

ANÁLISE GEOMECÂNICA DA CAPACIDADE DOS
MACIÇOS ROCHOSOS

Arialto Ferreira de Andrade

(CPRM-SUREG-MA)

Mecânica das Rochas

Recent methods applied to Rock Mechanics Problems suggest that both geological evidences and Physics data must be considered in evaluation of rocky masses behaviour when solicited by great forces (loadings) on view point of bearing capacity and safety. Today the bearing capacity problem for soils and rocks is intensively studied, but not completely solved yet. Many theoretical approximations are necessary for results measurements. At rupture case of rocky masses, we can divide in three characteristics stages. The first one when the loads are relatively small within the limits. The normal stress ($\bar{\sigma}_n$) is small and the ratio $\bar{\tau}/\bar{\sigma}$ is great. So the material presents a great resistance angle. At second stage the progressive loading is greater and greater, that implies in partial break of cohesion and consequently decreases of resistance at fissures around $\overline{AB}$ surface, Fig. 1. The increase of normal strain ($\bar{\epsilon}_n$) at $\overline{BC}$ surface modifies the ratio that is smaller and smaller. So, at the end of the second stage the equilibrium limits boundary is surpassed and consequently fractures begins to be formed at surface. Finally at the third stage we have activation of another surface ($\overline{CD}$) when characteristic deformations is produced by shearing. Here deformations will be highly considerable and rupture by critical resistance shear maybe, perhaps the only one that we know at end the stage. The Fig. 1 represents different fractures surfaces, observed in the most cases of ruptures in Dams- Finally conclusions about important considerations that can not be neglected for whatever works relating; great loadings to bearing capacity of rocky masses or soils.

INTRODUÇÃO

Há alguns anos atrás em Mecânica de rochas foram usadas para o problema de determinação da capacidade de carga diferentes fórmulas, as quais foram deduzidas para Mecânica de Solos.

Naquele tempo empregava-se para toda espécie de rocha as mesmas fórmulas do conhecido Terzaghi-Peck, Meyrhof ou Brinck-Hansem.

Como as fórmulas eram bem conhecidas, foram aplicadas na suposição de que o meio solicitado por tensões adicionais de carregamentos eram distribuídas de modo contínuo, homogêneo e isotrópico. Também era suposto que os valores de "C" (coesão) e ϕ (ângulo de atrito) eram constantes em toda seção, e que "C" e ϕ tinham o mesmo valor em cada ponto do meio.

Por outro lado sabe-se que o problema de capacidade de suporte nos meios contínuos não está completamente solucionado rigorosamente. É necessário introduzir nas fórmulas correspondentes algumas suposições e simplificações a fim de aproximar os resultados para a prática.

No meio contínuo as condições geométricas (aspecto qualitativo) foram investigadas e com bases nesses resultados foi possível a análise teórica e experimental resultando a obtenção de uma solução aproximada para os problemas da capacidade de suporte.

Nas rochas compactas que se comportam como meio contínuo, homogêneo e isotrópico também era suposto que os valores de "C" (coesão) e ϕ (ângulo de atrito) eram constantes em toda seção, e que "C" e ϕ tinham o mesmo valor em cada ponto do meio. O que também não é correto.

Nessas rochas que se comportam como meio contínuo, homogêneo, as soluções obtidas podem ser aceitáveis. Elas podem ser aplicadas para rochas muito fissuradas com igual resistência ao cisalhamento entre as fissuras dos blocos nas diferentes direções.

Todavia os maciços rochosos que são fissurados irregularmente e constituem meios descontínuos, têm-se usualmente nas diferentes continuidades grandes diferenças na resistência ao cisalhamento. No caso não é válido aplicar o mesmo raciocínio. Nesta situação a condição geométrica para a capacidade de suporte deveria ser investigada para cada caso particular separadamente, bem como o problema especial associado com as condições de resistência ao cisalhamento específico.

Para esclarecer melhor o problema, cita-se o exemplo

discutido em uma publicação de 1964 por Krsmannovic e Milic. "É comum o conhecimento de que a ruptura num meio descontínuo é progressivo. O prosseguimento seria uma consequência natural uma vez rompido o equilíbrio".

Vamos admitir o corte de um meio descontínuo com a superfície mostrada na figura (1), o estado de tensões será vetorialmente representado como se segue:

Seja, (σ_y) tensão vertical na superfície, (via de regra moderada), principalmente, devido ao peso de material sobrejacente nesta situação teoricamente esquematizada e $(\sigma_x) = (\sigma_z)$ tensão horizontal praticamente reduzida a zero.

Admite-se que o semi-plano seja submetido a uma força inclinada (R) uniformemente distribuída sobre a superfície $\overline{AE}$, (peso de uma barragem em arco), (θ) o ângulo de atrito em relação a normal ao plano, (τ) a tensão de cisalhamento do maciço (abaixo) da estrutura, finalmente $\overline{AB}$, $\overline{BC}$ $\overline{CD}$ planos de ruptura.

ESTÁGIOS DE RUPTURA EM BARRAGENS

Estágio (I)

Considerada a situação esquematizada, o comportamento da ruptura poderá ser estudado, analiticamente, em três estágios sucessivos.

A carga (q) é ainda pequena comparada com a carga de ruptura. Para a ombreira é necessário uma carga (Q) muito maior do que (q). A ombreira não se rompe, mas fica seriamente comprometida no que respeita a segurança e estabilidade.

A transmissão da força (peso) toma lugar dentro dos limites de uma superfície de ruptura delineada pelas linhas quebradas $\overline{AF}$ e $\overline{EG}$. Ao longo dessas linhas quebradas, limitantes da superfície de ruptura no 1º estágio, algumas fissuras começam a se formar. As superfícies laterais a esta área (FAEG) não estão afetadas durante o 1º estágio.

Quanto mais baixa a tensão normal nas superfícies horizontais de estratificação, a relação $\tau_{\max}/\sigma$ permanecerá alta, o que garante um ângulo de resistência ao cisalhamento na superfície horizontal $\overline{AE}$.

Exemplo: Suponhamos que a tensão máxima de cisalhamento seja 20 toneladas por cm^2 ($20 \text{ t}^*/\text{cm}^2$).

$$\tau = \sigma + C. \operatorname{tg} \theta$$

$$20 = \sqrt{P} + C \cdot \operatorname{tg} \emptyset$$

Diminuindo até zero vem:

$$20 = 0 + C \cdot \operatorname{tg} \emptyset$$

$$\text{Fazendo-se } C=1 \therefore 20 = 0 + 1 \cdot \operatorname{tg} \emptyset$$

Substituindo-se os valores numéricos tem-se:

$$\text{Para } = 0 \therefore \emptyset = \operatorname{arctg} 20 \text{ a } 87^\circ$$

$$\text{Para } = 10 \therefore \emptyset = \operatorname{arctg} 10 = 84^\circ$$

$$\text{Para } = 20 \therefore \emptyset = \operatorname{arctg} 0 = 0^\circ$$

Notar que $\tau_{\max} = \text{constante}$

Quanto menor for a tensão que se iguala às cargas unitárias geradas pelo peso da barragem ou seja $\sqrt{P} = q$, será $\emptyset$, e maior será a relação $\tau_{\max} / \sqrt{P}$.

Durante o primeiro estágio existe uma completa ausência de qualquer cisalhamento notável. As deformações são devidas, principalmente, à compressibilidade das rochas. Nesta primeira etapa a resistência ao cisalhamento não é atingida plenamente.

Estágio (II)

Ultrapassando o 1º estágio, isto é, aquele em que a resistência ao cisalhamento não tinha sido totalmente ultrapassada se tem que: com o aumento progressivo de peso, se observa que esse fenômeno é acompanhado, inicialmente, com uma quebra parcial de coesão da rocha intacta e a resistência ao longo das fissuras da superfície $\overline{AB}$. Como resultado, ocorre o cisalhamento e torna-se aparente ao longo da superfície. Em seguida, um aumento posterior no carregamento é seguido por um correspondente aumento da tensão normal, $(\sqrt{P}_n)$ ao longo da superfície $\overline{BC}$ e em consequência temos a diminuição (Fig. 1 - croquis dos sucessivos estágios de ruptura), até que, no final do 2º estágio o estado limite de equilíbrio nas superfícies de acaumamento ou aleitamento $\overline{BC}$ tenha sido alcançado e consequentemente o cisalhamento começa na superfície.

Estágio (III)

O cisalhamento está em progresso ao longo de $\overline{BC}$ e é somente agora no 3º estágio que começa a ativação da superfície $\overline{CD}$. Sua participação na ruptura inicia-se, começa a aumentar e torna-se efetivamente catastrófica.

Consideráveis deformações devidas ao cisalhamento deve

rão surgir antes que a zona $\overline{CD}$ se manifeste e desempenhe seu papel. Dependendo do sistema de juntas (Sheet Joints) do maciço rochoso, do número e extensão das diáclases, a ativação da resistência na parte $\overline{CD}$ será provocada também por deformações ao longo da superfície $\overline{BC}$ a qual corresponde à relação $\tau_{\max}/\sqrt{\sigma}$ ou aqueles que correspondem ao $\tau_{ult}/\sqrt{\sigma}$. Contudo esta relação pode ser consideravelmente menor do que a resistência máxima ao cisalhamento. Deslocamentos de blocos e mudanças na posição de inclinação das camadas podem facilmente ocorrer na parte $\overline{CD}$ mostrando anomalias em relação à baixa tensão. Somente, então, há possibilidade de ocorrer cisalhamento em $\overline{CD}$. A resistência ao cisalhamento na zona $\overline{CD}$ em cada caso terá em um valor definitivo. A perda em questão pode eventualmente provar ser consideravelmente maior do que a relação de aumento na resistência ao cisalhamento na parte $\overline{CD}$. Além do mais, as deformações neste estágio, serão, também, consideráveis, e, conseqüentemente, menos favorável. No caso a resistência ao cisalhamento crítico na ruptura pode ser a única que se obtém no fim do estágio.

O processo de ruptura seguiria com uma taxa de deformação qualquer, um curso diferente, se não fosse reduzido a zero. Se as tensões fossem relativamente baixas, a ruptura tomaria no todo o mesmo curso, exceto aquele em que as deformações não seriam tão grandes e estariam, da mesma forma, existindo em potencial, ao longo de toda superfície cisalhante dentro dos limites dos valores máximos de resistência ao cisalhamento. Assim, a própria capacidade de suporte crítica seria também majorada, daí a grande importância da consolidação da rocha sob estruturas análogas.

De modo muito similar deve ser investigado cada problema de capacidade de suporte num meio descontínuo. Se existe na superfície de aleitamento (acamadamento), uma camada (lâmina) de material argiloso (plástico), a capacidade de suporte decresceria de uma boa quantidade em comparação com o caso em que existia uma grande rugosidade superficial e a rocha seja dura.

No gráfico (Fig. 2 - Gráfico Esquemático reunindo curvas obtidas a partir das várias tensões admitidas), são dadas diferentes resistências ao cisalhamento obtidas com diferentes deformações cisalhantes para distintas superfícies de descontinuidade investigadas, "a priori"; com teste de cisalhamento direto. Há também uma envoltória de Mohr para uma rocha matriz obtida em teste triaxial. A envoltória de Mohr é dada na curva 1; a linha 2 representa a resistência ao cisalhamento inicial da rocha obtida com teste de cisalhamento direto; as linhas 3 e 5 representam linhas de resis

tência, iniciais, finais e residuais são representadas para diferentes valores de tensões normais. A linha 6 representa a resistência ao cisalhamento para as argilas entre os planos de acamamento. A curva (7) e o círculo de Mohr, para a tração. A curva (8) é representativa da compressão pura.

CONCLUSÃO

Associando o fato de que a resistência ao cisalhamento depende largamente das deformações cizalhantes e pressões normais, e que a superfície de deslizamento não é perfeitamente definida, acompanhando-se as superfícies de descontinuidades com resistência ao cisalhamento mais baixas, dever-se-ia efetuar cálculos de estabilidade ou capacidade de suporte levando em conta o que se segue: 1) superfícies de descontinuidades deveriam ser examinadas nos cálculos de capacidade de carga, tentando compatibilizar a superfície de deslizamento com as mais baixas resistências cizalhantes, visando encontrar as condições mais desfavoráveis para a superfície de deslizamento.

2) O tamanho real das deformações cizalhantes sob a estrutura deve ser calculado e estimar-se um valor provável.

3) A verdadeira tensão normal ao longo da superfície examinada de deslizamento deve ser calculada ou se não for possível, pelo menos, estimada.

4) Com base nas deformações cizalhantes e a tensão normal calculada (ou estimada) deve-se calcular os valores correspondentes da resistência ao cisalhamento, (Fig. 2 - Gráfico Esquemático reunindo curvas obtidas a partir das várias tensões admitidas).

BIBLIOGRAFIA

- ANDRADE, F. A. (1976) - Análise da Instabilidade nas Cavidades Subterrâneas, in Revista da Escola de Minas, Ouro Preto - MG. Vol. XXXIII 12 - 20 il.
- RUIZ, M. D., (1969) Problemas relacionados com a barragem de Barra Bonita, Boletim, São Paulo, Instituto de Pesquisas Tecnológicas da Universidade de São Paulo.
- TALOBRE, J. A., (1967) La mécanique des roches et ses applications, Paris, Dunod, 476 p. il.

Figura 2 — GRÁFICO ESQUEMÁTICO
REUNINDO CURVAS OBTIDAS A
PARTIR DAS VÁRIAS TENSÕES
ADMITIDAS.



