

Análise da estabilidade de talude coluvionar da Serra do Mar do Paraná considerando diferentes condições de fluxo no subsolo

Yomura, D. M.

Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil

Dyminski, A. S.

Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil

Resumo: Uma das grandes preocupações relativa às obras de engenharia é o risco geotécnico inerente, principalmente no que diz respeito aos deslizamentos de encostas. Em épocas de chuvas, quando os deslizamentos se tornam mais freqüentes, percebe-se a real necessidade de se estudar e entender a influência da água subterrânea na instabilização da massa de solo. Assim, neste trabalho, é apresentada uma avaliação da estabilidade de um importante talude natural situado na Serra do Mar do Paraná, composto de camada coluvionar sobre solo residual gnáissico. Foram consideradas diferentes hipóteses relativas à presença da água no subsolo, envolvendo mudanças de nível de água, bem como a variação da saturação da camada mais superficial. Desta forma, pôde-se apresentar a variação do coeficiente de segurança para as diversas hipóteses, o que permitiu uma análise da influência da água subterrânea na estabilidade do talude.

Abstract: A major concern for engineering works is the inherent geotechnical risk, especially with regard to slopes landslides. In times of rain, when the landslides become more frequent, we find a real reason to study and understand the influence of groundwater in the instability of the soil mass. Therefore, in this paper the authors present a stability evaluation of an important natural slope located in the Serra do Mar of Paraná, composed of a colluvium layer over a gneiss residual soil. Different situations concerning the presence of underground water were considered, involving changes in the water level and in the saturation of the superficial layer. Thus, it was possible to present a variation of the coefficient of safety for the several hypotheses, which allowed an analysis of the influence of subsoil water on the stability of the slope.

INTRODUÇÃO

Os deslizamentos de solo consistem em um dos muitos processos naturais que moldam a superfície terrestre. Possui um importante significado sócio-econômico-ambiental, pois pode causar perdas de propriedades, rodovias e ferrovias, florestas, animais, e até de pessoas. Sendo assim, torna-se cada vez mais necessário o constante monitoramento da dinâmica das encostas e o estudo dos processos de instabilização, bem como as formas de contenção.

A ocorrência da instabilização de taludes e seus deslizamentos aumentam principalmente devido ao crescimento da urbanização e ao desenvolvimento de áreas sujeitas a escorregamentos, ao desmatamento e poluição ambiental, e a maior taxa de precipitação causada pelas mudanças de clima (Cornforth, 2005).

Um elemento desencadeador dos fenômenos de instabilidade é a água infiltrada em épocas de chuvas intensas, pois ela contribui para o aumento do peso específico da camada do material, aumento

da poro-pressão, diminuição da pressão efetiva, e redução da coesão aparente.

Neste trabalho, é apresentado um estudo sobre um talude da Serra do Mar do Paraná envolvendo análises de estabilidade com métodos de equilíbrio limite, realizadas supondo-se diferentes condições de saturação e de fluxo subterrâneo, mostrando a grande variação dos coeficientes de segurança nas diversas situações.

CARACTERIZAÇÃO DO TALUDE

A encosta avaliada está localizada na Serra do Mar do Paraná, caracterizada por conter as seguintes obras de engenharia de grande interesse:

- A rodovia federal BR-376, com quatro faixas de rolamento, passando ao pé da encosta;
- Dois oleodutos e um gasoduto;
- Uma linha de transmissão de energia elétrica próximo ao topo da encosta.

Essa encosta possui aproximadamente 100 m de altura, e o solo pode ser descrito como um depósito de tálus, composto por blocos de rochas com

diferentes composições mineralógicas, em especial granitos e gnaisses, em meio a uma matriz de solos coluvionares heterogêneos, sendo muito suscetível ao movimento de rastejo ou *creep* (Dyminski et al, 2008).

O perfil do solo (Figura 1) e suas propriedades constam em Tonus (2008), que realizou um estudo a respeito do mesmo talude. O perfil em questão foi obtido a partir da planta de topografia do local, de 12 sondagens SPT e das informações dos

piezômetros instalados naquele sítio. Para chegar às propriedades dos solos, Tonus ainda realizou uma pesquisa bibliográfica abrangendo vários taludes coluvionares da costa brasileira, chegando então aos dados listados na tabela 1. A divisão de camadas do solo baseou-se tanto na descrição dos materiais nos boletins de sondagem quanto no valor do N-SPT, que serviu também como critério de classificação dos materiais.

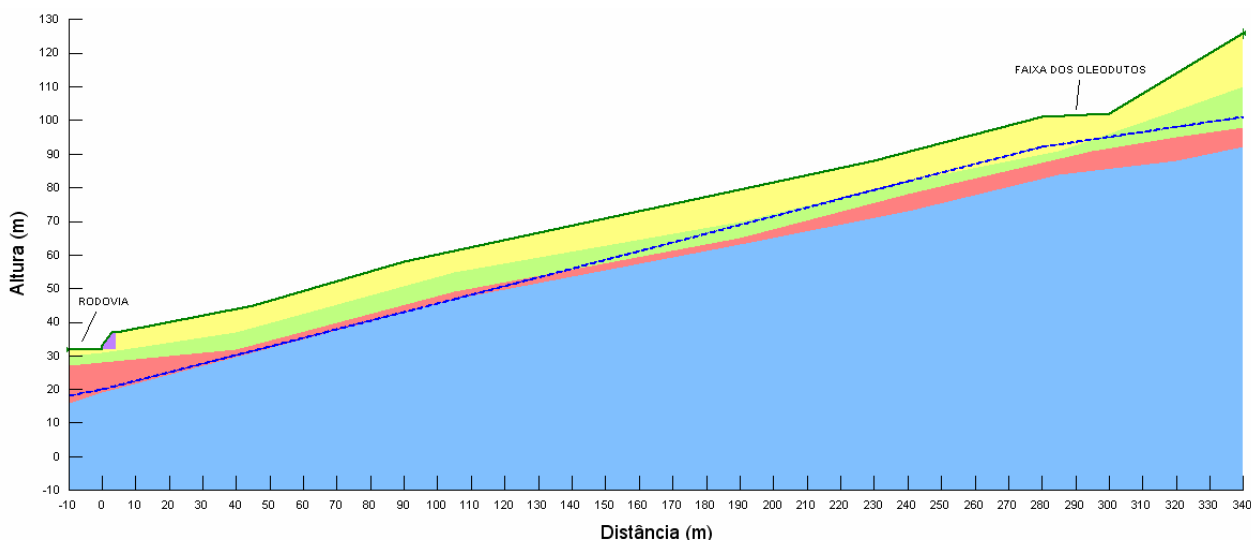


Figura 1: Perfil do talude (Tonus, 2008).

Tabela 1 – Solos e características do talude (Tonus, 2008)

Camada	Cor	NSPT	γ (kN/m ³)	γ_{sat} (kN/m ³)	C (kN/m ²)	ϕ (°)
Colúvio A	Amarelo	< 8	16,5	18,0	0	21
Colúvio B	Verde	8 – 15	17,0	18,5	3	24
Residual A	Laranja	15 – 30	18,0	19,5	5	28
Residual B	Azul	> 30	18,5	20,0	10	30

2.1 Descrição do Problema

No ano de 1995, época das obras de duplicação da rodovia BR-376, o talude em questão vinha apresentando sinais de movimentação. Um corte executado no pé do talude provocou a instabilização da área e induziu ao aparecimento de trincas, mas não afetou a faixa dos oleodutos. Para estabilização da área, foi construído um muro de concreto ciclópico com cerca de 2 m de altura e 50 m de comprimento no pé do talude (TRANSPETRO, 2003).

Após um período de fortes chuvas, em janeiro de 1997, ocorreu um escorregamento que rompeu o muro no pé do talude (Figura 2), desencadeando uma série de escorregamentos sucessivos, atingindo a faixa dos oleodutos.

Segundo Vasconcellos (1997), os caminhos naturais das águas no terreno foram provavelmente bloqueados, deixando a massa de solo acima instabilizada, e ocasionando o seu deslizamento.

Esse fenômeno deve ter se repetido sucessivamente até atingir a faixa dos dutos.



Figura 2: Detalhe do muro após ruptura (Vasconcellos, 1997).

Em abril do mesmo ano, foi verificada a existência de fendas na faixa de um dos oleodutos. Foram realizadas investigações de campo e

executadas algumas obras complementares para a estabilização da encosta, como drenos subhorizontais profundos e placas atirantadas. Além disso, o DNER construiu, junto à rodovia, uma cortina atirantada (TRANSPETRO, 2003). Para monitoração do talude, foram instalados diversos instrumentos geotécnicos: 12 piezômetros do tipo Casagrande (em regime de leitura semanal desde julho de 1997) e treze inclinômetros.

Devido aos drenos, a leitura dos piezômetros mostrou um rebaixamento diário do lençol freático. Além disso, foram tamponadas as fendas no talude de corte e na pista, para evitar a penetração de água.

3 ANÁLISE DA ESTABILIDADE DO TALUDE

Uma vez definidas a geometria do talude e as condições do subsolo, a estabilidade do talude pode ser avaliada utilizando-se metodologias de cálculo ou programas de computador específicos. A maioria desses programas se baseia nos métodos de equilíbrio limite para modelos bidimensionais, apesar de alguns possibilitarem uma análise tridimensional; outros usam o método dos elementos finitos, e permitem uma avaliação mais apurada de tensões e deformações nos materiais envolvidos.

Neste trabalho, primeiramente foi realizada uma análise do fluxo da água no subsolo e da distribuição das poro-pressões no talude através do programa GeoSlope, módulo Seep/W, que possibilita a resolução de problemas de percolação através de equações de elementos finitos para cada nó de uma determinada malha.

Esse módulo não cria uma rede de fluxo real, mas considera e mostra vários elementos dessa, sendo muito útil para a interpretação dos resultados dentro do mesmo contexto.

A utilização do Seep/W foi limitada à licença de estudante, uma versão que permite apenas um estudo básico do problema. As limitações encontradas foram:

- Máximo de 500 elementos;
- Máximo de 2 materiais;
- Possibilidade de análise apenas no estado estacionário, não no transiente;
- Não é possível especificar funções no contorno ou de granulometria;
- É possível especificar o nível d'água somente através da poro-pressão zero ou da carga total.

Uma vez que as equações de elementos finitos foram resolvidas, a modelagem da estabilidade do talude foi realizada com o auxílio do módulo Slope/W do programa computacional GeoSlope, que permite analisar desde problemas simples a mais complexos, com diferentes formatos de superfície de ruptura, bem como diferentes condições de poro-pressão, de propriedades do solo, de carregamentos e de métodos de análise.

A estabilidade do talude foi então analisada através de métodos de equilíbrio limite para

diferentes situações, considerando o fluxo de água no solo.

3.1 Metodologia de Análise

Devido às limitações encontradas na versão de estudante do módulo Seep/W, o movimento da água foi analisado apenas para as camadas superiores de colúvio.

A especificação e designação das propriedades dos materiais dependeram da situação estudada. Para o talude completamente saturado, foi necessário especificar a condutividade hidráulica saturada (K_{sat}), a função da umidade saturada, e o coeficiente de compressibilidade. Para o talude parcialmente saturado, foram necessários os dados para a definição da função da condutividade hidráulica e da função da umidade volumétrica.

A especificação das condições de contorno é uma componente chave para a análise, podendo ser dividida em carga total (H), variação do fluxo total (Q), ou fluxo por unidade de comprimento ao longo de uma face de um elemento (q). Para o presente estudo, elas foram definidas de acordo com a carga total nos nós da camada superior de colúvio, sendo que Q foi fornecido pelo programa. Todos os demais nós possuem $Q = 0$ como padrão, isto é, o fluxo chegando a cada nó é o mesmo fluxo saindo de cada nó.

Por último, as seções de fluxo foram desenhadas para o cálculo da percolação através do talude. O módulo Seep/W oferece a possibilidade de computar a taxa instantânea de volume de água percolada que flui por uma determinada seção. As seções de fluxo podem ser utilizadas de diversas maneiras, pois podem ser desenhadas em qualquer lugar em que se queira conhecer o fluxo. Além disso, quando uma seção é fragmentada segundo a geometria da região, o valor do fluxo calculado se aplica à seção inteira, e não a cada segmento individualmente.

Devido à escassez de dados laboratoriais deste solo, em especial ao que diz respeito à condutividade hidráulica, foi realizada uma pesquisa bibliográfica envolvendo a condutividade hidráulica de solos tropicais coluvionares e residuais de granito e gnaisse. Por fim, optou-se pela utilização dos dados de condutividade hidráulica e de umidade volumétrica de um estudo realizado por Gerscovich et al. (2006) sobre um talude natural do Rio de Janeiro, formado por solo residual originado de rocha metamórfica de gnaisse. Esta opção foi realizada devido ao fato do perfil estudado por aqueles autores ser o mais aproximado do presente talude.

As curvas de condutividade hidráulica e de umidade volumétrica utilizadas são mostradas nas Figuras 3 e 4.

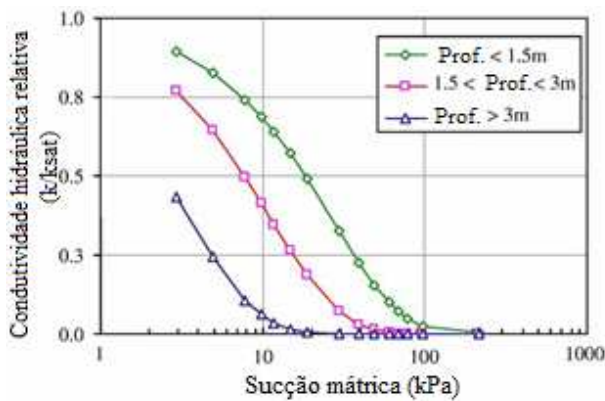


Figura 3: Curva de condutividade hidráulica (adaptado de Gerscovich et al., 2006).

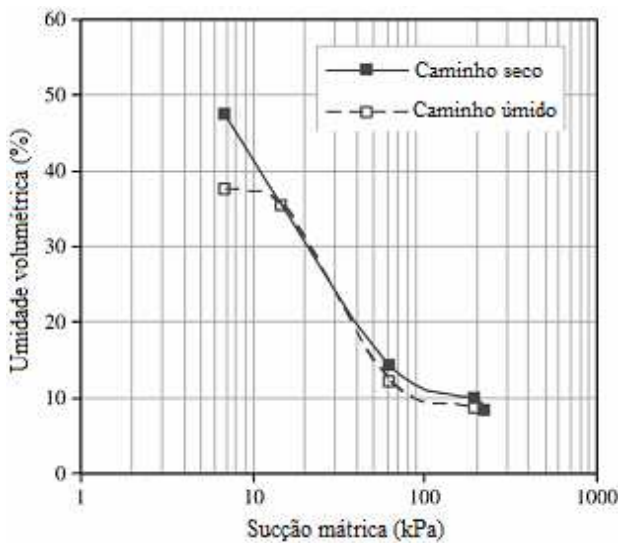


Figura 4: Curva de umidade volumétrica (adaptado de Gerscovich et al., 2006).

3.2 Análise do Talude

O talude foi analisado para quatro situações diferentes: parcialmente saturado sem a percolação da água no solo (Situação I); parcialmente saturado com a percolação da água no solo (Situação II); saturado sem a percolação da água no solo (Situação III); e saturado com a percolação da água no solo (Situação IV).

O objetivo dessas simulações foi realizar uma análise da influência da água no subsolo e, conseqüentemente, na estabilidade do talude.

As situações sem percolação da água no solo foram feitas diretamente no Slope/W com o objetivo de realizar uma comparação com os fatores de segurança encontrados após a consideração do fluxo da água no solo.

As situações com percolação da água no solo foram realizadas em duas etapas: o cálculo dos fluxos e poro-pressões no módulo Seep/W, para posterior interação com o cálculo do fator de segurança no módulo Slope/W. As condições de

contorno foram especificadas através da carga total na camada de colúvio superior.

Para o cálculo dos fatores de segurança foram utilizados os métodos de Bishop e de Janbu.

Os perfis utilizados nas diferentes análises são mostrados em seguida.

3.2.1 Situação I: Talude parcialmente saturado sem considerar a percolação da água no solo

A situação I abrange as duas camadas superiores de colúvio e o nível d'água de acordo com o perfil fornecido por Tonus (2008). Pretende-se achar o fator de segurança mínimo, que levaria à superfície de ruptura crítica junto ao muro.

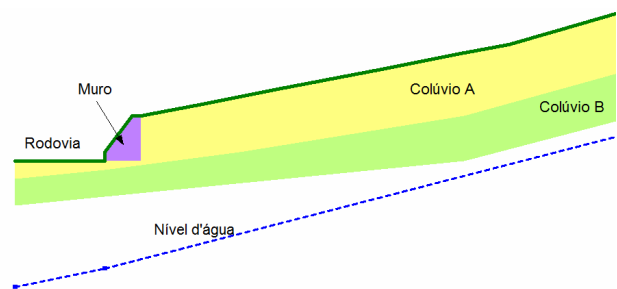


Figura 5: Situação I.

3.2.2 Situação II: Talude parcialmente saturado considerando a percolação da água no solo

A situação II envolve o mesmo perfil utilizado na situação I, mas considera a influência da percolação da água no solo. A figura 6 detalha o pé do talude, junto ao muro, e a discretização realizada com a malha triangular não estruturada de elementos finitos.

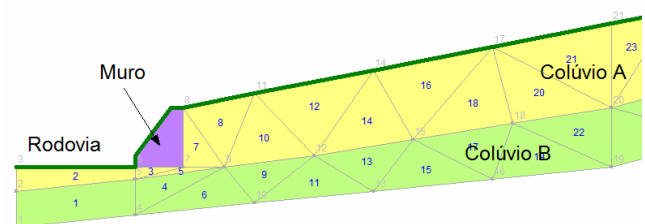


Figura 6: Situação II.

3.2.3 Situação III: Talude saturado sem considerar a percolação da água no solo

O perfil utilizado na situação III é baseado novamente os dados fornecidos por Tonus (2008), porém completamente saturado, ou seja, o nível d'água coincide com a parte superior do talude, como mostra a Figura 7. Ele serviu de base para o cálculo do fator de segurança no módulo Slope/W.

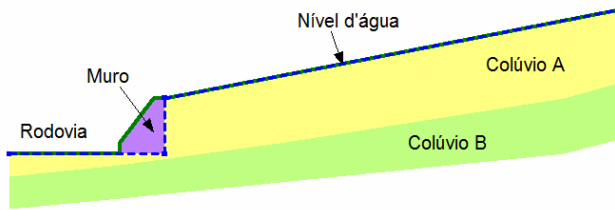


Figura 7: Situação III.

3.2.4 Situação IV: Talude saturado considerando a percolação da água no solo

A última situação estudada envolve o perfil do talude utilizado na situação III, completamente saturado, mas considerando a influência da percolação da água no solo. A Figura 8 mostra a discretização realizada pelo módulo Seep/W.

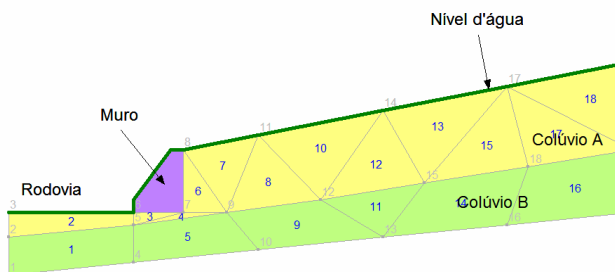


Figura 8: Situação IV.

4 RESULTADOS

4.1 Situação I: Talude parcialmente saturado sem considerar a percolação da água no solo

Para o presente estudo, os fatores de segurança encontrados para o talude não saturado e sem considerar a percolação da água no solo foram: 1,367 para o método de Bishop, e 1,314 para o método de Janbu. A superfície crítica de ruptura, cujo início possui as coordenadas que aparecem na caixa branca, é mostrada na Figura 9.

Nesse caso, o muro foi modelado como um terceiro material, diferente do colúvio A e B, com valor para coesão de 500 kPa, e para ϕ de 500° , iguais aos utilizados por Marchesini (2007). Nota-se, entretanto, que o muro faz parte da massa deslizante. Assim, para fins de comparação, foi realizado um teste onde o muro é considerado como sendo composto por um material impenetrável. O fator de segurança mínimo encontrado foi de 1,033 para o método de Bishop, e de 1,032 para o método de Janbu, considerando demais condições iguais ao do talude estudado nas quatro situações. A

superfície crítica de ruptura é mostrada na Figura 10.

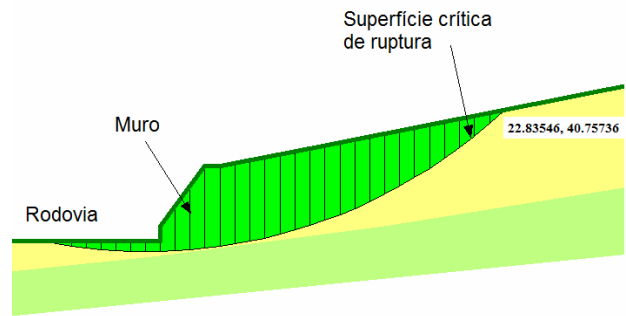


Figura 9: Superfície crítica de ruptura para situação I.

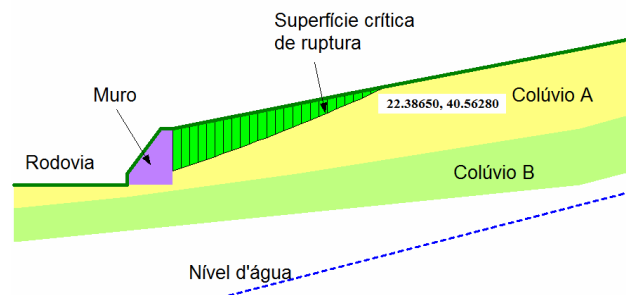


Figura 10: Superfície crítica de ruptura para muro com material impermeável para situação I.

Comparando os resultados obtidos nas figuras 9 e 10, verificou-se que as superfícies críticas de ruptura diferem com o material do muro. Optou-se por fazer toda a análise com os dados do muro fornecidos por Marchesini (2007), especificados anteriormente.

4.2 Situação II: Talude parcialmente saturado considerando a percolação da água no solo

Na análise do talude não saturado, considerando a percolação da água no solo para o mesmo nível d'água utilizado na situação I, foram obtidos os resultados para fluxos, poro-pressões e carga hidráulica como mostrados nas Figuras 11 e 12.

As flechas representam os fluxos no solo, sendo proporcionais em tamanho à quantidade de fluxo. É interessante notar que existe um fluxo não saturado, calculado diretamente pelo programa.

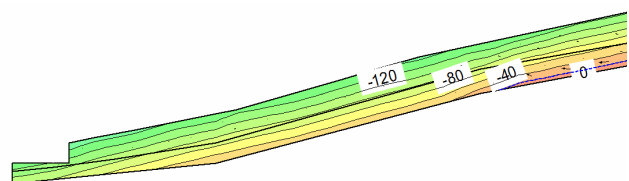


Figura 11: Poro-pressão e fluxos para situação II.

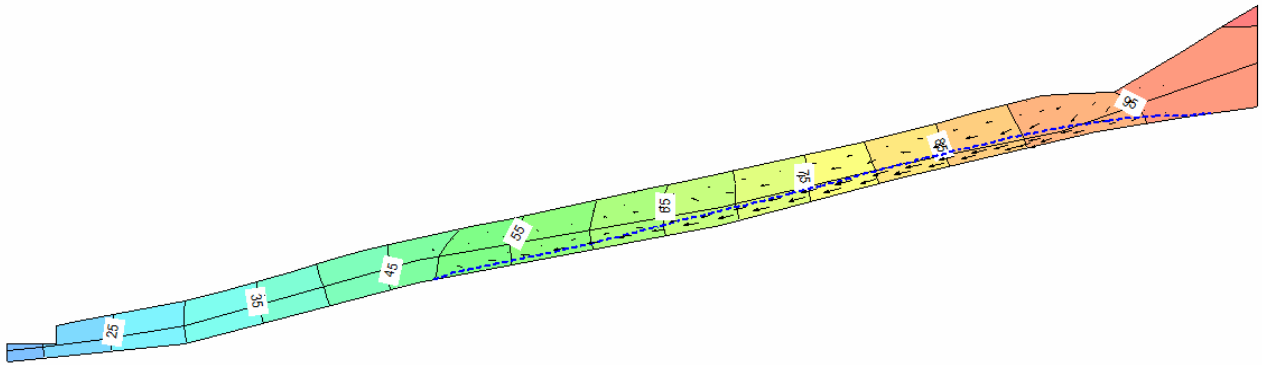


Figura 12: Carga hidráulica e fluxos para situação II.

A superfície crítica de ruptura para essa situação (Figura 13) possui fator de segurança 1,403 para o método de Bishop, e 1,363 para o método de Janbu.

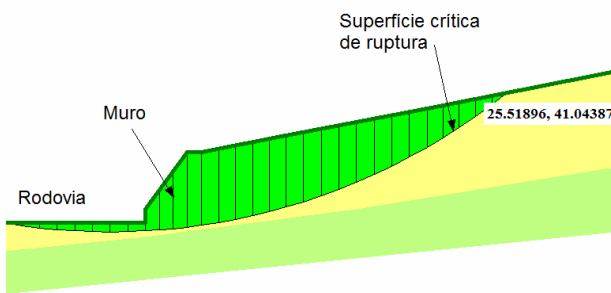


Figura 13: Superfície crítica de ruptura para situação II.

4.3 Situação III: Talude saturado sem considerar a percolação da água no solo

A situação III considera o talude completamente saturado, sendo essa uma situação de muito interesse para a compreensão de deslizamentos. Para simular o deslizamento ocorrido em 1997, os drenos do muro foram desconsiderados.

Infelizmente, não foi possível a realização de uma análise transiente, simulando uma chuva no talude. Portanto, foi suposta uma situação onde o nível d'água atinge a superfície do talude, obtendo fator de segurança 0,704 para o método de Bishop, e 0,666 para o método de Janbu. A superfície crítica de ruptura está ilustrada na Figura 14.

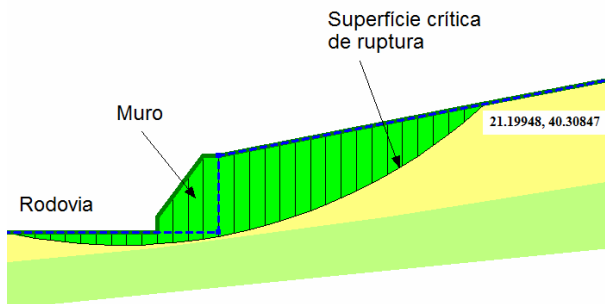


Figura 14: Superfície crítica de ruptura para situação III.

4.4 Situação IV: Talude saturado considerando a percolação da água no solo

A última situação estudada considera o talude completamente saturado com a percolação da água encontrada através do Seep/W, cujos resultados seguem nas Figuras 15 e 16.

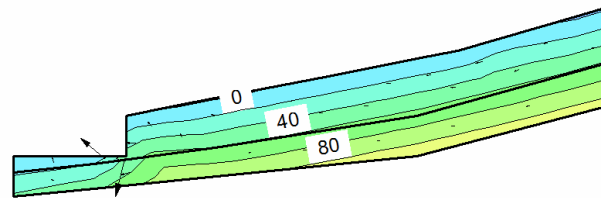


Figura 15: Poro-pressão e fluxos para situação IV.

Observa-se neste caso o representativo fluxo ascendente de saída na base do muro, o que também é um fator importante no alívio do peso próprio da estrutura, cuja estabilidade é garantida pela gravidade. Assim, além de afetar a estabilidade do talude, o fluxo diminui a estabilidade do muro de contenção.

A superfície crítica de ruptura (Figura 17), considerando a análise do fluxo da água, resultou em um coeficiente de segurança 0,594 para o método de Bishop, e 0,573 para o método de Janbu.

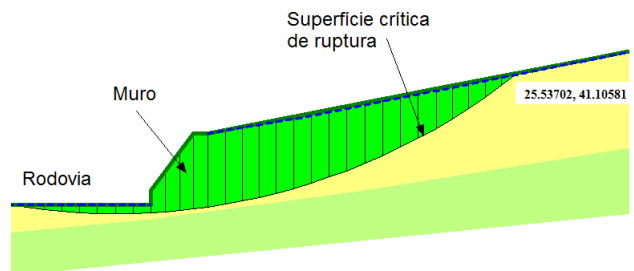


Figura 17: Superfície crítica de ruptura para situação IV.

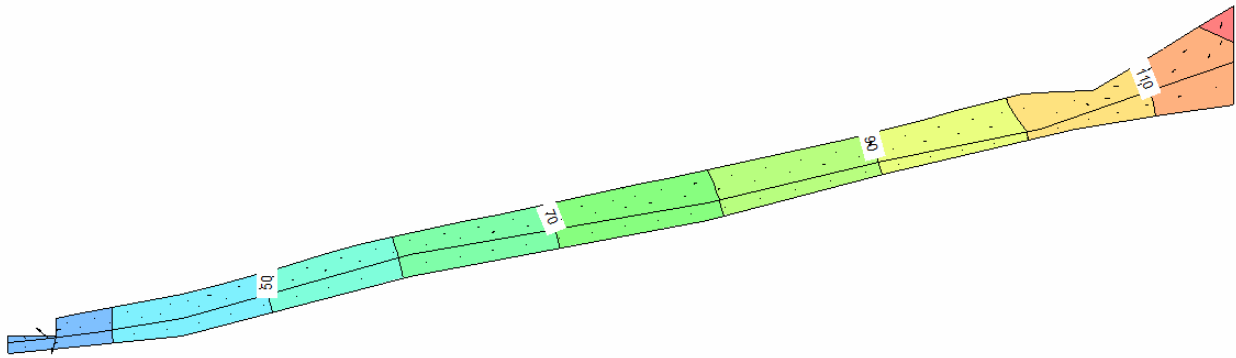


Figura 16: Carga hidráulica e fluxos para situação IV.

Para ambas as situações – perfil parcialmente saturado e perfil saturado – que consideram o fluxo da água no solo, existe uma diferença na superfície crítica de ruptura, no que diz respeito à quantidade de massa de solo que ela abrange.

5 CONCLUSÕES

Os deslizamentos possuem um significado importante no contexto sócio-econômico-ambiental. Seu acontecimento e suas conseqüências são vistos freqüentemente em épocas de chuvas, causando perdas de estruturas, transtornos econômicos e sociais, e, o mais importante, pondo em risco vidas humanas. A presente análise é, portanto, de grande interesse e importância atual, sendo apenas uma pequena parte de todo o estudo sobre estabilidade de taludes a ser realizado.

Através dos resultados, pôde-se observar quão importante é a influência da água no solo para a estabilidade do talude. Isso demonstra a necessidade de se entender detalhadamente as causas e o mecanismo das rupturas passadas, e simular a situação real que pode ter levado ao escorregamento já ocorrido.

Para a análise realizada, houve algumas limitações do software disponível, utilizado somente na sua licença de estudante. Tal versão determinou a diminuição das camadas de solo de quatro para duas, a análise do tipo estacionária e a discretização do perfil menos detalhada.

Na análise do tipo estacionária, não foi considerado o tempo necessário para se atingir a condição apresentada, sendo a resolução da pressão e das condições de fluxo aplicada somente às condições de contorno definidas em um dado momento. Portanto, não são feitas estimativas sobre o período passado até o desenvolvimento da condição final, supondo-se que o talude sempre permaneceu no mesmo estado.

Apesar dos limites encontrados, os resultados obtidos enfatizam que o deslizamento ocorrido em 1997, que causou o rompimento do muro de concreto, foi uma resposta dos materiais envolvidos

e da saturação do solo, iniciando, assim, a ruptura progressiva do talude.

Após as chuvas, a massa de solo pode se tornar rapidamente saturada, reduzindo as poro-pressões negativas ou até aumentando as poro-pressões positivas. O resultado é uma diminuição da resistência ao cisalhamento do solo e, conseqüentemente, uma menor estabilidade do talude, levando ao seu rompimento.

Para a obtenção dos fatores de segurança, foram utilizados os métodos de Bishop e de Janbu, apesar de serem mais simples. Os valores encontrados para o método de Janbu são menores que aqueles do método de Bishop, como mostra a Tabela 2:

Tabela 2 – Fatores de segurança.

Método	Talude parcialmente saturado		Talude saturado	
	Sem percolação	Com percolação	Sem percolação	Com percolação
Bishop	1,367	1,403	0,704	0,594
Janbu	1,314	1,363	0,666	0,573

Nota-se uma diminuição importante no fator de segurança para o talude parcialmente saturado e o completamente saturado. O fator de segurança sofre uma diminuição do caso sem percolação para o caso com percolação, como esperado. A superfície crítica de ruptura é maior quando se considera a percolação da água.

Para o caso não saturado, existe um pequeno aumento do fator de segurança quando se considera a percolação da água no solo devido ao efeito da sucção mátrica. Porém, o fluxo nessa situação é principalmente um fluxo não saturado, e a superfície crítica de ruptura abrange uma porção maior do solo, se comparada ao caso sem percolação.

Outro fator importante para a compreensão das condições que levaram ao rompimento do muro é a quantidade de fluxo junto a ele, como mostrado claramente nos detalhes dos resultados para a poro-pressão nas Figuras 18 e 19.

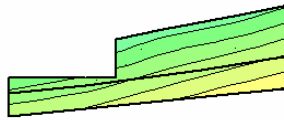


Figura 18: Talude parcialmente saturado.

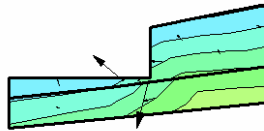


Figura 19: Talude saturado.

Portanto, é indispensável à segurança da encosta uma adequada manutenção do lençol freático em cotas apropriadas. Assim, deve-se realizar um monitoramento constante das estruturas de contenção e do sistema de drenagem, como tem sido realizado nos últimos anos, a fim de se evitar condições próximas da saturação, que diminuem a estabilidade do talude.

AGRADECIMENTOS

As autoras agradecem à Transpetro por dados usados neste trabalho.

REFERÊNCIAS

- Cornforth, D. *Landslides in Practice: Investigation, Analysis, and Remedial/Preventative Options in Soils*, Ed. Wiley, 2005.
- Dyminski A. S., Dell'Avanzi E., Kormann A. C. M. e Nascimento N. A. Encostas naturais: tendências atuais em análises de estabilidade e gerenciamento de riscos. *Anais do VI GEOSUL*, Florianópolis, 2008.
- Gerscovich D. M. S., Vargas E. A. e de Campos T. M. P. On the evaluation of unsaturated flow in a natural slope in Rio de Janeiro, Brazil. *Engineering Geology* 88 (2006).
- Marchesini I. A. Análise Determinística, probabilística e de sensibilidade de um talude situado na Serra do Mar do Paraná. Monografia de Graduação, Curso de Engenharia Ambiental, UFPR, 2007.
- Tonus B. P. A. Estabilidade de Taludes: Avaliação dos Métodos de Equilíbrio Limite Aplicados a uma Encosta Coluvionar e Residual da Serra do Mar Paranaense. Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Construção Civil, UFPR, 2008.
- TRANSPETRO. Análise de Estabilidade Complementar – Faixa do OSPAR/OPASC. 2003.
- Vasconcellos C. R. A. Instabilidade da Encosta km 55 + 800 do OSPAR. Workshop Dutos, 1997.