

ANEXO

MURO DE ARRIMO (PERFIL METÁLICO)



MURO DE GABIÃO



5. TALUDES

Os taludes ou encostas naturais são superfícies inclinadas de maciços terrosos, rochosos ou mistos (solo e rochas). Os taludes podem ser Naturais ou Artificiais.

5.1. TALUDES NATURAIS

Possuem estrutura particular e está intimamente ligado ao histórico de tensões sofridas: erosão, tectonismo, intemperismo etc.

Vários fatores atuam isoladamente ou conjuntamente durante o processo de formação de um talude natural:

- Fatores Geológicos: - litologia (constituintes);
 - estruturação (dobras, falhas) e
 - geomorfologia (tendência evolutiva dos relevos).

- Fatores Ambientais: - clima;
 - topografia e
 - vegetação.

5.2. TALUDES ARTIFICIAIS

Refere-se ao declive de aterros construídos a partir de materiais de diferentes granulometrias e origens, incluindo rejeitos industriais, urbanos ou de mineração e aos taludes originados de escavações diversas.

5.3. ESTABILIDADE DE TALUDES

Quando a superfície de um terreno não é horizontal existe uma componente da força da gravidade que tende a mover o solo para baixo, conforme ilustrado na Figura 5.1. Ao movimento de massa de terra nestas circunstâncias dá-se o nome de escorregamento ou escorregamento de taludes. Os escorregamentos podem ocorrer de maneira lenta, com o sem provocação aparente. São geralmente causadas por escavações, acréscimos de carga sobre taludes existentes, liquefações do solo provocadas por esforços dinâmicos etc. A ação da água tem sido uma das maiores responsáveis na ocorrência de muitos escorregamentos de taludes.

Ao infiltrar em um maciço de terra pode produzir os seguintes efeitos, favoráveis ao escorregamento:

- Introdução de uma força de percolação, no sentido do escorregamento;
- Perda de resistência do solo por encharcamento;
- Aumento do peso específico do solo e, portanto da componente da força da gravidade que atua na direção do escorregamento;
- Diminuição da resistência efetiva do solo pelo desenvolvimento de pressões neutras.

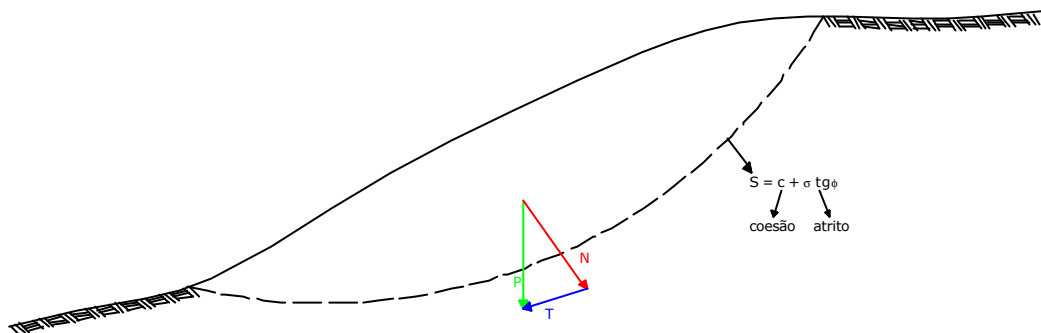


Figura 5.1 – Componente tangencial, T, no sentido do movimento.

Além disso, quando a água escoar sobre taludes, pode adquirir velocidade suficiente para provocar erosões, que iniciando no pé do talude podem assumir proporções tais que provoquem a instabilidade de grandes massas.

De modo geral os escorregamentos podem ser provocados por aumento das forças atuantes e/ou diminuição da resistência ao cisalhamento do solo. Para analisar a estabilidade de um talude o engenheiro precisa comparar as tensões cisalhantes e a resistência ao cisalhamento ao longo de uma superfície potencial de escorregamento.

5.4. TIPOS E CAUSAS DE ESCORREGAMENTOS

Os primeiros estudos sobre escorregamentos remontam a mais de 2000 anos, em países como a China e o Japão.

Estima-se em milhares de mortes e dezenas de bilhões de dólares de prejuízos por ano, relacionados a escorregamentos no mundo inteiro.

No Brasil, existem relatos de escorregamentos nas encostas de Salvador (BA), datados do Império (1971).

Estima-se um gasto de 7,1 milhões de dólares com gastos associados à execução de obras de contenção em encostas de Rio de Janeiro (1981 a 1991).

“Os escorregamentos de taludes são causados por uma redução da resistência interna do solo que se opões ao movimento de massa deslizante e/ou por um acréscimo das sollicitações externas aplicadas ao maciço”

Os movimentos são separados em três categorias, de acordo com a velocidade em que se ocorrem:

- Escorregamentos → 20 cm/min;
- Desmoronamentos → 3 m/s;
- Rastejo → 20 cm/5anos;

ESCORREGAMENTO: separação de uma cunha de solo que se movimenta em ralação ao resto do maciço, segundo uma superfície bem definida. Não há uma separação efetiva de corpos.

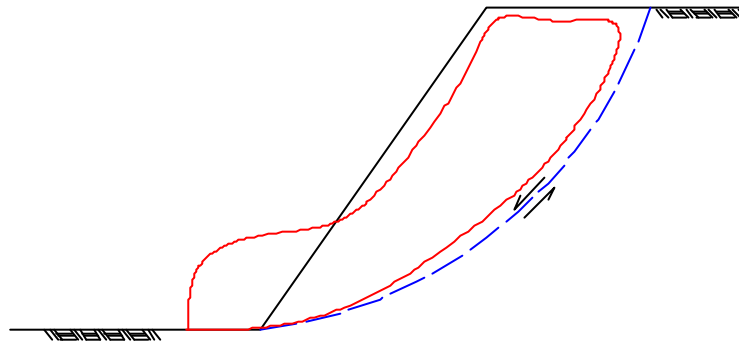


Figura 5.2 – Escorregamento.

DESMORONAMENTOS: são movimentos rápidos, resultantes da ação da gravidade sobre a massa do solo que se destaca do restante do maciço e rola talude abaixo.

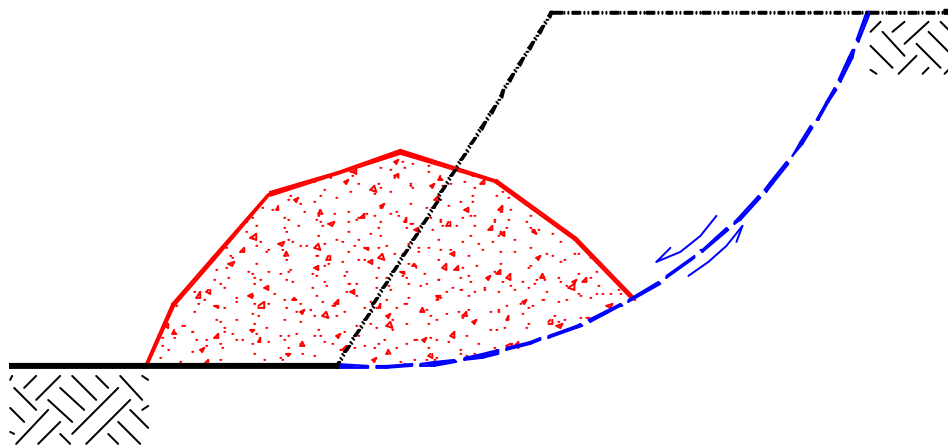


Figura 5.3 – Desmoronamento.

RATEJOS: movimentos bastante lentos que ocorrem nas camadas superiores do maciço. Diferem do escorregamento, pois neles não existe uma linha separatória nítida entre a porção que se desloca e a parte remanescente, estável do maciço. Ex.: Rodovia do Imigrantes.

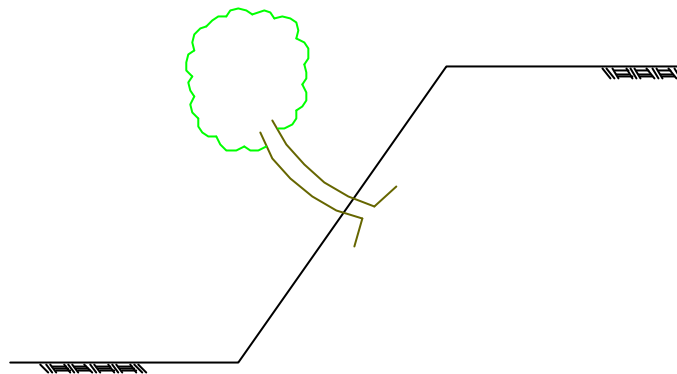


Figura 5.4 - Rastejos

As causas dos escorregamentos, enumerados por Terzaghi, são colocadas em três níveis:

- Efeitos Externos: efeitos sísmicos, aumento da inclinação do talude, deposição de material ao longo da crista do talude;
- Efeitos Internos: aumento da pressão da água, decréscimo de coesão;
- Efeitos Intermediários: não podem ser classificadas em uma das duas classes anteriores. Liquefação, erosão interna, rebaixamento do nível de água.

5.5. TERMINOLOGIA EMPREGADA

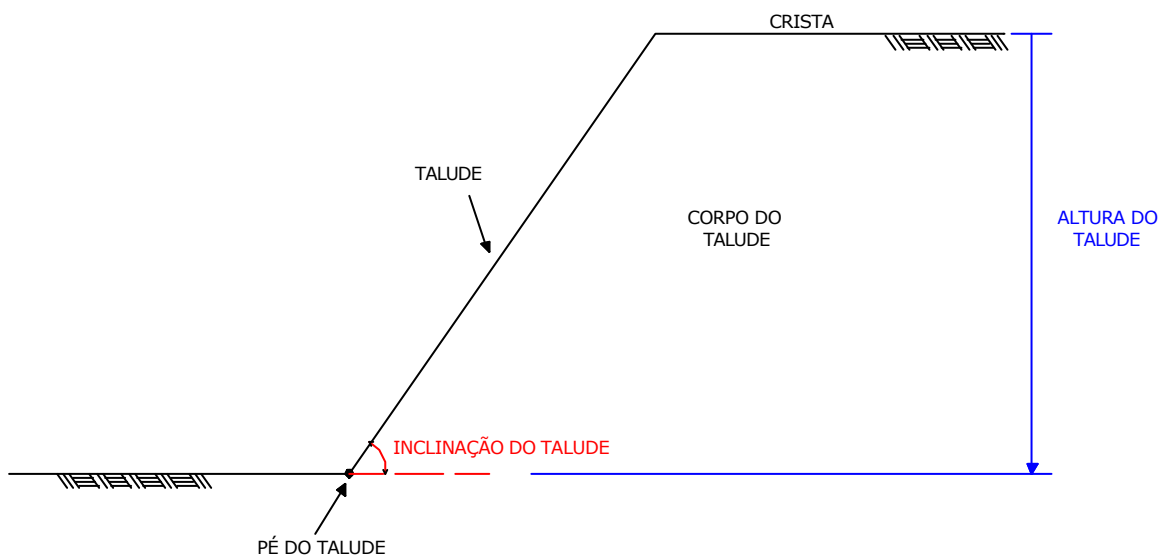


Figura 5.5 – Terminologia.

5.6. FATORES QUE AFETAM A ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE UM TALUDE

Para se processar a análise de estabilidade de um talude, relacionada à possibilidade de ruptura do maciço por escorregamento, é necessária a consideração de diversos fatores:

A) a geometria da superfície de ruptura, que pode ser admitida como cilíndrica, plana, espiral-logarítmica, ou a combinação destas formas; taludes íngremes geralmente apresentam superfícies de ruptura plana, enquanto que taludes suaves escorregam segundo superfícies cilíndricas; a ocorrência de camadas de solo de baixa resistência pode condicionar a forma e a posição da superfície de ruptura (Figura 5.6);

B) a heterogeneidade das camadas do subsolo, havendo a necessidade de se atribuir parâmetros médios para a resistência ao cisalhamento e para os índices físicos; a anisotropia do solo, associada às condições de deposição e subsequente variação de tensões durante a sua história geológica, pode afetar a solução da análise;

C) a existência de percolação de água através do maciço, sendo necessário o traçado de uma rede de fluxo, para se determinar os valores das pressões neutras que atuam na superfície de escorregamento;

D) a possibilidade de ocorrência de fendas de tração sobre o talude, que além de diminuir a resistência ao cisalhamento, permite o aparecimento de pressões hidrostáticas favoráveis ao escorregamento, conforme ilustrado na Figura 5.7;

E) atuação de cargas dinâmicas ou terremotos, que produzem esforços horizontais e se somam às forças que tendem a provocar o escorregamento.

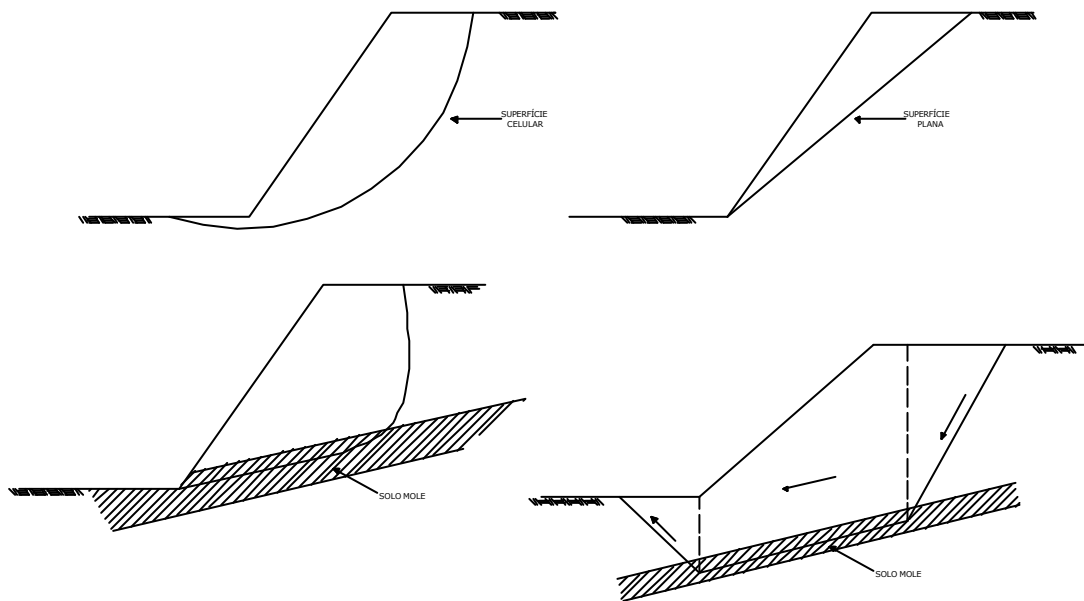


Figura 5.6 – Tipos de superfície de ruptura.

Como na maioria dos casos de Mecânica dos Solos, a análise é feita no plano, considerando-se uma seção típica do maciço, compreendida entre dois planos verticais, paralelos, de espessura unitária. São desprezadas as forças que atuam nestes planos. Para que ocorra a ruptura é necessário que a soma das forças ou dos momentos, que tendem a produzir o escorregamento, superem ou igualem a soma das forças (ou dos momentos) resistentes, devidas à resistência ao cisalhamento do solo ao longo da superfície em análise.

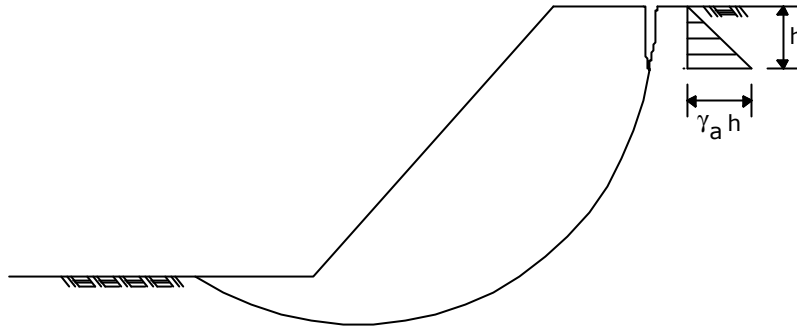


Figura 5.7 – Fenda de Tração.

5.7. COEFICIENTE DE SEGURANÇA

Para se analisar a estabilidade de um talude, quando o maciço estiver submetido às condições de solitação admitidas no projeto, utiliza-se o coeficiente de segurança. Conhecida a resistência ao cisalhamento do solo, $S = c + \sigma \tan \phi$, são definidos três tipos de coeficiente de segurança:

$$F_c = \frac{C}{C_{mob}}$$

onde:

F_c coeficiente de segurança em relação à coesão, é a relação entre a força resistente devida à parcela de coesão,

C é a coesão;

C_{mob} , necessária para a estabilidade, após se esgotar a resistência por atrito.

$$F_f = \frac{\tan \phi}{\tan \phi_{mob}}$$

F_f , coeficiente de segurança em relação ao atrito, é a relação entre o coeficiente de atrito disponível,

$\tan \phi$ e o coeficiente de atrito;

$\tan \phi_{mob}$, necessário para a estabilidade, após se esgotar toda a resistência por coesão;

$$F = \frac{S}{S_{mob}}$$

F , coeficiente de segurança total, é a relação entre a soma das componentes devidas á coesão e ao atrito, disponíveis,

S e a força de cisalhamento;

S_{mob} , necessária para a estabilidade.

Exemplo numérico: seja um elemento de solo, submetido um certo estado de tensões, que necessite de uma força resistente ao cisalhamento, $S_{mob} = 100kN$ para a sua estabilidade em um plano considerado, e tenha disponíveis as parcelas $C = 30kN$, de coesão, e $N \operatorname{tg} f = 90kN$, de atrito; os coeficientes de segurança serão:

$$a) F_c = \frac{C}{S_{mob} - N \operatorname{tg} f} = \frac{30}{100 - 90} = 3,00$$

$$b) F_f = \frac{N \operatorname{tg} f}{S_{mob} - C} = \frac{90}{100 - 30} = 1,29$$

$$c) F_T = \frac{C + N \operatorname{tg} f}{S_{mob}} = \frac{30 + 90}{100} = 1,20$$

Dos coeficientes de segurança acima definidos somente tem significado o coeficiente de segurança total, pois as parcelas c e f são apenas parâmetros da reta que exprime a resistência ao cisalhamento do solo, e não podem ser comparados separadamente com as tensões cisalhantes. Note-se, no exemplo apresentado, que apesar da parcela de coesão ser pequena ($C = 30\%$ de S), o coeficiente de segurança em relação à coesão é elevado, quando comparado com o coeficiente de segurança total.

$$FS = \frac{\sum \operatorname{Re} \operatorname{sist\^e}n\operatorname{c}i\operatorname{a}(d\operatorname{i}s\operatorname{p}\operatorname{o}n\operatorname{i}v\operatorname{e}l)}{\sum \operatorname{Re} \operatorname{sist\^e}n\operatorname{c}i\operatorname{a}(m\operatorname{o}b\operatorname{i}l\operatorname{i}z\operatorname{a}d\operatorname{a})} = \frac{c' + (s - m) \operatorname{tg} f}{S_{mob}}$$

Quadro 5.1 – Fatores de segurança.

FS < 1,0	Talude instável (deverá romper)
FS = 1,0	Limite (iminência de ruptura)
FS > 1,0 (pouco maior)	Estável
FS > 1,0 (muito maior)	Menor probabilidade de ruptura em condições críticas (água etc)

5.8. MÉTODOS DE ANÁLISE DE ESTABILIDADE

Diversos métodos têm sido utilizados para se analisar a estabilidade de taludes maciços, a maioria deles com base no critério equilíbrio-limite. A hipótese desses métodos impõe que o critério de ruptura de Coulomb seja satisfeito ao longo de uma superfície de ruptura pré-fixada. Considera-se um corpo livre de um talude e analisa-se o seu equilíbrio, assumindo-se valores para as forças atuantes e calculando-se a força de cisalhamento resistente necessária. Esta força necessária é comparada com a resistência ao cisalhamento disponível, resultando um coeficiente de segurança. Alguns métodos analisam o equilíbrio de um corpo livre como um todo, como o Método de Culmann e o Método de Taylor. Outros dividem o corpo livre em diversas lamelas verticais e consideram o equilíbrio de cada lamela, como o Método de Fellenius e o Método de Bishop. Existe também um método que considera o corpo livre subdividido em cunhas e analisa o equilíbrio entre elas e o restante do maciço, de forma que a cunha situada na parte inferior contribui para a estabilidade da superior, mobilizando-se as resistências ao cisalhamento nas superfícies de ruptura e de contacto entre as cunhas, é o Método das Cunhas.

Como a superfície de ruptura não pode ser conhecida a priori, diversas análises precisam ser processadas, considerando-se diferentes superfícies prováveis e determinando-se os respectivos coeficientes de segurança. A superfície crítica de ruptura será a que apresentar o coeficiente de segurança mínimo.

5.8.1. MÉTODO DO TALUDE INFINITO

Quando um maciço apresenta um talude de grande extensão, tal que a espessura do material instável sujeito ao escorregamento é pequena em relação à sua altura, o talude é denominado talude infinito. A superfície de ruptura é paralela ao talude.

Para analisar a estabilidade de um talude infinito, consideremos um elemento isolado desse talude (Figura 5.8) e as tensões que atuam sobre as três faces deste elemento. Como o talude é infinito é válido assumir que as tensões que atuam sobre as duas faces verticais são iguais e se equilibram, pois se assim não fosse as tensões em planos verticais dependeriam da sua posição ao longo do talude, o que seria contrário à hipótese de que todo o talude se move como uma só massa. Assim, somente as tensões na face BD, devem ser consideradas, juntamente com o peso, no equilíbrio do elemento de solo.

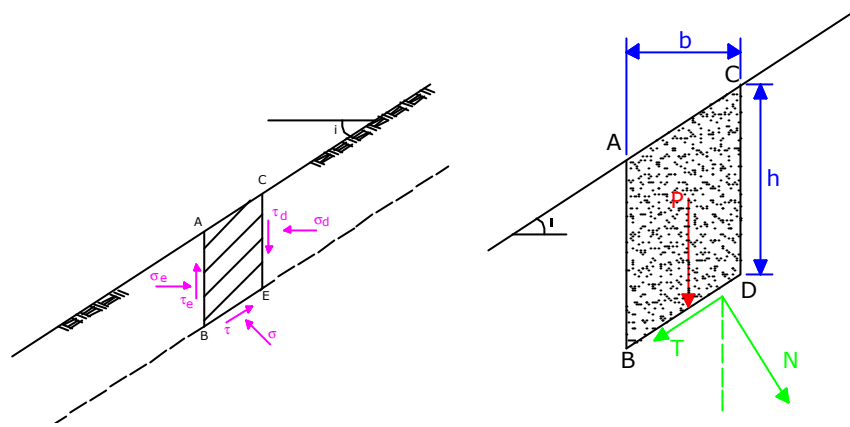


Figura 5.8 - Talude infinito.

Para que ocorra o escorregamento é necessário que a componente tangencial T da força peso se igual à resistência ao cisalhamento do solo ao longo de BD . Se tratar de solo não coesivo, essa resistência será $N \operatorname{tg} f$, e o coeficiente de segurança.

$$F_c = \frac{N \operatorname{tg} f}{T}, \text{ ou seja: } F_c = \frac{P \cos i \operatorname{tg} f}{P \operatorname{sen} i}, \text{ ou } F = \frac{\operatorname{tg} f}{\operatorname{tg} i}$$

Portanto, para que não haja escorregamento é necessário que o ângulo de atrito do solo seja superior ao do talude ($f > i$).

Quando há percolação de água através do maciço o escorregamento ocorre com os taludes mais brandos. Nesse caso costuma-se assumir uma rede de percolação constituída de linhas de fluxo (Figura 5.9). No ponto B , situado a uma profundidade h , a pressão neutra é:

$$u = g_w h \cos^2 i$$

As pressões neutras que atuam no elemento de solo $ABCD$ estão representadas na Figura 5.9.

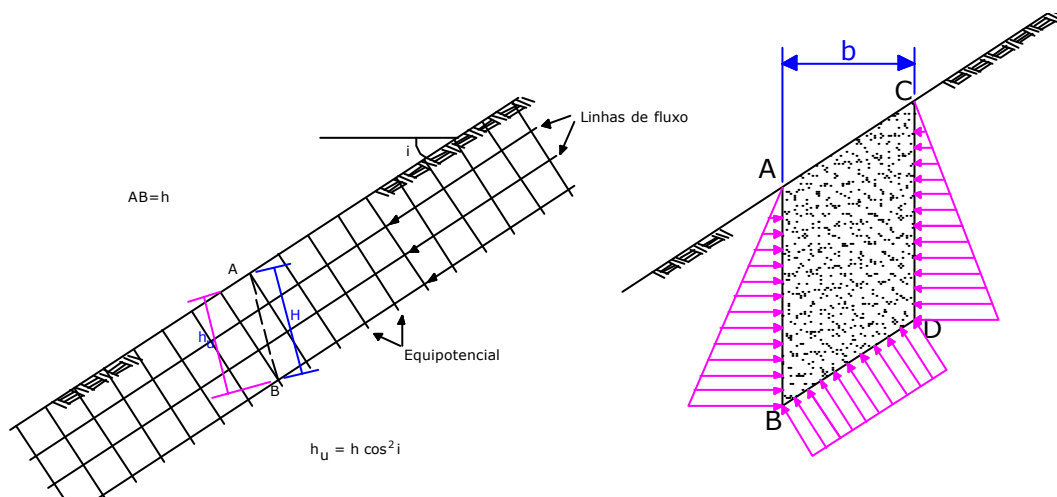


Figura 5.9 – Talude infinito com percolação de água

Note-se que no elemento da Figura 5.9, a resultante dessas pressões na face AB é igual e oposta à face CD, restando apenas as pressões na face BD, cuja resultante vale:

$$u = \mathbf{g}_w \overline{BD} h \cos^2 i ,$$

ou seja,

$$u = \mathbf{g}_w b h \cos^2 i$$

$$BD = \text{área} \quad b = BD \cos i$$

A força resistente ao longo de BD será:

$$(N - U) \mathbf{t} \mathbf{g} \mathbf{f} ,$$

isto é,

$$(P \cos i - U) \mathbf{t} \mathbf{g} \mathbf{f} = (\mathbf{g}_{sat} - \mathbf{g}_w) b h \cos i \mathbf{t} \mathbf{g} \mathbf{f} = \mathbf{g}_{sub} b h \cos i \mathbf{t} \mathbf{g} \mathbf{f}$$

e o coeficiente de segurança valerá:

$$P = \mathbf{g} h$$

$$F = \frac{\mathbf{g}_{sub} b h \cos i \mathbf{t} \mathbf{g} \mathbf{f}}{\mathbf{g}_{sat} b h \text{seni}} , \text{ como } \frac{\cos i}{\text{seni}} = \cot gi = \frac{1}{\mathbf{t} \mathbf{g} \mathbf{i}} , \text{ temos que:}$$

$$F = \frac{\mathbf{g}_{sub} \mathbf{t} \mathbf{g} \mathbf{f}}{\mathbf{g}_{sat} \mathbf{t} \mathbf{g} \mathbf{i}}$$

γ_{sub} é o peso específico aparente do solo submerso, e

γ_{sat} é o peso específico aparente do solo saturado.

Se o solo apresenta coesão e existe percolação de água paralela ao talude, o coeficiente de segurança será:

$$F = \frac{c + \overline{\mathbf{s}} \mathbf{t} \mathbf{g} \mathbf{f}}{\mathbf{t}}$$

A uma profundidade h, tem-se:

$$\overline{\mathbf{s}} = \mathbf{g}_{sub} H \cos^2 i \quad \text{e} \quad \mathbf{t} = \mathbf{g}_{sat} H \text{seni} \cos i , \text{ e}$$

$$F = \frac{c + \mathbf{g}_{sub} H \cos^2 i \mathbf{t} \mathbf{g} \mathbf{f}}{\mathbf{g}_{sat} H \text{seni} \cos i}$$

O coeficiente de segurança precisa ser determinado para a superfície mais crítica.

Para o caso de um solo homogêneo, de espessura vertical H, sobrejacente a um estrato rochoso, a superfície crítica será a interface solo-rocha. Se a resistência ao cisalhamento varia

com a profundidade, o coeficiente de segurança precisa ser pesquisado para diversas profundidades até que seja obtido o seu valor mínimo.

5.8.2. MÉTODO DE CULMANN

Este método é utilizado para a análise de estabilidade de taludes íngremes, e considera o escorregamento ao longo de uma superfície plana. Analisa-se o equilíbrio da cunha de solo situada acima da superfície de escorregamento, considerando-a como um corpo rígido. Entre os infinitos planos possíveis de escorregamento, o crítico será o que apresentar o menor valor do coeficiente de segurança.

Vamos considerar, inicialmente, um terrapleno homogêneo, com um talude de inclinação i e altura H , de peso específico aparente γ e resistência ao cisalhamento $S=c+\sigma \tan \phi$, não sujeito à percolação da água (Figura 5.10). Para a análise do escorregamento ao longo de uma superfície com inclinação α qualquer, considera-se o equilíbrio das seguintes forças:

- peso P da cunha ABD;
- reação R , do restante do maciço, no plano BD, com obliquidade ϕ ;
- força de coesão C , ao longo de BD, atuando no sentido contrário ao escorregamento

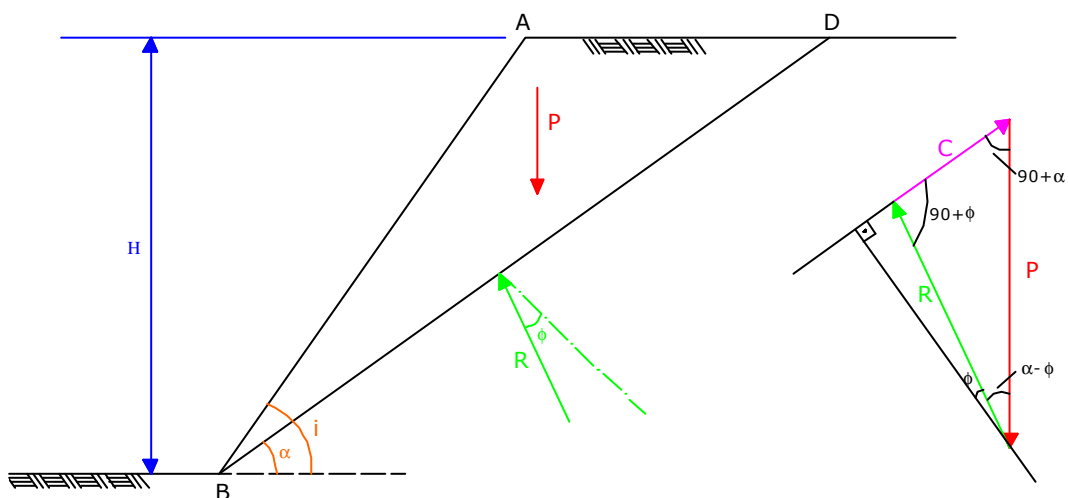


Figura 5.10 – Método de Culmann.

Conhecendo-se o valor do peso P , a direção da força R (supondo-se a mobilização de toda a resistência por atrito), pode-se determinar a força de coesão C , necessária ao equilíbrio. Aplicando-se a lei dos senos no triângulo formado por estas três forças:

$$\frac{c}{\text{sen}(\mathbf{a}-\mathbf{f})} = \left[\frac{P}{\text{sen}(90+\mathbf{f})} \rightarrow \frac{P}{\cos \mathbf{f}} \right]$$

Sendo:

$$P = \frac{1}{2} \mathbf{g}H \frac{\text{sen}(i-\mathbf{a})}{\text{sen } i} \overline{BD}$$

$$C = c \overline{BD} \quad \text{e} \quad P = \mathbf{g} \overline{AD} \frac{H}{2} \quad (5.1)$$

$$\frac{\overline{AD}}{\text{sen}(i-\mathbf{a})} = \frac{\overline{BD}}{\text{sen}(180-i)} \rightarrow \frac{\overline{AD}}{\text{sen}(i-\mathbf{a})} = \frac{\overline{BD}}{\text{sen } i}, \text{ substituindo em (5.1);}$$

$$\frac{c \overline{BD}}{\text{sen}(\mathbf{a}-\mathbf{f})} = \frac{\frac{\mathbf{g}H \overline{BD} \text{sen}(i-\mathbf{a})}{2 \text{sen } i}}{\cos \mathbf{f}} \rightarrow \frac{c}{\mathbf{g}H} = \frac{1}{2} \frac{\text{sen}(\mathbf{a}-\mathbf{f}) \text{sen}(i-\mathbf{a})}{\text{sen } i \cos \mathbf{f}}$$

onde: $\frac{c_{mob}}{\mathbf{g}H} = \text{Número de Estabilidade}$ para um ângulo α qualquer.

A relação $\frac{c_{mob}}{\mathbf{g}H} = \text{Número de Estabilidade}$, entre a coesão necessária ao equilíbrio das forças, o peso específico aparente dos solo e a altura do talude, é denominada número de estabilidade; ela é adimensional e, quanto menor o seu valor, mais crítica será a superfície de escorregamento. Derivando-se a expressão acima, em relação ao ângulo α , e igualando-se a zero o seu resultado, obtém-se o ângulo crítico α_c , para a superfície que apresenta o menor coeficiente de segurança em relação à coesão. Assim, obtém-se:

$$\mathbf{a}_c = \frac{1}{2}(i-\mathbf{f})$$

$$\left(\frac{c}{\mathbf{g}H} \right)_c = \frac{1-\cos(i-\mathbf{f})}{4 \text{sen } i \cos \mathbf{f}}$$

$$c_{mob} = \mathbf{g}H \frac{1-\cos(i-\mathbf{f})}{4 \text{sen } i \cos \mathbf{f}} \rightarrow F_c = \frac{c}{c_{mob}}$$

Para o cálculo do FS (coesão e atrito), deve-se adotar valores de ângulo de atrito (ϕ), variando de 5° em 5° até o valor disponível.

$$F_f = \frac{f}{f_{mob}} \text{ e } c_{mob} = \frac{gH}{4 \sin i \cos f'} \frac{1 - \cos(i - f)}{1 - \cos(i + f)}, \text{ portanto } F_c = \frac{c}{c_{mob}}$$

Para a obtenção do FS e plano de ruptura crítico, deve-se traçar o gráfico em escala (Figura 5.11).

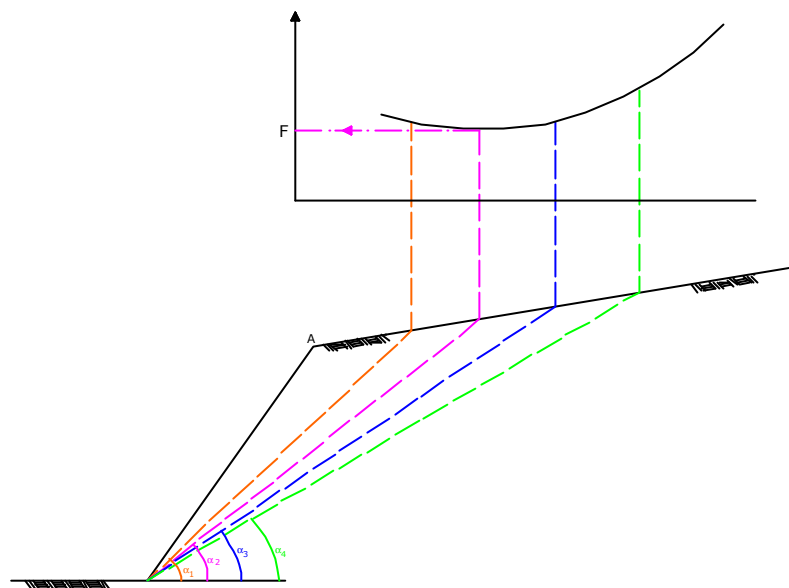


Figura 5.11 – Determinação do FS e plano de ruptura crítico.

A análise de estabilidade para superfície de ruptura plana pode ser elaborada graficamente, o que permite calcular coeficientes de segurança quando existe percolação de água, desde que se conheça a rede de fluxo, e/ou quando a superfície do terrapleno não é horizontal (Figura 5.12).

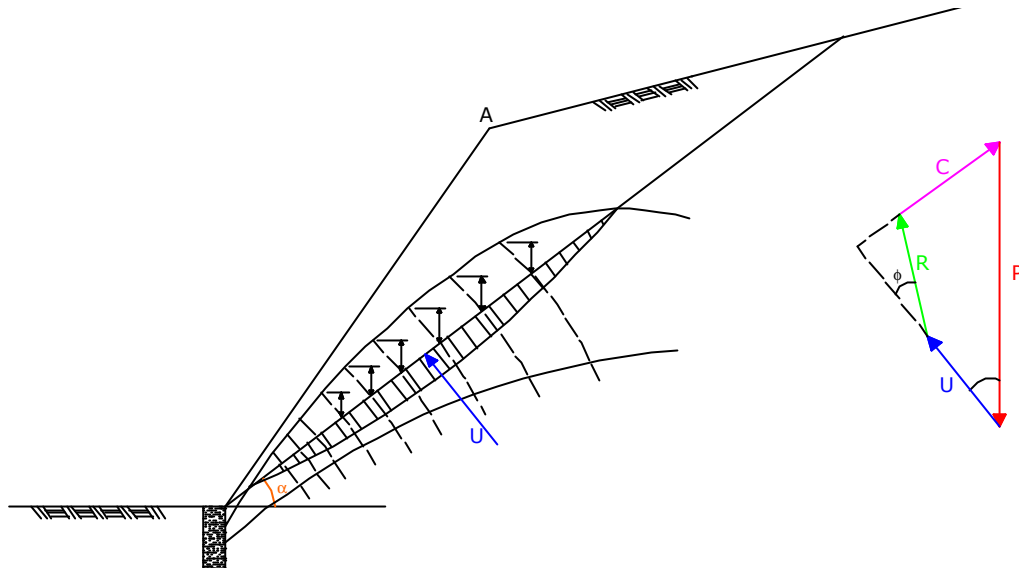


Figura 5.12 – Método de Culmann com percolação de água

Calcula-se a resultante das pressões neutras (U) ao longo da superfície de escorregamento em análise e determina-se a componente normal efetiva da força peso ($N=N-U$) e a seguir a força resistente ($C_{mob} + N' \operatorname{tg} f_{mob}$), que deve ser mobilizada para equilibrar a componente tangencial $T = P \operatorname{sen} \alpha$. O coeficiente de segurança é a relação entre a força resistente disponível e a mobilizada:

$$F = \frac{C + (N - U) \operatorname{tg} f}{C_{mob} + (N - U) \operatorname{tg} f_{mob}}$$

ou seja

$$F = \frac{C + (N - U) \operatorname{tg} f}{T}$$

5.8.3. MÉTODO DE TAYLOR

Para maciços homogêneos, sem percolação de água, Taylor elaborou tabelas e ábacos (Figura 5.13), correlacionando o número de estabilidade (c_{mob}/gH) com o talude (i), para diversos valores do ângulo de atrito do solo (f).

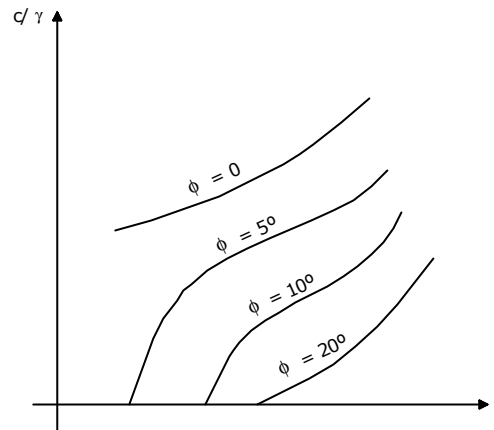


Figura 5.13 – Ábaco de Número de Estabilidade.

Esses quadros e ábacos foram preparados a partir de análises de estabilidade, processadas segundo diferentes métodos, que consideram superfícies de ruptura plana, cilíndrica e espiral logarítmica (Figuras 5.14 e 5.15). A partir do número de estabilidade necessário pode-se determinar a altura crítica ($H=H_c$), além da qual o talude deixa de ser estável.

A seguir calculam-se os valores de F correspondentes a outros valores de a , até obter-se o valor mínimo, que é o coeficiente de segurança. Para a obtenção do FS e plano de ruptura crítico, deve-se traçar o gráfico em escala (Figura 5.11).

$$F_f = \frac{f}{f_{mob}} \text{ e } \frac{c_{mob}}{gH} = \text{Número de Estabilidade}, \text{ portanto } F_c = \frac{c}{c_{mob}}$$

ÁBACO A

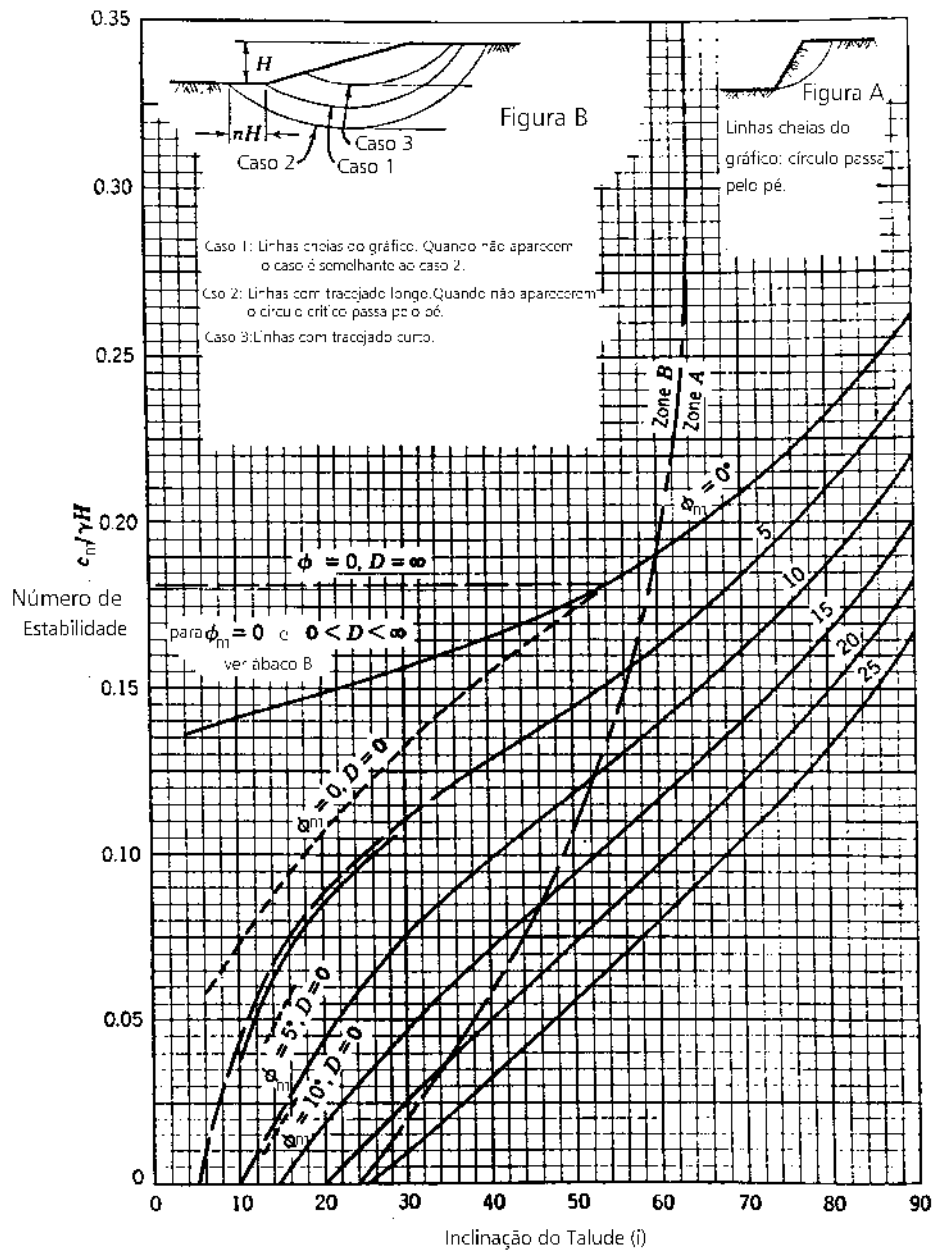


Figura 5.14 - Ábaco A - Taylor (Figuras A e B).

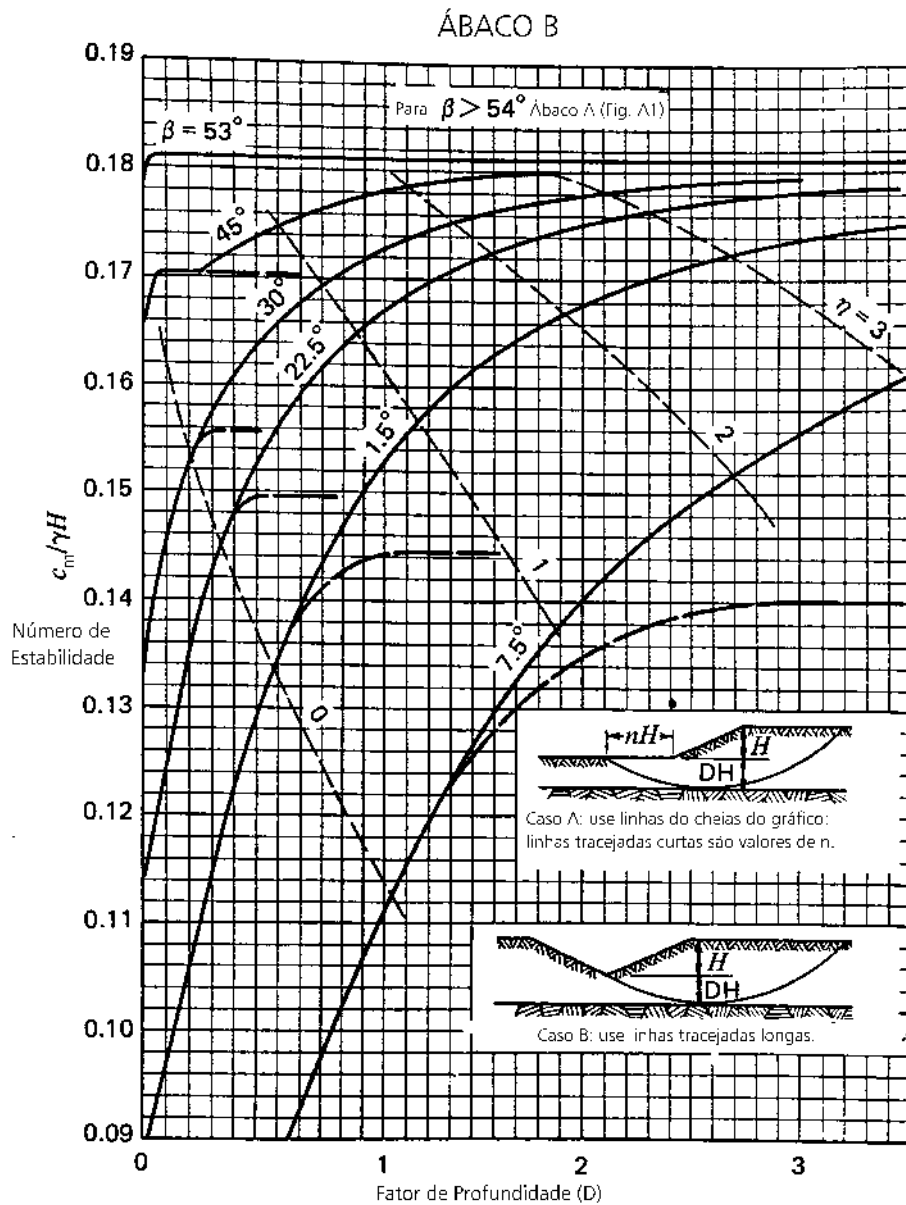


Figura 5.15- Ábaco B - Taylor.

5.8.4. MÉTODO DE FELLENIUS

Também denominado como Método das Lamelas, este método foi introduzido por Fellenius, em 1927, após a observação de inúmeros escorregamentos ocorridos na Suécia, que apresentaram superfícies de ruptura de forma cilíndrica ou esférica. A análise, feita no plano, considera uma linha de ruptura circular e subdivide o corpo livre em uma série de lamelas verticais, de igual largura b (Figura 5.16). Quanto maior o número (n) de lamelas, maior a precisão do resultado, não havendo, entretanto, necessidade deste número ser superior a 10 ou 2.

Determina-se o peso P de cada lamela, que é decomposto, na sua base, em uma força tangencial T e uma normal N . São desprezadas as forças laterais entre as lamelas. Calcula-se o momento devido às forças tangenciais, ou seja:

$$M_a = \sum_1^n TR = R \sum_1^n T$$

em relação ao centro do círculo. O momento das forças resistentes será:

$$M_r = R \sum_1^n bo(c + s \cdot \text{tg} f) R$$

ou seja

$$M_r = Rc \sum_1^n bo + R \text{tg} f \sum_1^n N$$

O coeficiente de segurança é a relação:

$$F = \frac{M_r}{M_a}$$

isto é,

$$M_r = Rc \sum_1^n bo + R \text{tg} f \sum_1^n N$$

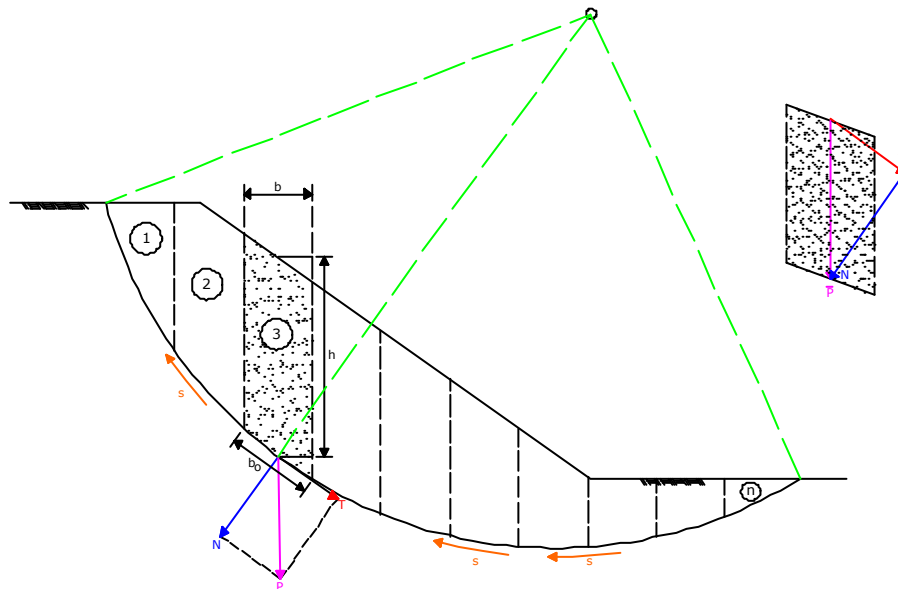


Figura 5.16 – Método de Fellenius.

O método pode ser processado graficamente, utilizando-se a altura h da lamela para representar o seu peso $p = bgh$. Assim a análise é realizada em escala gráfica // bg e os segmentos T e N representam respectivamente as componentes tangencial e normal.

A determinação do coeficiente de segurança aqui também é feita por tentativas, pesquisando-se uma série de círculos, com centros diferentes. Para cada centro deve-se também calcular os coeficientes de segurança para diferentes raios; na maioria das vezes os círculos mais profundos, isto é, com maiores raios, apresentam valores menores de coeficiente de segurança. A pesquisa do centro do círculo que apresenta o coeficiente de segurança mínimo é feita considerando-se uma malha de pontos equidistantes, que permitem o traçado de curvas com igual coeficiente de segurança, que são concêntricas, em torno do valor mínimo (Figura 5.17).

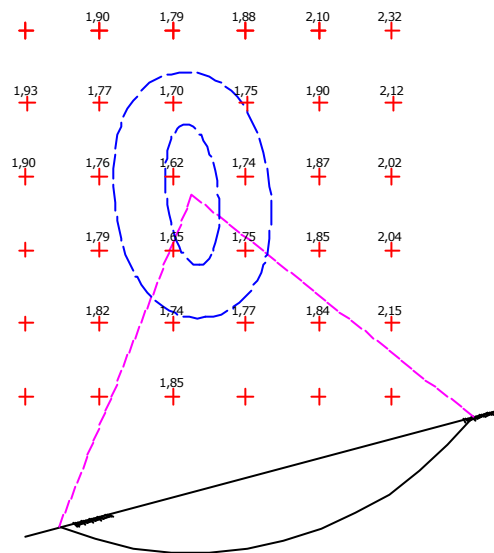


Figura 5.17 - Determinação do Coeficiente de Segurança (mínimo).

Havendo percolação de água no maciço é necessário calcular o diagrama de pressões neutras sobre a superfície de escorregamento. Em cada lamela é computado o valor da resultante das pressões neutras que age sobre ela, ou seja, $u \cdot b_o$, onde u é o valor médio da pressão neutra na lama. Este valor é subtraído da força normal N , e o coeficiente de segurança resulta:

$$FS = \frac{c \sum_1^n b_o + \sum_1^n g \cdot b \cdot N \cdot tg f}{\sum_1^n g \cdot b \cdot T} \quad \text{onde, } \sum b_o = \frac{2 \cdot p \cdot r \cdot q}{360^\circ}$$

Este método permite também a análise no caso de maciço heterogêneo, constituído de dois ou mais solos diferentes. Para tal basta considerar as diferenças de peso específico no peso das lamelas e utilizar par cada trecho da superfície de escorregamento a envoltória de resistência ao cisalhamento do solo se os solos apresentarem comportamento semelhante, em relação à curva tensão-deformação.

Quadro 5.2 - Tabela para o cálculo do método.

LAMELA	b	N	T	$\gamma \cdot b \cdot T$	$\gamma \cdot b \cdot N \cdot \text{tg}\phi$
Σ					

5.8.4. MÉTODO DE BISHOP SIMPLIFICADO

O método de Bishop também considera superfície de ruptura cilíndrica e subdivide o corpo livre em lamelas. Em sua forma geral considera ainda as forças laterais entre lamelas. A diferença básica entre este método e o Fellenius é que analisa, não somente o equilíbrio de momentos resistentes e atuantes, mas também o equilíbrio das forças que agem em cada lamela (Figura 5.18).

A força S_{mob} é a resistência mobilizada para se verificar o equilíbrio das forças que atuam sobre a lamela i , ou seja, a resistência ao cisalhamento do solo, S , ao longo do comprimento b_o dividida por coeficiente de segurança F , igual para todas as lamelas.

$$S_{mob} = \frac{s b_o}{F} = \frac{s b}{F \cos \alpha}$$

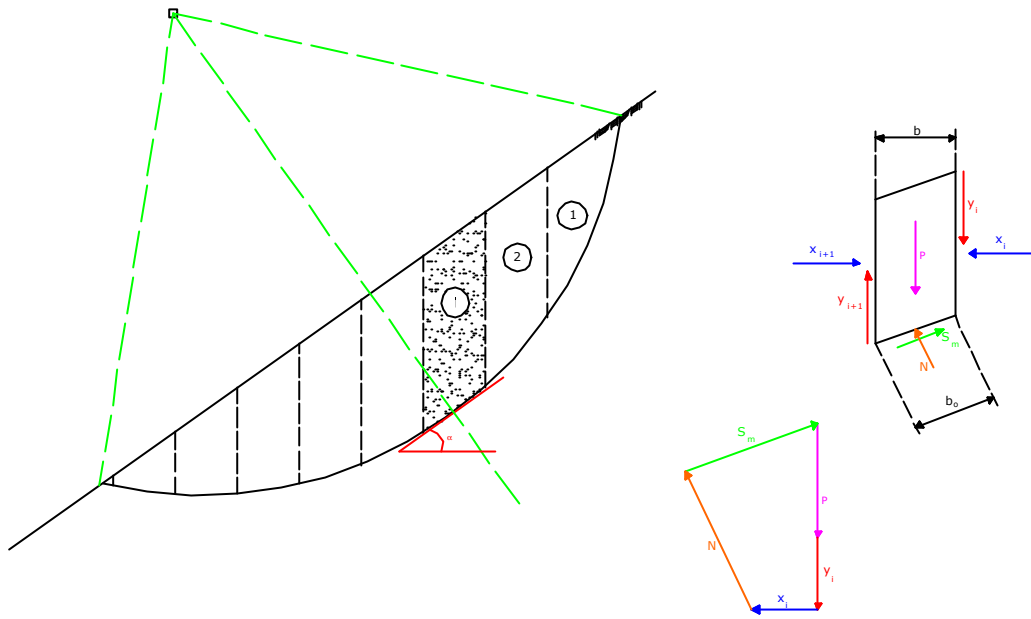


Figura 5.19 - Método de Bishop.

Fazendo-se o equilíbrio de momentos tem-se:

$$R \sum P \operatorname{sen} \mathbf{a} = R \sum S_m$$

Portanto:

$$R \sum P \operatorname{sen} \mathbf{a} = \frac{1}{F} \sum \frac{s b}{\cos \mathbf{a}} \quad \text{então, } F = \frac{\sum \frac{s b}{\cos \mathbf{a}}}{\sum P \operatorname{sen} \mathbf{a}}$$

onde,

$$s = c + s \operatorname{tg} f$$

$$\text{e } s = \frac{N}{b_o} = \frac{N \cos \mathbf{a}}{b}$$

Portanto:

$$s = c + \frac{N \cos \mathbf{a}}{b} \operatorname{tg} f$$

e

$$F = \frac{\sum \frac{c b}{\cos \mathbf{a}} + \sum N \operatorname{tg} f}{\sum P \operatorname{sen} \mathbf{a}}$$

Fazendo-se o equilíbrio de forças na direção de P:

$$P + (y_i + y_{i+1}) = S_m \operatorname{sen} \mathbf{a} + N \cos \mathbf{a}$$

$$P + (y_i + y_{i+1}) = \left(\frac{c b}{F \cos \mathbf{a}} + \frac{N}{F} \operatorname{tg} f \right) \operatorname{sen} \mathbf{a} + N \cos \mathbf{a}$$

$$N = \frac{P + (y_i + y_{i+1}) - \frac{cb}{F} \operatorname{tg} a}{\cos a + \frac{\operatorname{sen} a \operatorname{tg} f}{F}}$$

Para se resolver esta expressão é necessário atribuir-se valores às diferenças $(Y_i - Y_{i-1})$ tais que $\sum (Y_i - Y_{i-1}) = 0$. O Método de Bishop Simplificado admite que $(Y_i - Y_{i-1}) = 0$. Então:

$$N = \frac{P - \frac{cb}{F} \operatorname{tg} a}{\cos a + \frac{\operatorname{sen} a \operatorname{tg} f}{F}}$$

Fazendo-se $M\mathbf{a} = \left(1 + \frac{\operatorname{tg} a \operatorname{tg} f}{F}\right)$, resulta:

$$F = \frac{\sum \frac{cb + P \operatorname{tg} f}{M\mathbf{a}}}{\sum P \operatorname{sen} a}$$

Note-se que a expressão de $M\mathbf{a}$ depende de F . Para se processar a análise deve-se atribuir inicialmente um valor arbitrário a F para o cálculo de $M\mathbf{a}$, o que vai resultar geralmente em um valor calculado de F , diferente do arbitrado. Com este novo valor calcula-se $M\mathbf{a}$ e assim procede-se sucessivamente até obter-se o valor final de F igual ao arbitrado.

Como este processo iterativo é rapidamente convergente geralmente com três ou quatro tentativas chega-se ao valor final do coeficiente de segurança. O Quadro 5.3 facilita o processo de cálculo do coeficiente de segurança.

Quadro 5.3 – Tabela para o Cálculo do método.

LIMITE	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)			(9)		
	α	$\operatorname{sen} \alpha$	P	$P \operatorname{sen} \alpha$	b	bc	$cb + P \operatorname{tg} \phi$	$M\alpha$			$(7)/(8)$		
								F=F1	F=F2	F=F3	F=F1	F=F2	F=F3
1													
2													
3													
.													
.													
.													
.													
n													
Σ				A							B1	B2	B3

$$F_1 = \text{arbitrário}$$

$$F_2 = \frac{B_1}{A}$$

$$F_2 = \frac{B_2}{A}$$

$$F_2 = \frac{B_3}{A} = F(\text{coeficiente de segurança final})$$

O valor de Ma pode ser obtido com o auxílio do gráfico da Figura 5.20.

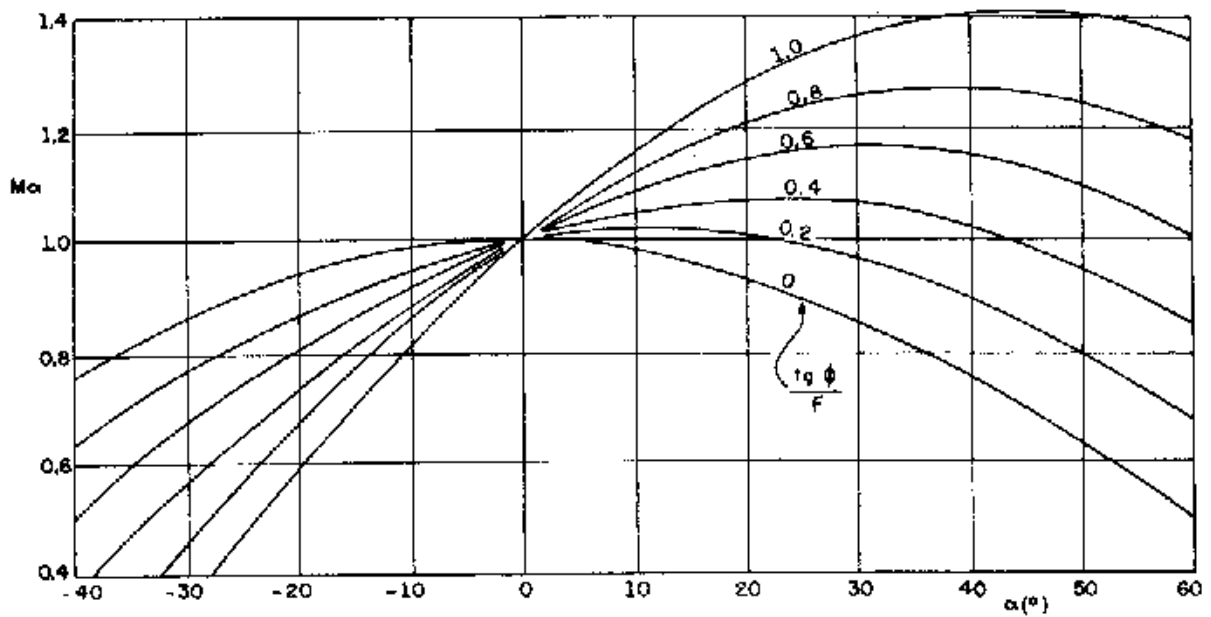


Figura 5.20 - Gráfico para Determinação de Ma

Quando atuam pressões neutras no maciço, sejam por percolação de água ou por adensamento do solo, estas podem ser levadas em conta no cálculo do coeficiente de segurança, cujo valor fica:

$$F = \frac{\sum \frac{c b + (P - u b) \text{tg} f}{Ma}}{\sum P \text{sen} a}$$

5.8.5. MÉTODO DAS CUNHAS

Em alguns casos a superfície potencial de escorregamento pode ser constituída de dois ou mais planos. Isto ocorre quando existem camadas ou zonas de menor resistência no interior do maciço, conforme mostrado na Figura 5.21.

Pelo Método das Cunhas a análise é feita considerando que à parte do maciço potencialmente deslizante se dividem em duas ou mais cunhas, como identificado na Figura 5.10.

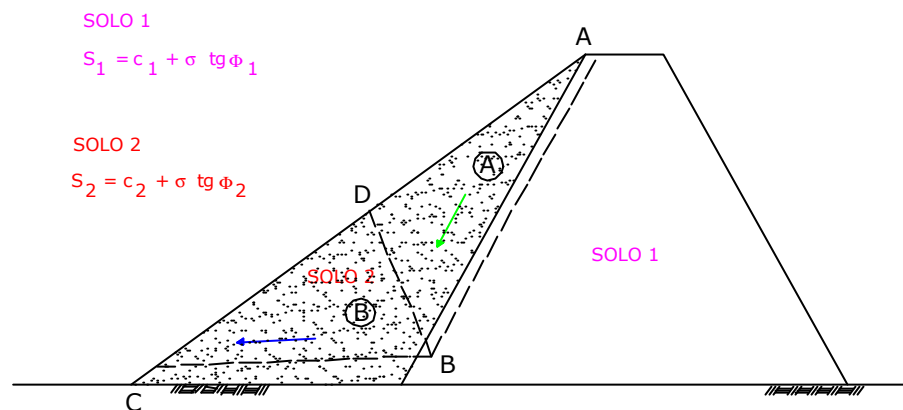


Figura 5.21 - Método das Cunhas.

Nesta figura estão mostradas duas cunhas, que são denominadas cunha ativa (ABC) e a cunha passiva (BCD), que tendem a se deslocar segundo as direções indicadas pela flechas. Para que isto ocorra é necessário que haja um movimento relativo entre ambas, ao longo de BD. As forças que atuam em cada cunha estão indicadas na Figura 5.22 e correspondem ao seu peso próprio, às reações da parte restante do maciço, incluindo a resistência ao cisalhamento ao longo dos planos de BD.

O processo de cálculo do coeficiente de segurança é iterativo, sendo a ele atribuído um valor inicial F_1 , para a consideração dos valores da resistência mobilizada:

$$F_1 = \frac{C_2 \times \overline{CB}}{C_2} = \frac{\operatorname{tg} f_2}{\operatorname{tg} f_1} = \frac{\operatorname{tg} f_1}{\operatorname{tg} f_2}$$

A obliquidade da força lateral entre as cunhas também é considerada com o mesmo coeficiente de segurança.

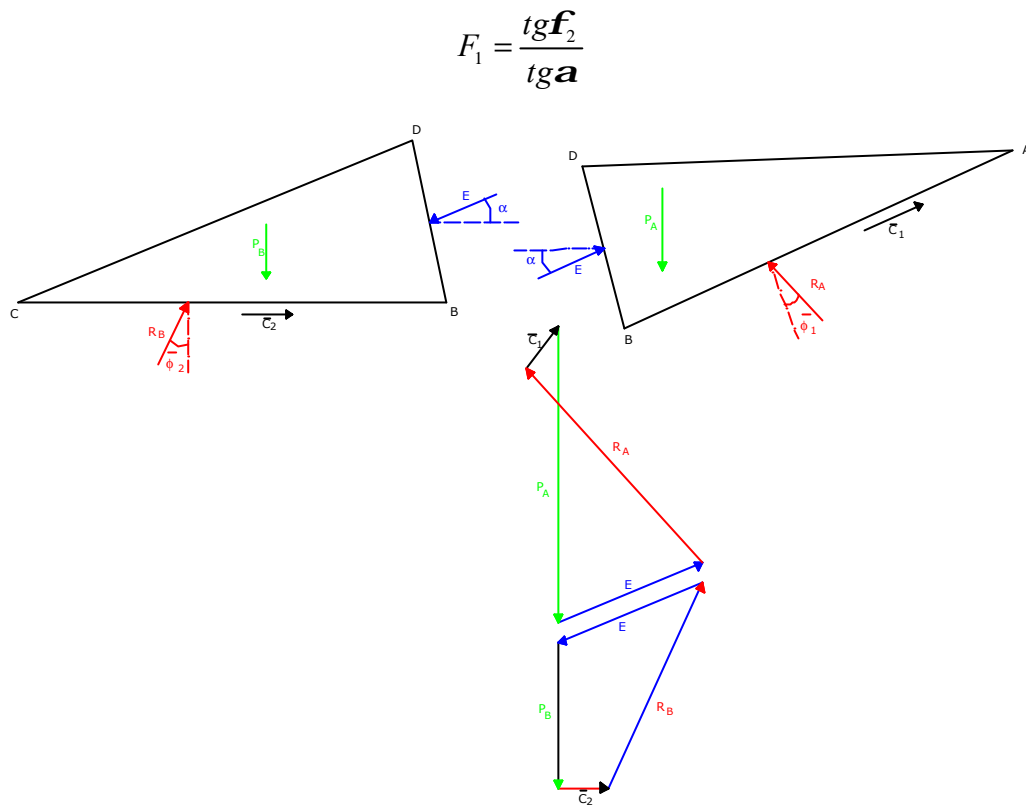


Figura 5.22 - Polígonos de Força.

Através do polígono de forças obtém-se o valor da coesão, $\overline{C_1}$, a ser mobilizada, que comparada com a coesão do solo permite verificar se o coeficiente de segurança atribuído inicialmente é o final. Em caso negativo deve-se experimentar outros valores de F até se constatar a coincidência dos valores inicial e final, o que pode ser conseguido construindo-se um gráfico auxiliar, que correlaciona esses valores inicial e final de cada tentativa.

A inclinação de \overline{BD} deve ser analisada, também por tentativas, até que se obtenha o mínimo valor do coeficiente de segurança para cada superfície ABC considerada.

Da mesma forma que nos métodos anteriores podem ser consideradas forças devidas a pressões neutras, bastando para tal avaliar a sua magnitude e introduzi-las no polígono de forças.

Quando houver necessidade de se considerar mais do que dois planos de deslizamento, o método é aplicado da mesma forma, introduzindo-se também um movimento relativo entre a segunda e a terceira cunha (Figura 5.23).

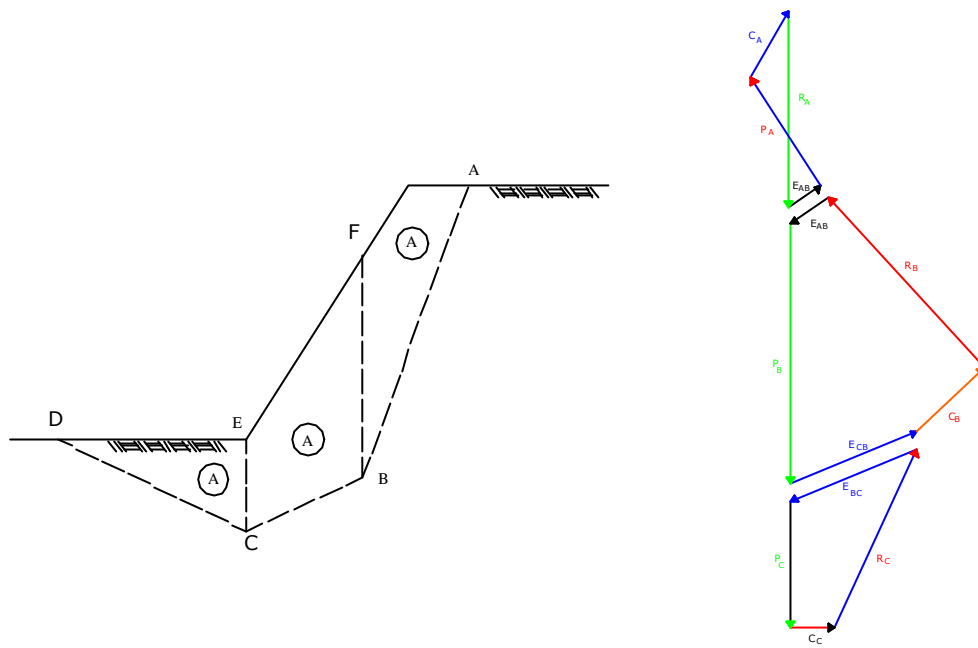
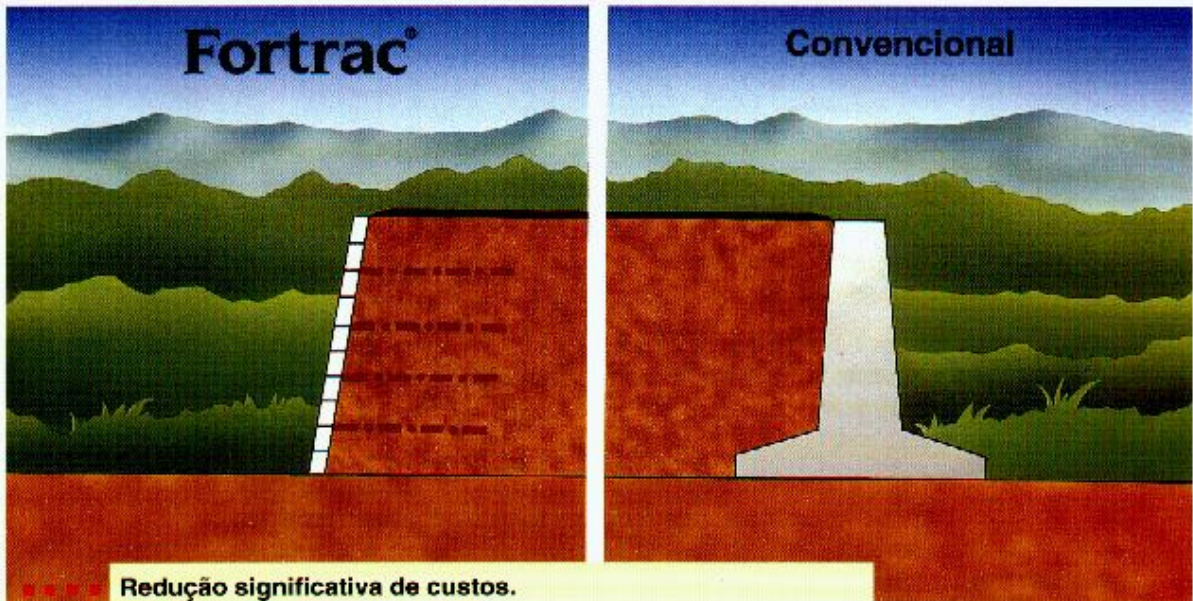


Figura 5.23 – Método das Cunhas para Três Planos de Deslizamento.

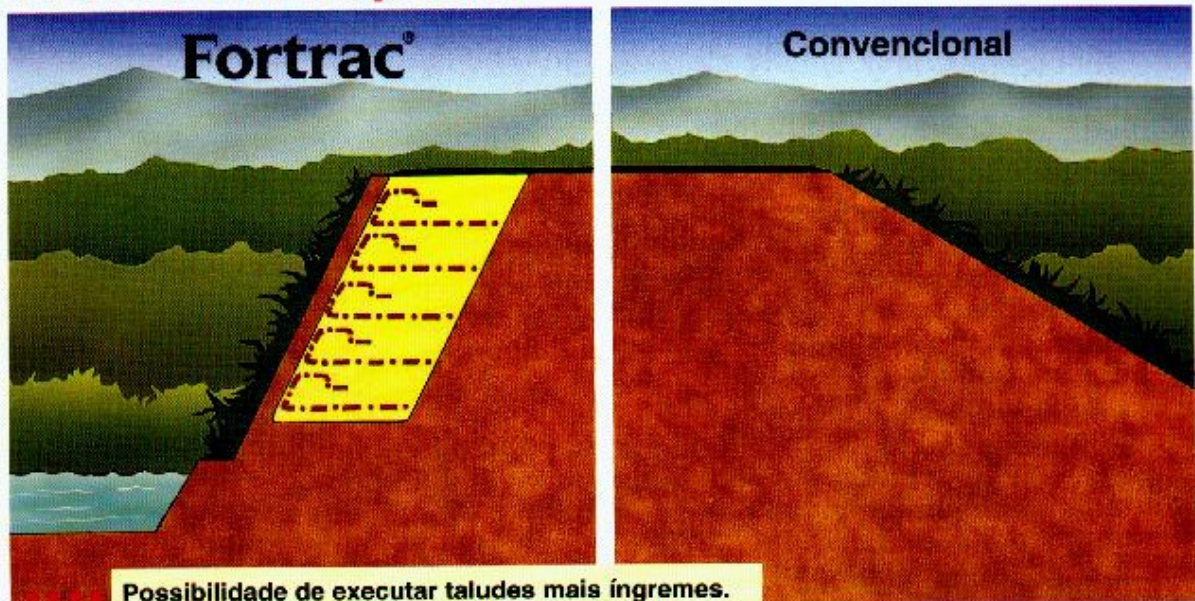
ANEXO

■ MUROS DE CONTENÇÃO



- ■ ■ ■ Redução significativa de custos.
- ■ ■ ■ Redução do tempo de execução.
- ■ ■ ■ Facilidade de execução, mesmo em locais de difícil acesso.
- ■ ■ ■ Elimina a necessidade de concretagem no local.

■ TALUDES REFORÇADOS



- ■ ■ ■ Possibilidade de executar taludes mais íngremes.
- ■ ■ ■ Melhor ocupação do espaço disponível.
- ■ ■ ■ Menor utilização de materiais de aterro.
- ■ ■ ■ Menor interferência com o meio ambiente.