

**Denise M. S. Gerscovich**

# estabilidade de taludes

**2ª edição**

**com exercícios  
resolvidos**

**oficina de textos**

**Denise M. S. Gerscovich**

# **estabilidade de taludes**

**2ª edição**

**com exercícios**

**resolvidos**

**oficina de textos**

Copyright © 2012 Oficina de Textos

1ª reimpressão | 2013

2ª edição | 2016

Grafia atualizada conforme o Acordo Ortográfico da Língua Portuguesa de 1990, em vigor no Brasil desde 2009.

**Conselho editorial** Arthur Pinto Chaves; Cylon Gonçalves da Silva;  
Doris C. C. K. Kowaltowski; José Galizia Tundisi;  
Luis Enrique Sánchez; Paulo Helene; Rozely Ferreira dos Santos;  
Teresa Gallotti Florenzano

**CAPA E PROJETO GRÁFICO** Malu Vallim

**DIAGRAMAÇÃO** Alexandre Babadobulos

**PREPARAÇÃO DE FIGURAS** Eduardo Rossetto, Alexandre Babadobulos  
e Leticia Schneiater

**PREPARAÇÃO DE TEXTO** Rena Signer e Carolina A. Messias

**REVISÃO DE TEXTO** Gerson Silva e Rafael Mattoso

**IMPRESSÃO E ACABAMENTO** Gráfica Rettec

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)**  
**(Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)**

---

Gerscovich, Denise M. S.

Estabilidade de taludes / Denise M. S.

Gerscovich. -- 2. ed. -- São Paulo : Oficina de Textos, 2016.

Bibliografia.

ISBN 978-85-7975-241-4

1. Engenharia de estruturas 2. Geotécnica  
3. Geotexteis 4. Mecânica do solo I. Título.

16-02592

CDD-624

---

Índices para catálogo sistemático:

1. Estabilidade de taludes : Engenharia civil

624

Todos os direitos reservados à **Editora Oficina de Textos**

Rua Cubatão, 798

CEP 04013-003 São Paulo SP

tel. (11) 3085 7933

[www.ofitexto.com.br](http://www.ofitexto.com.br)

[atend@ofitexto.com.br](mailto:atend@ofitexto.com.br)

## AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus mestres, que me ensinaram como enfrentar o desafio de prever o comportamento de um material tão complexo, produto da natureza.

Agradeço aos meus alunos, que motivaram a organização deste volume.

Agradeço à minha família, que me apoiou em todos os momentos da minha vida.

Agradeço à Faperj pelo apoio ao ensino e à pesquisa no Rio de Janeiro.

A questão da segurança envolvendo taludes em materiais geomecânicos (solos, alteração de rocha, fraturas e descontinuidades, rochas) é um problema recorrente nas Engenharias Civil e Geotécnica, seja envolvendo encostas naturais, seja envolvendo taludes de aterros e pilhas. Em muitas situações nos mais diversos tipos de obras e outras intervenções humanas, a avaliação da segurança de taludes é o fator controlador de projetos, normalmente expresso sob a forma de um coeficiente de segurança mínimo a ser estabelecido como critério de projeto/implantação ou sob outras formas de expressar a segurança (p.ex., probabilidade de ruptura). Destacam-se ainda as frequentes ocorrências recentes de fenômenos maciços de movimentação de massa em encostas naturais, com maior ou menor influência humana.

Apesar do assunto estabilidade de taludes ser tratado como capítulo em grande número de livros-texto – particularmente estrangeiros, mas também em algumas referências brasileiras –, havia uma carência de um texto mais específico envolvendo as análises de estabilidade com uma abordagem tanto qualitativa como quantitativa.

O livro da Profa. Denise Gerscovitch vem suprir essa lacuna na literatura técnica básica brasileira. Pela sua estruturação, este livro fornece uma visão abrangente do problema de avaliação da segurança de taludes naturais, aterros e pilhas, cobrindo os diversos aspectos do problema envolvendo:

1. identificação do tipo de movimento de massa, essencial para seleção do método de avaliação qualitativa ou de análise quantitativa do fenômeno;
2. conceituação das causas possíveis dos escorregamentos e consequente seleção do tipo de análise a ser aplicada em cada caso;
3. definição do tipo de solicitação envolvida (drenada ou não drenada, curto ou longo prazo) e consequente definição do tipo de análise a ser aplicada (tensões efetivas ou totais, materiais saturados ou parcialmente saturados);

4. identificação e determinação dos parâmetros geomecânicos dos materiais (solos, rochas, planos de fraqueza, descontinuidade) requeridos nos tipos de movimento e de análise identificados; e
5. descrição detalhada dos métodos de cálculo usados em análises de estabilidade, aplicáveis em cada situação.

A Profa. Denise tem sólida formação básica e acadêmica e larga experiência em estudos e avaliações envolvendo estabilidade de encostas naturais e taludes de aterros, sob diferentes condições. Também é professora de cursos de graduação e pós-graduação relacionados com esse assunto e supervisionou diversas teses de mestrado e trabalhos de final de curso, além de diversas palestras técnicas e relatos gerais em conferências. Ressalte-se também sua participação na equipe que elaborou o *Manual de Estabilidade de Encostas da Geo-Rio*, referência brasileira obrigatória sobre o assunto. Seu trabalho de pesquisa de doutoramento, relacionado com estabilidade de encostas, destacou-se pelo tratamento simultâneo do problema de infiltração de água de chuva em encostas naturais, parcialmente saturadas, com a avaliação de efeitos tridimensionais nos estudos de fluxo e estabilidade. O trabalho ainda abrangeu o estudo de um caso real de escorregamento de grande porte e importância em encosta natural no Rio de Janeiro, tornando-se um dos mais completos e inovadores nessa área.

Tendo acompanhado ao longo de vários anos as atividades acadêmicas e profissionais da Profa. Denise, tenho a certeza de que a presente publicação se tornará uma referência obrigatória em cursos de graduação em Engenharia Civil e Engenharia Geotécnica, assim como importante referência para cursos de pós-graduação e para profissionais de Engenharia Geotécnica.

Vamos esperar que, em breve, a autora dê continuidade a esta primeira publicação, envolvendo exemplos e casos de aplicações e um novo texto envolvendo métodos de cálculo das técnicas de estabilização de encostas.

*Leandro de Moura Costa Filho*  
Sócio-Diretor da LPS Consultoria e Engenharia

Escorregamentos de taludes são uma das formas mais frequentes de movimento de massa e, por esse motivo, representam o escopo principal deste livro. Os mecanismos deflagradores e métodos de análise vêm sendo estudados há décadas por pesquisadores em várias partes do mundo. Muito já se avançou na compreensão do comportamento dos solos sob diferentes condições de umidade e na disponibilização de ferramentas computacionais de análise. Entretanto, escorregamentos de encostas ainda promovem sérios problemas, particularmente em áreas montanhosas, chegando a se caracterizar como uma questão de ordem pública, governamental.

Solucionar problemas de estabilidade de taludes é uma prática comum na engenharia geotécnica. Cabe ao engenheiro desenvolver um projeto que seja ótimo em termos econômicos e, principalmente, que garanta a segurança do empreendimento. Um talude pode, por exemplo, tornar-se instável quando as tensões cisalhantes mobilizadas na massa de solo ou rocha atingem a resistência ao cisalhamento do material. Essa condição pode ser atingida pela intervenção de agentes externos (como, por exemplo, a ação do homem) ou internos (alterações da resistência por intemperismo, por exemplo).

Como fatores decorrentes da atividade humana, enquadram-se as alterações na rede de drenagem e no uso e ocupação do solo (eliminação da cobertura vegetal, cortes para abertura de novas estradas, construção de muros, taludes mal dimensionados, lançamento de lixo etc.).

No caso de taludes naturais, a entrada de água no solo promove mudanças nas pressões de água intersticiais, potencializando as condições favoráveis à instabilização. A infiltração pode se dar superficialmente, pela ação da água da chuva; pelo mau funcionamento de sistemas de drenagem; ou em profundidade, por fluxo através de fraturas no embasamento rochoso ou mesmo por rupturas de tubulações de serviços de água ou de esgoto.

A inclinação dos taludes também é um dos fatores que influenciam a ocorrência de movimentos de massa. Assim, taludes mais íngremes

tendem a ser mais suscetíveis a processos de instabilidade. Há outros fatores decisivos para desencadear os movimentos de massa, como, por exemplo, sismos e atividades vulcânicas.

As análises da estabilidade de taludes construídos são realizadas com base na geometria do problema, na inclusão de possíveis carregamentos externos, no conhecimento das propriedades geomecânicas dos materiais e nos padrões de fluxo. No caso de encostas, a avaliação da estabilidade envolve conhecimentos prévios sobre a geologia, a topografia, as características mecânicas dos materiais, além do estabelecimento de hipóteses sobre as possíveis condições hidrológicas que podem ocorrer. Adicionalmente, é importante identificar as eventuais movimentações prévias, para se estabelecer os mecanismos de deflagração da ruptura.

Os estudos de estabilidade também se aplicam na análise de taludes já rompidos, pois fornecem informações relevantes sobre os parâmetros de resistência dos materiais envolvidos e auxiliam no estabelecimento de medidas corretivas. Na realidade, a ruptura de um talude pode ser associada a um ensaio de resistência de grandes dimensões. Assim, os parâmetros necessários para atingir a ruptura podem ser calculados na retroanálise e comparados com os parâmetros de resistência atribuídos no projeto original.

Esta obra procura apresentar aos estudantes e aos profissionais de engenharia os temas mais importantes relacionados ao estudo e análise de estabilidade de taludes. No Cap. 1, definem-se os tipos de taludes e movimentos de massa. O Cap. 2 trata dos conceitos básicos necessários para a realização de estudos de estabilidade. São revistas definições e metodologias para análise de tensões em solos, previsão de pressões na água presente nos vazios e conceitos de resistência ao cisalhamento. No Cap. 3, são apresentadas, passo a passo, todas as etapas para a análise e concepção do projeto de estabilidade, contemplando a escolha do momento mais crítico do projeto e a forma mais adequada de abordagem do problema. No Cap. 4, apresentam-se métodos de estabilidade por equilíbrio limite, subdivididos por forma da superfície potencial de ruptura. Por fim, o Anexo A complementa os ábacos de estabilidade e o Anexo B apresenta um breve resumo dos principais métodos de estabilidade.

<b>1 TIPOS DE TALUDE E MOVIMENTO DE MASSA .....</b>	<b>11</b>
1.1 Tipos de talude.....	11
1.2 Tipos de movimento de massa .....	15
<b>2 CONCEITOS BÁSICOS APLICADOS A ESTUDOS DE ESTABILIDADE .....</b>	<b>35</b>
2.1 Conceito de tensão.....	35
2.2 Conceito de deformações .....	42
2.3 Comportamento tensão x deformação.....	43
2.4 Tensões em solos.....	47
2.5 Água no solo.....	56
2.6 Resistência ao cisalhamento .....	77
<b>3 CONCEPÇÃO DE PROJETO DE ESTABILIDADE .....</b>	<b>85</b>
3.1 Quanto à geometria da ruptura .....	87
3.2 Quanto ao método de análise.....	87
3.3 Quanto à escolha da condição crítica: final de construção x longo prazo.....	93
3.4 Quanto ao tipo de análise .....	95
3.5 Quanto aos parâmetros dos materiais.....	96
<b>4 MÉTODOS DE ESTABILIDADE .....</b>	<b>101</b>
4.1 Talude vertical – solos coesivos.....	101
4.2 Blocos rígidos.....	103
4.3 Talude Infinito.....	107
4.4 Superfícies planares – talude finito .....	115
4.5 Superfície circular.....	125
4.6 Superfícies não circulares.....	161
4.7 Comentários sobre os métodos de equilíbrio limite .....	173
<b>ANEXO A.....</b>	<b>177</b>
<b>ANEXO B.....</b>	<b>183</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS CITADAS E RECOMENDADAS.....</b>	<b>186</b>

### 1.1 TIPOS DE TALUDE

Talude é a denominação que se dá a qualquer superfície inclinada de um maciço de solo ou rocha. Ele pode ser natural, também denominado encosta, ou construído pelo homem, como, por exemplo, os aterros e cortes.

A Fig. 1.1 exemplifica várias situações práticas em que as análises de estabilidade são necessárias. No caso de aterros construídos ou cortes, a análise deve ser realizada considerando as alterações geradas ao longo da execução e após o término da obra, de forma a identificar a condição mais crítica em termos de segurança. No caso de barragens de terra, deve-se analisar a estabilidade nas diversas etapas de construção e operação, isto é, no final da construção, durante a operação e em situações em que a barragem poderá estar sujeita a um rebaixamento rápido do reservatório. As barragens de rejeitos são estruturas semelhantes às barragens de terra, entretanto, têm a função de estocagem de resíduo e, em muitos casos, o próprio rejeito é usado como material de construção. Esse tipo de obra tem como condição crítica a baixa capacidade de suporte do resíduo.

A ruptura em si caracteriza-se pela formação de uma superfície de cisalhamento contínua na massa de solo. Portanto, existe uma camada de solo em torno da superfície de cisalhamento que perde suas características durante o processo de ruptura, formando assim a zona cisalhada, conforme mostrado na Fig. 1.2. Inicialmente, forma-se a zona cisalhada e, em seguida, desenvolve-se a superfície de cisalhamento.

#### 1.1.1 Taludes construídos

Os taludes construídos pela ação humana resultam de cortes em encostas, de escavações ou de lançamento de aterros.

Os cortes devem ser executados com altura e inclinação adequadas, para garantir a estabilidade da obra. O projeto depende das propriedades geomecânicas dos materiais e das condições de fluxo.

ções naturais promove um desequilíbrio ambiental que resulta na movimentação das camadas mais superficiais.

As erosões também podem se caracterizar como processos de evolução natural. As erosões costeiras, por exemplo, representam um processo que se desenvolve a partir de um conjunto de fenômenos e processos dinâmicos, que alteram as condições de estabilidade e podem levar a situações de risco para as populações que ali vivem ou para eventuais ocupações futuras. Os processos erosivos são subdivididos em dois movimentos, de acordo com o agente deflagrador: quando a água subterrânea é o principal agente, o processo é denominado voçoroca; caso contrário, denomina-se ravina (Fig. 1.10). A potencialidade do desenvolvimento de processos erosivos depende de fatores externos e internos, conforme mostrado no Quadro 1.5.



(A) Ravinas (sem surgência de água)  
(Kalinny; Coutinho; Queiroz, 2005)



(B) Voçorocas (com surgência de água)  
(Futai; Almeida; Lacerda, 2005)

**FIG. 1.10** Processos erosivos (Kalinny; Coutinho; Queiroz, 2005)

#### QUADRO 1.5 Fatores condicionantes de processos erosivos

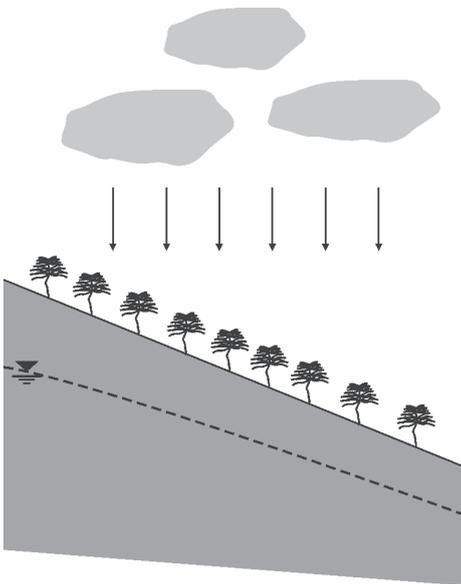
Fatores externos	Potencial de erosividade da chuva Condições de infiltração Escoamento superficial Topografia (declividade e comprimento da encosta)
Fatores internos	Fluxo interno Tipo de solo Desagregabilidade Erodibilidade Características geológicas e geomorfológicas Presença de trincas de origem tectônica Evolução físico-química e mineralógica do solo

Na gênese e evolução das erosões, os mecanismos atuam de modo isolado ou em conjunto, em fenômenos como: erosão superficial, erosão subterrânea, solapamento, desmoronamento e instabilidade de taludes (escorregamentos), além das alterações que os próprios solos podem sofrer em consequência dos fluxos em meio saturado e não saturado em direção aos taludes, tornando complexo o conhecimento

Apresentam-se, a seguir, alguns dos efeitos da vegetação na estabilidade das encostas (Guidicini; Nieble, 1983).

Quanto à ação das copas e caules das árvores

- As copas protegem a superfície da ação dos agentes climáticos (raios solares, vento, chuva etc.), minimizando as mudanças bruscas de temperatura e umidade. Com isso, retardam a ação do intemperismo e, com a interceptação da precipitação, reduzem o volume de água que incide sobre a superfície do talude (Fig. 1.26).



- Os caules das árvores geram um caminho preferencial de escoamento de água, concentrando a infiltração dos volumes de água precipitada nessa região.

- Os caules e as copas podem estar sujeitos à força do vento; quando transmitida ao solo, gera uma tensão adicional que pode contribuir para instabilizar a encosta. Estudos em túneis de vento em modelos indicaram que o acréscimo na tensão cisalhante mobilizada é da ordem de:

$$\Delta\tau = \frac{C\rho\mu_s^2}{2} \quad (1.1)$$

em que  $C$  é o coeficiente de arrasto (0,3 a 0,15),  $\rho$  é a densidade da massa de ar ( $12 \times 10^{-3} \text{KN/m}^3$ ) e  $\mu_s$  é a velocidade do vento (km/h). Ao se considerar uma velocidade do vento relativamente alta, de 90 km/h, e coeficiente de arrasto médio de 0,2, chega-se a um acréscimo de tensão cisalhante de 1 kPa, desprezível para fins práticos. Por outro lado, a ação do vento pode derrubar a árvore e, com isso, favorecer a infiltração de água (Fiori; Carmignani, 2009).

- A cobertura vegetal aumenta o peso sobre o talude. Ao se calcular a tensão exercida pela cobertura vegetal dividindo o peso da árvore pela área de abrangência das raízes, registraram-se valores entre 2,5 kPa e 5 kPa (Fiori; Carmignani, 2009).
- A vegetação promove a deposição de matéria orgânica sobre a superfície do talude, a qual absorve parte da água precipitada, protegendo o talude dos efeitos da erosão superficial.

**Fig. 1.26** Proteção superficial

Em geral, os estudos de estabilidade de taludes seguem a seguinte metodologia:

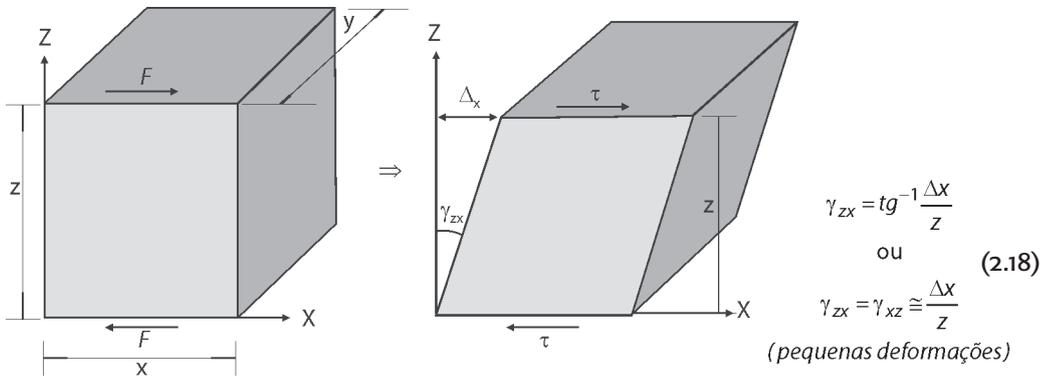
- ▣ definição da topografia do talude;
- ▣ definição das sobrecargas a serem aplicadas sobre o talude, caso existam;
- ▣ execução das investigações de campo para definir a estratigrafia e identificar os elementos estruturais eventualmente enterrados na massa e os níveis freáticos;
- ▣ definição das condições críticas do talude, considerando diversos momentos da vida útil da obra;
- ▣ definição dos locais de extração de amostra indeformada;
- ▣ realização de ensaios de caracterização, resistência ao cisalhamento e deformabilidade (para estudos de análise de tensões);
- ▣ análise dos resultados dos ensaios para definir os parâmetros de projeto;
- ▣ adoção de métodos de dimensionamento para a obtenção do fator de segurança ou das tensões e deformações.

A qualidade do projeto depende da confiabilidade das investigações de campo e laboratório e da capacidade do projetista em interpretar os resultados experimentais, definir os parâmetros de projeto e, principalmente, analisar os diferentes cenários possíveis que possam alterar as condições de resistência ao cisalhamento e reduzir o fator de segurança.

A seguir, apresentam-se os conceitos básicos necessários para a realização de um estudo de estabilidade.

### 2.1 CONCEITO DE TENSÃO

Qualquer ponto no interior da massa de solo está sujeito a esforços, em razão do peso próprio, além daqueles gerados pela ação de forças externas. Esses esforços podem ser representados por suas resultantes, atuantes nas direções normal ( $R_\alpha$ ) e tangencial ( $T_\alpha$ ), a partir das quais,

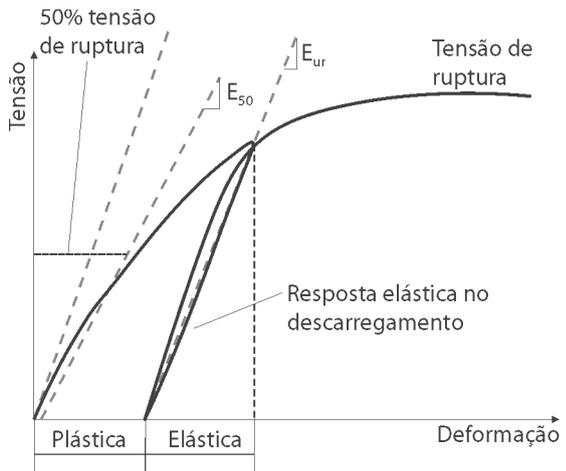


**Fig. 2.13** Deformação cisalhante no plano XZ

### 2.3 COMPORTAMENTO TENSÃO X DEFORMAÇÃO

Em solos, as relações tensão × deformação são não lineares (Fig. 2.14). Os módulos de elasticidade ou de deformabilidade, ou módulo de Young (E), que caracterizam a inclinação da curva, variam em função do nível de tensões e da sua trajetória de tensões. Quando o solo é descarregado, a inclinação da curva muda, indicando que o módulo de deformabilidade no descarregamento ( $E_{ur}$ ) é significativamente maior do que no carregamento ( $E_{ur} > E$ ). Após o descarregamento, as deformações não são recuperadas integralmente, permanecendo um resíduo denominado deformação plástica. Com isso, variações no estado de tensões geram deformações totais que podem ser subdivididas numa parcela elástica ( $\epsilon_e$ ) e outra plástica ( $\epsilon_p$ ), caracterizando o solo com um comportamento elastoplástico.

A influência da trajetória de tensões no comportamento tensão/deformação evidencia-se quando se comparam as curvas de carregamento com as de descarregamento. O resultado é estendido para qualquer sequência de variação de tensões no solo, isto é, os módulos de deformabilidade variam conforme a trajetória imposta. A Fig. 2.15 mostra resultados de



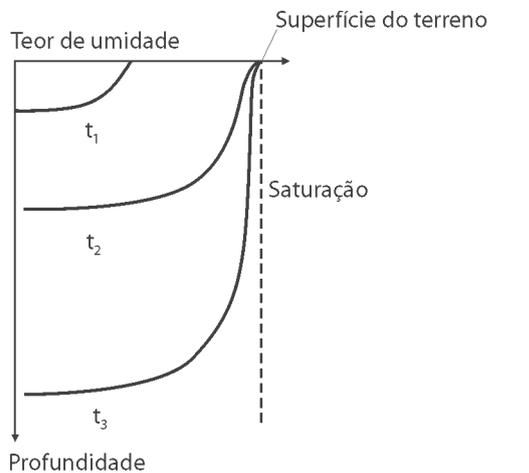
- $E_i$  – módulo tangente inicial
- $E_{50}$  – módulo secante, passando pela origem e a 50% da tensão na ruptura
- $E_{ur}$  – módulo de descarregamento

**Fig. 2.14** Curva tensão x deformação

compreendido por meio da Fig. 2.27. Inicialmente, há uma tendência de aumento do teor de umidade na região superficial; em seguida, ocorre o avanço da frente de saturação para profundidades mais elevadas.

Ao se examinar mais detalhadamente um perfil de infiltração sob uma lâmina d'água constante, verifica-se a existência de três regiões distintas (Fig. 2.28): (i) zona saturada, com uma espessura de poucos centímetros; (ii) zona de transmissão, aparentemente uniforme; (iii) zona de umedecimento, onde ocorre uma drástica redução da umidade, limitada pela frente de umedecimento. A zona de transmissão caracteriza-se por uma condição de quase saturação, em decorrência de bolhas de ar retidas nos vazios, que impedem a saturação completa. Em solos finos, a espessura da zona de transição é mais bem definida.

A taxa de infiltração depende da condutividade hidráulica do solo superficial e da intensidade de chuva, entre outros fatores. Quando a intensidade de chuva é inferior à infiltrabilidade, a infiltração é contínua; caso contrário, quando a intensidade de chuva é superior à infiltrabilidade, há um acúmulo de água na superfície e a taxa de infiltração se iguala à infiltrabilidade. A Fig. 2.29 apresenta um esquema das possíveis relações entre taxa de infiltração e intensidade de chuva ( $R$ ), de acordo com as condições de infiltrabilidade. Sempre que a intensidade de chuva for inferior à condutividade saturada ( $k_{sat}$ ) da região superficial, o processo de infiltração será contínuo, como mostra a curva A. Se a intensidade de chuva for superior à condutividade saturada ( $k_{sat}$ ), mas inferior à infiltrabilidade, haverá um processo contínuo de infiltração, até que ocorra a saturação da região superficial; então, haverá uma redução da taxa de infiltração, como mostra a curva B. Por fim, se a intensidade de chuva for superior à infiltrabilidade, o processo de infiltração será semelhante ao caso B, e a saturação superficial ocorrerá instantaneamente (curva C) (Hillel, 1971).



- $t < t_1$  - predominância dos gradientes de sucção
- $t = t_2$  - saturação superficial
- $t > t_3$  - predominância dos gradientes gravitacionais

**Fig. 2.27** Estágios da evolução do teor de umidade com o tempo

O objetivo da análise de estabilidade é avaliar a possibilidade de ocorrência de escorregamento de massa de solo presente em talude natural ou construído. Em geral, as análises são realizadas pela comparação das tensões cisalhantes mobilizadas com a resistência ao cisalhamento. Com isso, define-se um fator de segurança dado por:

$$FS = \frac{\tau_f}{\tau_{mob}} \quad \left| \begin{array}{l} > 1 \Rightarrow \text{obra estável} \\ = 1 \Rightarrow \text{ocorre ruptura} \\ < 1 \Rightarrow \text{não tem significado físico} \end{array} \right. \quad (3.1)$$

Esse tipo de abordagem é denominado determinístico, pois estabelece um determinado valor para o FS. O  $FS_{adm}$  de um projeto corresponde a um valor mínimo a ser atingido e varia em função do tipo de obra e vida útil. A definição do valor admissível para o fator de segurança ( $FS_{adm}$ ) depende, entre outros fatores, das consequências de uma eventual ruptura em termos de perdas humanas e/ou econômicas.

A norma NBR 11682 (ABNT, 2008) estabelece que, dependendo dos riscos envolvidos, deve-se inicialmente enquadrar o projeto em uma das classificações de Nível de Segurança, definidas a partir dos riscos de perdas humanas (Quadro 3.1) e perdas materiais (Quadro 3.2). A qualificação de risco deve considerar não somente as condições atuais do talude, como também o uso futuro da área, preservando-se o talude contra cortes na base, desmatamento, sobrecargas e infiltração excessiva.

**QUADRO 3.1** Nível de segurança desejado contra perdas humanas

Nível de segurança	Critérios
Alto	Áreas com intensa movimentação e permanência de pessoas, como edificações públicas, residenciais ou industriais, estádios, praças e demais locais urbanos, ou não, com possibilidade de elevada concentração de pessoas Ferrovias e rodovias de tráfego intenso
Médio	Áreas e edificações com movimentação e permanência restrita de pessoas Ferrovias e rodovias de tráfego moderado
Baixo	Áreas e edificações com movimentação e permanência eventual de pessoas Ferrovias e rodovias de tráfego reduzido

É necessário determinar os parâmetros:  $c'$ ,  $\phi'$  e  $u$  ( $u_o + \Delta u$ ). Na condição não saturada, a expressão torna-se:

$$\tau_{mob} = \frac{c}{FS} + (\sigma - u_a) \cdot \frac{tg\phi'}{FS} + (u_a - u_w) \cdot \frac{tg\phi^b}{FS} \quad (3.7)$$

com a necessidade de determinar novos parâmetros:  $\phi^b$  e a parcela de sucção ( $u_a - u_w$ ).

### 3.4.2 Tensões totais ( $\phi = 0$ )

Em algumas situações, a análise em função das tensões totais fornece resultados confiáveis e, como requerem um menor número de parâmetros, torna-se uma alternativa interessante do ponto de vista de custo do projeto. Essa abordagem pode ser realizada em situações de:

- ☐ solo saturado;
- ☐ condição crítica correspondente ao final de construção (excessos positivos de poropressão);
- ☐ argilas normalmente adensadas ou levemente pré-adensadas. Argilas muito pré-adensadas ( $OCR > 4$ ) geram excessos de poropressão negativa; portanto, a condição mais crítica passa a ser a longo prazo.

A tensão cisalhante mobilizada é estimada pela equação:

$$(s_u)_{mob} = \frac{s_u}{FS} \quad (3.8)$$

A análise em termos efetivos é teoricamente mais correta, pois a resposta do solo a qualquer tipo de solicitação depende da tensão efetiva. Quando se opta por análises em termos totais ( $\phi = 0$ ), o projetista está automaticamente assumindo que as poropressões geradas na obra são idênticas às desenvolvidas nos ensaios.

## 3.5 QUANTO AOS PARÂMETROS DOS MATERIAIS

A norma NBR 11682 (ABNT, 2008) preconiza que a caracterização geotécnica dos materiais que compõem a estratigrafia da encosta e os terrenos envolvidos (empréstimos e/ou aterros) deve englobar ensaios para a determinação de:

- ☐ umidade natural;
- ☐ curva granulométrica;

Os métodos apresentados a seguir baseiam-se na abordagem por Equilíbrio Limite e foram desenvolvidos para análises em 2D. Todos os métodos pressupõem estado plano de deformação e sua validade está associada à forma da da superfície de ruptura.

Independentemente do mecanismo de ruptura, em solos coesivos é comum uma formação de trincas de tração na superfície do terreno antes do escorregamento. Quando isso ocorre, a superfície potencial de ruptura na região da trinca deixa de contribuir para a estabilidade global, como mostra a Fig. 4.1. Adicionalmente, eventuais sobrecargas contidas no trecho não afetam mais os momentos instabilizantes. A trinca pode ser preenchida por água e, com isso, gerar esforços adicionais (há projetistas que consideram a fatia limitada pela trinca para fins de cálculo dos momentos instabilizantes, como forma de compensar a possibilidade de esta ser preenchida por água). Portanto, é aconselhável estimar a profundidade da trinca.

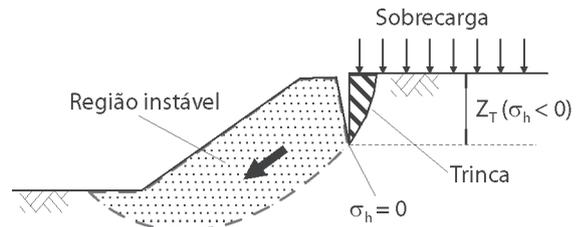


FIG. 4.1 Trinca de tração

## 4.1 TALUDE VERTICAL – SOLOS COESIVOS

### 4.1.1 Trinca de tração

Com base na teoria de equilíbrio limite, Rankine verificou que, em maciços com superfície plana, a menor tensão horizontal suportada pelo solo poderia ser definida pelo círculo de ruptura e envoltória de Mohr-Coulomb (Fig. 4.2).

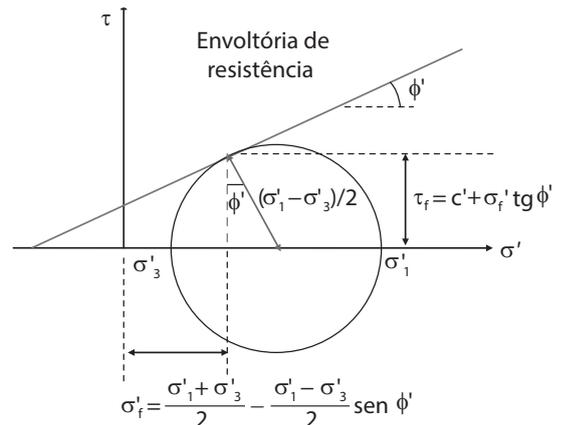


FIG. 4.2 Círculo de Mohr para solo coesivo

### Exercício resolvido – Talude infinito

O talude indicado na Fig. 4.9 é formado por solo coluvionar. Pede-se:

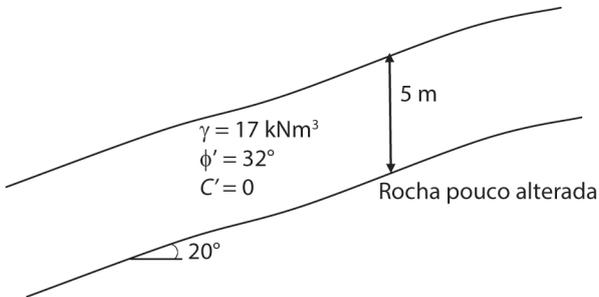


Fig. 4.9 Geometria do problema

- Desenvolver a expressão para FS admitindo fluxo paralelo à superfície, com linha freática situada a uma profundidade  $(1 - m)z$ , em que  $z$  é a profundidade da superfície de ruptura.
- Comparar o FS calculado pelo método do talude infinito com o resultado previsto por Duncan, assumindo que  $m = 0,5$ .

- Desenvolver expressão para FS assumindo fluxo paralelo à superfície e linha freática a uma profundidade  $(1 - m)z$ , em que  $z$  é a profundidade da superfície de ruptura, considerando o solo não saturado.
- Desenvolver expressão para FS assumindo fluxo inclinado de um ângulo  $\alpha$  com a horizontal, com linha freática situada a uma profundidade  $(1 - m)z$ , em que  $z$  é a profundidade da superfície de ruptura.

### Solução

- Fluxo paralelo à superfície:

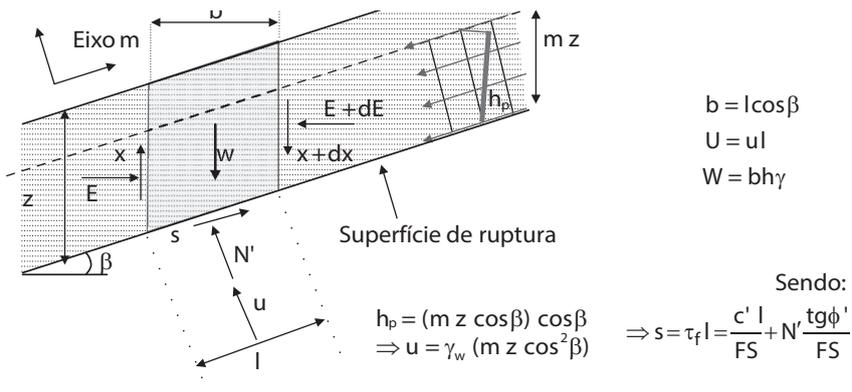


Fig. 4.10 Talude infinito

$$\sum F_m = 0 \quad \Rightarrow W \sin \beta = s \quad \Rightarrow W \sin \beta = \frac{c' l}{FS} + N' \frac{\text{tg} \phi'}{FS}$$

$$\sum F_n = 0 \quad \Rightarrow W \cos \beta = N' + u l \quad \Rightarrow N' = W \cos \beta - u l$$

c) Considerando rebaixamento rápido:

$$\beta = 40^\circ \text{ e } D = 0,75$$

$$\text{Ábaco de Taylor} \Rightarrow \frac{c'}{\gamma H} \cong 0,173 \therefore c = 0,173 \times 16 \times 6,1 = 16,88 \text{ kPa}$$

$$\Rightarrow FS = \frac{6,95}{16,88} = 0,41$$

#### 4.5.2 Ábacos de Hoek e Bray (tensões efetivas)

Com base no método de círculo de atrito e na introdução de hipóteses simplificadoras sobre a distribuição de tensões normais, Hoek e

Bray (1981) apresentaram ábacos de estabilidade para taludes de geometria simples, submetidos a determinadas condições de fluxo, solo homogêneo e isotrópico, superfície de ruptura circular passando pelo pé do talude, conectando-se à trinca de tração na superfície do terreno.

Os ábacos são válidos para determinadas condições de fluxo, que podem variar desde

a inexistência de água no talude até a saturação completa (Fig. 4.37). Uma vez definida a posição da linha freática que mais se aproxima da condição de campo, segue-se a sequência de utilização dos ábacos mostrada na Fig. 4.38.

As Figs. 4.39 a 4.43 mostram as soluções para cinco situações distintas de linha freática, definidas geometricamente pela razão  $L_w/H$ , em que  $H$  é a altura do talude e  $L_w$  é a distância entre o pé do talude e o ponto em que a linha freática atinge a superfície do terreno. Em todos os casos, a superfície crítica passa pelo pé do talude.

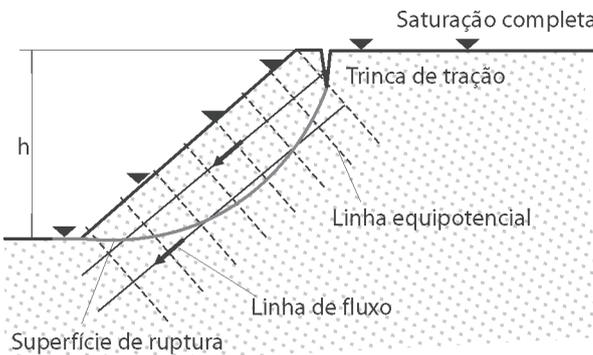


Fig. 4.37 Condição de saturação completa

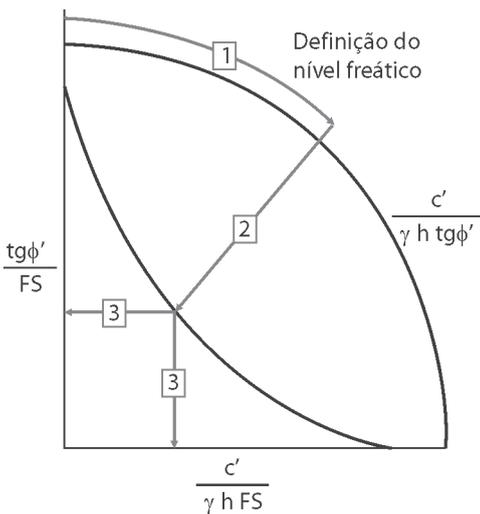


Fig. 4.38 Sequência de utilização dos ábacos – Hoek e Bray

### 4.6 SUPERFÍCIES NÃO CIRCULARES

Os métodos para superfícies quaisquer mais utilizados na prática são os de Jambu (1954, 1957, 1973) (simplificado ou generalizado); Morgenstern e Price (1965); e Sarma (1973, 1979).

Os métodos de Sarma e Morgenstern e Price são os mais completos, pois satisfazem às três equações de equilíbrio. Em razão da complexidade dos métodos, em geral, não se pode resolvê-los manualmente, sendo necessário o uso de computadores. O método de Jambu generalizado também satisfaz a todas as equações de equilíbrio, porém introduz hipóteses diferentes dos outros métodos, em particular com relação às forças interlamelares e, como os demais, requer o uso de computador.

#### 4.6.1 Método de Jambu

Método de Jambu generalizado  
 Jambu (1954, 1957, 1973) desenvolveu um método rigoroso e generalizado, que satisfaz a todas as equações de equilíbrio. A massa de solo é subdividida em fatias infinitesimais (Fig. 4.66), e é feito o equilíbrio de forças e de momentos em cada fatia. Usando o equilíbrio de forças horizontais como critério de estabilidade para toda a massa, Jambu definiu o fator de segurança como:

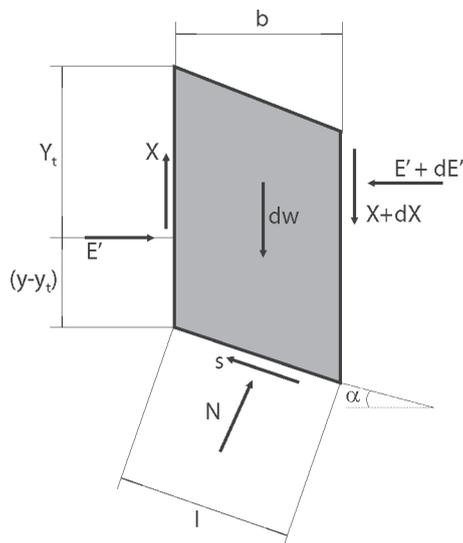


Fig. 4.66 Esforços na fatia - método de Jambu generalizado

$$FS = \frac{\sum b \left[ c' + \left( \frac{W + dX}{b} - u \right) tg\phi' \right]}{dE + \sum [dx(W + dX)tg\alpha]} \cdot \frac{1}{n_\alpha} \tag{4.79}$$

em que  $n_\alpha$  é dado por

$$n_\alpha = \frac{1 + tg\alpha tg\phi' / FS}{1 + tg^2\alpha} = \cos^2\alpha \left( 1 + tg\alpha \frac{tg\phi'}{FS} \right) \tag{4.80}$$

Analogamente ao observado em outros métodos de estabilidade, o FS é calculado de forma iterativa, pois aparece em ambos os lados da equação.

Escorregamentos de taludes, tanto naturais como construídos, são uma importante questão de segurança para a Engenharia Civil, sendo um fator controlador de projetos e até mesmo questão de ordem pública quanto à ocupação do solo urbano.

**Estabilidade de taludes** apresenta de forma didática os diferentes tipos de taludes, movimentos de massa, mecanismos de ruptura e as possíveis causas de escorregamentos, as solicitações envolvidas e os parâmetros geomecânicos dos materiais. Além de rever os conceitos básicos, a obra apresenta todas as etapas para a concepção do projeto de estabilização, os diferentes tipos de análise a serem aplicadas em cada situação e os métodos de cálculo envolvidos. A segunda edição revista e ampliada inclui diversos exercícios resolvidos, que explicam passo a passo a aplicação da teoria e os cálculos utilizados na solução dos problemas.

Apresentando as análises de estabilidade com uma abordagem tanto qualitativa como quantitativa, esta obra é uma referência obrigatória em cursos de graduação em Engenharia Civil, assim como importante referência para cursos de pós-graduação e para profissionais da área. A segunda edição revista e ampliada inclui diversos exercícios resolvidos, que explicam passo a passo a aplicação da teoria e os cálculos utilizados na solução dos problemas.

**Denise M. S. Gerscovich** possui graduação em Engenharia Civil e mestrado e doutorado em Mecânica dos Solos pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio). É Professora Associada do Departamento de Estruturas e Fundações e, desde 2003, membro do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ). Na Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (ABMS) foi vice-presidente no biênio 2003-2004 e presidente do núcleo Regional do Rio de Janeiro no biênio 2005-2006, além de membro eleita do colegiado da ABMS de 2007 a 2011. É membro do corpo de revisores de revistas como *Soils & Rocks*, *Water Resources Research* e *Geotecnia*, entre outras, e participou na elaboração do Manual Técnico de Encostas da Fundação Instituto de Geotécnica do Município do Rio de Janeiro (GeoRio).

ISBN 978-85-7975-241-4



9 788579 752414

# R

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS CITADAS E RECOMENDADAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Estabilidade de encostas*. NBR 11682, 2008.

ABRAMSON, L. W.; LEE, T. S.; SHARMA, S.; BOYCE, G. M. *Slope stability and stabilization methods*. Nova York: John Wiley & Sons, 1996.

ALPAN, I. The empirical evaluation of the coefficient  $K_o$  and  $K_{or}$ . *Soil and Foundation*. Jap. Soc. Soil Mech. Found. Eng., n. 7, v. 1, p. 31-40, 1967.

AUBERTIN, M.; RICARD, J.-F.; CHAPUIS, R. P. A Predictive model for the water retention curve: application to tailings from hard-rock mines. *Canadian Geotechnical Journal*, n. 35, p. 55-69, 1998.

AUGUSTO FILHO, O. Caracterização geológico-geotécnica voltada à estabilização de encostas: uma proposta metodológica. In: CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE ESTABILIDADE DE ENCOSTAS. *Anais...* Rio de Janeiro, v. 2. p. 721-733, 1992.

AUGUSTO FILHO, O. Escorregamentos em encostas naturais ocupadas: análise e controle. In: BITAR, O. Y. (Org.) *Curso de Geologia Aplicada ao Meio Ambiente*. São Paulo: ABGE/IPT, 1995. (Série Meio Ambiente).

BISHOP, A. W. The use of the slip circle in the stability analysis of slopes. *Geotechnique*, Great Britain, v. 5, n. 1, p. 7-17, 1955.

BISHOP, A. W. Test requirements for measuring the Coefficient of Earth Pressure at Rest. In: CONFERENCE ON EARTH PRESSURE PROBLEMS. *Proceedings...* Brussels, Belgium, v. 1, p. 2-14, 1958.

BISHOP, A. W.; BJERRUM, L. The relevance of the triaxial test to the solution of stability problems. In: ASCE RESEARCH CONFERENCE ON SHEAR STRENGTH OF COHESIVE SOILS. *Proceedings...* Boulder, p. 437-501, 1960.

BISHOP, A. W.; HENKEL, D. J. *The measurement of soil properties in the triaxial test*. London: Edward Arnold, 1962.

BISHOP, A. W.; MORGENSTERN, N. R. Stability coefficients for earth slopes. *Geotechnique*, n. 10, p. 129-150, 1960.

BISHOP, A. W.; ALPAN, I.; BLIGHT, G. E.; DONALD, I. B. Factors controlling the strength of partially saturated cohesive soils. In: RESEARCH CONF. ON SHEAR STRENGTH OF COHESIVE SOILS. *Proceedings...* ASCE, V.A, p. 500-532, 1960.

BLIGHT, G. E. *Strength and consolidation characteristics of compacted soils*. 1961. PhD Thesis - University of London. London, 1961.