

25.4

**CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DA ESTABILIDADE DO TALUDE DE MONTANTE DE BARRAGEM HOMOGÊNEA, SOB ABAIXAMENTO RÁPIDO<sup>(\*)</sup>**

**Victor F. B. de Mello**

Professor

Escola de Engenharia de São Carlos, U. S. P.

**Nélio Gaioto**

Engenheiro

Barragem  
Sta Branca

SUMÁRIO

*Considerando o caso de uma barragem de seção homogênea, apoiada sobre rocha viva impermeável, e interceptada a jusante da crista por um filtro vertical, estudou-se a influência que exerce sobre a rede de percolação de abaixamento instantâneo do reservatório, e sobre a estabilidade do talude de montante nessas condições, a relação de coeficientes de permeabilidade horizontal e vertical. O aumento do coeficiente de segurança com o aumento dessa relação é sensível. Investigou-se também a comparação entre os Métodos das Fatias e do Circulo de Atrito, tanto no tocante aos resultados alcançados, como em relação ao interesse prático na aplicação de cada método. Depreende-se que o método das Fatias é menos demorado, está sujeito a menores erros de imprecisão, e indica os menores coeficientes de segurança.*

SUMMARY

*A homogeneous dam, resting on impervious bedrock and intercepted just downstream from the crest line by a vertical filter, was used for a brief investigation on the influence of the assumed ratio of horizontal to vertical permeabilities on the flownet under instantaneous drawdown conditions, and on the consequent factor of safety against sliding of the upstream slope. It was found that the factor of safety increases appreciably with an increase of the permeability ratio. Further a comparison was made of the Slices Method and the  $\phi$  Circle Method, both with respect to the results of the stability analyses and as regards practicability and precision of the two methods. The Slices Method takes less time, involves lesser errors, and furnishes smaller computed factors of safety.*

(\*) Baseado no Trabalho de Formatura do Engenheiro Nélio Gaioto (1957).

## INTRODUÇÃO

A análise de estabilidade do taludê de montante de uma barragem de terra, sob abaixamento instantâneo do nível da água represada, vem sendo procedida por diversos métodos, alguns dos quais muito difundidos por terem sido explicados nos primeiros e melhores livros de texto circulados na Mecânica dos Solos após a guerra (ex. "Fundamentals of Soil Mechanics" de D. W. Taylor, e "Theoretical Soil Mechanics" de K. Terzaghi).

Não tendo havido uma comparação sistemática de um processo em relação ao outro, persiste a opinião de que é indiferente o emprego de qualquer dêles, quer quanto à praticabilidade das manipulações gráficas e numéricas, quer quanto aos resultados alcançados. Outrossim, considerando alguns dos processos individualmente, carecemos de informações quanto à influência de algumas das mais rotineiras hipóteses que somos obrigados a formular para o andamento dos cálculos.

O presente trabalho, que engloba as conclusões alcançadas num Trabalho de Formatura realizado na Escola de Engenharia de São Carlos, limita-se ao estudo de apenas algumas das múltiplas facetas dêsse problema, representando pois o início de um trabalho que deverá ser grandemente estendido.

O estudo foi procedido sôbre uma secção idealizada e simplificada, baseada aproximadamente em condições críticas representativas da Barragem de Santa Branca. As conclusões do presente estudo referem-se pois, especificamente a um taludê uniforme de montante 1:4 de uma barragem homogênea de 52 m de altura assente sôbre rocha viva impermeável, a barragem sendo dotada de um filtro vertical situado sob o extremo de jusante da crista de 10 m de largura. Para as análises de estabilidade admitiu-se uma densidade natural do solo de  $2,00 \text{ t/m}^3$  e uma envoltória hipotética de resistência  $s = 2,5 + \sigma \text{tg } 19^\circ \text{ (t/m}^2\text{)}$ .

## RÊDE DE PERCOLAÇÃO PARA CONDIÇÕES CRÍTICAS ANÁLOGAS À DE ABAIXAMENTO INSTANTÂNEO DO NÍVEL DO RESERVATÓRIO

Uma das hipóteses de cálculo mais correntemente empregadas para a análise de estabilidade do taludê de montante sob condições críticas de abaixamento instantâneo do nível do reservatório, admite a validade da determinação das pressões neutras respectivas a partir do traçado de uma rêde de percolação.

No traçado de tal rêde, interfere o valor da relação entre as permeabilidades horizontal e vertical do maciço. Essa relação não é conhecida em fase de projeto, nem pode, por enquanto, ser avaliada a contento, pela inexistência de medidas e informações publicadas

sobre o assunto: outrossim cabe ainda lembrar que apenas através de intensa coleta de dados será possível estabelecer estimativas razoáveis de uma relação inevitavelmente sujeita a grande variabilidade estatística no âmbito de amostras indeformadas dos tamanhos usualmente empregados em ensaios.

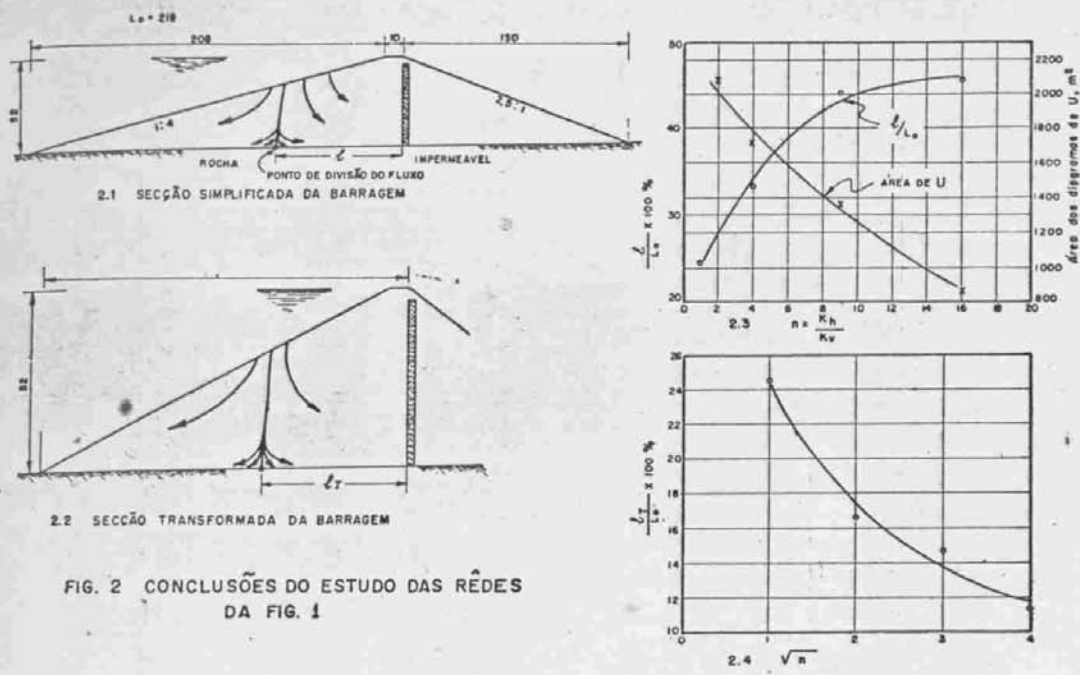


FIG. 2 CONCLUSÕES DO ESTUDO DAS RÊDES DA FIG. 1

A atitude correta do projetista requer em tais circunstâncias a adoção de valores a favor da segurança. Sabendo-se pois, que a permeabilidade horizontal é geralmente maior do que a vertical, resolveu-se investigar a influência da adoção de valores de  $n = k_h/k_v = 1, 4, 9, \text{ e } 16$ . Afim de se examinar a condição mais crítica imaginável, considerou-se a rêde de percolação de chuva intensa sobre o talude de montante (com a reprêsa vazia), ao invés da rêde de percolação sob abaixamento instantâneo do nível da reprêsa: desta feita evitou-se a comparação de diversas rêdes em condições iniciais diferentes entre si, devidas à linha freática progressivamente mais alta que resulta com valores maiores de  $n$ .

A figura 1 apresenta as quatro rêdes de percolação traçadas para essa investigação, e a figura 2 reúne algumas conclusões extraídas do exame dessas rêdes. Cabe ressaltar que essas conclusões têm apenas uma finalidade prática, estando sujeitas à imprecisão do

traçado das rêdes por processo gráfico; para aprimorar tais estudos sugere-se o emprêgo do modêlo elétrico.

1) Quanto maior a relação  $n$ , tanto menores serão as pressões de pressão neutra atuante sôbre o círculo hipotético de escorregamento. Para fins de comparação assinalamos que a área do diagrama de pressão neutra atuante sôbre o círculo hipotético de escorregamento indicado varia na proporção de 2,36 : 1,96 : 1,55 : 1 à medida que a relação  $n$  varia de 1 : 4 : 9 : 16.

2) Para maior facilidade no traçado da rêde de percolação assinalamos nos gráficos da figura 2 indicações quanto à posição do ponto de bifurcação da linha de fluxo que segue a base de rocha impermeável.

#### ANÁLISES DE ESTABILIDADE PELO MÉTODO DAS FATIAS (FELLENIUS) E PELO MÉTODO DO CÍRCULO DE ATRITO

a) Aplicação dos métodos; considerações gerais. Dispensamos de descrever ou comentar o Método das Fatias que é sobejamente conhecido. Assinalamos apenas que os coeficientes de segurança calculados referem-se à relação entre as forças totais resistentes disponíveis e as forças atuantes, e que não foram levadas em conta as pressões laterais nas fatias.

No caso do Círculo de Atrito cabe esclarecer que foram empregadas as seguintes bases de cálculo:

1) sendo necessário traçar a força  $F$  (fig. 3) tangente a um círculo de raio  $KR \operatorname{sen} \varphi_a$  (apud. Taylor, "Fundamentals of Soil Mechanics", P. 443), o valor de  $K$  adotado no presente trabalho foi a média dos dois fornecidos por Taylor na sua Fig. 16.16;

2) a determinação do centro de gravidade do segmento circular do maciço foi facilitada pelo emprêgo do ábaco fornecido na figura 3;

3) a resultante das pressões neutras atuantes na superfície do círculo foi obtida por processo gráfico, construindo-se o funicular das forças atuantes sôbre oito partes iguais do arco;

4) para a devida comparação dos dois métodos de análise de estabilidade, é imprescindível calcular-se o verdadeiro coeficiente de segurança do Método do Círculo de Atrito pela condição de igualdade dos coeficientes de segurança em relação ao atrito e à coesão ( $S_\varphi = S_c = S$  : figura 3).

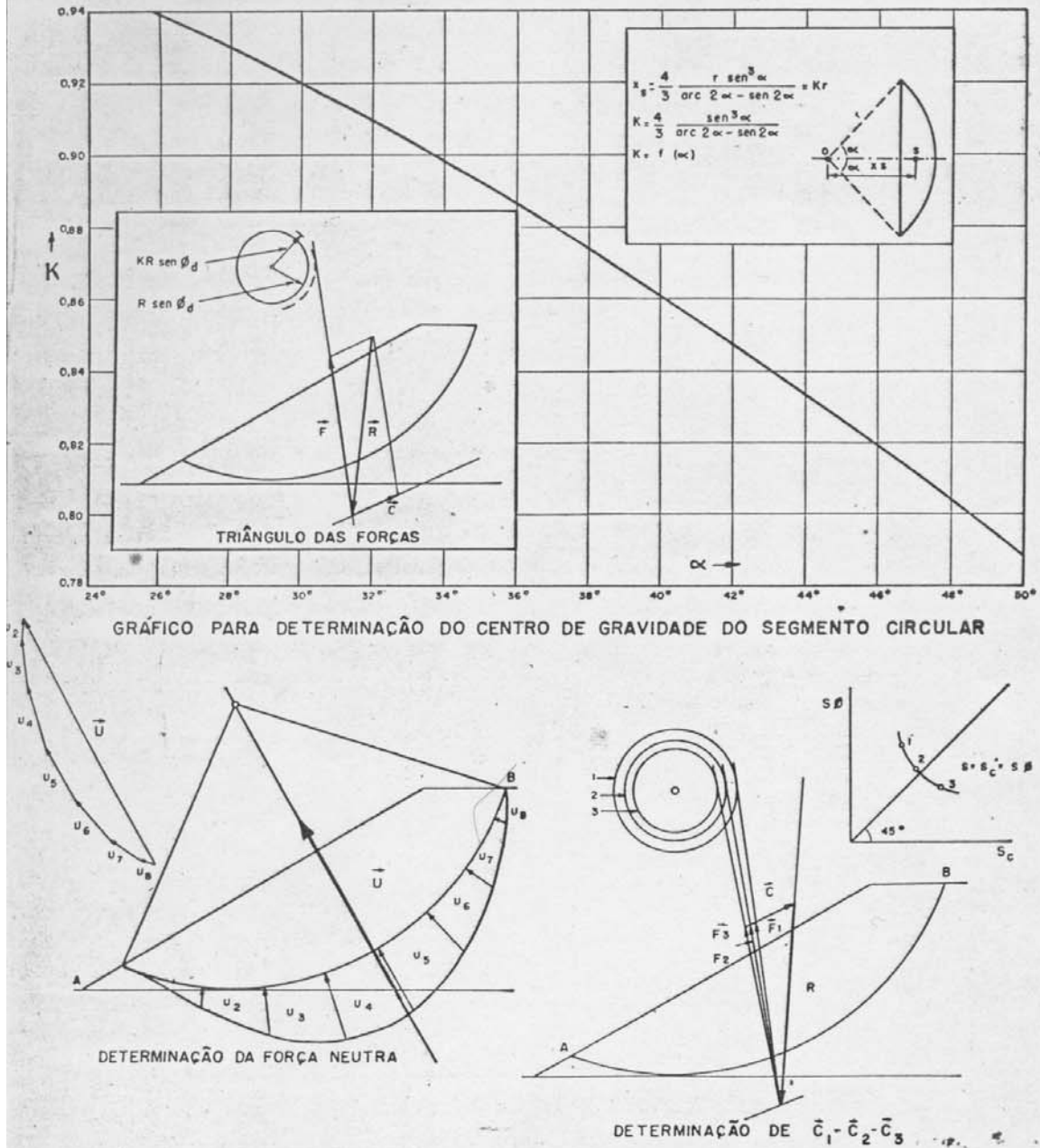


FIG.3 ELEMENTOS BASICOS DA ANALISE DE ESTABILIDADE PELO PROCESSO DO CIRCULO DE ATRITO

Inicia-se com uma hipótese do valor do ângulo de atrito absorvido ( $\varphi_d$ ) no equilíbrio estático ( $\varphi_d < \varphi$ ) o que corresponde à hipótese de um coeficiente de segurança em relação ao atrito: determina-se a respectiva força de coesão necessária para o equilíbrio estático, obtendo-se assim o coeficiente de segurança em relação à coesão. Nenhum desses coeficientes de segurança parciais tem qualquer sentido prático: só é significativo o coeficiente de segurança geral, que requer a execução de três análises no mínimo.

b) Influência da relação de permeabilidades sobre a estabilidade do talude (Método de Fatias).

Os resultados das análises de estabilidade procedidas estão resumidos na figura 4. Observou-se que a posição do círculo crítico não variou, não obstante as variações da relação dos coeficientes de permeabilidade; tal conclusão deve ser considerada válida apenas dentro da precisão dos trabalhos expostos. Outrossim, constatou-se que o coeficiente de segurança mínima de cada caso aumenta progressiva e sensivelmente com o aumento da relação de permeabilidades, o que era previsível em função da redução de pressões neutras mencionada acima.

c) Comparação dos coeficientes de segurança determinados pelos dois métodos.

O Método do Círculo de Atrito forneceu coeficientes de segurança sistematicamente maiores, conforme se depreende da tabela anexa. A diferença entre os dois métodos diminui, todavia, com o aumento do coeficiente, isto é, com o aumento da relação de permeabilidades.

Lembramos ser possível atribuir essa diferença, em parte, ao erro cometido, a favor da segurança, por desprezar-se no Método das Fatias as forças atuantes nos planos verticais.

Método / $k_h/k_v$	1	4	9	16
1) Fellenius	1,09	1,22	1,35	1,50
2) Círculo de $\phi$	1,22	1,38	1,46	1,58
Porcentagem de aumento (1)→(2)	12%	11%	8%	5%

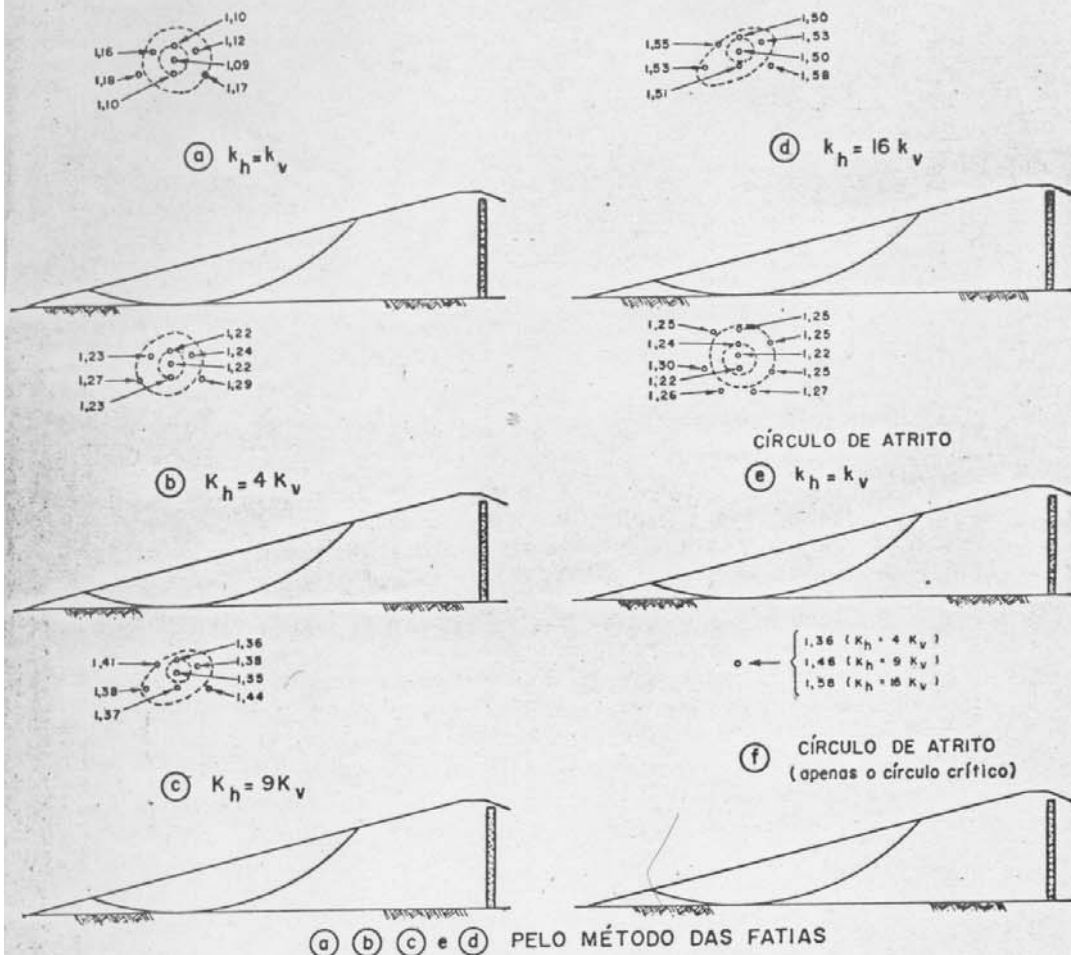


FIG. 4 CÍRCULOS CRÍTICOS E COEFICIENTES DE SEGURANÇA

d) Comparação dos dois métodos de análise quanto às vantagens de ordem prática.

Os dois métodos de análise de estabilidade foram comparados sob diversos aspectos práticos, como por exemplo, os erros de determinação implícitos em cada caso, o tempo e a praticabilidade de cada processo.

Os erros implícitos em cada processo devido à série de operações com números aproximados, foram calculados pela Teoria dos Erros, que fixa para as quatro operações básicas:

$$\text{Soma} \quad (x \pm \Delta x) + (y \pm \Delta y) = (x + y) \pm (\Delta x + \Delta y)$$

$$\text{Subtração} \quad (x \pm \Delta x) - (y \pm \Delta y) = (x - y) \pm x \cdot y (\Delta x/x + \Delta y/y)$$

$$\text{Produto} \quad (x \pm \Delta x) \cdot (y \pm \Delta y) = (x \cdot y) \pm (x \cdot y) (\Delta x/x + \Delta y/y)$$

$$\text{Divisão} \quad (x \pm \Delta x) : (y \pm \Delta y) = (x : y) \pm (\Delta x + \Delta y)$$

O erro de cada operação foi avaliado pela repetição da operação até se estabelecer adequadamente o grau de aproximação de cada valor usado no cálculo.

O Método do Círculo de Atrito é mais gráfico do que numérico, ao contrário do Método de Fellenius, estando pois sujeito a maiores erros.

Encontramos um erro máximo da ordem de 5,3% (erro de 0,06 em relação a um coeficiente de segurança de 1,10) quando aplicamos o Método de Fellenius e 8,2% (erro de 0,10 para 1,22) quando aplicamos o Método do Círculo de Atrito. Não foi considerado no segundo método o erro implícito na fixação do valor de K em função do ângulo central, para o diâmetro KR sen  $\varphi$  do círculo de atrito.

Outrossim, foi cronometrado o tempo gasto para se analisar um círculo de rutura hipotético pelos dois métodos e após ter-se adquirido uma certa prática na aplicação de ambos. A análise pelo Método de Fellenius durou 30 minutos e pelo Método do Círculo de Atrito 40 minutos; isto sem computarmos o tempo gasto na construção do polígono de forças para a determinação do peso no caso do maciço não ser constituído por um simples segmento circular.

O Método de Fellenius apresenta-se ainda mais conveniente no caso de se fazer a análise para várias rês de fluxo, pois não há superposição de desenhos, como acontece no círculo de atrito. Todavia, devido à dificuldade de se determinar precisamente os coeficientes de permeabilidade, é possível que se analise apenas o caso mais desfavorável, isto é com a hipótese de iguais coeficientes de permeabilidade.

Concluimos de qualquer forma que o Método de Fellenius se apresenta mais vantajoso que o Método do Círculo de Atrito, pois além de ser mais rápido, introduz um menor erro nos cálculos.

### CONCLUSÃO

Em resumo, recomenda-se empregar, a favor da segurança a relação mínima de  $n = k_b/k_v$ , compatível com a realidade, e de preferência o Método das Fatias (Fellenius) para as análises de estabilidade.