

ESTABILIZAÇÃO DE ESCAVAÇÕES A CÉU ABERTO

Parte III

RESUMO

A análise e o projeto de taludes em rocha é diferente do que se passa em solos, devido à influência fundamental que têm as descontinuidades sempre existentes nos maciços rochosos.

É importante definir a orientação espacial que apresentam essas descontinuidades e medir suas propriedades mecânicas de resistência ao cisalhamento, porque elas governam a estabilidade de escavações, associando-se ainda a influência da água e do estado de tensão "in situ".

Considerando estas informações básicas, resumem-se nesta artigo os métodos físicos e matemáticos mais divulgados nos estudos de estabilidade, aos quais se juntam processos de retroanálise aplicáveis nos trabalhos de estabilização prática. Refere-se ainda a necessidade de se criarem classificações geomecânicas dos maciços rochosos, com vistas à previsão da estabilidade dos taludes neles construídos.

I. — INTRODUÇÃO

Com o aumento do número e das dimensões das escavações em rocha presentemente executadas, novos métodos de estabilização têm sido implantados e a análise dos problemas tem sido melhorada, às custas do desenvolvimento de Mecânica de Rochas.

Em mineração, as profundidades atingidas nas escavações a céu aberto têm sido cada vez maiores, em vias de comunicação as especificações modernas de gradientes e raios de curvatura conduzem à abertura de cortes cada vez mais profundos nos maciços rochosos, uns e outros originando problemas de estabilidade com crescente complexidade.

Em geral, a questão fundamental a resolver consiste na pesquisa de um compromisso ótimo entre a segurança e a economia da escavação. Quanto mais seguros são os taludes, mais cara geralmente é a sua escavação, porque maiores volumes de rocha devem ser desmontados.

Por outro lado, quando os taludes se apresentam muito inclinados, os custos de escavação são menores, porém o risco de rotura do talude aumenta. E os deslizamentos, se ocorrerem, podem causar despesas

consideráveis, quer em trabalhos de reconstrução, quer na implantação de soluções paleativas.

Por esse motivo, considera-se atualmente que o *ângulo ótimo* do talude de uma escavação a céu aberto será aquele que minimiza os custos de sua construção e de sua manutenção. Contudo, nem sempre os taludes são projetados atendendo a condições puramente econômicas, porque na realidade intervêm fatores geológicos, hidrológicos e mecânicos que influenciam consideravelmente a sua estabilidade e, por consequência, a geometria final das escavações.

Um outro aspecto, por vezes esquecido na previsão da estabilidade dos taludes em rocha, é a introdução das novas condições (hidrológicas e geomecânicas) resultantes da escavação, nos métodos de análise utilizados no respectivo dimensionamento.

Por estas razões, pode-se deduzir que qualquer estudo de estabilização de escavações a céu aberto necessita sempre de um levantamento prévio das condições naturais existentes no local, com adequada caracterização geomecânica e mapeamento das litologias interessadas e sem esquecer a experiência prévia obtida de problemas análogos na mesma região. Considerações de outra ordem, como as relativas a ângulos de talude desejados ou pretendidos na concepção das obras, deverão em geral subordinar-se aos contrangimentos geológicos.

Após essa fase geológica, que deve também fornecer indicações sobre a posição geral do N.A. antes da escavação e uma avaliação da sua nova posição depois de executado o talude, procede-se habitualmente a uma análise preliminar da estabilidade da proposta escavação.

Quando não existirem dúvidas sobre as condições de estabilidade, pode-se prosseguir o trabalho com as atividades de projeto do talude, prevendo-se também as etapas de instrumentação e observação da rocha remanescente do talude, após cada etapa da sua construção. Na hipótese contrária, deve-se realizar uma análise detalhada da estabilidade do talude, entrando em consideração com todas as possíveis medidas corretivas que possam proporcionar resultados técnica e economicamente aceitáveis. Se mesmo assim subsistirem dúvidas quanto à estabilidade da escavação, não existindo garantias sobre a segurança de vidas e bens materiais que possam ser atingidos pela possível rotura do talude, haverá que modificar o respectivo projeto, ou até abandoná-lo.

Por consequência, o processo de dimensionamento das características ótimas do talude requer a análise de uma sequência de fases interdependentes, que na maioria dos casos tendem para o estabelecimento do compromisso menos objeccionável entre a multiplicidade das soluções possíveis.

Uma síntese dessa metodologia⁽¹⁾ é apresentada, sob a forma de fluxograma, na Fig. 1.

FLUXOGRAMA PARA PROJETO DE TALUDES EM ROCHA

(Adaptação de Hoek & Londe - 1974)

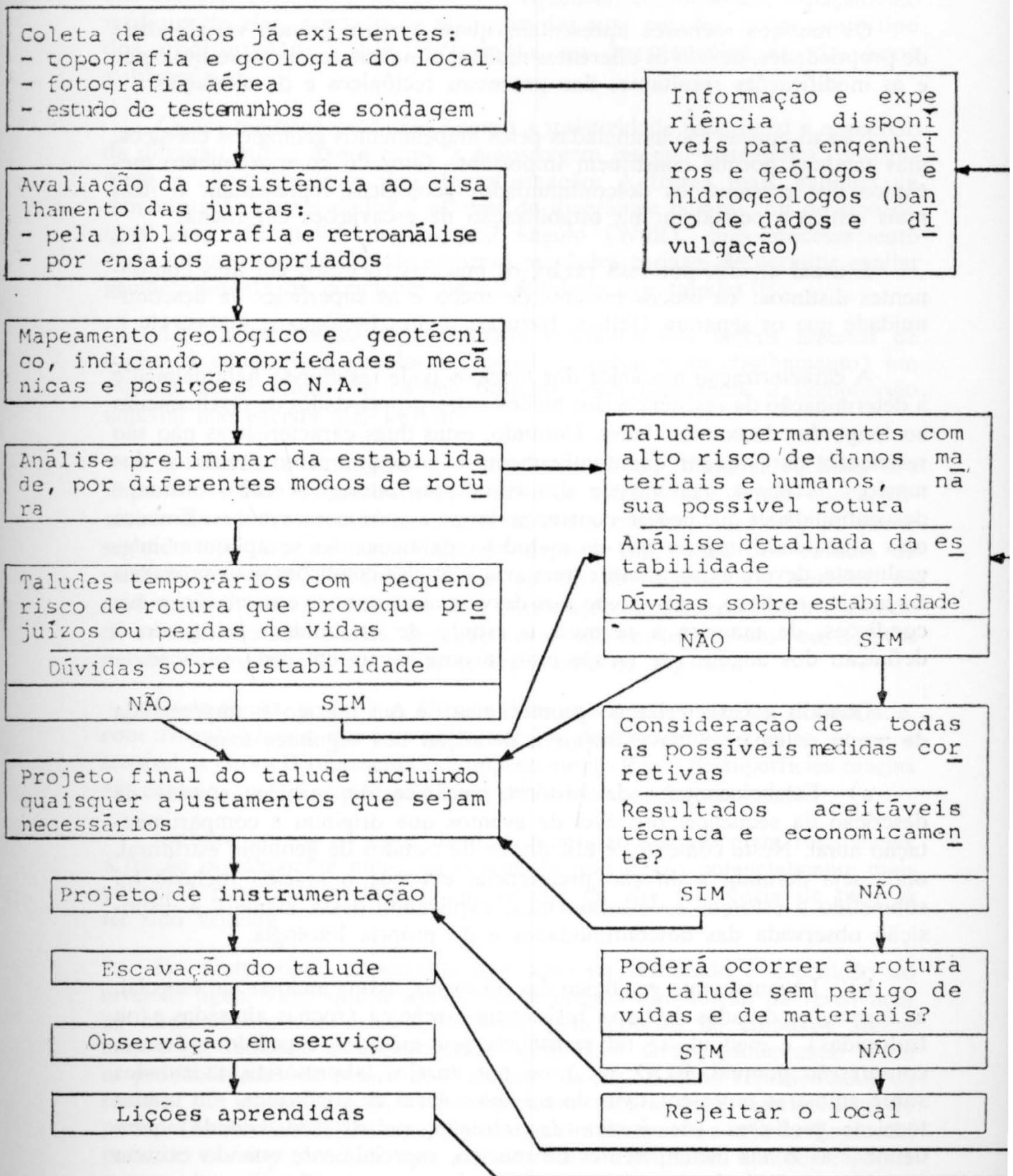


Fig. 1

II. — CARACTERIZAÇÃO GEOMECÂNICA DOS MACIÇOS ROCHOSOS

Os maciços rochosos apresentam quase sempre grande variabilidade de propriedades, devido às diferentes mudanças na sua composição litológica e às modificações resultantes dos processos tectônicos e de alteração.

Não só porque são assinaladas pelos mapeamentos geológicos clássicos, mas também porque constituem importante fator do comportamento mecânico dos maciços, as descontinuidades geológicas representam o item mais crítico a considerar na estabilização de escavações em rocha.

É usual dividir, por essa razão, os maciços rochosos em dois componentes distintos: os blocos intactos de rocha e as superfícies de descontinuidade que os separam (falhas, fraturas, limites litológicos, juntas, etc.).

A caracterização mecânica dos maciços pode resumir-se habitualmente à determinação da resistência dos blocos e das propriedades de cisalhamento ao longo das descontinuidades. Contudo, estas duas características não são suficientes para definir quantitativamente o comportamento mecânico dos maciços rochosos, em virtude das complexas interações entre blocos e descontinuidades que podem ocorrer ao longo e após as escavações. Embora essa dificuldade impeça que os métodos analíticos não se apliquem integralmente, deverá existir sempre uma avaliação das condições mais prováveis do maciço rochoso, assim como dos desvios mais críticos em relação a tais condições, de maneira a permitir o estudo de estabilidade adequado à definição dos ângulos de talude mais aconselháveis em cada situação.

Quando a caracterização geomecânica de um maciço é empreendida de modo sistemático, deve incluir a definição dos seguintes itens:

a) Estabelecimento da história mecânica do maciço, através da descrição da sequência provável de eventos que originou a compartimentação atual. Neste contexto, é útil dispor de estudos de geologia estrutural, onde seja definida a direção preferencial em que o maciço rochoso foi submetido a esforços e deslocamentos, explicando dessa maneira a disposição observada das descontinuidades e da própria litologia.

b) Levantamento geológico das litologias, assinalando-se em especial, as formações dotadas de baixa resistência mecânica (rochas alteradas e/ou fraturadas) e medindo-se tal resistência por métodos expedidos (dureza, compressão pontual, RQD, etc.) ou por ensaios laboratoriais executados sobre amostras representativas do maciço. Além de sondagens, são usadas técnicas geofísicas (de sísmica de refração, ou de resistividade) para delinear as zonas incompetentes do maciço, especialmente quando existem espessas capas de intemperismo, como é frequente no Brasil.

c) Informação detalhada sobre a compartimentação do maciço, definindo-se as famílias de descontinuidades mais importantes, sua orientação espacial (direção e mergulho), frequência, continuidade, espaçamento médio entre elas, e estado de alteração das suas paredes, assim como tipo dos enchimentos e sua influência na permeabilidade da água subterrânea.

Certos métodos geofísicos (como a resistividade superficial e o método da difração ótica) assim como a amostragem integral sistemática, possibilitam a obtenção desse tipo de informação. A forma mais habitual de representação destes dados é através de diagramas polares, ou do tipo de igual área (Schmidt), ou de igual ângulo (Wulf), cujo processamento pode incluir outros dados de natureza mecânica capazes de permitir avaliar geometicamente as condições de estabilidade dos taludes ⁽⁶⁾.

d) Determinação da resistência mecânica dos blocos intactos de rocha (à compressão simples e triaxial, à tração e ao cisalhamento) em especial se se tratar de rochas brandas, cuja resistência à compressão uniaxial não exceda 500 kg/cm².

A coesão e o ângulo de atrito interno do material rochoso são importantes para os métodos de análise de estabilidade, sendo que a primeira deverá ser medida de preferência em ensaios "in situ", já que o segundo, por ser adimensional, não depende da escala dos ensaios de cisalhamento das descontinuidades (e do correspondente material de enchimento) constitui também uma informação fundamental para o estudo de estabilidade dos taludes, devendo ser obtida em termos dos seus valores máximos e residuais, conforme se representa na Fig. 2.

Nesta figura, a curva A é típica de uma superfície de descontinuidade, com irregularidades, que não tenha sofrido deslocamentos prévios de valor sensível; a curva B representa o comportamento típico de superfícies macias em contato, que já experimentaram deslocamentos importantes.

Embora ambos os tipos de descontinuidades apresentem resistências à tração praticamente nulas, as curvas do tipo B são potencialmente mais perigosas para a estabilidade, em virtude da sua resistência de pico já ter sido vencida.

f) Outro dado importante que deve ser levantado é a posição do nível de água, visto que a sua presença origina diminuição da resistência ao cisalhamento nas descontinuidades, pela criação de empuxos ascendentes que reduzem as componentes normais de atrito, aumentando assim as probabilidades de rotura dos taludes. Na Fig. 3 estão representados os estados de tensão I e II, respectivamente sem e com interferência de pressões neutras, observando-se que o segundo ultrapassa a reta de Coulomb, portanto em situação de rotura, ao contrário do primeiro, que corresponde a uma situação estável.

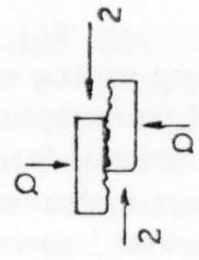
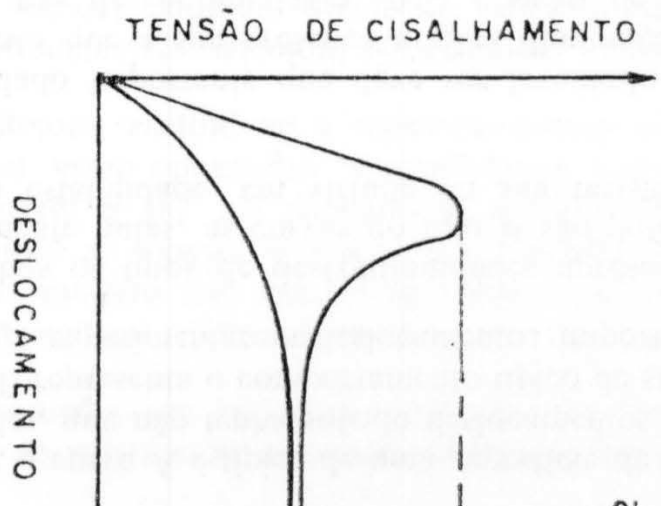
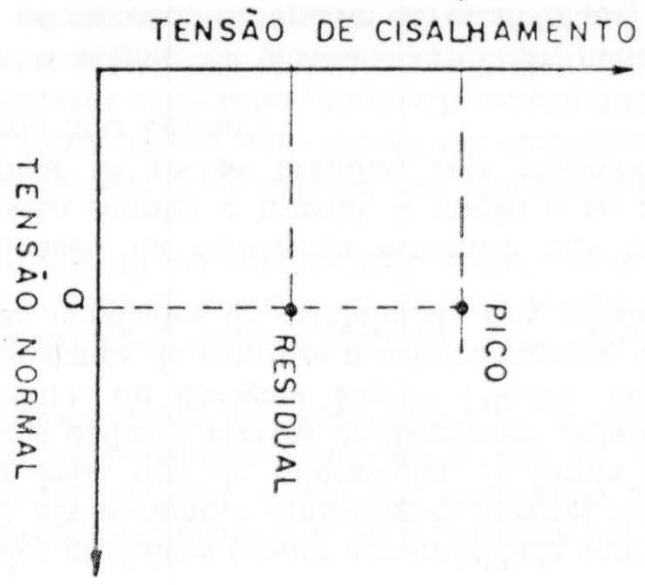


Fig. 2



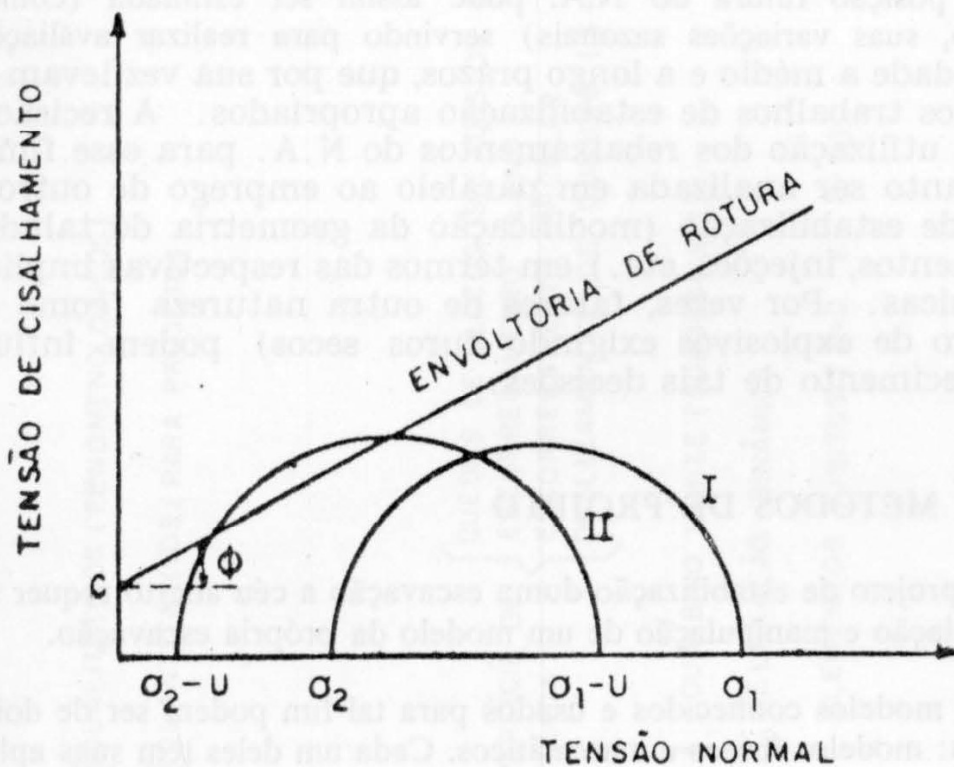


Fig. 3

A presença da água pode fazer-se sentir também através de fendas de tração verticais (originando forças horizontais atuantes sobre o volume de terreno que pode escorregar) ou das forças de percolação resultantes do seu próprio movimento, incluindo a erosão superficial causada por chuvas fortes.

Como é óbvio, as condições da água subterrânea devem ser determinadas convenientemente antes de qualquer estudo de estabilidade de taludes, compreendendo essencialmente.

- 1 — Medida de pressões neutras por meio de piezômetros
- 2 — Avaliação de permeabilidade do maciço, através de ensaios de bombeamento ou de testes de permeabilidade realizados em furos de sondagem.

As redes de percolação da água no interior dos maciços contribuem com dados valiosos para a análise de estabilidade, sendo obtidas normalmente com as informações dos piezômetros, associadas aos dados de permeabilidade. Por elas se dimensiona o volume de drenagem requerido para estabilizar um talude, seja por bombeamentos, seja por drenos horizontais ou até por galerias de drenagem.

A posição futura do N.A. pode assim ser estimada (como, por exemplo, suas variações sazonais) servindo para realizar avaliações da estabilidade a médio e a longo prazos, que por sua vez levam à previsão dos trabalhos de estabilização apropriados. A recisão final sobre a utilização dos rebaixamentos do N.A. para esse fim, deve no entanto ser analisada em paralelo ao emprego de outros processos de estabilização (modificação da geometria do talude, atirantamentos, injeções, etc.) em termos das respectivas implicações econômicas. Por vezes, fatores de outra natureza (como seja o emprego de explosivos exigindo furos secos) podem influir no estabelecimento de tais decisões.

III. — MÉTODOS DE PROJETO

O projeto de estabilização duma escavação a céu aberto requer sempre a formulação e manipulação de um modelo da própria escavação.

Os modelos conhecidos e usados para tal fim podem ser de dois tipos distintos: modelos físicos e matemáticos. Cada um deles tem suas aplicações específicas e objetivos adequados à natureza do problema em estudo.

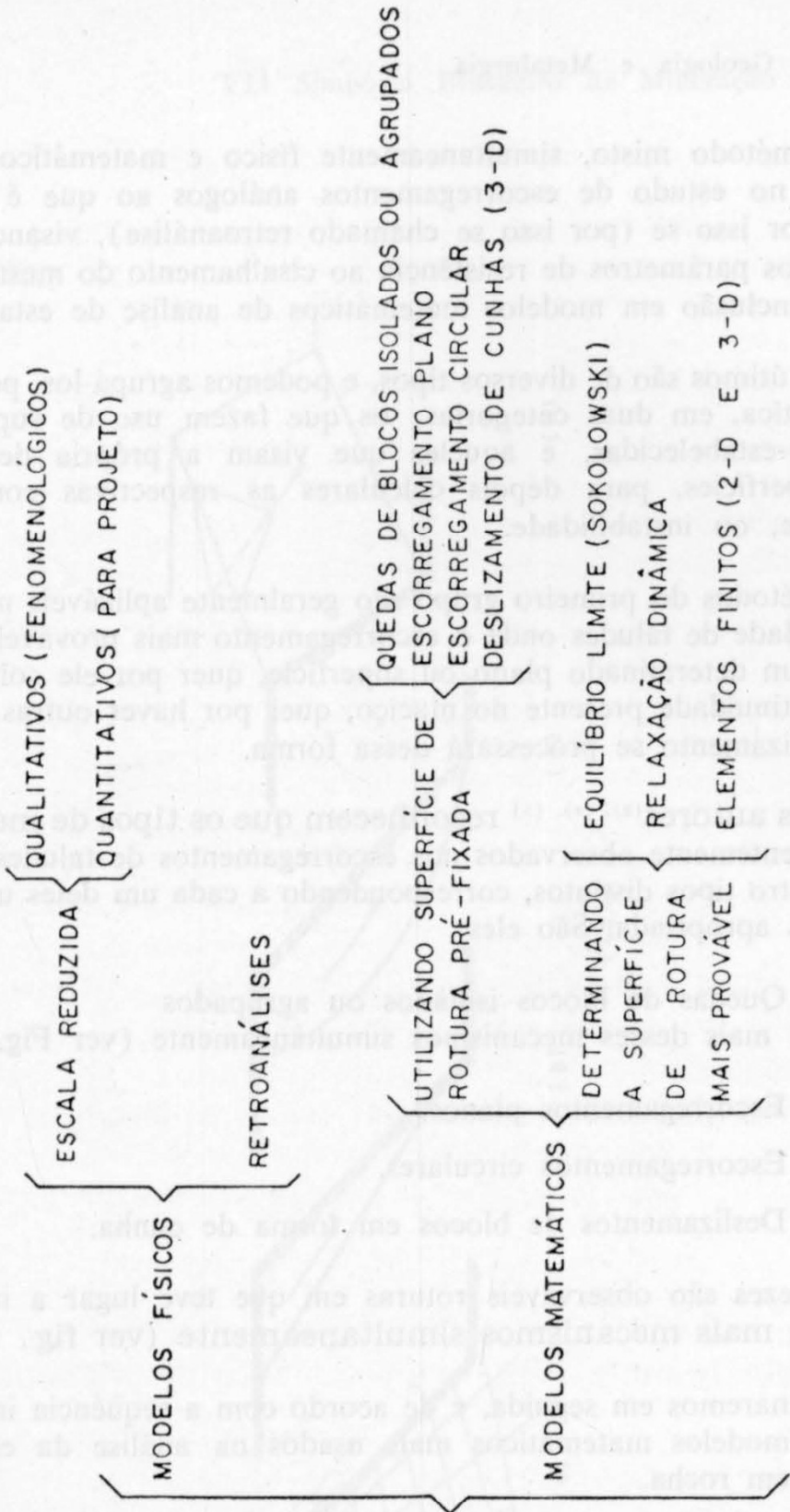
A Fig. 4 esquematiza os diferentes modelos empregados no estudo de taludes, de acordo com as atuais tendências da Mecânica de Rochas.

O recurso a modelos físicos, habitualmente confeccionados por sistemas de blocos de gesso, cimento, etc., está geralmente limitado ao estudo do comportamento mecânico de taludes formados por maciços rochosos compartimentos, sendo muito didáticos e explicativos por si próprios.

Quando se pretendem extrair informações quantitativas para base de projetos, tais modelos são quase sempre incompletos, visto não simularem perfeitamente o maciço protótipo (sem respeitarem integralmente as condições de similitude) atendendo à sua complexidade geométrica, mecânica e hidrológica.

Por estas razões, os modelos físicos servem apenas quando se pretendem extrair conclusões qualitativas, a respeito da fenomenologia das roturas de taludes, deixando a desejar se se preconiza a obtenção de dados de projeto com validade quantitativa. Não é de estaranhar que os modelos matemáticos tenham muito maior divulgação, dado que se baseiam nas leis mecânicas de equilíbrio (estático ou dinâmico) de massas de rocha em condições de deslizamento mais ou menos eminente. A respectiva validade, contudo, está na dependência da rigorosa definição dos parâmetros que influenciam o comportamento os volumes de rocha interessados, assim como da previsão do tipo de roturas que os taludes mais provavelmente irão experimentar.

MÉTODOS DE PROJETO
DE TALUDES EM ROCHA



Um método misto, simultaneamente físico e matemático, é o que se baseia no estudo de escorregamentos análogos ao que é objeto de análise (por isso se (por isso se chamado retroanálise), visando a determinação dos parâmetros de resistência ao cisalhamento do mesmo maciço, para sua inclusão em modelos matemáticos de análise de estabilidade.

Estes últimos são de diversos tipos, e podemos agrupá-los, por questões de sistemática, em duas categorias: os que fazem uso de superfícies de rotura pré-estabelecidas, e aqueles que visam a própria determinação dessas superfícies, para depois calcular as respectivas condições de estabilidade, ou instabilidade.

Os métodos do primeiro grupo são geralmente aplicáveis nas análises de estabilidade de taludes onde o escorregamento mais provável ocorre ao longo de um determinado plano ou superfície, quer por ele coincidir com uma descontinuidade presente no maciço, quer por haver outras evidências que o deslizamento se processará dessa forma.

Vários autores^{(2), (4), (5)} reconhecem que os tipos de mecanismos mais frequentemente observados nos escorregamentos de taludes em rocha são de quatro tipos distintos, correspondendo a cada um deles uma análise matemática apropriada. São eles:

- 1 — Quedas de blocos isolados ou agrupados de dois ou mais desses mecanismos simultaneamente (ver Fig. 5).
- 2 — Escorregamentos planos.
- 3 — Escorregamentos circulares.
- 4 — Deslizamentos de blocos em forma de cunha.

Por vezes são observáveis roturas em que teve lugar a interferência de dois ou mais mecanismos simultaneamente (ver fig. 5).

Examinaremos em seguida, e de acordo com a sequência indicada na Fig. 4 os modelos matemáticos mais usados na análise da estabilidade de taludes em rocha.

- a) Quedas de blocos isolados ou agrupados.

Este fenômeno pode ocorrer por dois mecanismos distintos: rotura por escorregamento no plano da base do bloco, ou queda por rotação devida à instabilidade estática do bloco.

Supondo que a superfície da base do bloco é caracterizada pelos parâmetros de cisalhamento c e ϕ , o seu equilíbrio limite é fornecido pela seguinte relação (ver Fig. 6):

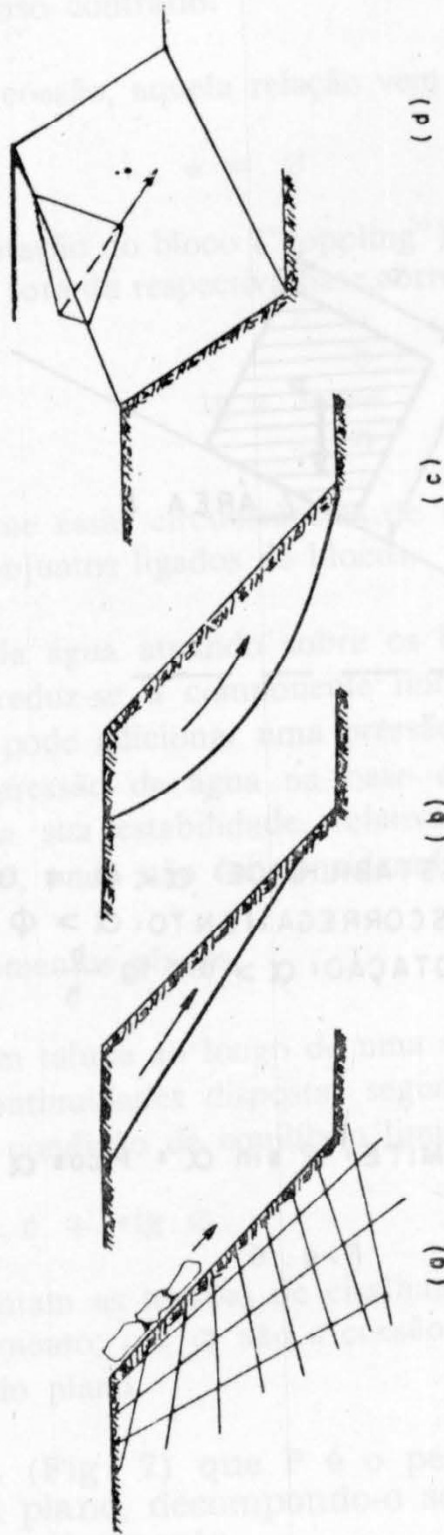


Fig. 5

Como é óbvio, haverá escorregamento do bloco quando o 1.º membro desta equação for maior que o 2.º membro, ocorrendo uma situação de instabilidade do corpo considerado.

Desprezando a contribuição da resistência ao cisalhamento

A rotação por... (text is faint and partially obscured)

A Fig. 6 resume... (text is faint and partially obscured)

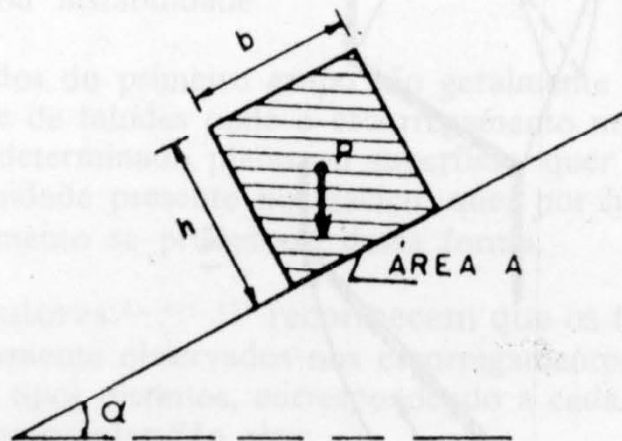
A influência da água... (text is faint and partially obscured)

ROTORA POR ESCORREGIMENTO... (text is faint and partially obscured)

A rotação de um... (text is faint and partially obscured)

em equilíbrio... (text is faint and partially obscured)

Supondo-se (Fig. 5) que... (text is faint and partially obscured)



SEM COESÃO:

CONDIÇÃO DE ESTABILIDADE: $\alpha < \phi$ e $\alpha < \text{arc tg } \frac{b}{h}$

ROTURA POR ESCORREGAMENTO: $\alpha > \phi$

QUEDA POR ROTAÇÃO: $\alpha > \text{arc tg } \frac{b}{h}$

COM COESÃO:

EQUILÍBRIO LIMITE: $P \sin \alpha = P \cos \alpha \text{ tg } \phi + CA$

Fig. 6

$$P \sin \alpha = P \cos \alpha \operatorname{tg} \phi + cA$$

Como é óbvio, haverá escorregamento do bloco quando o 1.º membro dessa equação for maior que o 2.º membro, correspondendo uma situação de estabilidade no caso contrário.

Desprezando a coesão, aquela relação vem simplesmente

$$\alpha = \phi$$

A rotura por rotação do bloco ("toppling") dar-se-á quando a direção do vetor peso passar fora da respectiva base, correspondendo à desigualdade:

$$\operatorname{tg} \alpha > \frac{b}{n}$$

A Fig. 6 resume essas circunstâncias de instabilidade, podendo aplicar-se também a conjuntos ligados de blocos.

A influência da água atuando sobre os blocos é sempre prejudicial à segurança, pois reduz-se a componente normal do peso do bloco, ao mesmo tempo que pode adicionar uma pressão lateral à componente tangencial. Assim, a pressão de água na base e faces dos blocos diminui consideravelmente a sua estabilidade, relativamente às condições esquematizadas na Fig. 6, onde não foi considerada a intervenção da água.

b) Escorregamentos planos

A rotura de um talude ao longo de uma superfície plana (ou através de sucessivas descontinuidades dispostas segundo uma orientação plana) obedece à seguinte condição de equilíbrio limite:

$$\tau = c + \sigma \operatorname{tg} \phi$$

onde τ e σ representam as tensões de cisalhamento e normal atuantes no plano de escorregamento; c e ϕ são a coesão e o ângulo de atrito característicos do referido plano.

Suponhamos (Fig. 7) que P é o peso do volume de terreno situado sobre tal plano, decompondo-o segundo a direção normal e tangencial respectivamente.

$$\begin{aligned} N &= P \cos \alpha \\ T &= P \sin \alpha \end{aligned}$$

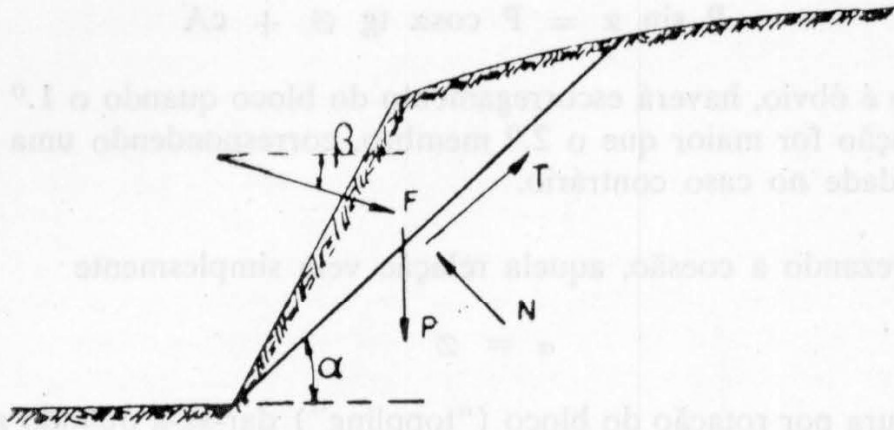


Fig. 7

A força F representa a resultante de todas as outras forças atuantes sobre o volume de rocha em eminência de escorregamento, fazendo com a horizontal um ângulo β , medido no sentido horário.

Assim, quando o talude se encontrar parcial ou totalmente submerso (com uma altura de água h acima da respectiva base) o valor de F por unidade de espessura do talude, será:

$$F = \frac{\gamma_a h^2}{2 \sin \alpha}$$

em que γ_a é o peso específico da água.

No caso de vibrações transmitidas ao terreno com aceleração a , teremos:

$$F = \frac{P}{g} a$$

admitindo-se usualmente $\beta = 0$.

A força F também poderá ser igual à resultante das forças de atirantamento que sejam aplicadas para sustentar o talude.

Ao longo do plano de escorregamento, cuja área é A , atua uma força tangencial total

$$P \sin \alpha - F \cos (\alpha + \beta)$$

à qual se opõe uma força resistente

$$c A + [F \sin (\alpha + \beta) + P \cos \alpha] \operatorname{tg} \varnothing$$

sendo a estabilidade do volume de rocha com peso P avaliada por um

fator de segurança que se calcula pelo quociente da segunda dessas forças pela primeira.

Como é evidente, valores do fator de segurança superiores à unidade correspondem a situações estáveis, e os inferiores à unidade traduzem casos de rotura do talude, sendo o equilíbrio limite caracterizado por um fator de segurança igual a 1.

Embora discutível quanto ao seu significado real, o conceito de fator de segurança é geralmente utilizado para avaliação da estabilidade de taludes, havendo normalmente regras práticas que preconizam certos fatores (por exemplo 1,3 em taludes das minas a céu aberto) como critérios de projeto.

c) Escorregamentos circulares.

Conforme a Fig. 5-c o escorregamento de alguns taludes pode ocorrer por rotação da massa de rocha ao longo de uma superfície cilíndrica, com desenvolvimento aproximadamente circular. Tais roturas iniciam-se geralmente por meio de fendas de tração superficiais, terminando nas vizinhanças da base do talude, em movimentos que chegam a deslocar milhões de m^3 de rocha.

O método mais clássico de análise deste tipo de escorregamento foi desenvolvido por Fellenius, sendo também conhecido pelo método das fatias.

Na Fig. 8 esquematiza-se a divisão do volume a deslizar em n fatias de igual espessura, representando-se as forças atuantes sobre uma fatia qualquer, de ordem i , inclusive havendo diversas camadas de terreno com diferentes propriedades (c , ϕ e γ).

O fator de segurança pode ser calculado pela expressão indicada na própria figura, caracterizando desse modo a estabilidade do referido talude.

Entre os múltiplos círculos de deslizamento do talude (a cada um dos quais corresponde um fator de segurança) é possível detectar a posição do círculo mais provável de escorregamento, através da pesquisa do menor de todos os fatores de segurança característicos do talude em causa.

d) Deslizamentos de blocos em forma de cunha.

Existem métodos sofisticados para proceder ao cálculo de estabilidade de cunhas de rocha formadas pela intersecção de duas ou mais superfícies de descontinuidades^(4, 6). Contudo, numa avaliação aproximada da referida segurança consiste na aplicação do método referido por Hoek⁽²⁾ que faz uso do chamado "fator de cunha", o qual multiplica o fator de

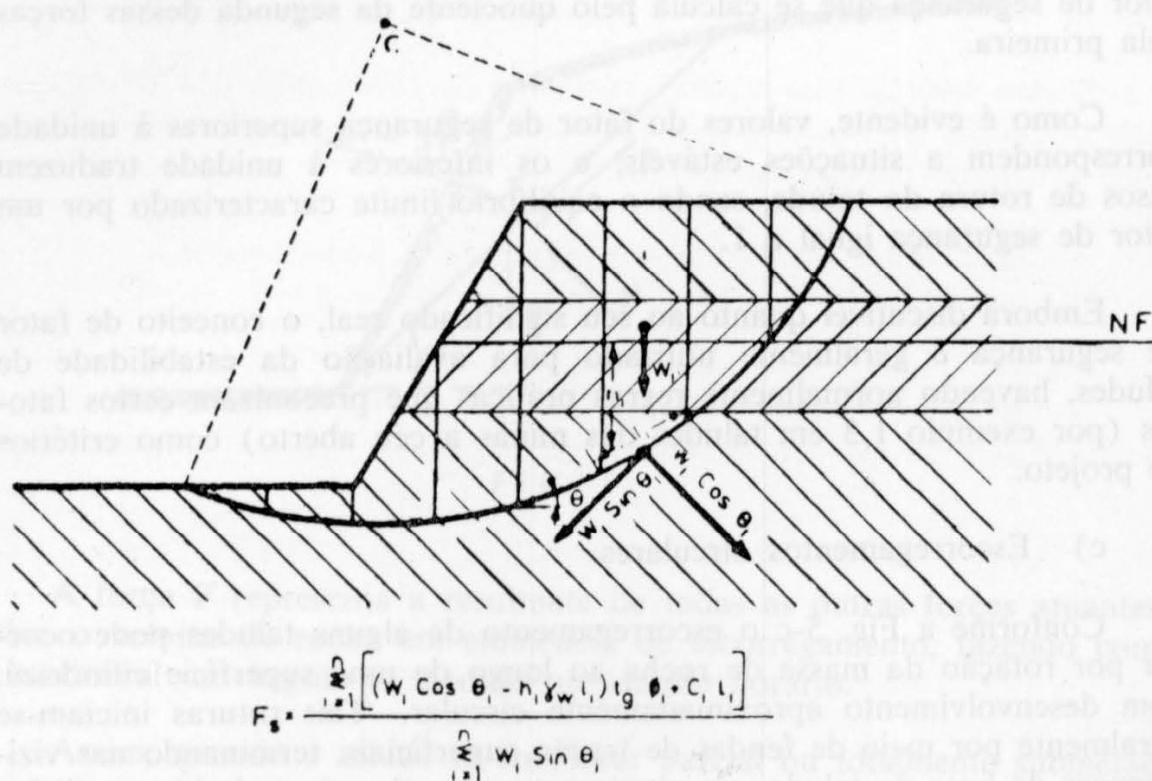


Fig. 8

segurança de um escorregamento plano que coincida em direção e inclinação com a aresta da cunha em análise.

Valores do citado fator de cunha podem ser obtidos a partir do conhecimento do ângulo sólido de cunha de rocha e do ângulo feito pela respectiva bissetriz com a horizontal (ver, por exemplo, ref. 3, pág. 129).

Sobre o segundo grupo de métodos de análise de estabilidade de taludes (aqueles que visam a determinação da superfície de ruptura mais provável) poderemos distinguir três tipos (vide Fig. 4):

a) *Método do equilíbrio limite*

Consiste na resolução de um sistema de equações constituído pelo critério de ruptura de Mohr-Coulomb e pelas equações de equilíbrio elástico. Aplicando-se às coordenadas do volume de terreno considerado, a resolução do referido sistema (que envolve equações diferenciais parciais) identifica os pontos situados sobre a superfície de equilíbrio limite, separando assim a porção do volume em ruptura, da zona estável. Para esse fim é usado o método das características e o das diferenças finitas, sendo difícil a sua aplicação a volume não homogêneos. Por esse motivo o método é pouco usado no estudo de estabilidade de maciços rochosos.

b) *Método da relaxação dinâmica*

É especialmente apropriado para a análise do comportamento de maciços rochosos compartimentados, formados por blocos soltos, semi-rígidos ⁽⁷⁾.

Representando a interação entre blocos por leis de atrito adequadas e usando parâmetros de rigidez realísticos, pode-se simular a rotura progressiva de taludes avaliando a influência de diversas condições de fronteira e a participação de atirantamentos na respectiva estabilização.

c) *Método dos elementos finitos*

Constitui presentemente o método com maior potencial para a análise do comportamento mecânico de maciços rochosos, visto que engloba a representação de todos os seus constituintes, incluindo os materiais de junta e sua interferência nos processos de instabilização dos taludes. Como tais materiais intervêm com a geometria que apresentam no campo, é possível simular com rigor a sua atuação sob o efeito das forças aplicadas no talude, determinando assim o grau de estabilidade e a superfície mais provável de escorregamento.

A análise processa-se através da determinação dos estados de tensão e de deformação ocorrentes no interior do volume de rocha que constitui o talude, e em função desses resultados a forma geométrica da superfície de rotura pode ser estabelecida, calculando-se em seguida o respectivo fator de segurança.

IV. — ESTABILIZAÇÃO PRÁTICA DOS TALUDES EM ROCHA

Considera-se estabilização o processo de aumento do coeficiente de segurança ao escorregamento dos taludes, ou a diminuição da respectiva probabilidade de rotura.

Na prática tal processo por ser empreendido através de várias medidas, como:

- Modificação da geometria do talude.
- Reforço por tirantes, chumbadores, muros de arrimo, ou injeções para melhorar as propriedades do maciço rochoso.
- Drenagem ou bombeamento da água.
- Escavação cuidadosa, usando métodos de pré-corte no desmonte.
- Acompanhamento sistemático dos movimentos do talude.

Este último aspecto, cuja importância tem aumentado recentemente, assinala a necessidade de proceder à observação e instrumentação dos taludes. Diversos métodos existem para esse fim, procurando registrar os movimentos da frente do talude (em especial detectando quando ocorrem acelerações desses deslocamentos) e outros fenômenos típicos do início da rotura, tais como o aparecimento de fendas de tração no topo do talude e a contração verificada junto à aresta superior, ou o alargamento na sua base.

Utilizam-se métodos topográficos de triangulação e de nivelamento, ou mesmo observação aérea, instrumentando-se com aparelhos apropriados (como os extensômetros múltiplos) para registrar, ao longo do tempo, os referidos movimentos. Quando estes assumem valores situados na faixa de alarme devem ser tomadas decisões operacionais corretivas, visando a minimização dos prejuízos que poderiam resultar do escorregamento inesperado do talude.

A opção entre as várias medidas corretivas é geralmente feita por critérios econômicos.

A Fig. 9 contém um conjunto de soluções práticas visando a estabilização de um talude por diversos processos, que se podem implantar simultaneamente ou em separado, conforme as circunstâncias.

Finalmente, interessa considerar, para efeitos de proceder aos estudos de estabilização, um método prático muito útil. Trata-se de comparar as condições de estabilidade de um talude, com as de um outro talude cuja segurança é conhecida, numa escavação realizada sobre o mesmo tipo de rocha. Com este raciocínio evita-se a dificuldade de determinar a resistência do maciço rochoso (incluindo as suas descontinuidades), e extrapolando as condições de um talude para o outro. Nalguns casos pode mesmo ser usada informação proveniente de estudos em modelo reduzido.

Vejamos então a aplicação deste método aos casos típicos de rotura mencionados no capítulo anterior.

a) Quedas de blocos

Como vimos, são fenômenos distintos da rotura ao longo de superfícies de deslizamento, sendo precedidos por deformações internas crescentes. Admitindo que K representa o quociente entre as tensões horizontal e vertical pré-existentes antes da escavação, e que H é a altura do talude, o ângulo de inclinação do talude i pode ser calculado por ⁽⁸⁾:

$$\operatorname{tg} i_2 = \operatorname{tg} i_1 \left(\frac{k_1 H_1}{K_2 H_2} \right)^2$$

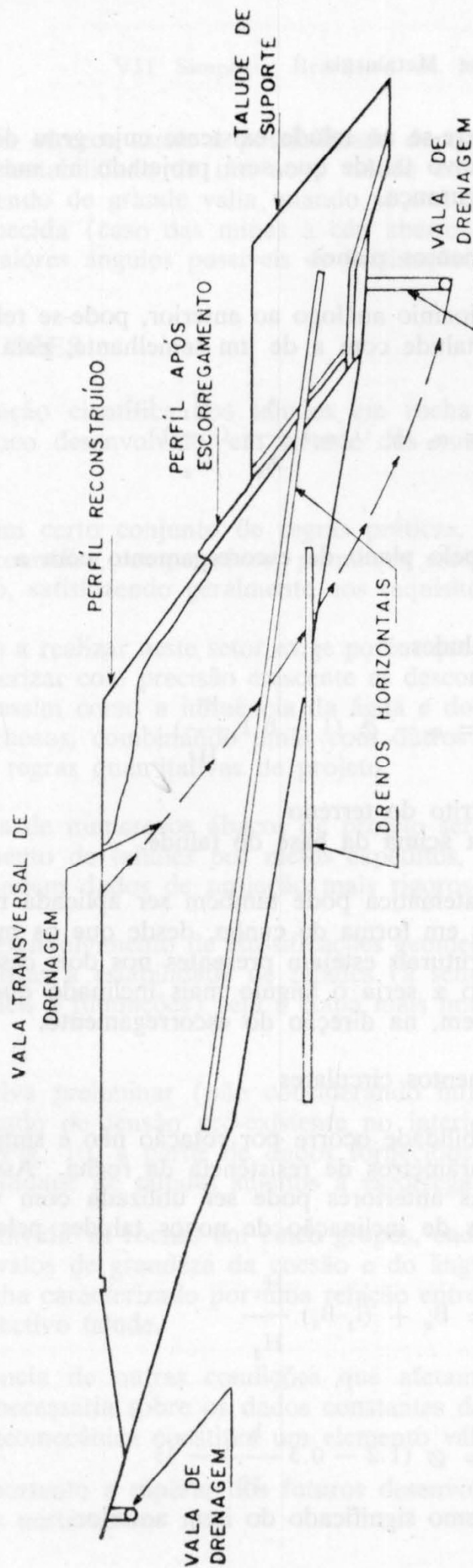


Fig. 9

onde o índice 1 refere-se ao talude existente cujo grau de estabilidade é conhecido, e 2 ao novo talude que será projetado na mesma rocha para idêntico fator de segurança.

b) Escorregamentos planos

Usando um raciocínio análogo ao anterior, pode-se relacionar a inclinação de um novo talude com a de um semelhante, pela equação ⁽⁹⁾:

$$i_2 = \alpha_2 + (i_1 - \alpha_1) \frac{A_1}{A_2} \left(\frac{H_1}{H_2} \right)^{1.5}$$

onde:

α é o ângulo feito pelo plano de escorregamento com a horizontal (ver Fig. 7).

H é a altura dos taludes

$$A = \alpha - \phi \left(1 - 0.1 \frac{h^2}{H^2} \right)$$

ϕ é o ângulo de atrito do terreno

h é a altura de água acima da base do talude.

Esta relação matemática pode também ser aplicada na extrapolação de roturas de blocos em forma de cunha, desde que os mesmos tipos de discontinuidades estruturais estejam presentes nos dois casos. Nestas circunstâncias, o ângulo α seria o ângulo mais inclinado que tais discontinuidades apresentassem, na direção do escorregamento.

c) Escorregamentos circulares

Quando a instabilidade ocorre por rotação não é simples proceder à determinação dos parâmetros de resistência da rocha. Assim, a extrapolação de experiências anteriores pode ser utilizada com vantagens, estimando-se os ângulos de inclinação de novos taludes pela expressão ⁽⁹⁾:

$$i_2 = B_2 + (i_1 - B_1) \frac{H_1}{H_2}$$

em que:

$$B = \phi \left(1.2 - 0.3 \frac{h}{H} \right) - 15$$

tendo as letras o mesmo significado do item anterior.

Este método oferece assim a possibilidade de quantificar o grau de estabilidade ou instabilidade de um novo talude em função de estudos pré-existentes, sendo de grande valia quando se trabalha numa região de geologia já conhecida (caso das minas a céu aberto), porque permite a obtenção dos maiores ângulos possíveis de inclinação dos taludes.

V. — CONCLUSÕES

A estabilização científica dos taludes em rocha ainda se encontra num estágio pouco desenvolvido, em virtude dos numerosos fatores que a influenciam.

Contudo, um certo conjunto de regras práticas, a que se associam métodos de retroanálise comparativos, permitem estudar o problema de modo qualitativo, satisfazendo geralmente aos requisitos de projeto.

O progresso a realizar neste setor exige porém que se enfatize a necessidade de caracterizar com precisão crescente as discontinuidades dos maciços rochosos, assim como a influência da água e dos estados de tensão nos maciços rochosos, combinando umas com outros para que se consigam estabelecer regras quantitativas de projeto.

A existência de numerosos ábacos de projeto serve para a obtenção do dimensionamento de taludes por meios expeditos, deixando a desejar quando se pretendem dados de projeção mais rigorosos.

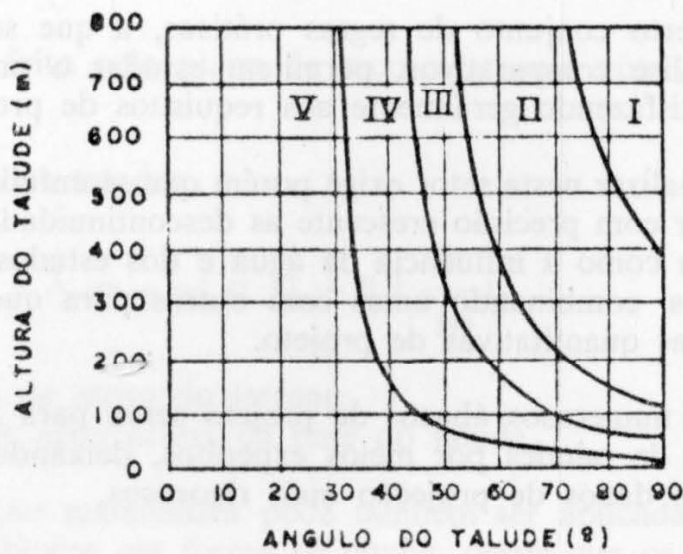
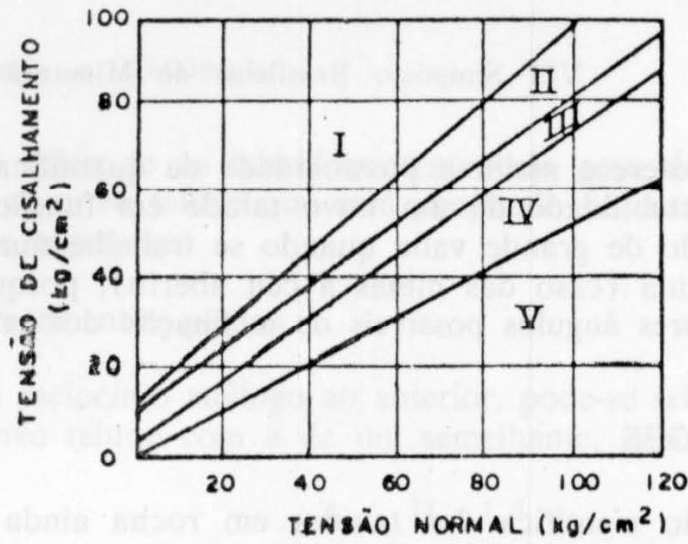
Talvez o desenvolvimento de classificações geomecânicas dos maciços rochosos com vistas à estabilidade de taludes (à semelhança das que já existem para túneis e fundações) seja a etapa mais imediata para alcançar tal objetivo.

Uma tentativa preliminar (não considerando influência do nível de água nem o estado de tensão pré-existente no interior do maciço) é a apresentada na Fig. 10, a partir de dados fornecidos por Hoek⁽²⁾ referindo-se à estabilidade de taludes sujeitos a escorregamentos planos.

É possível dividir as rochas em cinco grupos, cada um deles caracterizado por intervalos de grandeza da coesão e do ângulo de atrito, sendo cada tipo de rocha caracterizado por uma relação entre inclinação e altura máxima do respectivo talude.

A interferência de outras condições que afetam a estabilidade do talude torna-se necessária sobre os dados constantes da Fig. 10, para que a classificação geomecânica constitua um elemento válido para o projeto.

Muito há portanto a esperar dos futuros desenvolvimentos da Mecânica das Rochas neste setor.



TIPO DE ROCHA	COESÃO (kg/cm ²)	ÂNGULO DE ATRITO
I	> 12	> 42°
II	10 A 12	37° A 42°
III	3 A 10	35° A 37°
IV	0 A 3	28° A 35°
V	0	≅ 28°

Fig. 10

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) *Hoek, E. and Londe, P.* (1974) — Surface Workings in Rock. General Report of Theme 3. Proceedings of the Third Congress of the International Society for Rock Mechanics. Vol. I-A. Denver.
- (2) *Hoek, E. and Bray, J. W.* (1973) — Rock Slope Engineering. Institution of Mining and Metallurgy — London.
- (3) *Guidicini, G. e Nieble, C. M.* (1976) — Estabilidade de Taludes Naturais e de Escavação. Ed. Blucher, São Paulo.
- (4) *Jaeger, J. C. and Cook, N. G.* (1969) — Fundamentals of Rock Mechanics. Ed. Methuen, London.
- (5) *Attewell, P. B. and Farmer, I. W.* (1976) — Principles of Engineering Geology. Ed. Chapman and Hall, London.
- (6) *Hendron, A. J.; Cording, E. J. and Aiyer, A. K.* (1971) — Analytical and Graphical Methods for the Analysis of Slopes in Rock Masses. NCG Technical Report n.º 36, AD 738.929.
- (7) *Cundall, P. A.* (1971) — A computer model for simulating progressive large-scale movements in blocky rock systems. Paper II-8. Symposium on Rock Fracture. Nancy.
- (8) *Yu, Y. and Coates, D. F.* (1970) — Analysis of Rock Slopes using the Finite Element Method. Canadian Mines Branch Research report R 229.
- (9) *Hoek, E.* (1970) — Estimating the Stability of Excavated slopes in Opencast Mines. Transactions of I.M.M. Vol. 9, Sec. A, pág. A 109-132. London.