

Avaliação da Estabilidade de Taludes Naturais na Área Urbana da Cidade de Ilha Solteira (SP)

Francisco Augusto da Silva Sanches
UNESP, Ilha Solteira, Brasil, franciscosanches12@hotmail.com

Adriano Souza
UNESP, Ilha Solteira, Brasil, adriano@dec.feis.unesp.br

Artur Pantoja Marques
UNESP, Ilha Solteira, Brasil, artur@dec.feis.unesp.br

Amândio José Cabral D’Almeida Júnior
Unicastelo, Fernandópolis, Brasil, amandio.cabral@gmail.com

RESUMO: A interiorização das indústrias no Estado de São Paulo gerou crescimento populacional dos municípios das regiões noroeste e oeste do estado, implicando em um substancial aumento na demanda de imóveis, tanto para locação quanto para venda. Esta necessidade impulsionou a criação de novos loteamentos residenciais e conjuntos habitacionais, e nas obras de terraplenagem destes muitos taludes oriundos de corte se somaram aos já existentes, e sobre vários destes edificações foram construídas. Em diversos municípios o crescimento foi desordenado e muitos dos conceitos da boa engenharia e segurança foram negligenciados. Preocupado com a segurança da população urbana do município de Ilha Solteira (SP), se deu início a um estudo da estabilidade dos taludes urbanos. Inicialmente foram escolhidos três taludes, cujas principais características são: elevada inclinação e alturas variadas. Estes taludes foram levantados por intermédio de uma estação total, definindo-se as dimensões dos mesmos e obtendo suas imagens tridimensionais, portanto estão disponíveis: altura, inclinação e superfície do talude, possibilitando o estudo de sua estabilidade no corte que se desejar. Para a avaliação da estabilidade foi empregado o programa computacional SLOPE/W de uso educacional, com utilização dos métodos Fellenius, Bishop Simplificado e Janbu Simplificado. Identificado o perfil mais crítico de cada talude, adicionadas as suas informações geométricas e parâmetros do solo ($\phi = 32,6^\circ$, $c = 3$ kPa, $e = 0,94$ e $\gamma = 15,7$ kN/m³) ao programa computacional obteve-se os fatores de segurança. Para os taludes 1 e 3 os fatores de segurança foram inferiores a 1,5 (solos arenosos $FS \geq 1,5$), já para o talude 2 foi superior, atestando estabilidade ao mesmo. Para os taludes 1 e 3 fica claro que há uma necessidade urgente da administração municipal intervir nos mesmos antes que ocorra deslizamento ou até mesmo a ruptura. A intenção desta pesquisa é fornecer ao município um cadastramento de todos os taludes urbanos, com suas localizações em mapa georreferenciado, as suas dimensões geométricas e as condições de segurança.

PALAVRAS-CHAVE: Estabilidade de Talude, Fellenius, Bishop Simplificado, Janbu Simplificado.

1 INTRODUÇÃO

Para analisar a estabilidade de um talude se faz necessário estabelecer um índice que permita

quantificar o quanto próximo da ruptura ele se encontra. Em geral, as análises são realizadas pela relação entre a resistência ao cisalhamento e as tensões cisalhantes mobilizadas, tal como

mostra a Equação 1:

$$FS = \frac{\tau}{\tau_{mob}} \quad (1)$$

em que:

FS: fator de segurança;
 τ : resistência ao cisalhamento, e
 τ_{mob} : tensões cisalhantes mobilizadas.

Os valores obtidos de FS são classificados de acordo com a Tabela 1.

Tabela 1. Classificação da estabilidade. Gerscovich (2012).

Condição	Classificação
FS > 1	Obra estável
FS = 1	Ocorre a ruptura
FS < 1	Não tem significado físico

FS: fator de segurança.

O valor admissível para o FS varia em função do tipo de obra e sua vida útil. Sua adoção depende do julgamento e da experiência profissional do projetista, associados as consequências em termos do risco de perdas humanas e/ou humanas que essa escolha possa vir a acarretar.

A NBR 11692 (ABNT, 2006) estabelece que, dependendo dos riscos envolvidos, deve-se inicialmente enquadrar o projeto em uma das classificações do Grau de Segurança mostradas na Tabela 2.

Tabela 2. Grau de segurança. NBR 11692 (ABNT, 2006).

GS por perdas materiais e ambientais	GS por perda de vidas		
	Alto	Médio	Baixo
Alto	1,5	1,4	1,3
Médio	1,4	1,3	1,2
Baixo	1,4	1,3	1,2

GS: grau de segurança.

Atualmente a determinação deste FS é feita por métodos baseados no equilíbrio limite, dado ao fato de que esta análise não deva ser mais complexa que o nível de conhecimento do próprio talude. Estes métodos dependem de diversas variáveis e hipóteses, as quais devem ser mantidas, da maneira mais simples possível, principalmente os elementos geométricos, geológicos e hidrológicos envolvidos, com

exceção da superfície potencial de ruptura (Guidini, 1984).

Utilizando a análise do equilíbrio limite há diversos métodos para se determinar o FS, no Brasil os mais usuais são: Fellenius, Bishop e Janbu. Estes métodos têm resolução analítica ou com a utilização de ferramentas computacionais que oferecem maior rapidez e precisão.

Uma das ferramentas mais ágeis e de fácil manuseio é o software livre SLOPE/W da Produtora Geo-Slope International Ltd. Esta ferramenta permite a determinação do FS pelos Métodos de Fellenius, Bishop, Janbu entre outros.

Para a determinação do FS por estes métodos são de extrema importância:

- Geometria do talude: H (altura o talude) e i (inclinação do talude);
- Parâmetros de resistência ao cisalhamento solo: c (coesão) e ϕ (atrito interno entre os grãos de solo, e
- Solo: e (índice de vazios) e γ (peso específico do solo).

O objetivo da análise de estabilidade de um talude é de avaliar a possibilidade de ocorrência de esboralhamento de massa de solo presente no mesmo.

Fiori (2001) comenta que do ponto de vista teórico, um talude se apresenta como uma massa de solo submetida a três campos de forças distintos, devidas: ao peso dos materiais, ao escoamento de água e à resistência ao cisalhamento.

Dessa forma, o estudo da estabilidade de taludes deve almejar o equilíbrio dessas forças, sendo que as duas primeiras se somam, sobrando à última força atuar como um freio ao movimento do material (Fernandes et al., 2009).

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. Inicialmente, forma-se a zona cisalhada e, em seguida, desenvolve-se a superfície de cisalhamento (Gerscovich, 2012).

Uma massa de solo pode se romper sob diferentes formas geométricas: circular, planar, multiplanar, mista e outras. Em geral, a previsão

dos possíveis modos de ruptura está condicionada a presença de heterogeneidade ao longo do perfil do talude. Camadas com grandes diferenças de resistência ou a existência de descontinuidades acarretam mudanças bruscas na superfície de ruptura (Gerscovich, 2012).

2 METODOLOGIA

A metodologia desta pesquisa foi composta pelas etapas: escolha dos taludes, levantamento planialtimétrico, coleta de amostras de solo, ensaios de laboratório e análise da estabilidade dos taludes.

2.1 Escolha dos Taludes

Foram escolhidos, aleatoriamente, três taludes de corte dentro da área urbana da cidade de Ilha Solteira (SP), com suas localizações mostradas na Figura 1.



Figura 1. Mapa de localização dos taludes. Sanches (2015).

Optou-se por taludes com alturas e inclinações variadas, como pode ser observado, respectivamente, nas Figuras 2 a 4.



Figura 2. Talude 1 – Casa Vida. Sanches (2015).



Figura 3. Talude 2 – Ginásio Poliesportivo. Sanches (2015).



Figura 4. Talude 3 – Campus III da UNESP. Sanches (2015).

2.2 Levantamento Planialtimétrico

Foi realizado com uma estação total obtendo-se informações da altura do talude (H), inclinação do talude (i) e extensão do talude (L), mostradas na Tabela 3.

Tabela 3. Dimensões dos taludes. Sanches (2015).

Talude	H (m)	i (°)	L (m)
1	6,0	50	40
2	13,0	40	158
3	3,5	70	72

Os perfis dos três taludes analisados são mostrados nas Figuras 5 a 7.

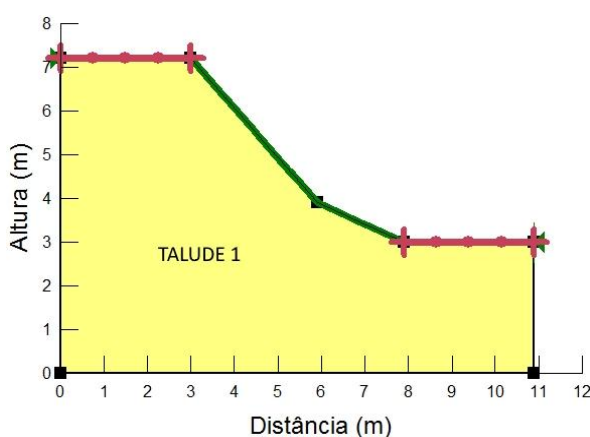


Figura 5. Perfil do Talude 1 – Casa Vida.

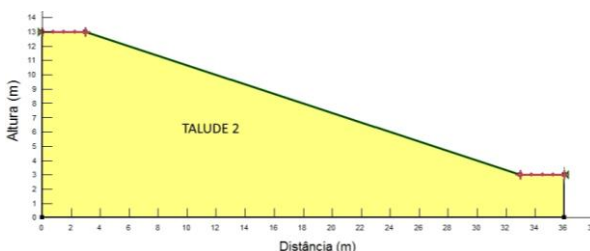


Figura 6. Perfil do Talude 2 – Ginásio Poliesportivo.

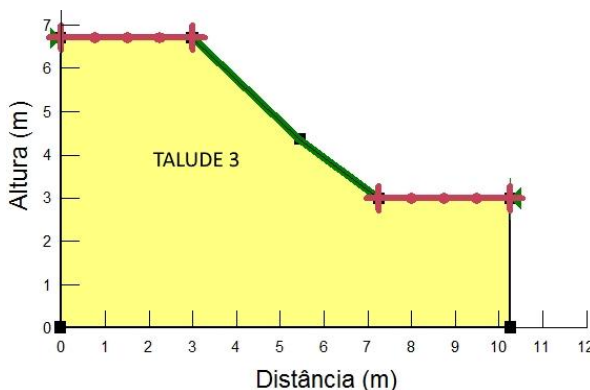


Figura 7. Perfil do Talude 3 – Campus III da UNESP.

2.3 Coleta de Amostras de Solo

Em cada talude foi coletada uma amostra de solo indeformada para a realização dos ensaios de laboratório.

2.4 Ensaios de Laboratório

Foram realizados no Laboratório Central de Engenharia Civil da Unesp de Ilha Solteira (SP) ensaios em amostras indeformadas de solo para determinar índice de vazios, peso específico, coesão e atrito interno entre os grãos de solo, valores estes mostrados na Tabela 4.

Tabela 4. Parâmetros do solo. Sanches (2015).

Talude	e	γ (kN/m ³)	c (kPa)	ϕ (°)
1	0,94	15,7	3	32,6
2	0,82	16,0	3	33,0
3	0,90	15,7	4	34,1
Adotado	0,94	15,7	3	32,6

e: índice de vazios; γ : peso específico do solo; c: coesão, e ϕ : atrito interno entre os grãos de solo

A diferença entre os valores dos parâmetros é pequena, logo, adotou-se valores iguais para todos os taludes (Adotado), tomando-se sempre os valores mais críticos, conforme mostrado na Tabela 4

2.5 Análise da Estabilidade de Taludes

Nesta pesquisa utilizou-se métodos para análise de estabilidade de taludes que se baseiam no equilíbrio para superfícies potenciais de ruptura circulares, pelo fato de permitirem uma análise mais profunda, complexa e precisa, a saber:

- Método de Fellenius;
- Método de Bishop Simplificado, e
- Método de Janbu Simplificado.

2.5.1 Método de Fellenius

Fellenius (1936) desenvolveu um procedimento de cálculo também conhecido como método suéco ou das fatias. Baseia-se na análise estática do volume de material situado acima de uma superfície potencial de escorregamento de seção circular, sendo esse volume dividido em pelo menos 10 (dez) fatias verticais (Fiori, 2001).

A Figura 8 apresenta os parâmetros envolvidos na análise, para uma determinada fatia (i) de solo com peso específico (γ), coesão (c) e ângulo de atrito interno (ϕ), de peso (P_i), largura (b), altura (z) e comprimento unitário (perpendicular ao plano da figura).

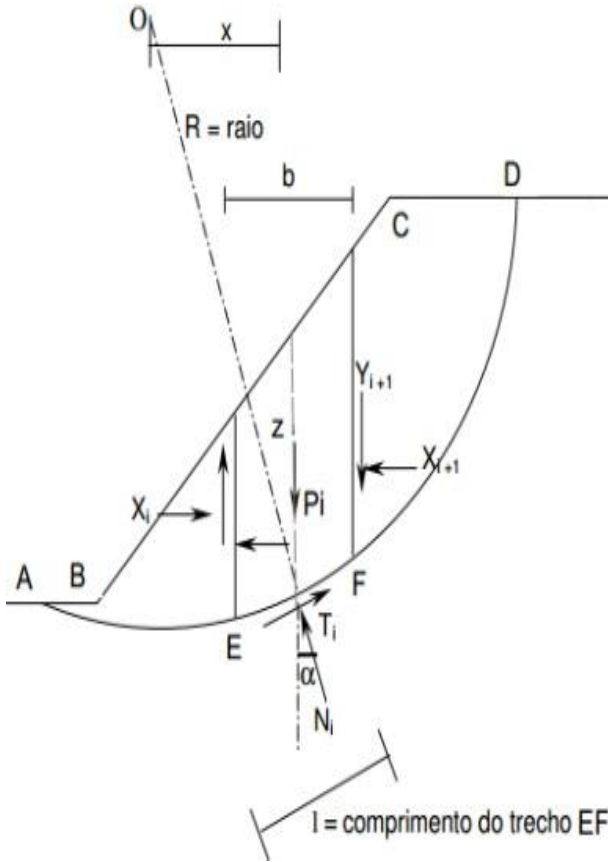


Figura 8. Relação dos parâmetros envolvidos na análise de estabilidade pelo método de Fellenius. Fiori (2001).

A força peso da fatia “i” (P_i) é dada pela Equação 2:

$$P_i = \gamma \cdot z \cdot b \quad (2)$$

A decomposição de P_i nos componentes paralelos (T_i) e normal (N_i), ao plano de ruptura da base da fatia “i”, de largura “b” fornece, respectivamente, as Equações 3 e 4:

$$T_i = \gamma \cdot z \cdot b \cdot \sin \alpha \quad (3)$$

$$N_i = \gamma \cdot z \cdot b \cdot \cos \alpha \quad (4)$$

A força de resistência ao cisalhamento (Fr_i) é dada pela Equação 5:

$$Fr_i = (c \cdot l) + (N_i \cdot \tan \phi) \quad (5)$$

em que:

l: comprimento do arco na base da fatia “i”, substituindo a Equação 4 em 5 se obtém a Equação 6:

$$Fr_i = (c \cdot l) + (\gamma \cdot z \cdot b \cdot \cos \alpha \cdot \tan \phi) \quad (6)$$

O fator de segurança (FS) é dado pela Equação 1, sendo assim, o fator de segurança na fatia “i” (FS_i) é determinado pela Equação 7:

$$FS_i = \frac{Fr_i}{T_i} = \frac{(c \cdot l) + (\gamma \cdot z \cdot b \cdot \cos \alpha \cdot \tan \phi)}{\gamma \cdot z \cdot b \cdot \sin \alpha} \quad (7)$$

Considera-se que a área total sujeita ao escorregamento possa ser subdividida em “n” fatias, onde o comprimento total da superfície de ruptura $\overline{AD}$ é igual a “ b_0 ”, obtendo-se a Equação 8:

$$FS_i = \frac{(c \cdot s) + \sum (\gamma \cdot z \cdot b \cdot \cos \alpha \cdot \tan \phi)}{\sum \gamma \cdot z \cdot b \cdot \sin \alpha} \quad (8)$$

Lembrando que a Equação 6 não leva em consideração a pressão intersticial (u). No caso de um solo não coesivo ($c = 0$), tem-se a Equação 9:

$$FS_i = \frac{\tan \phi}{\tan \alpha} \quad (9)$$

Se houver pressão intersticial (pressão neutra) atuando na base do plano de potencial escorregamento, a componente normal (N_i) deverá ser diminuída de uma quantidade igual à força neutra ($U = u \cdot s$). Para uma única fatia, tem-se a Equação 10:

$$FS_i = \frac{(c \cdot s) + [(\gamma \cdot z \cdot b \cdot \cos \alpha) - (u \cdot s)] \tan \phi}{\gamma \cdot z \cdot b \cdot \sin \alpha} \quad (10)$$

Para toda a superfície de ruptura, arco AD, tem-se a Equação 11:

$$FS_i = \frac{(c.s) + \sum_{i=1}^n [(\gamma.z.b.\cos \alpha) - (u.s)] \operatorname{tg} \phi}{\sum_{i=1}^n \gamma.z.b.\sin \alpha} \quad (11)$$

A Equação 11 pode ser simplificada para a Equação 12, ou seja:

$$FS_i = \frac{\sum_{i=1}^n [(c.s) + (P_i.\cos \alpha - u.s) \operatorname{tg} \phi]}{\sum_{i=1}^n P_i.\sin \alpha} \quad (12)$$

2.5.2 Método de Bishop Simplificado

Bishop (1955) também definiu seu método para superfície de ruptura circular. Para simplificar o método toma-se a hipótese que a resultante das forças entre as fatias é horizontal, ou seja, considera-se o equilíbrio das forças verticais. Partindo da Equação 10, acrescenta-se a Equação 12 que traduz o equilíbrio das forças verticais. Assim o fator de segurança (FS_i) é dado pela Equação 13:

$$FS_i = \frac{1}{\sum_{i=1}^n P_i.\sin \alpha} \frac{\sum_{i=1}^n [(c.b) + (P_i.-u.b).\operatorname{tg} \phi]}{M_\phi} \quad (13)$$

em que:

$$M_\alpha = \cos \alpha \left[1 + \frac{\operatorname{tg} \alpha.\operatorname{tg} \phi}{FS_i} \right] \quad (14)$$

Como FS_i aparece em ambos os membros das Equações 13 e 14, o cálculo do fator de segurança é feito por um processo iterativo, geralmente da seguinte maneira: toma-se para FS_i do segundo termo da equação um valor aproximado FS' , e recalcula-se o segundo membro da fórmula. Se o valor obtido de FS_i do primeiro termo da equação diferir muito de FS' , repete-se o cálculo até que o valor de FS_i seja aproximadamente igual ao assumido FS' . Normalmente, três iterações são suficientes.

O valor de M_α pode ser obtido pelo ábaco mostrado na Figura 9.

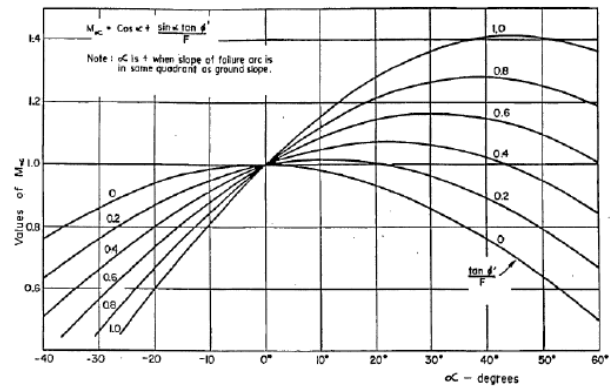


Figura 9. Ábaco para determinação do M_α . Fiori (2001).

2.5.3 Método de Janbu Simplificado

Janbu (1954, 1973) também definiu seu método para é baseado no equilíbrio de forças e momentos. A versão simplificada, assim como a de Bishop, é baseada em equilíbrio de forças, desprezando assim os componentes verticais tangentes laterais das fatias.

Para satisfazer parcialmente o equilíbrio de momentos, Janbu propôs um fator de correção empírico f_0 , como tentativa de solucionar o problema. Este fator é dependente do tipo de solo e da forma de superfície de deslizamento, conforme ilustra a Figura 10 (Fabrício, 2006).

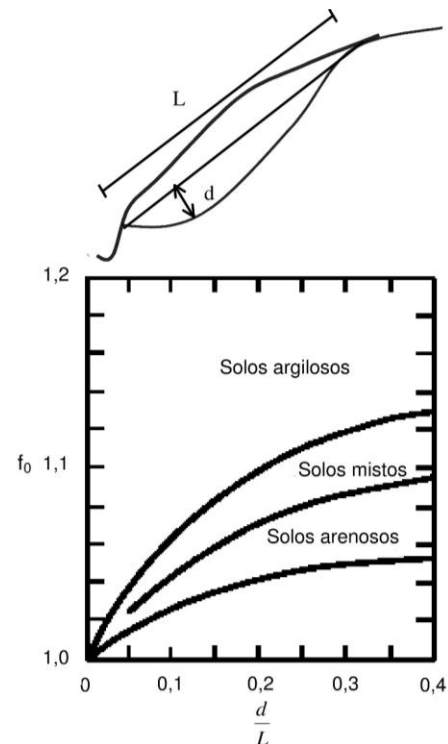


Figura 10. Variação do fator f_0 em função do parâmetro d/L e do tipo de solo. Fabrício (2006).

O fator de segurança (FSi) nesse método é dado pela Equação 15:

$$FS_i = \frac{f_o}{\sum_{i=1}^n P_i \cdot \text{tg } \alpha} \sum_{i=1}^n [(c.b) + (P_i - u.b) \cdot \text{tg } \phi] \quad (15)$$

em que M_α é dado pela Equação 14.

Fabício (2006), conclui que fatores de segurança menos confiáveis e não conservativos podem ser obtidos em análises de estabilidade utilizando o método de Janbu simplificado, em presença de superfícies de rupturas profundas que interceptam a superfície do solo no topo do talude com ângulos elevados.

O coeficiente de segurança obtido com este método pode diferir em até 15% dos resultados fornecidos pelos métodos rigorosos. No entanto, essa diferença é pequena quando a superfície de ruptura é rasa e alongada (Duncan e Wright, 1975).

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A análise da estabilidade de taludes feita pelas simulações computacionais, para os três taludes avaliados, determinou os valores mostrados na Tabela 5.

Tabela 5. Fatores de Segurança (FS). Fonte: Sanches (2015).

FS Método	Talude		
	1	2	3
Fellenius	1,28	2,29	1,37
Bishop Simplificado	1,38	2,35	1,44
Janbu Simplificado	1,26	2,28	1,35
Média	1,31	2,31	1,39
Desvio Padrão	0,05	0,03	0,04

A Tabela 2 mostra que os valores obtidos de fator de segurança pelos métodos de Fellenius e de Janbu simplificado são praticamente iguais, já, o método de Bishop simplificado levou a valores maiores. O valor médio de FS obtido para cada talude apresenta um desvio padrão muito pequeno, indicando a possibilidade do uso do valor médio.

Os taludes 1 e 3 apresentaram valores de FS

inferiores a 1,5 (solos arenosos $FS \geq 1,5$), indicando a necessidade de intervenção nos mesmos, já o talude 2 apresentou FS bem superior a 1,5, indicando a segurança do mesmo.

A ferramenta computacional SLOPE/W se mostrou uma importante ferramenta para o estudo da estabilidade de taludes.

4 CONCLUSÕES

Com a pesquisa realizada conclui-se que:

- (1) Os FS determinados pelos métodos de Fellenius e de Janbu simplificado são praticamente iguais, já, o método de Bishop simplificado levou a valores maiores;
- (2) O valor médio de FS obtido para cada talude apresenta um desvio padrão muito pequeno, indicando a possibilidade do uso do valor médio;
- (3) Para os taludes 1 e 3 o $FS \leq 1,5$, indicando necessidade de intervenção, já o talude 2 apresentou $FS \geq 1,5$, atestando segurança, e
- (4) A ferramenta computacional SLOPE/W se mostrou uma importante ferramenta para o estudo da estabilidade de taludes.

REFERÊNCIAS

- ABNT (2009). Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 11682: Estabilidade de taludes, Rio de Janeiro, 39 p.
- Bishop, A. W. (1955). The use of the slip circle in the stability analysis of slopes. *Geotechnique*, Great Britain, v 5, n. 1, p. 7-17.
- Duncan, J. M.; Wright, S. G. (1975). The accuracy of equilibrium methods of slope stability analysis. In: *International Symposium on Landslides*. New Delhi, Proceedings, v. 1, p. 247-254.
- Fabício, J. V. F. (2006). *Análises probabilísticas da estabilidade de taludes e contenções*. Dissertação de Mestrado. PUC-RIO, 170 p.
- Fellenius, M. (1936). Calculation of stability of earth dams. In: *Congress of Large Dams*, 2, Proceedings, Washington, USA, v. 4, p. 445-463.
- Fernandes, L.S. et al. (2009). Uso de Geomantas no Controle da Erosão Superficial Hídrica em um Talude em Corte de Estrada, *Revista Brasileira de Ciências do Solo*, Vol. 33, p. 199-206.

- Fiori A. P. (2001). *Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas: aplicações na estabilidade de taludes*. Curitiba: UFPR.
- Gerscovich, D. M. S. (2012). *Estabilidade de Taludes*. Oficina de Textos, São Paulo, 166 p.
- Guidini, N. (1984). *Estabilidade de taludes naturais e de escavação*. São Paulo: Edgard Blucher Ltda, 216 p.
- Janbu, N. (1954). Application composite slip surface for stability analysis. In: *European Conference on Stability of Earth Slopes*. Stockholm Discussion 3, Proceedings.
- Janbu N. (1973). *Slope stability calculations*. In: Hirschfeld, S. C., Poulos, F. J. (Ed.). *Embankment Dam Engineering - Casagrande Volume*, John Wiley & Sons, New York, NY, USA, p. 47-86.
- Sanches, F. A. S. (2015). *Análise da estabilidade de taludes naturais*. Relatório de Iniciação Científica, Faculdade de Engenharia Civil, UNESP, Ilha Solteira, 63 p.
- Souza, A. (2001). *Estaca piloto instrumentada: Uma ferramenta para o estudo da capacidade de carga de estacas quando submetidas a esforços axiais de compressão*. Tese de Doutorado. Escola Politécnica da USP de São Paulo, 295 p