

Estudos de Retroanálise pelo Método de Lopes e Correlações Obtidas da Literatura Técnica Aplicados a um Talude Rodoviário: Comparação de Resultados com Métodos Analíticos Tradicionais.

Douglas Correia Moscateli

UFPR – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, douglasmoscateli@hotmail.com

Alberto Pio Fiori

UFPR – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, fiori@ufpr.br

José Antônio Urroz Lopes

LQ GEOAMBIENTAL, Curitiba, Brasil, zelopes41@gmail.com

Neile Cristina Andraos

UFPR – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Brasil, neileandraos@gmail.com

RESUMO: Este artigo apresenta uma comparação entre os principais métodos de análise de estabilidade de taludes: Bishop, Spencer, Fellenius e o método teórico e prático de estabilidade de taludes naturais, através do método de regressão desenvolvido por Lopes (1981), que procura estimar a estabilidade de taludes artificiais, a partir do exame de cicatrizes de escorregamentos naturais. Utilizou-se como estudo de caso para esta pesquisa, um talude da rodovia PR 408 - km 19,8, localizado no município de Antonina-PR, cujos dados foram cedidos pela empresa ENGEMIN – Engenharia e Geologia Ltda. A ruptura deste talude resultou da ocorrência de fortes chuvas que atingiram a região entre os dias 10 e 11 de março de 2011, que ocasionaram problemas de instabilidades em encostas naturais e taludes de cortes e aterros, com interdição parcial do tráfego desta rodovia. Para os estudos foram realizados dois tipos de análises comparativas de estabilidade: no primeiro caso foram comparados os FS obtidos para o talude calculado utilizando-se os parâmetros de resistência avaliados pelo Método de Lopes com os obtidos utilizando-se esses mesmos parâmetros e os procedimentos dos métodos tradicionais, empregando-se o software GeoStudio – Slope/W; no segundo caso, a mesma comparação foi feita utilizando-se parâmetros de correlações constantes da literatura técnica. Os resultados demonstraram que é possível desenvolver o projeto de estabilização de um talude intercalando análises de diferentes cunhos: neste caso específico, intercalando as metodologias observacional e analítica, além de alimentar o modelo matemático com diferentes cenários através da retroanálise de escorregamentos.

PALAVRAS-CHAVE: Estabilidade de Taludes, Método de Lopes, Retroanálise.

1 INTRODUÇÃO

Problemas relacionados à estabilização de taludes geralmente são casos que necessitam intervenções e reparações urgentes por parte dos engenheiros, visto que na maioria das vezes envolvem catástrofes naturais, devidos a chuvas, abalos sísmicos, etc., que ocasionam desastrosas consequências.

Segundo Gomes (2003), para a aplicação dos métodos de estabilidades em taludes, se faz necessário determinar os dados de entrada para a resolução do problema, ou seja, é necessário estabelecer os parâmetros de resistência ao cisalhamento dos solos: a coesão (c) e o ângulo de atrito. Isso, independentemente das hipóteses simplificadoras adotadas por cada método.

Esses parâmetros podem ser obtidos através de ensaios de laboratório específicos (ensaio de cisalhamento direto e ensaios triaxiais), ensaios *in situ* e retroanálises de casos reais observados de rupturas.

Ocorre que a execução de ensaios de campo e laboratório em muitos casos não é possível de ser realizada devido aos custos e prazos envolvidos. Não bastasse isso, “[...] sérias ressalvas poderiam ser levantadas quanto à representatividade das amostras utilizadas e quanto à reprodutividade em laboratório, das condições naturais.” (LOPES, 1981).

Baseado nesse contexto, este trabalho busca ressaltar a importância das análises de estabilidade em taludes, e ainda, verificar a eficiência do cálculo aplicado no talude objeto deste artigo, metodologia a qual, foi adotada e desenvolvida por LOPES (1981) descrita e apresentada no 3º CBGE, em Itapema-SC e transcrita em FIORI & CARMIGIANI (2011).

1.1. Método de Lopes para a determinação da estabilidade de taludes

O método de Lopes para o cálculo da estabilidade de taludes possui as vantagens de ser simplista, acessível, sem a necessidade de inúmeras ferramentas, e pela facilidade de operação.

Esse método foi desenvolvido, originalmente, com vistas ao estabelecimento da geometria de taludes de cortes em regiões geologicamente homogêneas, partindo-se da forma das cicatrizes de ruptura desenvolvidas naturalmente (isto é pela própria evolução do relevo) e ou pela execução de cortes para obras de engenharia.

A aplicação do método inicia-se por análises minuciosas da região de trabalho. Análises feitas através de levantamentos aerofotogramétricos, mapas, ou imagens adquiridas por recursos de softwares disponíveis, que foram bastante facilitadas com o avanço tecnológico de alguns anos para cá.

A análise destas imagens visa primordialmente detectar as cicatrizes de escorregamentos existentes. Com a técnica de identificação destas cicatrizes, é possível ainda, realizar mapeamentos quantitativos das áreas mais susceptíveis a escorregamentos.

Uma vez localizadas as cicatrizes, a partir das informações obtidas das curvas de nível oriundas de restituições aerofotográficas ou de levantamentos topográficos, traçam-se os perfis longitudinais principais dessas cicatrizes.

Após isto, pode ser selecionado e traçado o perfil de maior declividade, ou seja, o pior caso, a denominada curva envoltória, onde então se escolhem os possíveis ângulos de taludes nela inscritos.

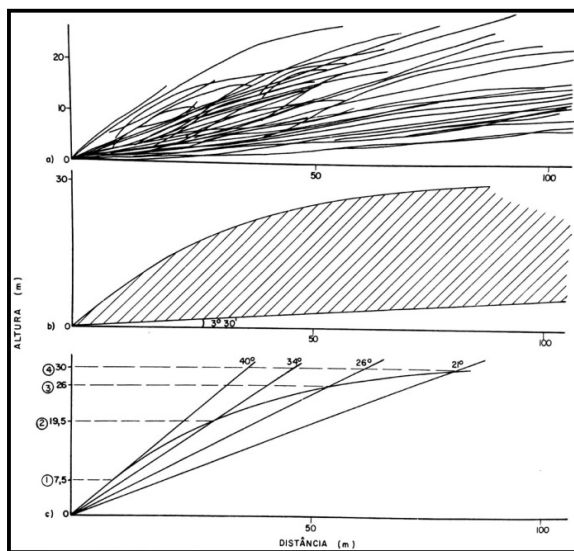


Figura 1 – Ângulos de taludes e curva envoltória.
Fonte: LOPES (1981).

De acordo com Lopes (1981), a outra fase do estudo se resume a visita de campo. Visa obter características mais detalhadas dos locais das cicatrizes, o tipo de solo que constitui a vertente, condições hidrogeológicas, entre outros aspectos considerados característicos e importantes do local de estudo. Caso seja suficiente, apenas a observação feita por engenheiros e/ou geólogos no local basta, caso contrário poderão ser realizados estudos mais completos como no presente caso, representados por sondagens.

O autor do método ainda se baseia em determinadas observações, estabelecendo as hipóteses de como se supõe terem ocorrido às rupturas: o grau de meteorização e pedogenização do material envolvido, a presença ou ausência e posição do lençol freático, e a probabilidade de ocorrência de fendas de tração e de seu preenchimento por água.

Depois de retornado do campo e identificada a hipótese provável da ruptura, ou seja, o motivo mais aparente pelo qual a vertente escorregou, Lopes parte dos estudos estabelecidos por Hoek (1970), o qual considera os dois tipos de rupturas mais frequentes para as vertentes, como superfícies de ruptura plana e circular.

Fiori e Carmigiani (2011) transcrevem as hipóteses-tipo propostas por Hoek (1970) para o caso de ruptura circular, que são apresentadas na Figura 2, configurando seis situações diferentes e formando, portanto nove combinações possíveis das funções X e Y.

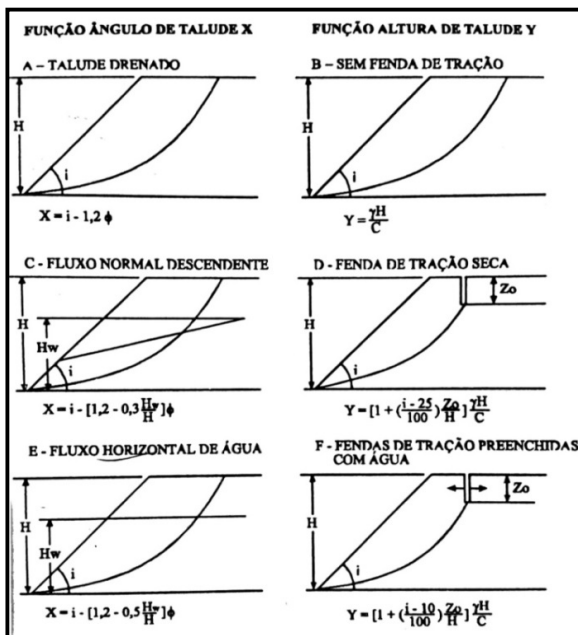


Figura 2 – Ábaco de Projeto de Ruptura Circular.
 Fonte: HOEK (1970) *apud* FIORI & CARMIGIANI, (2011).

A partir das observações de campo, compara-se-as às situações representadas na figura acima devendo-se então selecionar o par de equações X e Y mais adequado. Escolhidas as duas funções, substitui-se então os pares de valores altura/ângulo limite dos taludes escolhidos e estima-se o valor do peso específico do solo (γ_n), que irão permitir o estabelecimento de um certo número de equações numéricas possíveis. (LOPES, 1981).

Estas funções foram sendo ajustadas por tentativas, por Hoek, e seus resultados foram comparados com os obtidos utilizando-se os métodos tradicionais, até obter-se boa

concordância. Com elas Hoek desenhou o ábaco, apresentado na Figura 3, que permite a verificação da condição de estabilidade de qualquer talude.

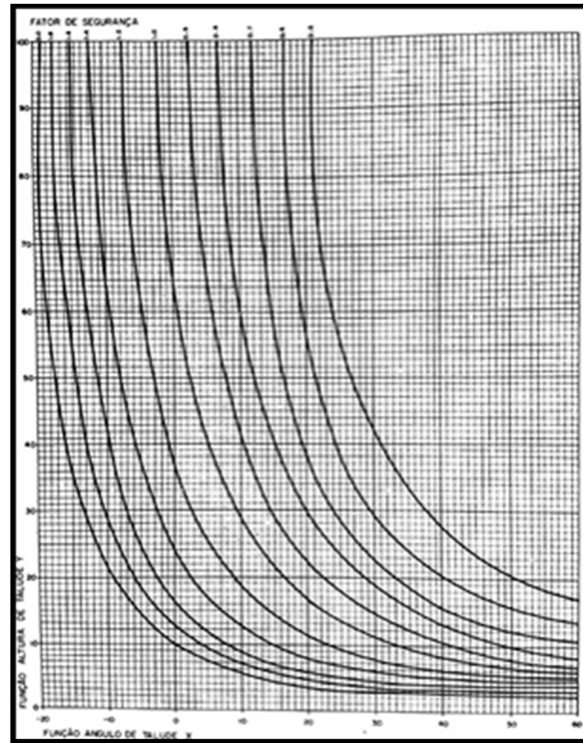


Figura 3 – Ábaco de Projeto de Ruptura Circular.
 Fonte: HOEK (1970) *apud* LOPES (1981).

2. ESTUDO DE CASO: TALUDE km 19,8 (ANTONINA -PR)

2.1 Aspectos gerais da encosta

O talude localiza-se na PR-408, entre os municípios de Morretes e Antonina, mais precisamente na cidade de Antonina, no km 19,8 da rodovia Deputado Miguel Bufara.



Figura 4 – Mapa geral da área de estudo.
 Fonte: GOOGLE EARTH (2016).

A região caracteriza-se como de clima do tipo Cfa, classificação de Wladimir Koeppen, com chuvas distribuídas durante o ano, sem estação seca, com verões quentes (temperatura média do mês mais quente acima de 22°C).

Para a visualização do regime pluviométrico da região foram obtidos gráficos a partir de dados diários dos Postos de Morretes/PR e de Antonina/PR, operados pela Agência Nacional de Águas - ANA e localizados em municípios próximos ao trecho em estudo.

Os dados pluviométricos obtidos apresentam precipitação média anual de 1.933,6 mm e 2.107,8 mm, distribuídos em cerca de 202 e 181 dias de chuva durante o ano para o posto de Morretes e Antonina, respectivamente (ENGEMIN, 2011).

2.2 Histórico das movimentações

Face aos eventos pluviométricos extremos ocorridos entre os dias 10 e 11 de março de 2011, na região de Antonina e Morretes, o processo de ruptura da encosta em estudo ocasionou problemas de instabilidades em encostas naturais e taludes de cortes e aterros, com interdição parcial do tráfego da rodovia Deputado Miguel Bufara.

As duas imagens aéreas abaixo fornecem uma visão geral da situação da encosta antes dos escorregamentos e após as obras de conformação realizadas no local.



Figura 5 – Vista aérea da encosta antes dos escorregamentos.

Fonte: GOOGLE EARTH (2011).



Figura 6 – Vista aérea da encosta já com as obras de retaludamento e drenagem realizadas.

Fonte: GOOGLE EARTH (2016).

O comportamento da ruptura apresentou feições diferentes em suas diferentes porções. A ruptura se estendeu por cerca de 260 m ao longo da rodovia, se distinguindo em três segmentos: o primeiro com ruptura remontante, cujo pé elevou a pista existente em cerca de dois metros e cujo topo se estendeu até cerca de 32,5 m de altura acima da pista e a cerca de 100 m de afastamento da mesma. O segundo a ruptura foi “normal”, isto é, sem soerguimento do pé e se elevou até 18 m acima do nível da pista, com um afastamento máximo de cerca de 50 m. No terceiro e último segmento, as duas rupturas ocorrentes apresentaram-se menores: máximo 4 m de altura e 20 m de afastamento, unidas por uma trinca próxima à pista.

As Figuras 7 e 8 abaixo apresentam o registro das rupturas do segundo segmento ocorridas na encosta.



Figura 7 – Ruptura “normal” no 2º segmento do talude.

Fonte: ENGEMIN (2011).



Figura 8 – Ruptura “normal” no 2º segmento do talude.
Fonte: ENGEMIN (2011).

2.3 Caracterização e análise do perfil geotécnico

Com base nos estudos geotécnicos desenvolvidos no local, foi possível a identificação das características e classificação dos materiais ocorrentes no projeto, partindo de subsídios fornecidos pelos Estudos Geológicos para a definição do perfil geotécnico do local.

Cabe ressaltar, que os estudos geotécnicos ao qual o autor do presente artigo se refere e nos quais se baseou para os estudos deste trabalho, se remetem a dados e investigações realizadas antes da recomposição do talude, ou seja, antes das obras de retaludamento e drenagem da encosta rompida. A metodologia empregada no desenvolvimento dos estudos geotécnicos constou de uma inspeção de campo realizada pela equipe de geologia, e da execução de três furos de sondagens tipo SPT (NBR 6484:2001), satisfazendo às exigências mínimas para garantir o conhecimento das condições do subsolo.

As sondagens foram realizadas sobre as cicatrizes e o material remontante do deslizamento, e não sobre o corte do talude conformado. Também foram feitas somente no pé do escorregamento, devido à dificuldade e o risco de acesso ao local na época dos acontecimentos. Os dois primeiros furos: SP-02A e SP-02B atingiram o impenetrável em matacões, mas o terceiro, SP-02C, caracterizou melhor a estratigrafia do terreno, sendo interrompido em 13,70 m, no encontro com a rocha.

Os furos identificaram uma camada de aterro superficial, com média de 1,10 m de profundidade, composta por argila silto arenosa, de cor variegada e consistência mole, material este, que foi removido durante a execução do retaludamento. Praticamente em toda a área, juntamente com o material de escorregamento, ocorrem alguns matacões pequenos dispersos. Abaixo deste material foram encontrados mais dois tipos de solos residuais: o primeiro de espessura variável de 2 a 6 metros, composto por silte argilo arenoso, de cor variegada e consistência média. O segundo, estendendo-se até o final das sondagens, em torno de 10 a 20 m de espessura, composto por silte muito arenoso e com pouca argila, de cor variegada e consistência dura.

O nível freático detectado nas sondagens, em torno de 0,70 m, na época dos escorregamentos, não é o mesmo que foi utilizado para as análises de estabilidade do presente trabalho. Para a interceptação e rebaixamento do lençol freático, de forma a impedir a deterioração progressiva do suporte do subleito, foram empregados drenos longitudinais profundos, portanto, o perfil da linha piezométrica foi adotado hipoteticamente, considerando que a linha freática encontra-se praticamente abaixo e interceptando as linhas dos drenos, mas ainda assim, saturando boa parte da segunda camada de solo residual.

O perfil descrito acima está representado na Figura 11 abaixo, juntamente com a locação dos furos de sondagem SPT e a geometria da seção crítica.

Para o levantamento das cicatrizes do escorregamento e as informações das curvas de nível que descrevem as declividades da vertente, foram realizados levantamentos topográficos no local da ocorrência. Com estes, foram sobrepostos um a um os perfis das seções, e após isto, pode então ser selecionado e traçado o perfil de maior declividade, ou seja, o pior caso, a denominada curva envoltória, onde então se escolheram os possíveis ângulos de taludes nela inscritos e se realizaram os estudos de retroanálise.

3. METODOLOGIA

A seguir será descrita a metodologia empregada neste trabalho para a avaliação e comparação do fator de segurança pertencente a encosta em estudo.

Cabe ressaltar que a descrição dos dados e procedimentos descritos abaixo, referentes à metodologia proposta e aplicada por Lopes (1981) na encosta objeto deste estudo, foram obtidos por meio de relatórios e memoriais de cálculo fornecidos pela empresa Engemin Engenharia e Geologia Ltda.

3.1. Procedimentos metodológicos

Com o objetivo de analisar o fator de segurança no qual a encosta se encontra, foi inicialmente modelada a geometria do talude no software GeoStudio – Slope/W, e então realizadas comparações com três métodos tradicionais: Morgenstern-Price, Fellenius e Bishop Simplificado, utilizando-se os parâmetros obtidos das correlações.

Feitas essas análises, partiu-se então para os estudos do Método de Lopes, feitos por meio de memoriais de cálculos da empresa Engemin, o qual foi aplicado para dimensionar os taludes de corte da encosta.

Foram analisadas diversas seções de cicatrizes de escorregamentos, levantadas pela topografia, através do método observacional e registradas as informações necessárias para a análise: inclinação e altura dos taludes limites inscritos na cicatriz crítica. A partir dessa análise foi possível obter as funções ângulo e altura para os taludes possíveis, numerados de 1 a 5. O peso específico do solo, estimado para os cálculos, foi de 18 kN/m³.

Obtidas as equações representativas do caso em questão, foi feita a substituição dos pares de valores altura/ângulo limite dos taludes escolhidos e estimado o valor de ϕ , que permitiram o estabelecimento de um determinado número de equações numéricas possíveis.

Dentro do intervalo de validade da variável ângulo de atrito, adotado segundo Hoek (1970), variando-se de 10° a 40°, e calculando-se os valores da função X correspondentes, pôde-se, no gráfico de Hoek (Figura 3), sobre a

curva FS = 1, considerando ruptura circular, determinar os correspondentes valores da função Y. Uma vez de posse dos valores dessa função, puderam-se calcular os valores de c que satisfaziam as condições impostas pelos taludes escolhidos na envoltória dos perfis das seções principais dos escorregamentos.

No instante seguinte, foram plotados em gráficos os valores dos diversos pares c/ ϕ que poderiam atender às condições impostas por cada talude-limite e em verificar-se a região onde ocorreram intersecções entre dois ou mais deles, uma vez que nelas deveriam situar-se os pares que atenderiam às condições dos diversos taludes parciais.

Por ajustes sucessivos foi possível chegar-se ao par que melhor atende às condições impostas por todos os taludes, e que é aquele para o qual todos eles se aproximaram do FS = 1, valor do qual, também, se aproximou a média geral dos FS individuais de todos os taludes parciais escolhidos. Assim para a situação de ruptura, foi admitida como representativa a ruptura com fluxo normal descendente e adotados os valores dela obtidos: $\phi = 25^\circ$ e $c = 8$ kN/m².

Selecionados então os parâmetros tido como expressivos da ruptura, e utilizando-se ângulos de inclinação habituais em construção de cortes (45° = 1v:1h; 34° = 1v:1,5h; 30° = 1v:1,75h; 27° = 1v: 2h e 24° = 1v:2,5h), estabeleceram-se alturas máximas passíveis de serem construídas com essas inclinações e que, trabalhando a seco (isto é, utilizando sistemas de drenagem), mantivessem fatores de segurança de 1; 1,1; 1,2; 1,3; 1,4 e 1,5, respectivamente.

De acordo com Lopes (1981), esses fatores de segurança representam uma condição numericamente superior se comparada à condição que vigeu por ocasião da grande chuva de 10/11 de março. Assim sendo, considerou-se suficiente adotar um valor de segurança no entorno de 10% sobre essa condição, uma vez que valores mais elevados de FS, resultariam em taludes extremamente abatidos, até porque, numa condição mais agressiva do que a que foi usada como paradigma, de nada adiantariam taludes mais suaves, uma vez que, teoricamente as encostas deveriam colapsar antes dos taludes da obra.

4. RESULTADOS

O resultado das análises realizadas com os métodos tradicionais, utilizando-se os parâmetros obtidos das correlações da literatura técnica, forneceu valores significativamente maiores do fator de segurança, em comparação com o Método de Lopes como mostra a Tabela 3 e, por outro lado, a mesma comparação utilizando os parâmetros do estudo de regressão apresenta valores muito próximos (Tabela 4).

Tabela 3. Comparativo entre os FS obtidos nos diferentes métodos de estabilidade considerados, utilizando-se os parâmetros do estudo de regressão para o método de Lopes e os obtidos de correlações nos outros métodos.

Método de Estabilidade	FS
Fellenius	2,13
Morgenstern-Price	2,28
Bishop S.	2,28
Lopes	1,10

Tabela 4. Comparativo entre os FS obtidos nos métodos de estabilidade considerados, utilizando-se em todos, os valores obtidos do estudo de regressão.

Método de Estabilidade	FS
Fellenius	1,15
Morgenstern-Price	1,24
Bishop S.	1,24
Lopes	1,10

5. CONCLUSÃO

Entre as conclusões passíveis de serem tiradas do trabalho enumera-se:

1. A utilização de métodos analíticos tradicionais e o método de Lopes leva a valores semelhantes (sempre algo menor) se utilizados os mesmos parâmetros;
2. A utilização do método de Lopes leva à obtenção de valores dos parâmetros de resistência sensivelmente menores que os obtidos das correlações utilizadas e, conseqüentemente, a valores de FS muito menores;
3. A metodologia utilizada no caso se apresenta eficaz na análise de estabilidade de taludes, sendo de simples e rápida aplicação;
4. Em comparação com métodos tradicionais, ressalta-se a vantagem de utilização de dados

reais do talude, pois além de não depender de ensaios de campo ou laboratoriais que muitas vezes não são possíveis de serem realizados, (pois demandam custo e prazo) na definição de soluções e que no caso de escorregamentos de taludes, devem ser imediatas.

5. Há necessidade de testar-se (e isto será feito pelo autor) um comparativo entre os parâmetros obtidos do estudo de regressão efetuado com valores obtidos de ensaios canônicos de laboratório.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à empresa Engemin Engenharia e Geologia Ltda. pelo fornecimento dos dados aplicados neste trabalho, também ao Engenheiro Nelson Henrique Joly pelo auxílio na execução das modelagens de análise de estabilidade empregadas no software e ao MSc. Geólogo José Antonio Urroz Lopes pelas suas sugestões e análises significativas.

REFERÊNCIAS

- Cintra, J.; Aoki, N; Albiero, J. (2011). *Fundações diretas: projeto geotécnico*. São Paulo: Editora Oficina de textos, 140p.
- Dell'Avanzi, E. e Silva, D. P. (2013). *Estabilidade de Encostas - Considerações sobre a acurácia dos modelos de previsão da segurança*. In: GeoSul 2013- IX Simpósio de Prática de Engenharia Geotécnica da Região Sul, Criciúma-SC, Brasil, 9p.
- Engemin Engenharia e Geologia (2011). *Relatório de Projeto - Ocorrências km 19,8*. Pinhais-PR, 95p.
- Fiori, A. P.; Carmigiani, L. (2011) *Fundamento de mecânica dos solos e das rochas: aplicação na estabilidade de taludes*. Curitiba: Editora UFPR, 500p.
- Gomes, C. L. R. (2003). *Retroanálise em Estabilidade de Taludes em Solo: Metodologia para Obtenção dos Parâmetros de Resistência ao Cisalhamento*, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Civil, UNICAMP, Campinas, 146p.
- Lopes, J. A. U. (1981). *Algumas Considerações Sobre a Estabilidade de Taludes em Solos Residuais e Rochas Sedimentares Subhorizontais*. In: CBGE (CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA E ENGENHARIA), 3th, 1981, Itapema-SC. Anais do 3º Congresso Brasileiro de Engenharia e Geologia. Itapema: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, v.3, p. 167-186.