

COMPORTAMENTO E SEGURANÇA DAS FUNDAÇÕES DAS BARRAGENS DE BETÃO* (II PARTE)

Analyses and Design of the Foundations of Concrete dams

por
MANUEL ROCHA**

4 – FUNDAÇÃO IDEALIZADA COMO UM MEIO CONTÍNUO INTERCEPTADO POR DADAS DESCONTINUIDADES

4.1 – *Idealização como meio contínuo com dadas descontinuidades* – Ao analisar o comportamento de fundações em maciços rochosos o mecanismo de rotura geral que em regra interessa considerar consiste no deslocamento de volume do maciço limitado por descontinuidades. Estas podem ser diaclases, superfícies de xistosidade, superfícies de estratificação, contactos entre derrames, falhas, etc. Camadas de pequena espessura do maciço são por vezes assimiladas a descontinuidades, quando não há interesse em analisar a distribuição de tensões na camada e existe a possibilidade de caracterizar o comportamento mecânico da camada nos mesmos termos de uma descontinuidade. Na maior parte dos casos só se põe a necessidade de analisar a rotura geral quando estão em jogo feições contínuas, de baixa resistência. Em maciços constituídos por rochas de baixa resistência pode ser necessário considerar descontinuidades cuja rotura implica a rotura da rocha, Fig. 6, o que acarreta as dificuldades de caracterização referidas no art. 2.4.

* Relato Geral do tema 3 do Simpósio Internacional sobre a Mecânica das Rochas Aplicada às Fundações de Barragens, Rio de Janeiro, Setembro de 1978.

** Presidente do Conselho Superior dos Laboratórios de Engenharia Civil; Professor de Mecânica das Rochas, Instituto Superior Técnico, Lisboa.

Nas condições de serviço podem também verificar-se roturas locais, ao longo das descontinuidades do maciço.

Nota-se que a existência de descontinuidades facilita a solução dos problemas da rotura dos maciços rochosos no respeitante à previsão da forma e localização das superfícies de rotura. Esta previsão constitui uma das dificuldades básicas do estudo da rotura de qualquer sólido.

Ao analisar o comportamento de maciços rochosos além do estado de comportamento como um meio contínuo (art. 3.1), a idealização com mais interesse prático é a de um meio contínuo, isotrópico ou não, interceptado por um número limitado de descontinuidades com comportamento não linear, ao longo das quais pode ocorrer escorregamento ou abertura. São raras as condições em que se justifica a idealização não linear do meio contínuo.

No art. 5 é tratado o caso de a posição e a forma das superfícies de rotura não serem conhecidas “à priori”.

A Fig. 2 apresenta situações típicas no respeitante à posição de superfícies de rotura, em equilíbrio bidimensional. A rotura pode dar-se ao longo de uma só descontinuidade, tal como AB das Figs. 2a e 2b; a Fig. 2c diz respeito à situação muito comum na qual a rotura ao longo de uma descontinuidade BC pertencente a uma família com orientação desfavorável acarreta o desenvolvimento de tracções noutra família, dando origem à rotura AB pois a resistência à tracção dos maciços rochosos é em regra desprezada; a rotura pode ainda ter lugar ao longo de duas descontinuidades sob compressão tais como AB e BC da Fig. 2d, BC e CD da Fig. 2e e AB e CD da Fig. 2f, onde BC se supõe ser uma junta. No caso da Fig. 2d, se a família de descontinuidades correspondente a BC não existisse podiam ocorrer deslocamentos ao longo de AB mas não a rotura geral do maciço no sentido de um volume se poder destacar. O destaque de um volume exigiria rotura através do próprio maciço, problema que será discutido no art. 5. O mesmo se diz no respeitante ao caso da Fig. 2e se não existir a família de descontinuidades correspondente a CD.

Quanto ao comportamento mecânico das descontinuidades, a sua deformabilidade e condições de rotura devem ser caracterizadas mediante ensaios de corte directo, conforme foi referido no art. 2.4.

Na idealização dos maciços rochosos considerada neste artigo, uma das questões fundamentais que se levanta é a definição das superfícies de rotura a considerar, entre as descontinuidades do maciço para as quais a análise

como meio contínuo, art. 3, tenha revelado a possibilidade de escorregamento em maior ou menor extensão.

No caso de descontinuidades em número limitado mas importantes tais como falhas, diaclases contínuas de especial relevância e camadas fracas, não é em regra difícil seleccionar as descontinuidades que na idealização devem ser consideradas como superfícies de rotura.

Contudo, se a rotura pode ocorrer através de descontinuidades pertencentes a família com espaçamento de valor comum, por vezes centimétrico como nas formações xistosas, levanta-se o problema de definir o número de descontinuidades a ter em consideração na idealização como superfícies de rotura. Tendo em mente a heterogeneidade habitual dos maciços rochosos e, além disso, o facto de a redução do número de superfícies através das quais a rotura ocorre, dentro de uma família de descontinuidades, conduzir a um incremento das tensões tangenciais nas outras superfícies, conclui-se que deve ser considerado um pequeno número de superfícies de rotura. Resulta, por razões de segurança, que é em regra aconselhável considerar, para cada família, a propagação da rotura ao longo de uma só superfície, passando pelo ponto onde o estado de tensão atinge em primeiro lugar a condição de rotura, ao serem aplicadas as solicitações.

Assim, nos casos da Fig. 2, exceptuado o da Fig. 2e, as descontinuidades representadas a traço mais forte são as que devem ser consideradas, desde que seja suposto que não pode dar-se rotura através da barragem. Devido ao peso do maciço a segurança é em regra maior no respeitante a descontinuidades situadas a maior profundidade, supondo que as propriedades mecânicas se mantêm. No caso da Fig. 2e as descontinuidades BC e CD foram consideradas como superfícies de rotura por se ter suposto que eram as mais relevantes, dentro das respectivas famílias. Note-se que pode ter lugar a consideração de superfícies de rotura interceptando a barragem, nomeadamente no caso de barragens aligeiradas, podendo a resistência à tracção do betão ser ou não considerada.

Em casos especiais pode ter interesse analisar a evolução da situação quando se considera a rotura num número crescente de descontinuidades, dentro da família, nas quais o critério da rotura pontual não seja satisfeito. Se a rotura implicar a conjugação de descontinuidades pertencendo a mais de uma família, haverá que considerar analogamente sucessivas conjugações de descontinuidades.

A consideração, bastante comum, em métodos analíticos, de mecanismos de rotura em que se dá a plastificação contínua de extensos volumes dos maciços rochosos não é pertinente, em virtude de tal implicar deformações que determinam roturas localizadas, ao longo de dadas superfícies, fenómeno este acentuado pela heterogeneidade.

No art. 2.4. foi discutido na generalidade o problema dos caminhos de enfraquecimento a adoptar na análise da segurança pelo critério da rotura global. Na idealização em consideração é em regra aconselhável atribuir ao meio contínuo propriedades elásticas, por vezes médias, e considerar a ocorrência de descontinuidades com características mecânicas sucessivamente mais fracas. Em termos gerais haverá a considerar descontinuidades com resistência decrescente, e (ou) extensão crescente, e (ou) deformabilidade variando em sentido adverso. Como foi referido no art. 2.4, cada problema exige uma apreciação específica do processo de enfraquecimento a adoptar, o qual deve corresponder, por um lado, à situação cuja ocorrência seja mais provável, considerando a natureza geológica do maciço rochoso, e, por outro lado, mais desfavorável no respeitante ao comportamento estrutural.

4.2 – *Equilíbrios bidimensionais* – O método dos elementos finitos é bem adequado à solução de problemas bidimensionais, dentro da idealização em consideração, quer se trate da análise do comportamento em condições de serviço, para as quais ocorrerá quando muito rotura limitada, quer se trate do dimensionamento pelo critério da rotura global.

Além da atribuição de propriedades elásticas aos materiais da barragem, a caracterização da estrutura implica a atribuição de valores às constantes elásticas do maciço bem como aos parâmetros de deformabilidade e de resistência das descontinuidades pelas quais se preveja a ocorrência de rotura.

Rotura ao longo de descontinuidade plana – Considere-se a situação na qual a rotura pode somente ocorrer ao longo de uma descontinuidade plana, tal como AB na Fig. 2a e 2b, e BC na Fig. 2c. O método dos elementos finitos, por um processo iterativo, sob a acção de solicitações crescentes, permite determinar o progresso da rotura, isto é, determinar não só os deslocamentos tangenciais δ_T , e portanto a extensão da descontinuidade em que, a rotura ocorre, mas também a distribuição de tensões, quer o comportamento seja considerado elastoplástico ou mais complexo, Fig. 3. Nota-se que a extensão da zona plastificada ao longo de uma descontinuidade cresce, em regra, com

o valor do coeficiente de rigidez tangencial k_T . A análise em consideração permite a determinação da abertura sofrida por descontinuidades sujeitas a tracção, tal como AB na Fig. 2c.

O conhecimento dos deslocamentos tangenciais bem como das aberturas de fendas de tracção tem, por exemplo, interesse na interpretação de resultados de observações e na apreciação do risco de rotura de cortinas de impermeabilização.

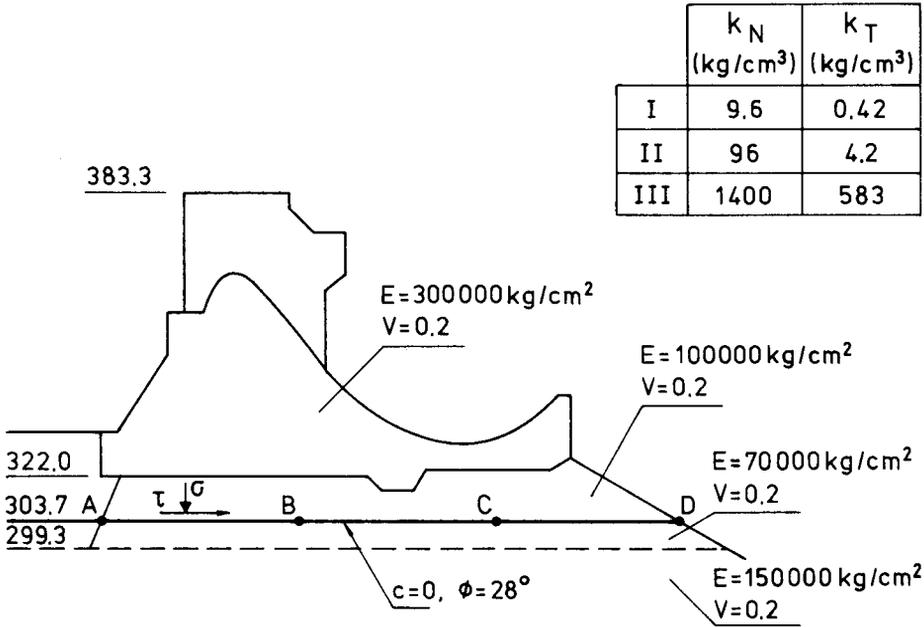


Fig. 10

Apresentam-se a seguir resultados do estudo de uma barragem gravidade, estruturalmente integrada com o revestimento de uma bacia de dissipação, tendo como fundação um maciço rochoso basáltico interceptado por uma falha horizontal AD, Fig. 10 (Pedro et al., 1975). Estão indicados na figura os valores das constantes elásticas adoptadas para o betão e para as três camadas que constituem a fundação. Com vista a investigar a sensibilidade de comportamento estrutural relativamente à rigidez da descontinuidade foram consideradas as três hipóteses indicadas na Fig. 10 no respeitante aos valores de k_N e k_T , alguns

dos quais foram obtidos em ensaios *in situ*. Aos valores de k das hipóteses I, II e III correspondem os módulos de elasticidade $52,5 \text{ kg/cm}^2$, 525 kg/cm^2 e 70000 kg/cm^2 , respectivamente. O comportamento da falha foi suposto elastoplástico, com os parâmetros de resistência $\bar{c} = 0$ e $\bar{\Phi} = 28^\circ$.

Cálculos pelo método dos elementos finitos conduziram às distribuições das tensões σ e τ ao longo da descontinuidade indicadas na Fig. 11. Enquanto na hipótese III a condição $\tau < \sigma \text{tg } 28^\circ = 0,53$ é satisfeita, nas outras duas hipóteses esta condição não é respeitada no trecho de jusante da descontinuidade. Esta plastificação é devida ao baixo valor da tensão normal, tendo-se desenvolvido neste trecho a tensão tangencial $\tau = \sigma \text{tg } 28^\circ$. Os resultados da Fig. 11 mostram que a distribuição das tensões normais é pouco influenciada pela deformabilidade da descontinuidade e que a distribuição das tensões tangenciais tende para uniforme quando a deformabilidade tangencial aumenta, excepto no trecho plastificado. É importante frisar este resultado: no domínio elástico, a tensão tangencial em cada ponto de uma descontinuidade depende somente do deslocamento tangencial e portanto se o maciço rochoso é suficientemente rígido a distribuição das tensões tangenciais, em equilíbrio bidimensional, tende para uniforme.

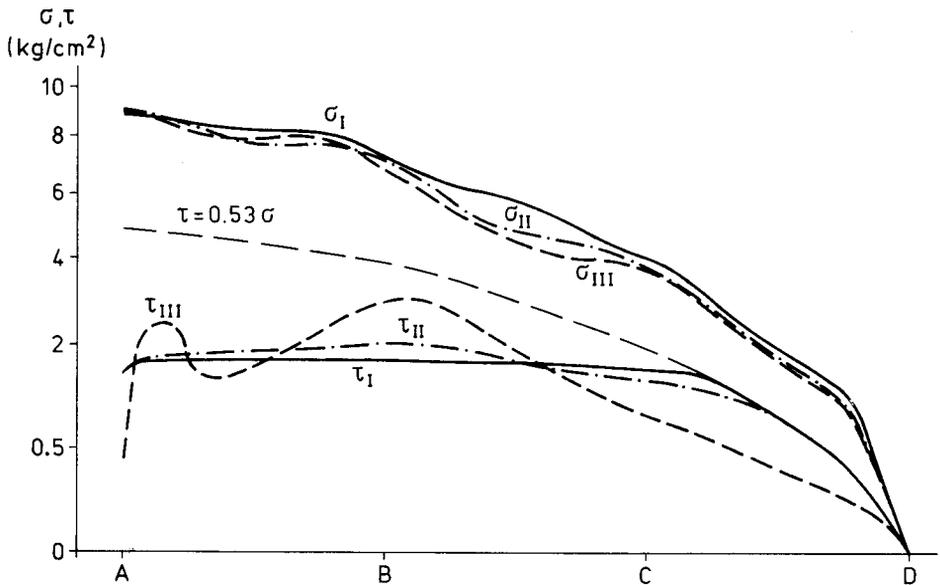


Fig. 11

As conclusões que acabam de ser apresentadas acerca da influência da deformabilidade das descontinuidades tem grande interesse em virtude da sua natureza geral.

As distribuições dos deslocamentos tangenciais δ_T ao longo da falha são apresentadas na Fig. 12. Como era de esperar, quando a deformabilidade aumenta os deslocamentos tendem para a uniformidade, mesmo nos trechos plastificados,

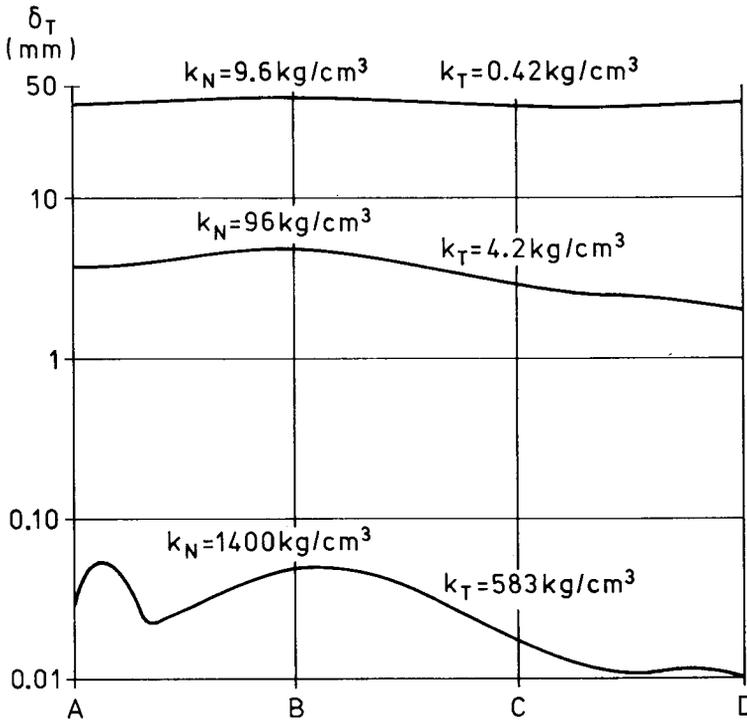


Fig. 12

enquanto na hipótese III eles variam bastante, o que está associado à variabilidade das tensões tangenciais. Além disso, a grandeza dos deslocamentos varia muito conforme a deformabilidade tangencial.

Vai passar a discutir-se a propagação da rotura ao longo de uma descontinuidade plana, tal como nos três primeiros casos da Fig. 2, quando se considera processo de enfraquecimento, admitindo que a descontinuidade exhibe

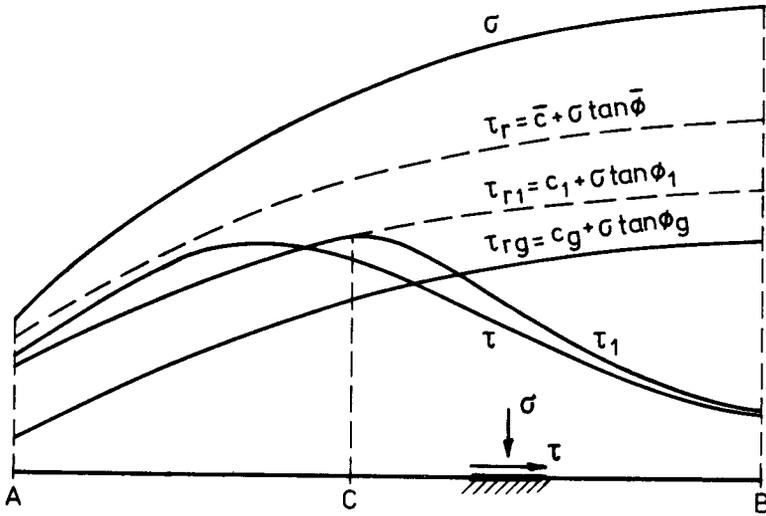


Fig. 13

comportamento elastoplástico e que a solicitação nela actuante, isto é, os esforços normal e tangencial, N e T , se mantêm constantes.

Supomos que inicialmente os parâmetros de resistência têm valores médios, \bar{c} e $\bar{\Phi}$, e que as distribuições da tensão efectiva normal σ e da tensão tangencial τ são as indicadas na Fig. 13, admitindo-se que não se verifica início de rotura, isto é, que $\tau < \tau_r$, sendo $\tau_r = \bar{c} + \sigma \operatorname{tg} \bar{\Phi}$. No processo de enfraquecimento os valores da coesão e do ângulo de atrito diminuirão, podendo também verificar-se ou não redução de k_N e k_T . Suponhamos que para os valores c_1 , Φ_1 dos parâmetros de resistência a plastificação se estende ao trecho AC da descontinuidade, Fig. 13. Então as tensões tangenciais τ_1 terão a distribuição dada por $\bar{\tau}_{r1} = c_1 + \sigma \operatorname{tg} \Phi_1$ no trecho plastificado, e no trecho restante CB terá de ser $\tau_1 > \bar{\tau}$, visto T ser constante. Como a rotura ocorre numa só descontinuidade, as áreas limitadas pelas curvas de distribuição de τ e $\bar{\tau}_1$ e pelo eixo das abcissas têm de ser iguais à força tangencial T actuante na descontinuidade.

$$T = \int_{AB} \tau \, dS = \int_{AB} \tau_1 \, dS$$

Nos casos das Fig. 2d, 2e e 2f esta condição já não se verifica, para cada descontinuidade em jogo, visto que o processo de enfraquecimento acarreta trans-

ferência de forças de uma descontinuidade para a outra. Foi admitido na Fig. 13 que a distribuição de σ não é influenciada pelo enfraquecimento, tal como acontece frequentemente, notando-se que as conclusões que vão ser tiradas subsistem mesmo quando tal não se verifica. Prosseguindo o enfraquecimento, a plastificação propagar-se-á a toda a superfície de rotura, de tal modo que, se c_g e Φ_g forem os valores dos parâmetros de resistência para as quais a rotura global tem lugar, a tensão tangencial em cada ponto terá o valor

$$\tau_{rg} = c_g + \sigma \operatorname{tg} \Phi_g$$

e, portanto,

$$T = \int_{AB} (c_g + \sigma \operatorname{tg} \Phi_g) dS$$

isto é,

$$T = c_g S + N \operatorname{tg} \Phi_g \quad (4.2-1)$$

onde S designa a área da superfície de rotura.

Conclui-se portanto que a rotura global de uma superfície com comportamento elastoplástico só depende dos parâmetros de resistência c_g e Φ_g , não dependendo nem dos coeficientes de rigidez nem dos valores dos deslocamentos δ_T , uma vez que estes sejam inferiores a δ_{TQ} , Fig. 3b. Além disso, a Eq. 4.2-1 mostra que a rotura geral não depende da distribuição das tensões σ , τ mas somente dos seus valores integrais, N e T, donde resulta que a verificação da segurança em relação à rotura pode ser feita simplesmente mediante condição de equilíbrio global.

Uma vez dados N e T, a Eq. 4.2-1 permite determinar pares de valores c_g , Φ_g para os quais se verificará a rotura e mesmo os próprios valores se o valor de um deles for conhecido ou se for considerada relação entre c_g e Φ_g .

Se N e T forem os valores das sollicitações de cálculo, os coeficientes de segurança, Eq. 2.4-1 e 2.4-2, serão dados por

$$n_\Phi = \frac{\operatorname{tg} \bar{\Phi}}{\operatorname{tg} \Phi_s} \quad (4.2-2)$$

$$e \quad n_c = \frac{\bar{c}}{c_s}$$

designando, como atrás, por Φ_s e c_s os valores dos parâmetros de resistência para os quais ocorre a rotura sob a acção das solicitações de cálculo.

Tal como foi referido no art. 2.3 ao ser comentada a Fig. 1, os coeficientes de segurança n_c e n_Φ corresponderão a um quantilho de rotura igual ao quantilho de ocorrência de valores da resistência ao corte da descontinuidade inferiores a $c_s + \sigma \text{tg } \Phi_s$.

Se for admitido que o processo de enfraquecimento é $c = c(\Phi)$, virá

$$T = c(\Phi_s) S + N \text{tg } \Phi_s$$

isto é, o valor de Φ_s será determinado, tomando os coeficientes de segurança os valores

$$n_\Phi = \frac{\text{tg } \bar{\Phi}}{\text{tg } \Phi_s}$$

$$n_c = \frac{c(\bar{\Phi})}{c(\Phi_s)}$$

Da Eq. 4.2-1 resulta

$$T = \frac{\bar{c}}{n_c} S + N \frac{\text{tg } \bar{\Phi}}{n_\Phi}$$

e, se $n_c = n_\Phi = n$,

$$T = \frac{\bar{c}S + N \text{tg } \bar{\Phi}}{n}$$

A expressão $\bar{c} S + N \text{tg } \bar{\Phi}$ representa a força tangencial T_r que provocaria a rotura da descontinuidade, sob N , quando os parâmetros de resistência tomem os valores médios, isto é,

$$n = \frac{T_r}{T}$$

Se, como é frequente, for desejado determinar a segurança relativamente a escorregamento através de uma descontinuidade horizontal, esta expressão mostra que, se a face de montante da barragem for vertical, o coeficiente n é igual à relação entre o valor da pressão hidrostática que determinaria a rotura e o valor adoptado no projecto. Portanto, neste caso particular, o coeficiente de segurança respeitante ao enfraquecimento do material da fun-

dação é igual ao coeficiente de majoração que seria necessário aplicar ao valor de projecto da pressão hidrostática para se dar a rotura global.

Vai agora ser considerado o caso de a superfície de rotura exibir um comportamento que envolve a consideração de resistências de pico e residual, Fig. 3b. A caracterização deste comportamento é feita através dos parâmetros k_N , k_T , c , Φ , c' e Φ' , e ainda dos parâmetros que definem os valores de δ_T correspondentes aos pontos Q e R da figura, como foi referido no art. 2.4.

O método dos elementos finitos permite, tal como no caso do comportamento elastoplástico e sem apreciável acréscimo de trabalho de cálculo, seguir a propagação de possível rotura da descontinuidade quando as solicitações aumentam.

Analisemos a evolução dos fenómenos quando se considera enfraquecimento da descontinuidade com vista à apreciação da segurança pelo critério da resistência global. Pode, por exemplo, supor-se que no processo de enfraquecimento os diversos parâmetros tomam valores função de Φ , nomeadamente os outros parâmetros de resistência c , c' e Φ' .

Admite-se que sob a acção das solicitações de projecto as tensões σ e τ na descontinuidade AB são as indicadas na Fig. 14, supondo-se que inicialmente não ocorre plastificação, isto é, que τ é menor que $\tau_T = \bar{c} + \sigma \operatorname{tg} \bar{\Phi}$, em todos os pontos. Quando o enfraquecimento progressivo tem lugar a resistência de pico será alcançada num certo ponto e posteriormente a resistência residual instalar-se-á num trecho AC da descontinuidade e a resistência de pico num trecho DE. Sejam c_1 , Φ_1 e c'_1 , Φ'_1 os valores dos parâmetros de resistência para os quais esta situação ocorre. A correspondente distribuição da tensão tangencial τ_1 , Fig. 14, tomará portanto nos trechos AC e DE os valores da resistência residual $\tau'_{r1} = c'_1 + \sigma \operatorname{tg} \Phi'_1$ e da resistência de pico $\tau_{r1} = c_1 + \sigma \operatorname{tg} \Phi_1$, respectivamente, e no trecho EB valores $\tau_1 > \tau$. Tal como no caso elastoplástico, as áreas limitadas pelas curvas ζ e ζ_1 , e pelo eixo das abcissas devem ser iguais. Finalmente, com a evolução do enfraquecimento, a plastificação progride e para certos valores c_g e Φ_g e c'_g , Φ'_g deixa de se verificar equilíbrio, isto é, ocorre a rotura global. Nota-se que a perda de equilíbrio pode dar-se para uma distribuição das tensões tangenciais do tipo indicado na figura ou para uma distribuição na qual a plastificação se estende com a resistência de pico até ao limite B da descontinuidade. Uma situação extrema é aquela na qual a resistência de pico se desenvolve em toda a extensão AB da descontinuidade, o que depende da posição do ponto Q da Fig. 3b, da

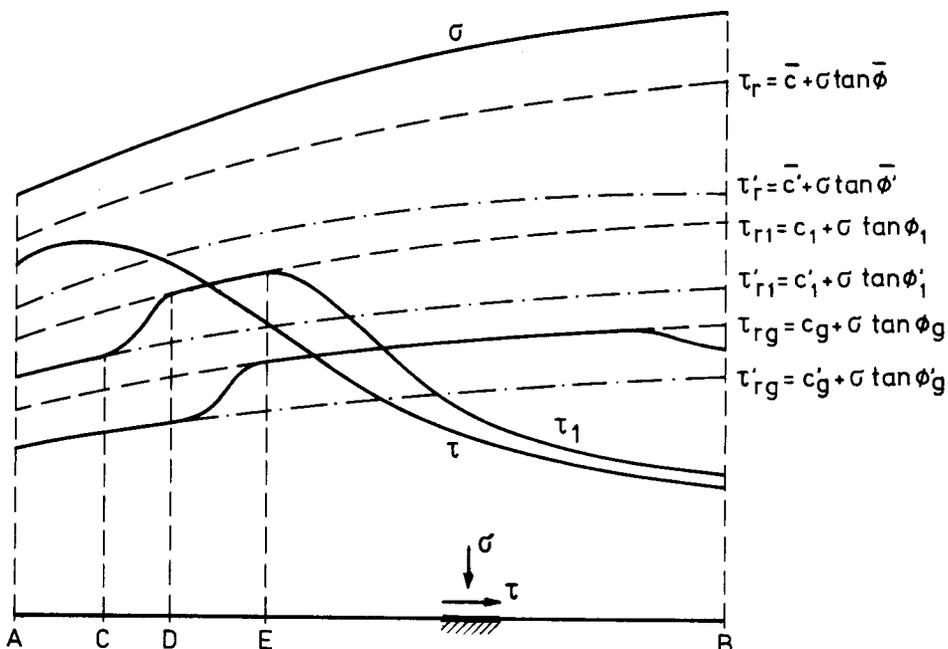


Fig. 14

deformabilidade relativa do maciço rochoso e da descontinuidade, e ainda das solicitações. Outra situação extrema corresponde à instalação da resistência residual ao longo de AB.

Os coeficientes de segurança terão os seguintes valores

$$n_{\phi} = \frac{\operatorname{tg} \bar{\phi}}{\operatorname{tg} \phi_s} \quad n'_{\phi} = \frac{\operatorname{tg} \bar{\phi}'}{\operatorname{tg} \phi'_s}$$

$$n_c = \frac{\bar{c}}{c_s} \quad n'_c = \frac{\bar{c}'}{c'_s}$$

O método dos elementos finitos permite simular o enfraquecimento e portanto determinar o material para o qual ocorre a rotura global. Será necessário considerar sucessivos materiais e determinar, para cada um, por interacção, os campos de tensão e deformação correspondentes à estabilização da rotura da descontinuidade, sob as solicitações de projecto. O facto de os cálculos serem longos juntamente com as circunstâncias referidas no art. 2.4, nomeadamente

a larga margem de indeterminação do processo de enfraquecimento, conduzem a que seja em regra suficiente apreciar a segurança admitindo comportamento elastoplástico, tanto mais que não será então necessário considerar a distribuição de tensões.

Rotura ao longo de duas descontinuidades planas – Vai ser considerado o caso de a rotura se dar ao longo de superfície constituída por duas descontinuidades planas, tal como nas Fig. 15 e 16.

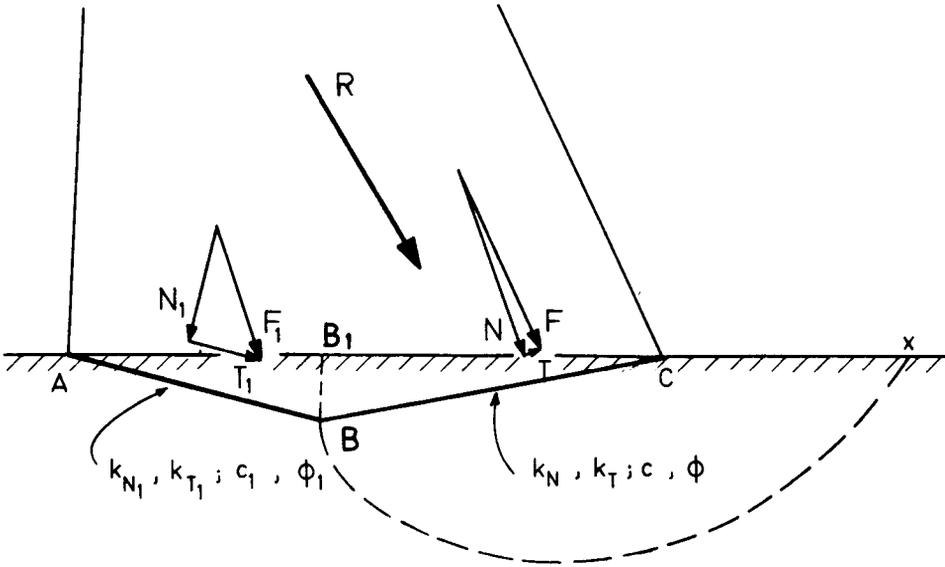


Fig. 15

Na prática o estudo de problemas deste tipo é em regra feito seguindo metodologia análoga à do método das fatias usado no projecto de taludes. Isto é, admite-se a plastificação simultânea das duas superfícies e supõe-se conhecida a direcção da força de interacção entre os dois volumes ABB_1 e B_1BC do maciço. Uma vez admitidas estas hipóteses é possível determinar um coeficiente de segurança n , assim como a força de interacção, quando se aceite que em ambas as superfícies é $n_c = n_\phi = n$ ou que existem relações entre os coeficientes de segurança de modo a um só ser independente.

Esta via não permite ter em consideração a real distribuição de tensões, e portanto dos esforços normais e tangenciais na superfície de rotura. Essa

distribuição depende da deformabilidade do maciço e das descontinuidades, variando conseqüentemente no decorrer do processo de enfraquecimento. A importância que pode assumir essa redistribuição é bem clara no caso da Fig. 16 quando a descontinuidade BC se encontra afastada da barragem, pois o estado de tensão desta descontinuidade só será influenciada pela pressão hidrostática actuante na barragem quando ocorrer plastificação da descontinuidade AB.

Quanto à aplicação do critério de rotura global, será considerado em primeiro lugar o problema da Fig. 15, na hipótese de as descontinuidades apresentarem comportamento elastoplástico, com características k_N , k_T , c , Φ e k_{N_1} , k_{T_1} , c_1 , Φ_1 . Será admitido que no processo de enfraquecimento as características de ambas as descontinuidades evoluem simultaneamente e que os valores dos parâmetros são, por exemplo, função de Φ . Sejam R a resultante das sollicitações que actuam acima da superfície ABC, incluído o efeito da percolação, F e F_1 as forças actuantes nas superfícies AB e BC, respectivamente, N , T e N_1 , T_1 as componentes normal e tangencial destas forças. Como foi referido no art. 2.4 não tem lugar a consideração do estado de tensão inicial do maciço.

Quando se dá o enfraquecimento, mantendo R constante, a grandeza de T_1 diminuirá, em virtude de transferência de forças para BC, e a direcção de F variará em sentido favorável a escorregamento. Neste processo os deslocamentos tangenciais em ambas as descontinuidades aumentam, dando origem a abertura progressiva de AB, a partir do ponto B.

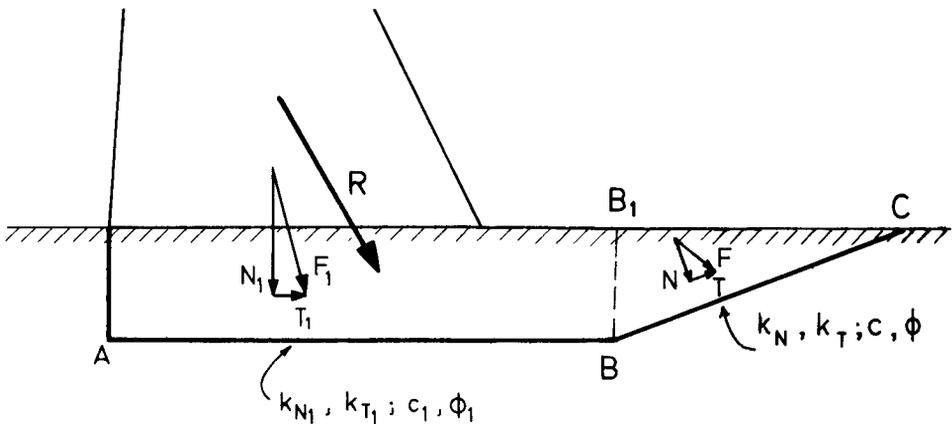


Fig. 16

Designando os valores dos parâmetros para os quais se verifique a rotura geral por c_s, Φ_s e c_{s1}, Φ_{s1} , o escorregamento ao longo de ABC implica a verificação simultânea das duas relações

$$T = c_s S + N \operatorname{tg} \Phi_s$$

e

$$T_1 = c_{s1} S_1 + N_1 \operatorname{tg} \Phi_{s1},$$

uma vez que se considera o comportamento como elastoplástico. Além disso há a considerar duas equações exprimindo que a soma das quatro forças constantes das relações acima deve ser igual à resultante R. Mesmo quando se supõe que somente um dos parâmetros de resistência, por exemplo Φ_s , é independente, como há 5 incógnitas não é possível determinar Φ_s nem as quatro forças.

Portanto no caso em consideração a determinação dos coeficientes de segurança exige o conhecimento do estado de tensão, o qual depende da deformabilidade do maciço rochoso, quer para comportamento elastoplástico quer quando haja a considerar resistências de pico e residual. A determinação do estado de tensão, para sucessivos estágios de enfraquecimento, pode ser feita pelo método dos elementos finitos tal como no caso de uma só descontinuidade, não implicando, em princípio, maior volume de trabalho.

As considerações que acabam de ser feitas são também aplicáveis ao problema da Fig. 16.

Dependendo da geometria e da deformabilidade do sistema, no caso da Fig. 15 há a possibilidade de, para um dado valor de Φ , se verificar abertura de AB, o que acarreta a aplicação de força R somente em BC. A partir deste momento passa a estar só em jogo uma descontinuidade, caindo-se no caso anterior.

Portanto, o coeficiente n_Φ terá o valor $n_\Phi = \frac{\operatorname{tg} \bar{\Phi}}{\operatorname{tg} \Phi_s}$, onde $\operatorname{tg} \Phi_s$ é dado por $T = c(\Phi_s) S + N \operatorname{tg} \Phi_s$ sendo N e T as componentes normal e tangencial de R em relação a BC. Se é considerado comportamento com resistências residual e de pico já será necessário conhecer a distribuição de tensões, conforme discutido atrás. Pode ser necessário analisar o risco de a actuação de R somente em BC causar rotura através do maciço rochoso, ao longo de superfície tal como BX.

Considere-se o caso de uma barragem e uma central a jusante constituírem uma unidade estrutural, Fig. 2f. Supondo que existe uma família de descontinuidades horizontais e que se deseja analisar a segurança em relação à rotura global, haverá em regra que considerar o enfraquecimento simultâneo das super-

fícies AB e CD, às quais poderão ser atribuídas características diferentes; pode supor-se que não existe ligação entre a central e o maciço ao longo de BC. Tal como nos casos anteriores, visto que as forças actuando em AB e CD dependem da distribuição de tensões, o julgamento da segurança pelo critério da rotura global exige a determinação do estado de tensão da estrutura.

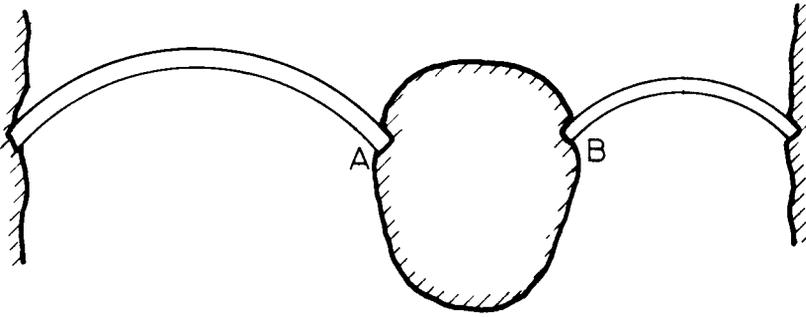
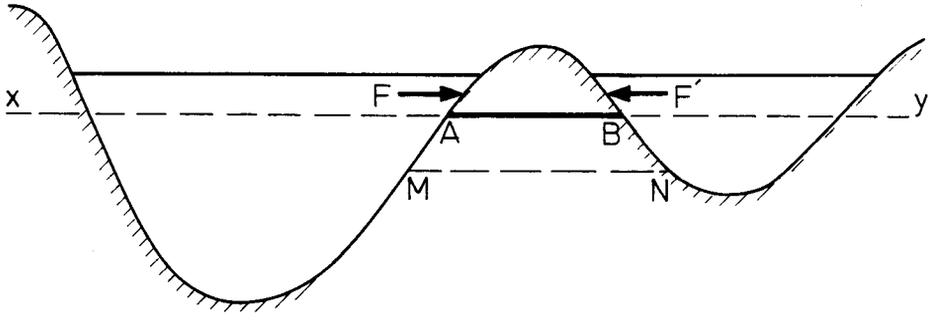
Tem-se admitido que os parâmetros que caracterizam as descontinuidades tomam valores em função de um deles, por exemplo Φ . Conforme a natureza do problema, pode ter interesse considerar diversas leis de variação, por exemplo nos casos das Figs. 15 e 16 supor que somente uma das superfícies AB e BC enfraquece e atribuir sucessivos valores dos parâmetros de resistência à outra superfície. Assim, se para AB se supõe que $c_1 = c_{1s}$ e $\Phi = \Phi_{1s}$, e se a rotura resultante de enfraquecimento de BC se dá para $c = c_s$ e $\Phi = \Phi_s$, os coeficientes de segurança terão os valores

$$n_c = \frac{\bar{c}}{c_s} \qquad n_{cl} = \frac{\bar{c}_l}{c_{1s}}$$

$$n_\Phi = \frac{\text{tg } \bar{\Phi}}{\text{tg } \Phi_s} \qquad n_{\Phi 1} = \frac{\text{tg } \Phi_1}{\text{tg } \Phi_{1s}}$$

Quanto ao uso de modelos físicos na análise dos equilíbrios bidimensionais em consideração, ele não tem em regra interesse, em face do método dos elementos finitos. Na verdade, além do custo e do tempo, é difícil no método experimental simular descontinuidades com dados parâmetros de deformabilidade e de resistência, em especial quando é necessário considerar resistências de pico e residual.

4.3 – *Equilíbrios tridimensionais* – Discutamos os casos típicos das Figs. 17, 18 e 19, dentro da idealização em consideração, isto é, de um maciço de fundação contínuo interceptado por dadas descontinuidades as quais determinam o volume do maciço que pode deslocar-se. Na Fig. 17 o volume acima da descontinuidade AB pode sofrer escorregamento quando actuado pelas solicitações aplicadas pelas duas barragens abóbada, e nas Figs. 18 e 19 os volumes limitados pelas três superfícies OAB, OBC e OCA pode também escorregar. Enquanto nos equilíbrios tridimensionais as superfícies de rotura a considerar não interceptam em regra a barragem, nos equilíbrios tridimensionais verifica-se o contrário. Levanta-se portanto o problema dos critérios a seguir na definição



Section $x y$

Fig. 17

da participação da barragem no processo de rotura, questão que será discutida no art. 5.

Um problema fundamental que se levanta é o do número e posição das superfícies de rotura a considerar na idealização, dentro das famílias de descontinuidades em jogo. Quanto ao número será aconselhável considerar uma só descontinuidade por família, pelas razões apresentadas no art. 4.1, para os equilíbrios bidimensionais, e ainda por tal ser favorável à segurança no respeitante à redistribuição de tensões entre a barragem e o maciço de fundação. No respeitante à definição da posição da descontinuidade a considerar em cada família o problema não é, em regra, tão fácil como nos equilíbrios bidimensionais, Fig. 2, pois será necessário considerar diversas hipóteses a fim de identificar a mais desfavorável à segurança.

Como se viu no art. 3.3, a análise do comportamento de barragens abóbada e de abóbadas múltiplas é muitas vezes feita por métodos que não fornecem o estado de tensão do maciço de fundação. Contudo, como estes métodos dão os valores das solicitações aplicadas à fundação pela barragem, é prática corrente julgar a segurança em relação ao deslocamento de volumes da fundação usando o critério da rotura geral e admitindo que essas solicitações se mantêm constantes. Esta simplificação conduz a resultados do lado da segurança

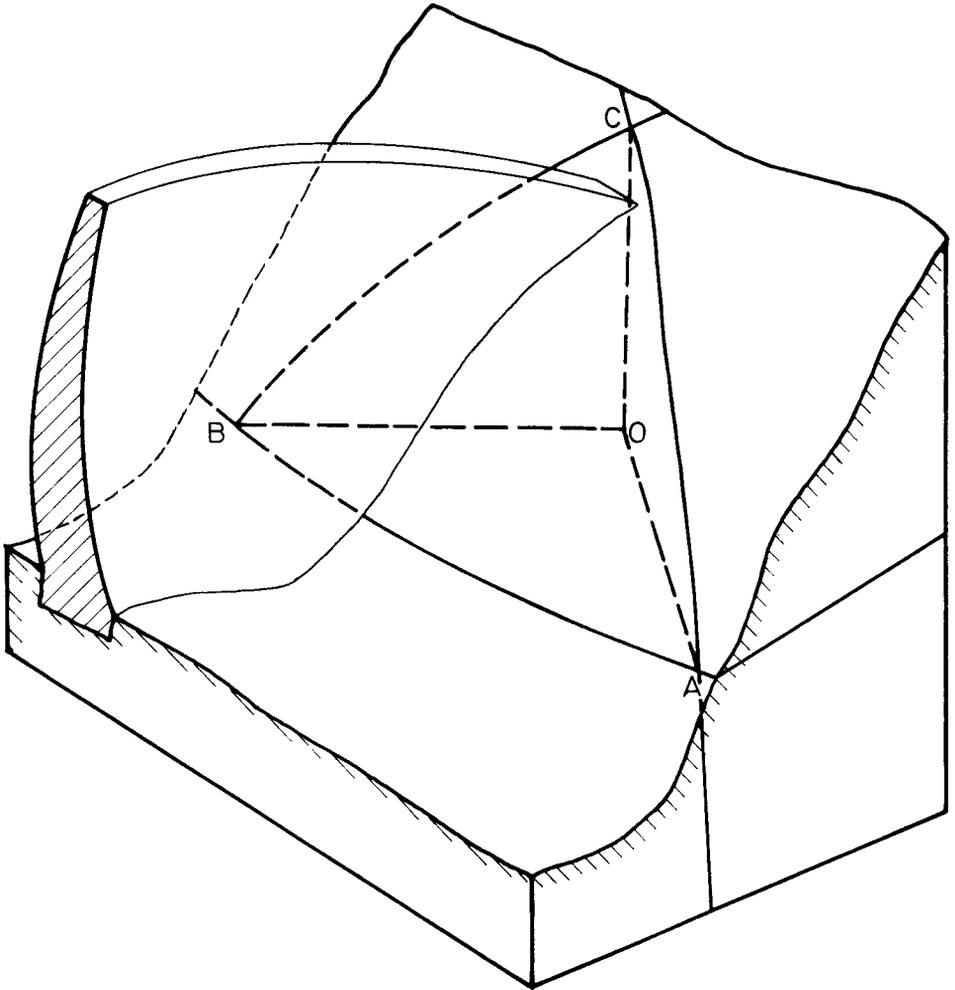


Fig. 18

pois que ao considerar-se o enfraquecimento das descontinuidades se dá redistribuição de tensões que acarreta diminuição das solicitações aplicadas pela barragem ao volume que se desloca.

Uma vez que, além de as solicitações aplicadas ao volume serem consideradas constantes, se atribua comportamento elastoplástico às descontinuidades, é fácil determinar os coeficientes de segurança nos casos das Fig. 17, 18 e 19.

No caso da Fig. 17 os coeficientes de segurança relativamente à rotura através da superfície AB serão dados pela Eq. 4.2-2, e a Eq. 4.2-1 deve ser respeitada, sendo N e T as forças normal e tangencial actuando em AB, devidas não só às forças F e F' aplicadas pelas barragens mas também ao peso do maciço e outras cargas, nomeadamente a subpressão. Admite-se que a rotura implica translação paralela a T.

Nos casos das Fig. 18 e 19 a rotura pode ter lugar ao longo de uma ou duas das três superfícies, conforme a direcção da resultante das solicitações actuantes no volume OABC. Se a rotura ocorre ao longo de uma só superfície cair-se-á na situação anteriormente considerada. Quando ocorre ao longo de duas superfícies admite-se que a aplicação de solicitações ao volume determina nas superfícies deslocamentos tangenciais que são paralelos à aresta do diedro, isto é, admite-se que são desprezáveis as componentes perpendiculares à aresta, o que será tanto mais válido quanto o deslocamento do volume for maior. Deste modo, as tensões tangenciais instaladas nas duas superfícies serão também paralelas à aresta do diedro, assim como as suas resultantes T e T₁. Uma vez atingida a plastificação completa, verificar-se-ão as relações

$$T = c S + N \operatorname{tg} \Phi$$

$$T_1 = c_1 S_1 + N_1 \operatorname{tg} \Phi_1$$

onde c, Φ e c₁, Φ_1 são os parâmetros de resistência das duas superfícies, e N e N₁ as forças normais. Portanto

$$T + T_1 = c S + c_1 S_1 + N \operatorname{tg} \Phi + N_1 \operatorname{tg} \Phi_1 \quad (4.3-1)$$

tendo T + T₁ de ser igual à componente, ao longo da aresta do diedro, da resultante R de todas as solicitações actuantes no volume. Como se admite que são nulas as componentes normais à aresta do diedro das tensões tangenciais que se desenvolvem nas duas superfícies, os valores de N e N₁ ficam determinados: são iguais às componentes de R segundo as normais às superfícies. Portanto, uma vez que T + T₁, N e N₁, são conhecidos, supondo que o enfraquecimento

das superfícies se dá considerando, por exemplo, c , c_1 e Φ_1 como funções de Φ a Eq. 4.3-1 permite calcular o valor Φ_s para o qual se dará a rotura e portanto os coeficientes de segurança. Tal como no art. 4.2, pode também ser considerado enfraquecimento em que só declina o valor de um parâmetro, por exemplo Φ , atribuindo-se dados valores aos outros parâmetros.

Portanto, quando se admite comportamento elastoplástico a apreciação da segurança pode ser feita com base nas forças aplicadas, sob as solicitações de cálculo, pela barragem à fundação, levantando-se o problema do interesse de fazer apreciação mais refinada. Tal pode justificar-se quando os coeficientes de segurança calculados como se acaba de indicar não sejam satisfatórios e se preveja, que eles aumentarão substancialmente quando for considerada a redistribuição de forças resultante sobretudo dos deslocamentos tangenciais na superfície. Isto pode verificar-se no caso de descontinuidades com deformação tangencial elástica elevada, isto é, k_T baixo, cujo efeito estrutural não tenha sido simulado uma vez que se usam as equações de Vogt, como pode acontecer na descontinuidade AB da Fig. 17. Além disso, a análise da propagação da plastificação nas descontinuidades e a resultante redistribuição de solicitações pode mesmo ter interesse no caso de a segurança da fundação estar garantida desde que se suspeite a ocorrência de deslocamentos tangenciais junto à barragem com valores que possam determinar fracturação da barragem. Como foi dito no art. 4.2, o conhecimento dos deslocamentos tangenciais pode ter interesse na interpretação de resultados da observação e na análise de risco de interferência com cortinas de impermeabilização.

Nos casos especiais em que se justifique a análise da propagação de escorregamentos em descontinuidades tal pode ser levado a cabo pelo método dos elementos finitos.

A aplicação deste método implica a discretização do maciço de fundação, incluídas as descontinuidades. Existe a dificuldade de cálculos tridimensionais não serem comuns e de o volume de cálculo aumentar substancialmente em virtude de ter de ser feita a iteração a fim de ter em consideração o comportamento não linear das superfícies de rotura. No caso da Fig. 17 a discretização da fundação pode ser feita no volume acima de um plano tal como MN, mantendo o tratamento do problema pelas equações de Vogt para o restante do maciço de fundação.

Quando se deseja analisar o comportamento sob dadas condições, no respeitante a solicitações e materiais, basta conduzir um só cálculo, enquanto a

apreciação da segurança pelo critério da rotura geral exige sucessivos cálculos, em correspondência com o progressivo enfraquecimento das superfícies de rotura. Especialmente neste caso está em jogo um grande volume de cálculo. Não se tem conhecimento da realização de tais cálculos com vista ao projecto de obras, mesmo somente para analisar comportamento sob dadas condições. É no entanto de esperar que no futuro os projectistas tirem deles proveito.

No caso de comportamento com resistências de pico e residual seria necessário, em princípio, considerar a deformabilidade do maciço e das descontinuidades, mesmo quando se admita a hipótese de o enfraquecimento não acarretar redistribuição das forças aplicadas pela barragem à fundação. Tal poderia ser feito pelo método dos elementos finitos mas não se justifica no âmbito da hipótese referida.

Como foi mencionado no art. 3.3, os modelos podem ser úteis para a solução de problemas tridimensionais quando se aceita idealização contínua. No caso em consideração, isto é, quando se deseja considerar a ocorrência de escorregamentos ao longo de dadas descontinuidades, além das dificuldades referidas no art. 3.3 há ainda a dificuldade, já mencionada no art. 4.2, da simulação da deformabilidade e dos parâmetros de resistência das descontinuidades.

Como nos problemas não lineares em consideração é necessário simular o peso do modelo, tal fixa a escala das tensões, o que acarreta a utilização de materiais com peso específico elevado e resistência muito baixa. Não se dispõe de técnicas adequadas à medição de deformações em tais materiais, e portanto à determinação de tensões, o que tem levado, em regra, à realização de ensaios em que são somente medidos deslocamentos. Trata-se de uma severa limitação, dada a importância do conhecimento do estado de tensão no julgamento da segurança.

Como não foi ainda possível desenvolver técnica que permita impor o enfraquecimento dos materiais de um modelo, há a tendência para julgar a segurança a partir do incremento de solicitações, em especial da pressão hidrostática, o que pode conduzir a resultados sem significado. A fim de evitar a construção de sucessivos modelos para simular o enfraquecimento dos materiais, o que é praticamente inviável, será aconselhável simular os materiais com propriedades limites correspondentes a coeficientes de segurança que sejam considerados aceitáveis. Se não ocorrer a rotura sob a acção das solicitações de cálculo, o ensaio fornece um limite inferior do coeficiente de segurança, e se se verificar rotura antes de as solicitações atingirem os valores de cálculo obter-se-á um limite superior.

Quanto ao número e posição das superfícies de rotura a simular nos modelos, o problema deve ser encarado tal como foi mencionado no início deste artigo. Como o número de superfícies de rotura deve ser limitado por razões de segurança, tal acarreta a simulação no modelo de famílias de descontinuidades com maior espaçamento ou mesmo de uma só descontinuidade por família.

Considerou-se com interesse apresentar as grandes dificuldades que se levantam na utilização de modelos, em regime não linear, em virtude de elas não serem óbvias e de os resultados da maior parte dos estudos realizados serem controversos.

De qualquer modo, deseja-se notar que na prática raras vezes se verificam condições que justificam a consideração, em problemas tridimensionais, de redistribuição de tensões devida a escorregamentos em descontinuidades, nomeadamente com vista à determinação de coeficientes de segurança pelo critério da rotura geral.

5 – FUNDAÇÃO SOFRENDO ROTURA GERAL AO LONGO DE SUPERFÍCIE NÃO DEFINIDA “À PRIORI”

5.1 – *Idealização do maciço rochoso* – No art. 4 foi considerado que a rotura geral do maciço de fundação tinha lugar ao longo de superfícies coincidindo com descontinuidades do maciço rochoso. Isto pode não acontecer, o que levanta a dificuldade de determinar a forma e a posição da superfície de rotura. Contudo, este caso tem muito menor interesse na prática pois que então a rotura ocorrerá com contribuição da própria rocha, o que elimina na maior parte dos casos o risco de rotura e a necessidade da sua análise. O tipo de rotura em consideração pode em especial ter de ser analisado no caso de maciços constituídos por rochas de resistência muito baixa, tanto mais que é comum tais maciços não apresentarem fracturação relevante.

O risco de rotura através da rocha é ilustrado nos equilíbrios bidimensionais pelos problemas das Figs. 2d e 2e quando não existam as famílias de descontinuidades ao longo das quais as superfícies de rotura BC e CD, respectivamente, foram consideradas. Em equilíbrios tridimensionais esse risco pode verificar-se nos problemas das Figs. 18 e 19 quando não exista, por exemplo, a família de descontinuidades com a atitude da superfície AOC. Outro caso típico é o da

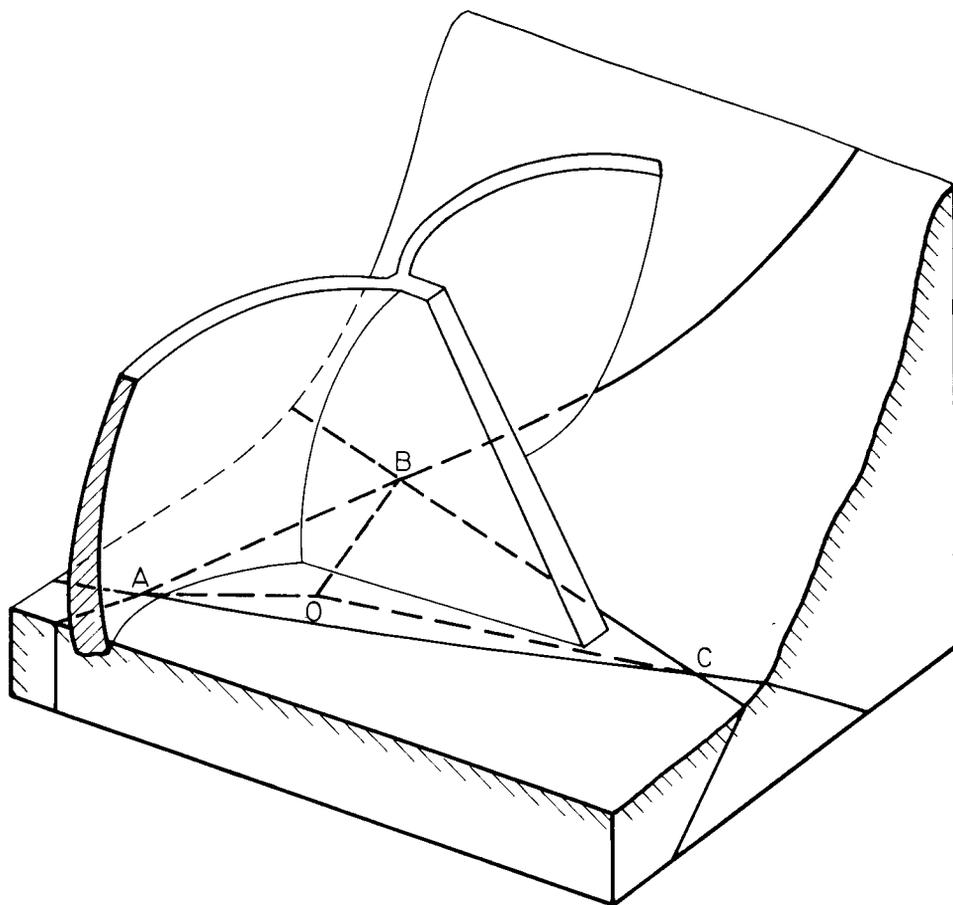


Fig. 19

barragem gravidade da Fig. 20, fundada num maciço interceptado por uma descontinuidade AB ao longo da qual pode dar-se escorregamento da barragem e de parte do maciço acima de AB. A rotura pode pois verificar-se em parte através da descontinuidade e em parte através de uma superfície interceptando a rocha, de forma e posição não conhecida "à priori".

A determinação da forma e posição da superfície de rotura, ou da parte da superfície de rotura que não coincida com descontinuidades, terá em geral de ser feita mediante sucessivas tentativas destinadas a determinar a superfície de menor resistência. Nota-se que tal determinação só tem em regra

interesse com vista à avaliação da segurança pelo critério da rotura geral, pois em condições de serviço não há que considerar em regra roturas incipientes dos maciços rochosos de fundação através da própria rocha. Menciona-se como excepção a eventual rotura por tracção da rocha a montante das barragens de betão.

A fim de julgar a segurança em relação à rotura geral haverá que eleger o/ou os mecanismos de enfraquecimento mais verosímeis que podem conduzir a rotura através da rocha, os quais dependem da natureza do maciço rochoso.

Um mecanismo que muitas vezes se apresenta como o mais pertinente consiste na aceitação da hipótese de ocorrência de descontinuidades, em especial diaclases, com atitudes diferindo das atitudes predominantes identificadas no maciço. Esta hipótese impõe-se frequentemente em virtude de: i) a grande dispersão de atitudes que muitas vezes se verifica dentro de uma família; ii) a frequente ocorrência de descontinuidades singulares; e iii) se ter de considerar situações com probabilidade de ocorrência muito baixa. Deste modo, a superfície de rotura será plana, sendo somente necessário analisar qual a inclinação mais desfavorável. Cai-se assim no caso tratado no art. 4, incluída a idealização do maciço como meio elástico. Tal pode ser, por exemplo, o caso acima referido das Figs. 2d e 2e, nos quais haveria a considerar superfícies de rotura BC e CD, respectivamente, com diversas inclinações

Dentro desta linha de pensamento a caracterização mecânica da superfície de rotura deve basear-se no conhecimento de que se disponha das descontinuidades do maciço. Bastará em regra a consideração de comportamento elastoplástico, isto é, de parâmetros k_N , k_T , c , Φ . O processo de enfraquecimento deverá ser estabelecido considerando também as superfícies de descontinuidade que fazem parte da superfície completa da rotura, tais como as superfícies AB da Fig. 2d e AB e BC da Fig. 2e.

No caso de maciços com descontinuidades de atitude bem definida assim como de maciços que não apresentem descontinuidades relevantes, em especial diaclases, pode não ser verosímil a consideração de rotura geral por descontinuidade singular. Em tal caso o mecanismo de enfraquecimento a considerar será o enfraquecimento da própria rocha, podendo, conforme os casos, considerar-se o enfraquecimento de todo o maciço ou somente ao longo de superfície de rotura. Quanto à forma da superfície de rotura bastará forma circular, suposto problema bidimensional, ou mesmo plana, pois em regra não se justificam tratamentos refinados. Pelas mesmas razões apresentadas no art. 4.1

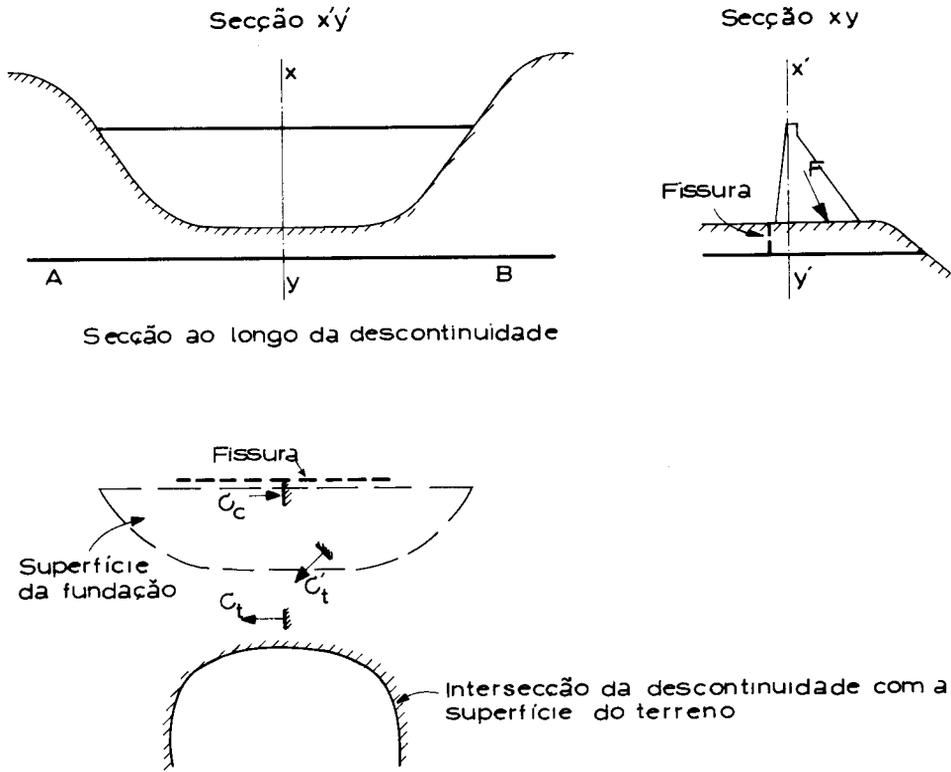


Fig. 20

a propósito da rotura por descontinuidades, também no caso presente deverá ser considerado que a rotura se dará ao longo de uma só superfície, em cada caso a analisar. No processo de enfraquecimento será em regra adequado considerar comportamento elastoplástico, e supor que os valores de k_N e k_T acompanham o declínio dos parâmetros de resistência, c e Φ , segundo relação a estabelecer para cada caso.

Um outro mecanismo de rotura por corte consiste num processo que implica a desarticulação do maciço, em especial por descontinuidades, com rolamento de blocos e sua eventual fracturação, formando-se escorregamento por camada com espessura de valor várias vezes superior à dimensão dos blocos.

Trata-se de mecanismo que mobiliza uma resistência ao corte intermédia entre a resistência das descontinuidades e a da rocha. Dada a sua complexidade e a impossibilidade que em regra existe de determinar os respectivos parâmetros de deformabilidade e de resistência não poderá ser considerado em cálculo para apreciação da segurança em relação à rotura. No caso, que será raro, de ser imprescindível a consideração desse mecanismo pode recorrer-se a modelos (art. 5.2).

Quando a superfície de rotura intercepta a própria barragem, de betão ou de aterro, haverá analogamente que considerar diversas formas da superfície. Devido à pequena dispersão das propriedades dos materiais das barragens, estes podem ser definidos pelos seus valores médios. A resistência à tracção do betão deve em regra ser considerada nula, tanto mais que há a considerar as juntas de betonagem e de construção.

5.2 – Apreciação da segurança pelo critério da rotura geral – A apreciação da segurança será feita tal como o referido nos art. 4.2 e 4.3, havendo agora necessidade de experimentar diversas superfícies potenciais de rotura, o que pode implicar aumento substancial do volume dos cálculos, em especial no caso de equilíbrios tridimensionais.

Podem simplificar-se o problema apreciando separadamente a segurança em cada trecho plano ou circular da superfície de rotura, a partir de distribuição de tensão elástica, sob as solicitações de cálculo e materiais com propriedades médias, e admitindo comportamento elastoplástico da superfície de rotura.

Se os pares de coeficientes de segurança obtidos para os trechos não forem inferiores aos valores n_c e n_ϕ considerados satisfatórios para a apreciação da rotura geral, está garantida a segurança pois a redistribuição de tensões que precede a rotura geral é favorável à segurança, isto é, os respectivos valores dos coeficientes de segurança serão superiores ao mais desfavorável dos pares correspondentes aos trechos.

No caso de problemas bidimensionais pode fazer-se uma apreciação prévia do risco de rotura através da rocha a partir do conhecimento do estado de tensão elástico sob as solicitações de cálculo, conforme foi referido no art. 3.2. Se tal risco existir, a determinação dos coeficientes de segurança respeitantes ao critério da rotura geral pode ser feita tal como no 4.2, não se levantando dificuldades, em especial quando forem consideradas superfícies planas.

No caso de equilíbrios tridimensionais não se dispõe em geral do estado de tensão do maciço rochoso de fundação, não sendo possível fazer a apreciação prévia do risco de rotura como se acaba de referir. A avaliação da segurança pelo critério da rotura geral será feita como foi indicado no art. 4.3, sendo em regra satisfatório considerar superfícies de rotura planas através da rocha, por exemplo, nos problemas das Figs. 18 e 19.

Poderá haver equilíbrios tridimensionais nos quais se justifique a determinação, pelo método dos elementos finitos, de coeficientes de segurança considerando a propagação da rotura em processo de enfraquecimento. Este pode ser o caso da Fig. 20, no qual o escorregamento na parte central da descontinuidade AB origina flexão da placa do maciço rochoso situada acima de AB e limitada a montante por uma fenda vertical de tracção. Em resultado da flexão podem desenvolver-se tensões de tracção tais como σ_t e σ'_t , Fig. 20, o que aconselha a consideração de superfícies potenciais de rotura por tracção, as quais podem ser simuladas no método dos elementos finitos por meio de elementos de junta, considerados por exemplo com resistência à tracção nula. Deste modo, em processo de enfraquecimento da descontinuidade, destinado à determinação dos respectivos coeficientes de segurança, n_c e n_ϕ , será tida em consideração a influência de eventuais roturas por tracção. Para simplificar a análise pode evitar-se a reprodução da barragem e considerar somente as forças F, Fig. 20, aplicadas pela barragem à fundação.

Se se chegar à conclusão de que as tensões de compressão, σ_c , são suficientemente elevadas para se justificar a análise de rotura para compressão, o respectivo enfraquecimento também poderá ser simulado, de maneira que dependerá das descontinuidades do maciço, nomeadamente de diaclases.

Dada, por um lado, a complexidade dos fenómenos de rotura e, por outro lado, o grande volume de cálculo exigido para o julgamento da segurança em relação à rotura geral, especialmente em equilíbrios tridimensionais, há situações em que pode ser aconselhável o recurso a modelos. Estes podem ser só usados com vista a obter informação sobre o mecanismo de rotura, sendo depois feita a determinação dos coeficientes de segurança pelo método dos elementos finitos, dadas as dificuldades que se encontram nos estudos sobre modelo (art. 4.3). A informação sobre o mecanismo de rotura pode consistir na definição da forma e posição da superfície de rotura, na averiguação da influência do diaclasamento sobre rotura através da rocha, etc.

No art. 4.3 foram dadas algumas indicações sobre as características dos modelos, os quais devem simular as idealizações consideradas no art. 5.1, bem como sobre a condução dos ensaios.

6 – CONCLUSÃO

A discussão feita do problema do comportamento dos maciços de fundação e da apreciação da sua segurança mostra, por um lado, a existência de métodos de análise com largas possibilidades mas, por outro lado, as limitações na sua utilização resultantes do escasso conhecimento de que em regra se dispõe das propriedades dos maciços rochosos. A economia e a segurança das obras de barragens de betão impõem que a caracterização dos maciços de fundação seja feita com um grau de desenvolvimento excedendo largamente o habitual. Em especial, é necessário proceder a uma caracterização muito mais cuidadosa da geometria das diaclases, incluída a sua extensão.

No estudo do comportamento nas condições de serviço, mesmo sob as solicitações de cálculo, bem como na apreciação da segurança pelo critério da resistência pontual, basta em regra idealizar o maciço de fundação como um meio contínuo linear (art. 3), em parte porque o conhecimento limitado dos maciços rochosos não é compatível com idealizações refinadas.

Na avaliação da segurança pelo critério da rotura geral assim como no estudo de roturas localizadas em condições de serviço, a idealização do maciço que na prática melhor se adequa é a de um meio contínuo interceptado por algumas superfícies planas de rotura, definidas “a priori”, coincidentes com descontinuidades (art. 4). São muito pouco comuns as situações em que se justifique a consideração de rotura ao longo de superfícies que não coincidam com descontinuidades (art. 5).

No estudo de problemas concretos, quer bidimensionais (arts. 3.2, 4.2 e 5.2) quer tridimensionais (arts. 3.3, 4.3 e 5.2) o método de análise recomendável, para qualquer das idealizações, é em regra o método dos elementos finitos. A utilização de modelos pode justificar-se (art. 3.3), nomeadamente para investigar mecanismos de rotura (art. 5.2).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- COMITÉ EURO-INTERNACIONAL DU BÉTON – “Regles unifiées comunes aux differents types d’ouvrages et de matériaux”. Bull. d’Information N.º 124/125-F, Paris, 1978.
- KREUZER, H. L. – “A probability-based safety factor approach for arch dams”. *Water Power*, v. 25, N.º 12, 1973.
- PEDRO, J. O. – “Dimensionamento das barragens abóbada pelo método dos elementos finitos”. Memória n.º 479, LNEC, 1977.
- PEDRO J.; O. SOUSA, L. M., TELES, M. M. and RAMOS J. M. – “Estudo da barragem de Água Vermelha pelo método dos elementos finitos”. Relatório interno, LNEC, 1975.
- ROCHA, M. – “Mechanical behaviour of Rock Foundations in Concrete Dams”. 8th Int. Congr. on Large Dams, Edinburgh, 1964.
- ROCHA, M. – “Some Problems on Failure of Rock Masses” – *Rock Mech. and Engg. Geol.*, Supplement I, 1964a.
- ROCHA, M., SILVEIRA, A. F., AZEVEDO, M. C., and FERREIRA, M. E. – “The Use of Model Tests in the Determination of the Safety Factor in Arch Dams”. *Water Power*, v. 21, no. 12, 1969.
- ROCHA, M. BRITO, S., and NIEBLE, C. – “Aplication of Advance Techniques to the Study of the Foundations of São Simão Dam”. 3rd Congress. Int. Soc. for Rock Mech., Denver, 1974.
- ROCHA, M. – “Present Possibilities of Studying Foundation of Concrete Dam”. 3rd Congress, Int. Soc. for Mech., Denver, 1974a.
- WITTKÉ, W. SEMPRICH, S. PLISCHKE, B. and HOSANG, K. – “Three Practical Examples for the Interaction between Concrete Dams and Foundation Rock”. Int. Symp. on Rock Mech. Related to Dam Foundations, Int. Soc. for Rock Mech., Rio de Janeiro, 1978.