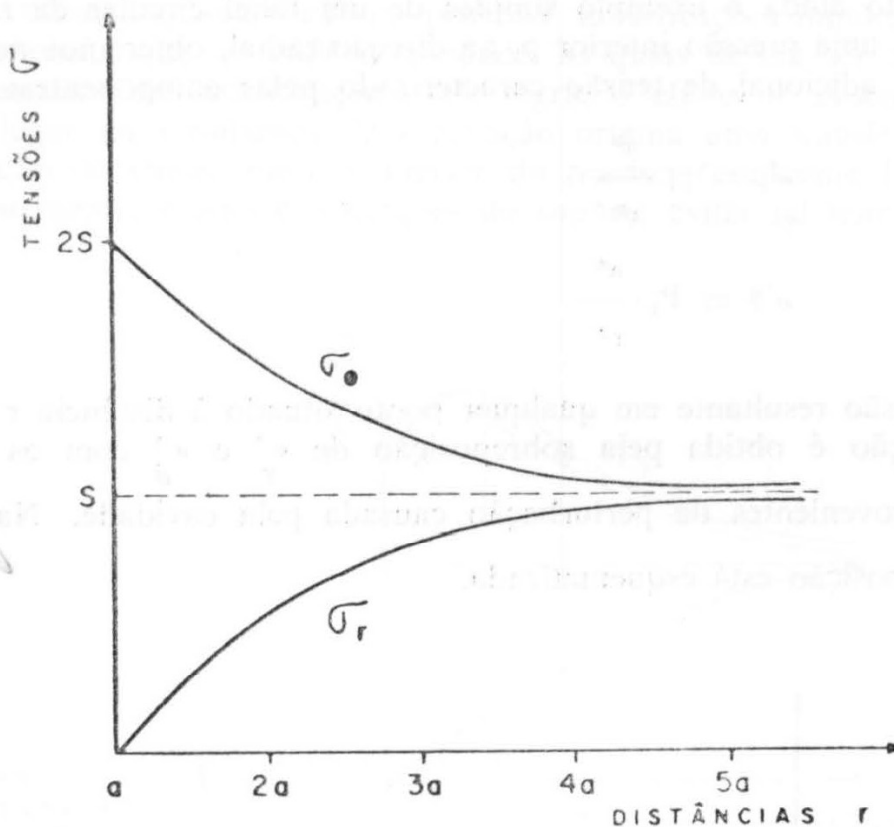


Fig. 2

pré-existentes, significando que a perturbação introduzida pela cavidade se anula a partir de uma certa distância dela.

A essa região perturbada de tensões em torno da escavação é habitual chamar-se **zona de influência**, sendo que a sua forma e dimensões dependem da geometria das cavidades, das tensões pré-existentes e das propriedades do maciço rochoso.

Em textos de Mecânica de Rochas (3, 4, 5) poderão ser encontradas expressões que estabelecem a forma dessas zonas de influência para diversos tipos de cavidades, simples ou múltiplas.

Uma das normas mais elementares de projeto de escavações subterrâneas consiste em não abrir, na vizinhança delas, outras cavidades cujas zonas de influência se intersectem com as primitivas.

## II.2. — Efeito do suporte

Não foi ainda feita referência à possibilidade de se instalarem no interior das escavações elementos de suporte que contrariem as ações de instabilização.

Usando ainda o exemplo simples de um túnel circular de raio  $a$  se aplicarmos uma pressão interior  $p_i$  na direção radial, obteremos no maciço um estado adicional de tensão caracterizado pelas componentes:

$$\sigma'_r = P_i \frac{a^2}{r^2}$$

$$\sigma'_\theta = P_i \frac{a^2}{r^2}$$

A tensão resultante em qualquer ponto situado à distância  $r$  do eixo da escavação é obtida pela sobreposição de  $\sigma'_r$  e  $\sigma'_\theta$  com as tensões  $\sigma_r$  e  $\sigma_\theta$  provenientes da perturbação causada pela cavidade. Na Fig. 3 essa sobreposição está esquematizada.

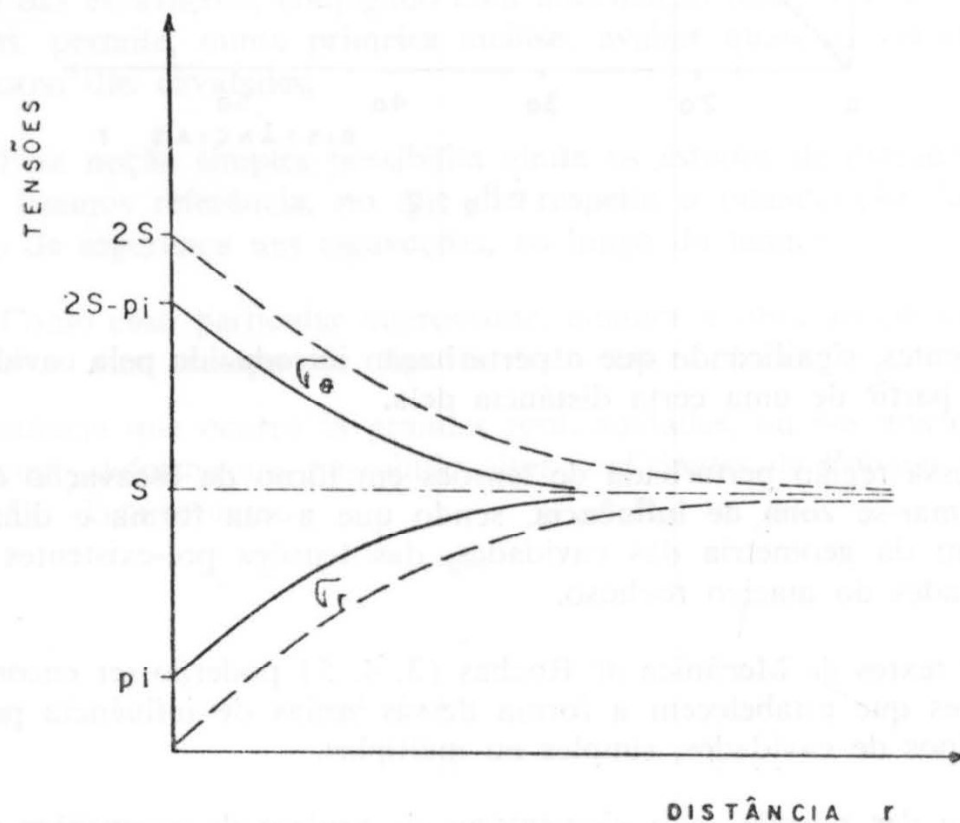


Fig. 3

É óbvio que um dos efeitos do suporte consiste na diminuição da zona de influência da escavação, ou por outras palavras, na redução do volume de rocha rodeando a cavidade em situação de poder provocar instabilidade ou até o colapso da mesma.

Esta última, quando existe, provoca modificações importantes no estado de tensão que circunda a cavidade, as quais devem ser consideradas nos estudos de estabilização. Em regra, o efeito de decompressão que tem lugar na vizinhança da escavação origina uma transferência de concentração de tensão para o interior do maciço (conforme Fig. 4) e, conseqüentemente, é uma das funções do suporte evitar tal fenômeno.

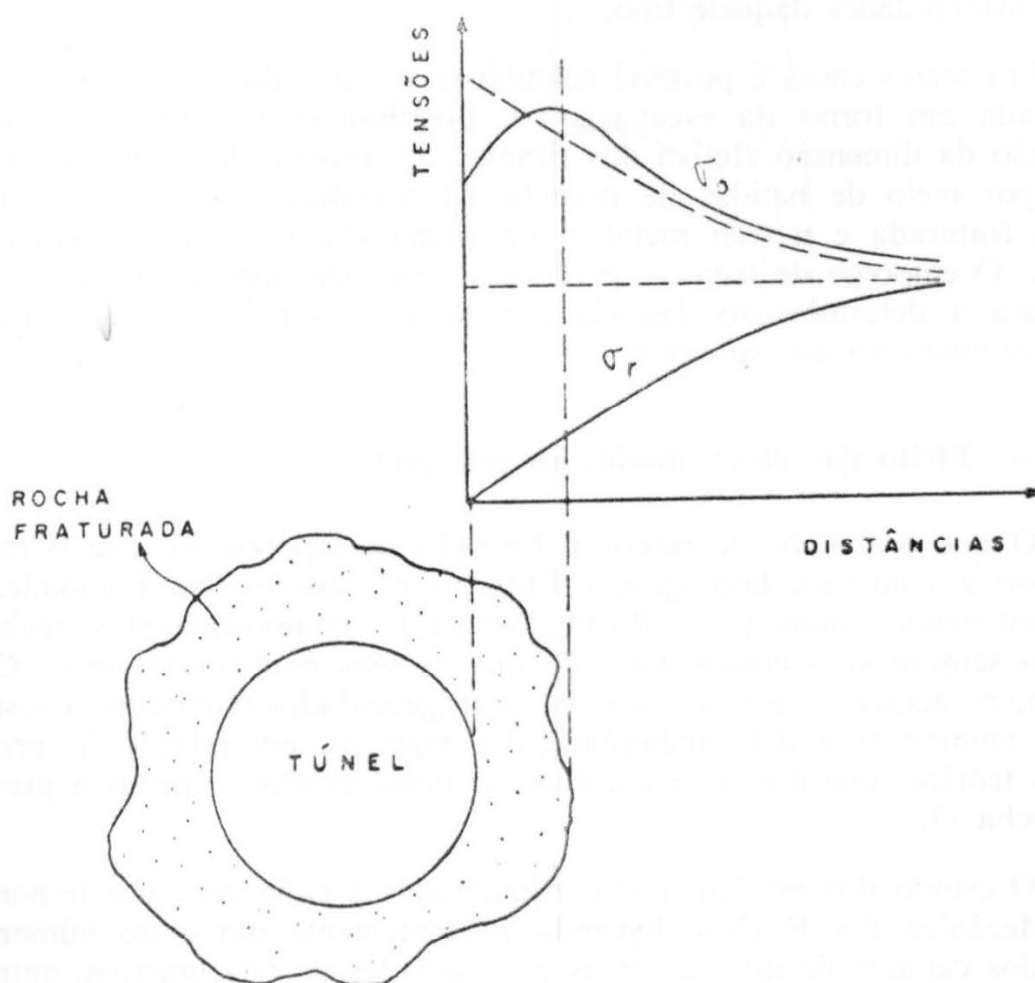


Fig. 4

A referida transferência da concentração de tensões apresenta a vantagem de afastar a possibilidade de roturas bruscas das paredes ou do teto da escavação (golpes de terreno, ou "rock-bursts") porém aumenta a probabilidade de quedas de blocos.

Um processo muito habitual de minimizar tais inconvenientes consiste em aplicar suportes resistentes, ou do tipo tirante e chumbador (com e sem ancoragem, respectivamente) os quais sustentam os blocos situados na zona desconfinada, em condições favoráveis à sua queda.



Evidentemente, os tirantes deverão ser ancorados sobre a rocha sã de tal forma que o respectivo comprimento deve exceder de 30 a 50% a espessura de rocha fraturada.

Para solidarizar os vários tirantes são instaladas redes metálicas pregadas ao teto e às paredes das escavações, de forma a revestirem continuamente certas zonas da periferia da escavação que mostrem tendência para instabilidades daquele tipo.

Em certos casos é possível calcular-se o valor da espessura de rocha fraturada em torno da escavação<sup>(2)</sup>, possibilitando assim uma melhor previsão da dimensão efetiva dos tirantes. A prática de avaliar tal espessura por meio de batidas de martelo (distinguindo entre o "choco" da rocha fraturada e o som metálico da rocha sã) pode ajudar em certos casos. O emprego de técnicas geofísicas é também uma contribuição válida para a determinação daquela espessura<sup>(4)</sup>, servindo para o melhor dimensionamento dos suportes.

### II.3. — Efeito das descontinuidades geológicas

O que acabamos de referir é baseado na hipótese de que o maciço rochoso é contínuo, homogêneo, isotrópico e elástico. Na realidade, tais circunstâncias jamais se verificam, sendo os comportamentos reais das rochas sempre mais complicados do que os seus modelos teóricos. Geralmente, os acidentes geológicos e as heterogeneidades diminuem a resistência e aumentam a deformabilidade dos maciços, em relação às propriedades teóricas que eles apresentariam se considerarmos apenas a presença de rocha sã.

O estudo dos maciços compartimentados é cada vez mais importante em Mecânica das Rochas, havendo presentemente um certo número de métodos capazes de quantificar as propriedades de tais maciços, entrando em consideração com essas descontinuidades<sup>(5)</sup>.

Certos aspectos práticos de instabilidades causadas pelos acidentes geológicos estão esquematizados nas Figs. 5 e 6.

A presença de uma falha ou plano de fratura nas proximidades de uma escavação provoca modificações no estado de tensão, podendo originar elevadas concentrações em certos pontos da periferia, que são susceptíveis de levá-la ao colapso, muitas vezes de forma inesperada.

As quedas de blocos poderão resultar de ocorrências fortuitas como as representadas na Fig. 6: a) pela formação de cunhas donde se destacam os blocos; b) por separação de camadas que constituam o teto imediato da escavação; c) no atravessamento de zonas de brecha ou de veios de material incoerente.

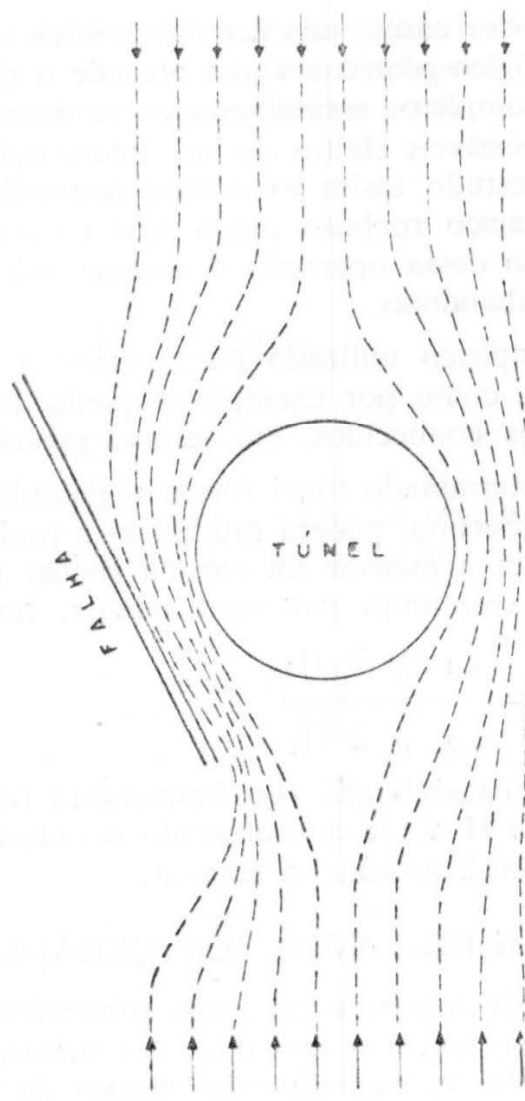


Fig. 5

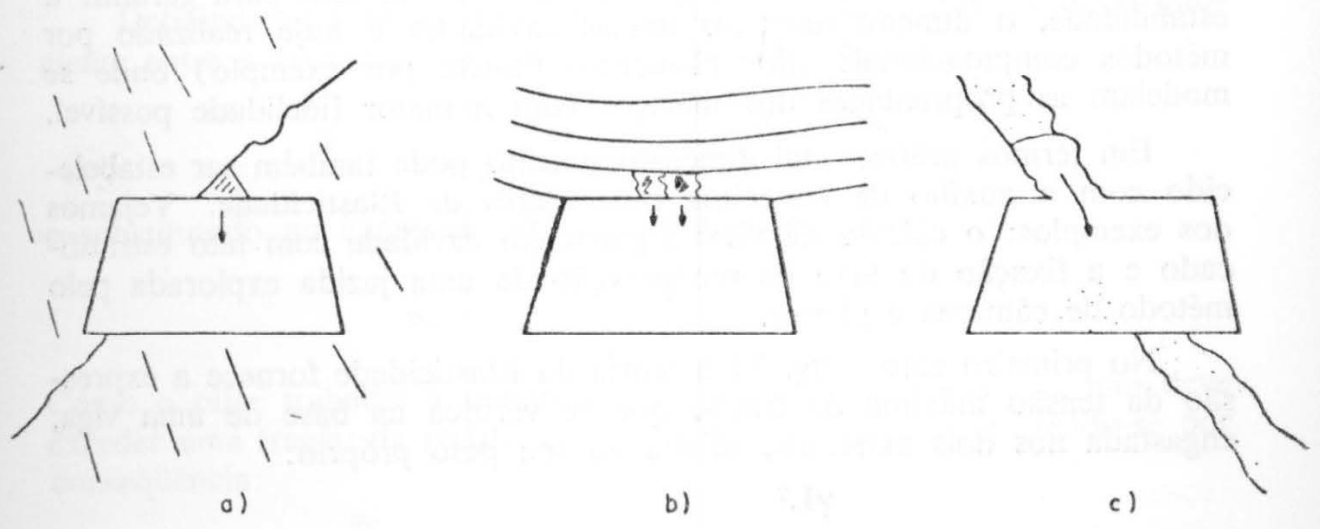


Fig. 6

Em qualquer destes casos, tais acontecimentos só poderão ser evitados se o estudo geológico-geotécnico que precede o trabalho de escavação for suficientemente completo, assinalando essas descontinuidades, e estudando-se depois os possíveis efeitos de sua intersecção com a cavidade a abrir. Por vezes, o estudo assim executado aconselha a que se preceda ao tratamento do maciço rochoso ainda não escavado, dependendo do maior ou menor custo dessa operação a decisão sobre o desvio da escavação ou até o seu abandono.

Um processo empírico utilizado para prever a incidência de certos tipos de instabilidade, como por exemplo a queda de blocos, consiste na extrapolação de valores conhecidos, em termos probabilísticos.

Assim, se em determinado túnel forem registradas as quedas de blocos ao longo da sua abertura, poderá estimar-se a probabilidade de quedas de blocos noutro túnel a escavar na mesma rocha, por uma relação de proporcionalidade. Exprimindo matematicamente, tem-se:

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{L_1 + 2 H_1}{L_2 + 2 H_2}$$

onde P representa a probabilidade (ou freqüência) das quedas de blocos, L a largura do túnel e H a sua altura, sendo o índice 1 relativo ao túnel já construído e o índice 2 ao túnel a escavar.

### III. — ESCAVAÇÕES DE LAVRA SUBTERRÂNEA

Para a extração de minérios em lavra subterrânea, a forma geométrica das escavações não tem a simplicidade dos túneis, sendo muitas vezes de configuração irregular e, exigindo vão abertos de considerável dimensão. Tais circunstâncias exigem que se recorra a conceitos apropriados de Mecânica de Rochas para o dimensionamento das cavidades subterrâneas. Atendendo à importância econômica que tem as relações entre o espaço escavado e os volumes de rocha que tem de ser mantidos para garantir a estabilidade, o dimensionamento dessas cavidades é hoje realizado por métodos computacionais (dos elementos finitos, por exemplo) onde se modelam as propriedades dos maciços com a maior fidelidade possível.

Em termos práticos, tal dimensionamento pode também ser estabelecido com o auxílio de conceitos elementares de Elasticidade. Vejamos dos exemplos: o cálculo de vãos seguros em cavidade com teto estratificado e a fixação da taxa de recuperação de uma jazida explorada pelo método de câmaras e pilares.

No primeiro caso (Fig. 7) a teoria da Elasticidade fornece a expressão da tensão máxima de tração que se verifica na base de uma viga, engastada nos dois extremos, sujeita ao seu peso próprio:

$$\sigma_{\max} = \frac{\gamma L^2}{2e}$$

em que  $\gamma$  é o peso específico da rocha constituinte do teto. Se esta rocha possui uma resistência à tração  $\sigma_t$ , aquela tração máxima não deve exceder uma fração desta resistência, o que equivale a introduzir um fator de segurança  $F_s$ , tal que:

$$\frac{\sigma_t}{F_s} = \frac{\gamma L^2}{2c}$$

donde resulta a fórmula do vão seguro:

$$L = \sqrt{\frac{2c \sigma_t}{\gamma F_s}}$$

Esta relação pode ser usada para fins de projeto, sendo normalmente utilizados para esse fim, fatores de segurança da ordem de 3 a 5, em mineração subterrânea.

O segundo caso encontra-se esquematizado na Fig. 8, e o problema a resolver consiste na determinação das dimensões de cada pilar numa malha regular de câmaras e pilares.  $A_p$  representa a área transversal do pilar e  $A_m$  a área minerada tributária desse pilar, que abrange metade dos vãos vizinhos.

Como a força transmitida antes de aberta a escavação deve igualar que é suportada pelo pilar após a execução da cavidade, têm-se:

$$\sigma_v (A_m + A_p) = \sigma_p A_p$$

em que  $\sigma_v$  é a tensão vertical pré-existente (supondo horizontal o plano de escavação) — no caso do peso dos terrenos será apenas  $\sigma_v = \gamma h$ , onde  $h$  é a profundidade dos trabalhos — e  $\sigma_p$  é a tensão suportada pelo pilar.

Definindo-se taxa de extração, ou de recuperação,  $R$ , como o quociente entre a área minerada e a área total, ou seja:

$$R = \frac{A_m}{A_m + A_p}$$

e substituindo na expressão anterior, obtém-se:

$$\sigma_p = \frac{\sigma_v}{1 - R}$$

Como o pilar trabalha à compressão, a tensão nele atuante  $\sigma_p$  não deve exceder uma fração da resistência da rocha à compressão  $\sigma_c$ , tendo-se por consequência:

$$\frac{\sigma_c}{F_s} = \frac{\sigma_v}{1 - R}$$



donde resulta a expressão que fornece a taxa de recuperação:

$$R = 1 - \frac{F_s \sigma_v}{\sigma_c}$$

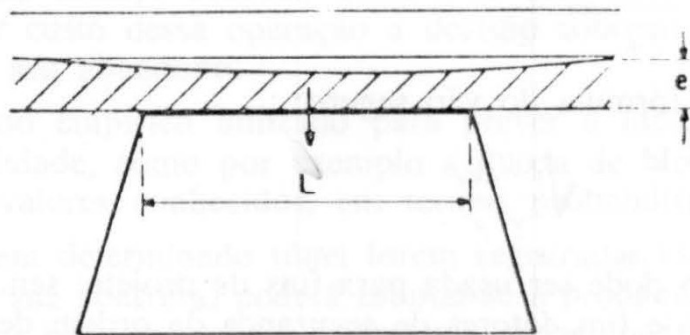
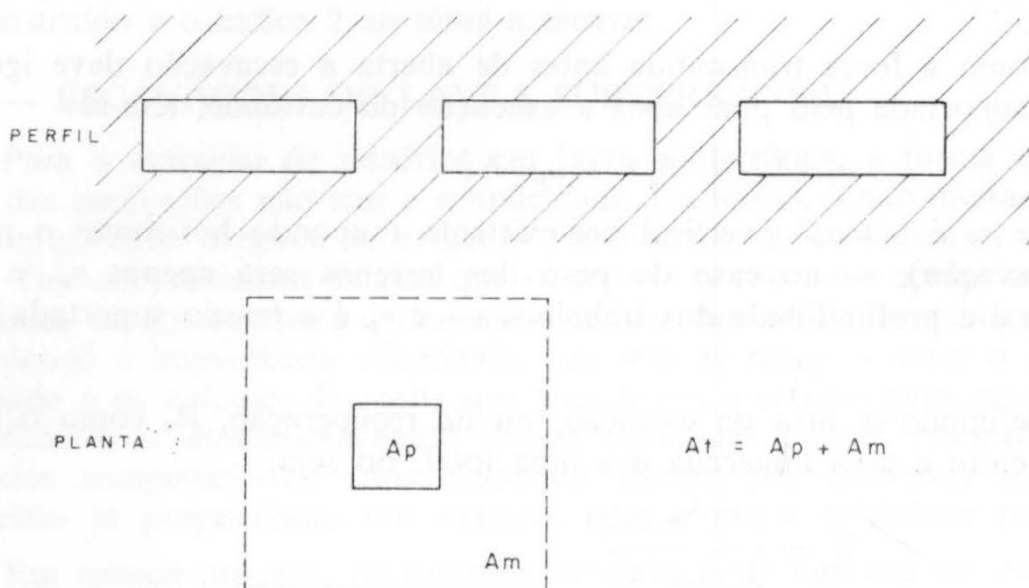


Fig. 7



Esta relação engloba o antagonismo existente entre a segurança (através do fator  $F_s$ ) e a economia (pela taxa de recuperação, que sempre convém maximizar). Através do adequado conhecimento das propriedades de resistência da rocha  $\sigma_c$  pode-se dimensionar os trabalhos de extração de forma racional, procurando conciliar os constrangimentos econômicos com os requisitos de segurança. Este exemplo simples ilustra perfeitamente o papel da Mecânica de Rochas no planejamento da moderna engenharia de minas.

#### IV. — O CONTROLE DO COMPORTAMENTO DAS ESCAVAÇÕES

O conhecimento das tensões e deformações dos terrenos em torno das escavações é fundamental para manter a respectiva segurança fornecendo ainda excelentes contribuições para melhorar os projetos de cavidades semelhantes.

Por esses motivos, a Mecânica de Rochas moderna atribui grande importância às operações de observação e instrumentação dos trabalhos, que permitem um acompanhamento científico dos fenômenos naturais associados ao desenvolvimento de escavações e outras obras subterrâneas.

Embora esteja fora do âmbito desta apresentação fornecer descrições da aparelhagem utilizada para este efeito, serão referidos os tipos de medições mais divulgados no controle dos comportamentos de escavações. Poderemos distinguir os seguintes grupos de instrumentos:

a) Para auscultação de microfraturas e de microsismos nas rochas, com o objetivo de determinar o início de fenômenos de rotura. São comuns em pilares subterrâneos e nas paredes e tetos das escavações, constando de geofones de alta sensibilidade conectadas a sismógrafos.

b) Para medida de deformações e deslocamentos dos maciços rochosos, visando estabelecer os seus movimentos ao longo do tempo e analisando se os valores registrados excedem os máximos admissíveis que garantem a estabilidade.

Em geral são obtidas variações (com o tempo) das velocidades de deslocamento medidas entre pontos críticos das escavações, proporcionando assim um controle dos respectivos movimentos e procurando evitar surpresas quanto à deterioração progressiva das suas condições de segurança.

Em particular, são realizadas no interior das cavidades subterrâneas, medidas de **convergência** dos seus contornos ao longo do tempo, conjugando tais informações com a atuação dos sistemas de suporte e com o desenvolvimento dos trabalhos da própria escavação. A convergência é habitualmente medida entre pontos opostos da periferia, devendo ser amarrada a um referencial fixo.

e) O controle das cargas que se exercem sobre os elementos de suporte é também de grande relevância para análise do seu comportamento, assim como para estabelecer critérios mais realísticos de dimensionamento. Existem diversos sistemas de células de carga que avaliam a grandeza dessas forças, por meio de processos contínuos de registro.

Os tirantes também são objeto desse controle, por meio de aparelhagem de registro da tensão exercida entre a ancoragem e a força (células de carga de tipo hidráulico ou elétrico) proporcionando uma estimativa da sua capacidade de suporte e respectiva eficiência, que geralmente decresce com o tempo.

d) A medição de tensões no interior dos maciços é outro processo muito divulgado, que fornece elementos úteis para o projeto de escavação e para a manutenção da sua estabilidade com o tempo. Diversos sistemas existem para esse fim, podendo-se distinguir os seguintes grupos principais:

d<sub>1</sub>) Processos baseados em libertação de tensão depois de criada uma superfície de alívio que possibilita a expansão da rocha anteriormente comprimida pela tensão que se pretende medir. Dentro deste grupo, figuram os extensômetros elétricos e os anéis fotoelásticos colados no fundo dos furos, assim como as células de instalação em furos de sondagem que posteriormente são superfurados (USBM, Leeman, LNEC, etc.) e as simples rosetas de deflectômetros que atuam nas paredes das galerias. Estas últimas registram as distâncias entre pontos préestabelecidos, antes e depois de abertos num corte entre esses pontos, de modo que os deslocamentos diferenciais permitem avaliar o estado de tensão que estava anteriormente instalado nesse local.

d<sub>2</sub>) Métodos de restauração do estado de tensão nos maciços rochosos, após terem sido criadas condições para o seu alívio, sendo registradas antes e depois da aplicação de sistemas de pressão (como por exemplo, os macacos planos). Por este processo é possível ensaiar paredes de galerias e determinar o estado de tensão reinante, na direção perpendicular ao plano de corte onde se instalam os macacos planos.

d<sub>3</sub>) Fraturação hidráulica. Processo baseado na pressurização de um trecho de furo de sondagem, entre dois obturadores estanques, até ser criada uma superfície de rotura na parede do furo. Sabendo a profundidade do trecho, a pressão que originou a primeira fratura, a pressão que mantém a propagação dessa fratura e a respectiva orientação no espaço, pode-se determinar as componentes dos estados de tensão instalados àquela profundidade.

d<sub>4</sub>) Outros processos de medição do estado de tensão envolvem métodos sísmicos, etc. e possuem divulgação reduzida. Maiores detalhes sobre estes tipos de métodos poderão ser encontrados nos textos da especialidade (3, 4, 5).

e) Sistemas de medição dos deslocamentos absolutos dos maciços. Destinam-se a avaliar os movimentos de escavação em relação a referenciais fixos, por meio de operações topográficas de precisão. Em particular, o registro de deslocamentos da superfície do terreno, resultantes de



trabalhos subterrâneos realizados no mesmo local (deslocamentos esses designados por **subsidiência**) constituem uma preocupação dominante em muitas empresas de mineração, podendo em muitos casos originar o fechamento de certos empreendimentos.

Existem diversas teorias sobre os efeitos superficiais provocados por escavações subterrâneas, permitindo avaliar as dimensões máximas dos vãos dessas cavidades, que não causem danos à superfície do terreno. Estes cálculos baseiam-se em certos comportamentos mecânicos propostos para os maciços rochosos, cuja realidade física é melhor assegurada se forem realizados trabalhos criteriosos de caracterização mecânica das rochas. Neste ponto, a Mecânica de Rochas pode fornecer ótimas contribuições para a compreensão dos mecanismos envolvidos nesse fenômeno.

## V. — REGRAS PRÁTICAS PARA O DIMENSIONAMENTOS DOS SUPORTES

Dado que os suportes são os elementos à disposição do engenheiro para garantir artificialmente a estabilidade de uma escavação (e muitas vezes corrigir certos erros no projeto e na execução das obras) é sobre o seu dimensionamento que convém descrever algumas regras práticas fundamentais em conceitos geomecânicos.

Na tabela que constitui a Fig. 9, devido a Deere et al <sup>(6)</sup> encontram-se listados os processos mais tradicionais de suporte em túneis, consoante o método de escavação utilizado e o tipo de rocha.

Nessa tabela, L representa o vão da escavação, sendo a carga de rocha atuante sobre o sistema uma função de L.

Os terrenos são divididos em 6 grupos distintos, de acordo com o valor do respectivo R.Q.D. (designação qualitativa da rocha).\*, figurando também um solo, como o grupo que possui piores propriedades mecânicas.

Os sistemas mais divulgados são os de cambotas, de tirante e de concreto projetado, e suas combinações. Contudo, o R.Q.D. não constitui o parâmetro único de caracterização de um maciço rochoso, em virtude de outras circunstâncias influenciarem a resistência dos maciços.<sup>2</sup> Por esta razão, Bieniawski <sup>(7)</sup> desenvolveu uma classificação geomecânica dos ma-

(\*) O R.Q.D. representa o quociente, em percentagem, do comprimento dos testemunhos recuperados em uma sondagem com diâmetro não inferior a NX (2 1/8 polegadas) e com comprimento individual superior a 10 cm, pelo comprimento total do trecho de sondagem considerado. Traduz assim um grau de fraturamento do maciço rochoso.



PROCESSOS DE SUPORTE EM TUNEIS

Qualidade da Rocha	Método de Escavação	Combotas de Aço			Sistemas Alternativos de Suporte			
		Cargo de rocha	Peso das cambotas	Espaçamento	Tirantes		Concreto Projetado	
					Espaçamento da malha	Complementos e limitações	Espessura no teto	Espessura nas paredes
I Muito Boa 100 > RQD > 90	Mecânico	(0 a 0,2)L	Leve	Nenhum ou ocasional	Raros	—	—	—
	Explosivos	(0 a 0,3)L	Leve	Nenhum ou ocasional	Raros	Localmente 5 a 7,5 cm	—	—
II Boa 90 > RQD > 75	Mecânico	(0 a 0,4)L	Leve	Ocasional ou 1,5 m a 2 m	Malha de aço ocasional	Localmente 5 a 7,5 cm	—	—
	Explosivos	(0,3 a 0,6)L	Leve	1,5 a 2 m	Malha de aço ocasional	Localmente 5 a 7,5 cm	—	—
III Média 75 > RQD > 50	Mecânico	(0,4 a 1)L	Médio	1,5 a 2 m	Malha e pregagens localmente	5 a 10 cm	—	Alguns chumbadores
	Explosivos	(0,6 a 1,3)L	Médio	1,2 a 1,5 m	Malha e pregagens localmente	10 cm ou mais	10 cm	Alguns chumbadores

(Continua)

(Continuação)

Qualidade da Rocha	Método de Escavação	Combotas de Aço			Sistemas Alternativos de Suporte				
		Carga de rocha	Peso das combotas	Espaçamento	Tirantes		Concreto Projetado		
					Espaçamento da malha	Complementos e limitações	Espessura no teto	Espessura nas paredes	Adicional
IV Má $50 > RQD$ $52 <$	Mecânico	(1 a 1,6)L	Médio circular	1 a 1,2 m	1 a 1,5 m	Considerável malha e pregagens	10 a 15 cm	10 a 15 cm	chumbadores 1,2 a 2 m
	Explosivos	(1,3 a 2,0)L	Médio a pesado, circular	0,6 a 1,2 m	0,6 a 1,2 m	Considerável malha e pregagens	15 cm ou mais	15 cm ou mais	chumbadores 1,2 a 2 m
V Muito má $RQD < 25$	Mecânico	(1,6 a 2,2)L	Médio a pesado, circular	0,6 m	0,6 a 1,2 m	Necessário em 100% malha e pregagens	15 cm ou mais em toda a secção	15 cm ou mais em toda a secção	Cambotas médias
	Explosivos	2,0 a 2,8)L	Pesado, circular	0,6 m	1 m	Necessário em 100% malha e pregagens	15 cm ou mais em toda a secção	15 cm ou mais em toda a secção	Cambotas médias a pesadas
Solo	Qualquer	Até 75 m	Muito pesado, circular	0,5 m	0,6 a 1 m	Ancoragem pode ser impossível. Necessário em 100% malha e pregagens	15 cm ou mais em toda a secção	15 cm ou mais em toda a secção	Cambotas pesadas

ciços rochosos para fins de escavação de túneis, onde considerou, além do R.Q.D., os seguintes itens:

- Resistência dos blocos de rocha à compressão uniaxial.
- Espaçamento entre juntas ou descontinuidades.
- Condições geométricas e físicas das juntas.
- Orientação dominante dessas juntas.
- Condições hidrológicas do maciço rochoso.

Atribuindo pesos definidos em relação a cada uma destas 6 propriedades, e somando esses pesos obtém-se um índice representativo do estado geral do maciço, que pode então ser utilizado para fins de projeto do sistema de suporte.

A classificação geotécnica de Bieniawski é apresentada na Fig. 10, e a integração do índice do maciço com o vão da escavação em função do tempo de auto-sustentação da cavidade consta de Fig. 11. Com esta avaliação prática torna-se possível conceber em cada caso qual o tempo que medeia entre a abertura da cavidade e a instalação do suporte obtendo assim informações importantes sobre os ciclos de escavação. A subsequente escolha do sistema de suporte poderá ser efetuada de acordo com a Fig. 9.

A técnica contemporânea tem demonstrado que é sempre vantajoso diminuir o tempo entre a escavação e a aplicação dos suportes, a fim de evitar deslocamentos importantes dos maciços rochosos, que podem deteriorar as suas possibilidades de resistência no futuro. Por esta razão certos métodos atuais como o austríaco prevê a aplicação imediata de um revestimento de concreto projetado provisório, ao qual se segue posteriormente a instalação de suporte definitivo. Este processo permite aumentar a capacidade de auto-sustentação dos maciços, conduzindo a sistemas de suporte mais leves, e por conseqüência, mais econômicos. É portanto um exemplo de evolução tecnológica baseada no conhecimento do comportamento mecânico dos maciços rochosos.

## VI. — CONCLUSÕES

Não só do que foi mencionado neste artigo, mas também nas três partes anteriores, pode-se inferir que as aplicações da Mecânica de Rochas são cada vez mais vastas e promissoras.

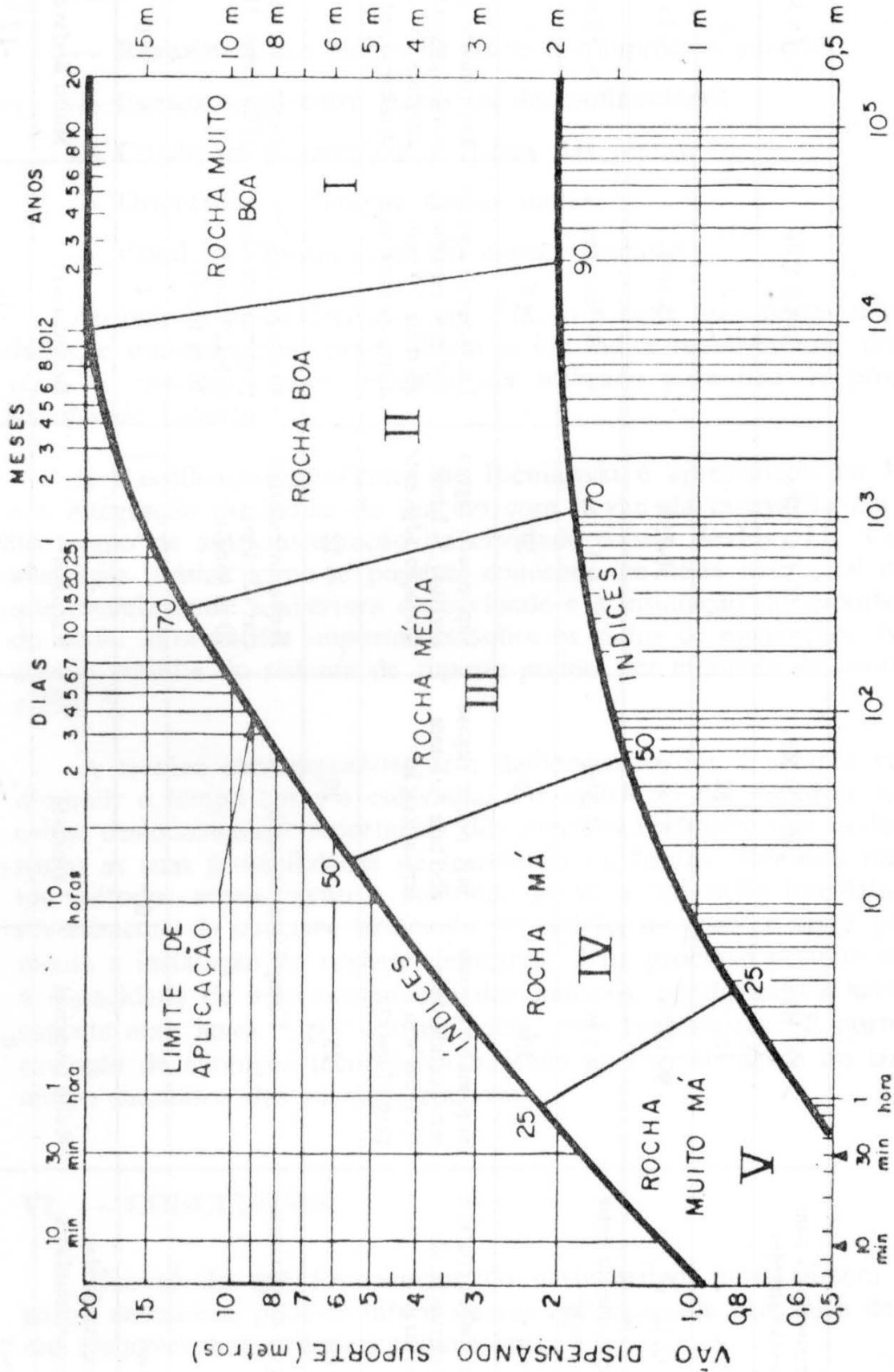
Na sua tentativa de tornar inteligível a sua complexa realidade geológica, a Mecânica de Rochas tem contribuído para a compreensão de varia-

# CLASSIFICAÇÃO GEOTÉCNICA DE MACIÇOS ROCHOSOS PARA TÚNEIS

(Adaptada de Bieniawski, 1973)

Resistência à compressão simples	> 200 MPa	100-200 MPa	50-100 MPa	25-50 MPa	< 25 MPa
Pesos	15	12	7	4	4
R. Q. D.	90-100%	75-90%	50-75%	25-50%	< 25%
Espaçamento entre fracturas	> 3 m	1-3 m	0,3-1 m	50-300 mm	< 50 mm
Pesos	30	25	20	10	5
Condições físicas e geométricas das fracturas	Sup. muito rugosas sem continuidade fechadas sem preenchimento	Sup. pouco rugosa abertura < 1 mm sem alteração	Sup. pouco rugosa abertura < 1 mm alteração adjacente	Enchimento argiloso < 5 mm espessura; abertura 1-5 mm diaclases contínuas	Enchimento argiloso com espessura > 5 mm abertura > 5 mm diaclases contínuas
Pesos	25	20	12	6	0
Água subterrânea	Completamente seco		Pequenas escorrências (25 l/min. 10 m túnel)	Ressurgência com pequena pressão (25-125 l/min. 10 m túnel)	Fortes ressurgências (125 l/min. 10 m túnel)
Pesos	10	7	4	0	0
Orientação das discontinuidades	Muito favorável	Favorável	Razoável	Desfavorável	Muito desfavorável
Pesos	0	-2	-5	-10	-12





TEMPO DE AUTO-SUSTENTAÇÃO (horas)

díssimos fenômenos e para a pesquisa de métodos mais racionais de projeto.

Existe ainda um longo caminho a percorrer para se dominar perfeitamente o mundo mineral que nos rodeia, parecendo razoável que o abandono progressivo de regras empíricas, substituindo-as por conceitos geomecânicos apropriados, seja a alternativa mais viável para se atingir aquele objetivo.

Os projetos de engenharia em maciços rochosos são cada vez mais ambiciosos, as estruturas subterrâneas são construídas em condições mais adversas; novas aplicações, como o uso polivalente do espaço subterrâneo, a energia geotérmica, o armazenamento de substâncias radioativas e outras mais, constituem desafios sempre novos que só se vencem com conhecimentos científicos bem desenvolvidos.

O grau de extrapolação a partir da experiência já adquirida é muitas vezes solicitado para além dos limites da prudência, exigindo elevada dose de bom senso para a implantação de novas soluções.

Por todas essas razões, a Mecânica de Rochas surge como promissora fonte de informação, promovendo a compreensão dos reais comportamentos das rochas, onde a variabilidade é quase sempre uma constante, e desenvolvendo princípios gerais que servem como excelentes guias para a concepção e o projeto de obras realizadas em ambientes geológicos.

Tais conhecimentos, baseados em experiências válidas, e orientados por um prudente bom senso, serão a chave para um melhor domínio deste ramo da Engenharia.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) *Dinis da Gama, C.* (1977) — Os Custos de Construção de Túneis. Revista Construção Pesada. Abril de 1977. São Paulo.
- (2) *Dinis da Gama, C.* (1976) — Cálculo Expedido da Estabilidade de Túneis e de suas Necessidades de Suporte. Anais do VI Simpósio de Mineração. Geologia e Metalurgia n.º 39, pág. 101-133. São Paulo.
- (3) *Mello Mendes, F.* (1968) — Mecânica das Rochas. Ed. AEIST. Lisboa.
- (4) *Obert, L. and Duvall, W. I.* (1967) — Rock Mechanics and the Design of Structures in Rock. Ed. John Wiley. New York.
- (5) *Jaeger, J. C. and Cook, N. G.* (1969) — Fundamentals of Rock Mechanics. Ed. Mathuen. London.
- (6) *Deere, D. U.; Peck, R. et al.* (1970) — Design of Tunnel Support Systems. Proceedings 49<sup>th</sup> Annual Highway Research Board Meeting. Washington.
- (7) *Bieniawski, Z T.* (1973) — Engineering Classification of Jointed Rock Masses. Transactions of the South African Institution of Civil Engineers. Vol. 15, pág. 335-342.