

Retroanálise da Estabilidade de um Talude Rodoviário da Região de Curitiba

Wagner Teixeira
UTFPR, Curitiba, Brasil, teixeira.wagner@hotmail.com

Alexandre Mokdici dos Reis
UTFPR, Curitiba, Brasil, amr.92@hotmail.com

Ronaldo Luís dos Santos Izzo
UTFPR, Curitiba, Brasil, izzo@utfpr.edu.br

Juliana Lundgren Rose
UTFPR, Curitiba, Brasil, julrose@gmail.com

RESUMO: Apresenta-se neste trabalho a retroanálise de um escorregamento em um talude rodoviário na encosta da rodovia Curitiba – Ponta Grossa (BR 376), km 4040, situado no município de Curitiba, Paraná. Por ser um corredor de escoamento de alguns dos principais polos de produção agrícola e industrial do Estado, mitigar seu risco de bloqueio ou acidentes é de suma importância. O talude localiza-se na região de Formação Guabirotuba e o solo é classificado como silte-arenoso, conforme norma D-2487 (ASTM, 2011). Através do ensaio de cisalhamento direto obteve-se um intercepto de coesão de 13,45 kPa e um ângulo de atrito interno de 25,85° para este solo. Há no local um escorregamento do tipo rotacional, por isso, determina-se a mais provável causa do deslizamento, assumindo hipóteses em que este pode ter ocorrido. Um modelo da geometria inicial do talude foi inserido na ferramenta computacional SLOPE-W (GeoStudio, 2007), e juntamente com seus parâmetros característicos, determina-se o fator de segurança, através do método de Spencer, resultando em um fator de 2,18 para o talude em estado seco e 1,42 para o talude em estado parcialmente saturado. Através da análise, conclui-se que talude encontra-se estável no ponto de ruptura existente. Para o talude em estado parcialmente saturado, indica-se a aplicação de drenos profundos de 2,5 metros de comprimento, para assim obter o fator de segurança acima de 1,5, recomendado pela norma NBR 11682 (ABNT, 2002). Hipóteses para o rompimento foram levantadas, a primeira é devido a uma infiltração localizada no patamar acima, ocasionando um fluxo de água corrente, abaixando a coesão para 8,62 kPa, chegando no fator de segurança unitário. Outra hipótese é a de uma lente no local da ruptura, com parâmetros inferiores aos obtidos em laboratório.

PALAVRAS-CHAVE: Estabilidade de Taludes, Talude Rodoviário, Fator de Segurança, Cisalhamento.

1 INTRODUÇÃO

Além de ser um país de dimensões continentais, o Brasil também possui a quarta maior rede de estradas no mundo, com 1,6 milhões de quilômetros, pavimentadas ou não, segundo a

Road Traffic Technology, em 2014. Dessas rodovias, o governo federal resolveu privatizar grande parte dos principais eixos, onde estão sendo recuperadas, parcialmente duplicadas, e mantidas pela iniciativa privada.

O país passa por um grande esforço em

manutenção de rodovias, e o aprofundamento em estudos rodoviários vem ao encontro do processo que o país está passando, já que sua matriz de transporte é, e continuará sendo por muitos anos, a mesma: rodoviária.

Para uma rede rodoviária manter-se viável, deve ser a mais acessível possível. Sua acessibilidade acarreta em vencer topografias cada vez mais irregulares, exigindo então, um trabalho preciso nos entornos da estrada.

Existem no Brasil, conforme boletim da Confederação Nacional de Transportes, 98.475 km de rodovias, até 2014 (CNT, 2015). Dentre as rodovias nacionais existem eixos que cortam o país diagonalmente, transversalmente, longitudinalmente e radialmente, partindo de Brasília. Essas rodovias nacionais são construídas com dinheiro público, e são foco de grande polêmica, pois possuem sérios problemas de qualidade.

Desde Juscelino Kubitschek, a malha rodoviária do país vem sendo tratada como principal meio de transporte de mercadorias e pessoas. Mesmo com a preferência, o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes preconiza que, em 1979 considerava-se 18% da malha rodoviária nacional em estado ruim. Em 2014, considerou-se 16%, no entanto, esta melhoria, praticamente, só aconteceu da malha rodoviária de estado intermediário (DNIT, 2015).

Continuando nos problemas rodoviários, no mesmo boletim da Confederação Nacional, estão catalogados 289 pontos críticos, sendo 28 de queda de barreira. Entrando nos problemas de queda de barreiras nas rodovias, vem à tona o papel da engenharia geotécnica como responsável pela análise correta dos taludes.

Os deslizamentos de terra estão entre os problemas mais estudados dentro da engenharia geotécnica. Na verificação de um talude sujeito ao deslizamento empregam-se métodos de análise que se apoiam na teoria do equilíbrio limite. Essa análise passa pela comparação, ao longo de uma superfície de ruptura arbitrária, entre a resistência disponível e a resistência necessária para manter certo grau de estabilidade, expressos em um fator de segurança.

Esse método, onde se calcula um fator de

segurança através do equilíbrio de uma massa de solo, na iminência de cisalhar, é a análise mais consagrada dentro da geotecnia. Para cada método de análise existente, baseado na teoria do equilíbrio limite, faz-se alguma suposição para realizarem-se os cálculos. Cada autor que trabalhou em seu método sugere uma simplificação ou um aprofundamento a fim de se chegar à maior precisão possível no fator de segurança do talude.

Dentro de uma retroanálise, onde se aplica para taludes já rompidos, fazem-se todos os cálculos de estabilidade do talude, porém, admite-se que o fator de segurança é igual à unidade, e assim, estuda-se que grandeza variou para o fator de segurança, ou em outras palavras, a estabilidade do talude, tenha sido comprometida.

2 RETROANÁLISE

Gomes (2003) define retroanálise como fixar condições de contorno do problema. Ao se fixar a geometria inicial do talude, geometria da superfície de ruptura no seu eixo mais crítico e as condições de poropressão, estima-se o ângulo de atrito e o intercepto de coesão do solo, objetivando-se gerar um fator de segurança unitário. Se o fator de segurança calculado for diferente de 1,00, geralmente, o valor do ângulo de atrito é fixado e o valor da coesão é alterado, por tentativas, até que o fator de segurança seja igual a 1,00.

Para a análise ser confiável, um modelo geológico deve determinar a mais provável causa do deslizamento assumindo condições em que ocorreu. A retroanálise é uma ferramenta extremamente importante para estabelecer parâmetros razoáveis para estabilizar o talude, e deve ser realizada com poucas exceções (MACHAN, 2006).

Tang et al. (1999) afirmam que determinar forças de cisalhamento do solo por meio de retroanálise evita muitos dos problemas associados aos testes de laboratório, sendo amplamente utilizada em reparos de deslizamentos. Retroanálise é um método eficaz para incorporar fatores importantes que não estão bem representados em amostras de

laboratório, tais como o tecido estrutural do solo, não homogeneidade, a influência das fissuras na resistência ao cisalhamento do solo, e os efeitos dos planos de corte pré-existent no solo.

O procedimento de retroanálise permite ainda o uso de margens mais baixas (menos conservadoras) de critérios para o fator de segurança, pois se trabalha muito próximo da iminência de cisalhamento (MACHAN, 2006). Para os casos onde o solo está saturado, como, por exemplo, durante e ao final da estação chuvosa, a ocorrência de chuvas intensas representa a elevação dos valores de poropressões acima de valores críticos podendo provocar escorregamentos. Durante os períodos de seca, entretanto, os danos causados pelas precipitações relacionam-se aos impactos das gotas sobre o solo que, durante um período chuvoso, poderiam ser absorvido pela vegetação (TONUS, 2009).

É possível ainda aplicar retroanálise para avaliação de deslizamentos em solo e rochas com o propósito de avaliar as forças cisalhantes e os níveis piezométricos, além da análise de medidas de estabilidade. Contudo, para os casos de taludes quase verticais, pode ser necessária a inclusão de tensões de tração, pois a existência desses taludes só se explica pela resistência à tração dos depósitos naturais (USACE, 2003).

Tang et al. (1999) explicam, por fim, que a ruptura do talude fornece apenas um pedaço da informação: o fator de segurança é igual à unidade. Por conseguinte, a resistência ao cisalhamento do solo pode ser variada para se conseguir um fator de segurança igual à unidade. A resistência ao cisalhamento é, geralmente, representada por uma combinação de c' e Φ' , seguindo a equação de Coulomb. Determinar a magnitude apropriada de c' e Φ' é complicado, pois significa também demonstrar a localização da superfície de ruptura. Por exemplo, em encostas de solos homogêneos, existe um Φ' maior do que zero, e a superfície de ruptura, geralmente, passa pelo pé do declive (DUNCAN, 1996 apud TANG et al., 1999). No entanto, o aumento do valor de c' com um valor constante de Φ' irá fazer com que a superfície de ruptura crítica passe a se estender mais profundamente no talude, embora ainda saia

pelo pé do talude.

3 CONTEXTO GEOLÓGICO E GEOTÉCNICO

A MINEROPAR (órgão de serviço geológico do Paraná) realizou um levantamento detalhado das características geotécnicas da região metropolitana de Curitiba, segue na Figura 1 o mapa esquemático.

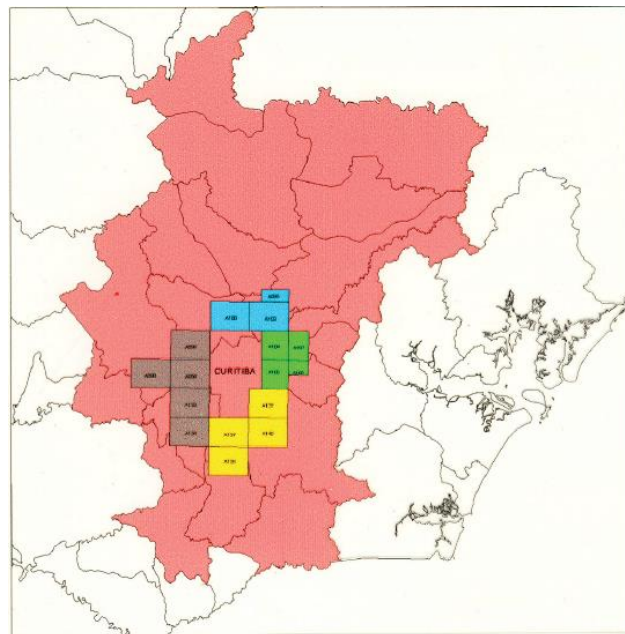


Figura 1. Mapa esquemático da Formação Guabirota
Fonte: MINEROPAR, 2011.

A região do talude está inserida na área IV (área marrom), na qual a MINEROPAR apresenta o perfil típico de alteração desta área. A descrição do perfil está no Quadro 1.

Quadro 1. Perfil típico da área marrom da Formação Guabirota.

Cam.	Descrição	Espessura (m)	Litotipo
1	Solo transportado, cor castanho negro	0,5 a 2,0	Laterítico
2	Solo residual maduro, cor vermelha, homogêneo, argilo mineral principal: caulinita	0,5 a 5,0	Laterítico

3	Solo residual jovem, cor vermelha com manchas de argila, argilo mineral principal: caulinita	0,5 a 5,0	Saprolítico
4	Argilas alteradas, cores variadas, argilo mineral principal: esmectita	1,0 a 5,0	Saprolítico
5	Argilas cinzas esverdeadas, argilo mineral principal: esmectita	1,0 a 50,0	Saprolítico
6	Saprólito gnaisse-migmatito, argilo mineral principal: caulinita	-	Saprolítico

Outros parâmetros geotécnicos importantes da região IV da Formação Guabirota, realizados também pela MINEROPAR, estão no Quadro 2:

Quadro 2. Resultados dos ensaios geotécnicos da região IV da Formação Guabirota.

Material	Média de resultados de LL	Média de resultados de LP	Média de resultados de perm. m/s (K)
Solo residual	63	38	5×10^{-6}
Argila	68,4	39,8	$4,5 \times 10^{-7}$
Arcócio	41,8	29,7	$5,5 \times 10^{-6}$

Outras características geotécnicas, informadas por Kormann (2002), são os valores médios do limite de plasticidade e de liquidez, que são 30% e 73%, respectivamente.

Com relação à expansibilidade, a composição mineralógica das argilas da Formação Guabirota é caracterizada pela ocorrência de esmectita, a qual é um material tipicamente expansivo (KORMANN, 2002).

As argilas alteradas e cinza-esverdeadas da Formação Guabirota são expansivas, retrativas e higroscópicas, atributos que lhes conferem uma alta erodibilidade (MINEROPAR, 2011).

Kormann (2002) realizou, de forma aprofundada, análises de cisalhamento direto e triaxiais do solo da Formação Guabirota, realizados com níveis de tensão inferiores às

pressões de pré-adensamento dos solos. Os resultados de ângulo de atrito de pico efetivo para sedimentos não intemperizados foram entre 22° e 28°, e o intercepto de coesão efetiva variou entre 5 e 47 kPa.

Destaca-se, por fim, a intensidade e frequência de precipitações que interferem de maneira significativa no solo. Chuvas de longa duração caracterizam infiltrações contínuas, responsáveis pela quase saturação do solo e consequente redução de sua resistência ao cisalhamento, resultando em uma superfície com pontos de fraqueza favoráveis à ocorrência de deslizamentos. Precipitações intensas e de curta duração estão frequentemente relacionadas a processos de erosividade e, consequente, transporte de material (SESTREM et al., 2014).

4 TALUDE RODOVIÁRIO EM ESTUDO

4.1 Aspectos Gerais do Talude

O talude em análise está localizado na encosta da rodovia Curitiba PontaGrossa (BR 376), km 4040, situada no município de Curitiba, Paraná (Figura 2 e Figura 3). A geometria do talude é apresentada na Figura 4.



Figura 2. Localização de Curitiba.



Figura 3. Vista aérea do talude.

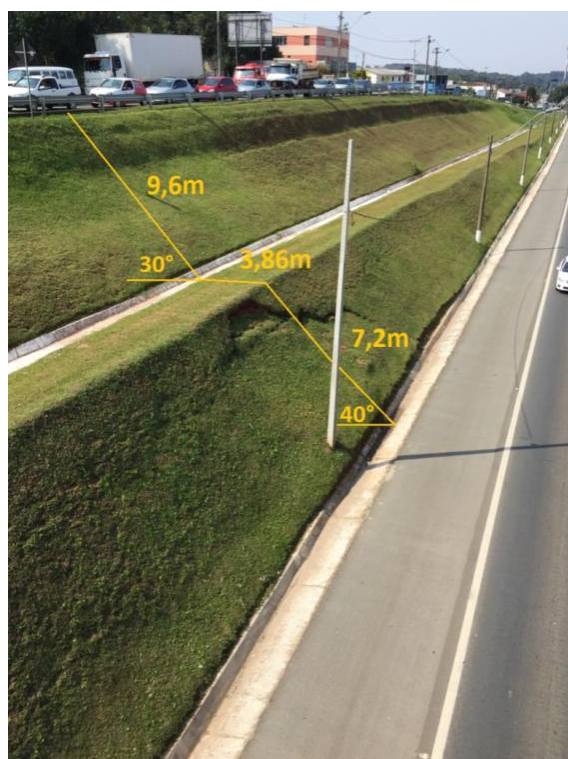


Figura 4. Geometria do talude

4.2 Metodologia

4.2.1 Caracterização do solo, geometria do talude e ensaios de cisalhamento

O solo foi caracterizado com amostras coletadas na região da ruptura. Foram realizados ensaios de granulometria por sedimentação (NBR 7181 – ABNT, 1984), ensaios de limite de liquidez (NBR 6459 – ABNT, 1984), ensaios de limite de plasticidade (NBR 7180 – ABNT, 1984) e ensaio de determinação da densidade real dos grãos (DNER – 093/1994).

Com o auxílio de uma trena a laser (modelo BOSCH GLM 50) coletaram-se as dimensões do corpo do talude.

Para se determinar o ângulo de atrito drenado e o intercepto de coesão utiliza-se o ensaio de cisalhamento direto drenado, baseando-se na

norma internacional D-3080 (ASTM, 1998) para execução dos procedimentos. Realiza-se o ensaio drenado para simular a pior situação possível, onde existe a quase saturação do solo.

4.2.1 Retroanálise do escorregamento

Para realização da retroanálise adota-se o método Spencer (GEO-SLOPE..., 2015) e a ferramenta computacional SLOPE/W da Geostudio, versão 2007.

Primeiramente, insere-se o modelo do talude estudado. Em seguida, inserem-se os dados do solo do talude conforme propriedades obtidas em laboratório. Deve-se, então, indicar no talude onde será o início e o final do cisalhamento, arbitrando-se a cunha de cisalhamento mais provável. Insere-se um valor de iterações necessárias para os cálculos e realizam-se os cálculos.

Para se determinar o fator de segurança necessário para este caso, lança-se mão da norma NBR 11682 (ABNT, 2009) que versa sobre a estabilidade de encostas.

5 RESULTADOS

O intercepto de coesão e o ângulo de atrito interno drenados, obtidos pela envoltória de ruptura de Mohr-Coulomb, são 13,45 kPa e 25,85°, respectivamente (Figura 5). O peso específico natural das amostras é 16,54 kN/m³, corrigido pela umidade natural. O teor de umidade médio das amostras é 43,45%.

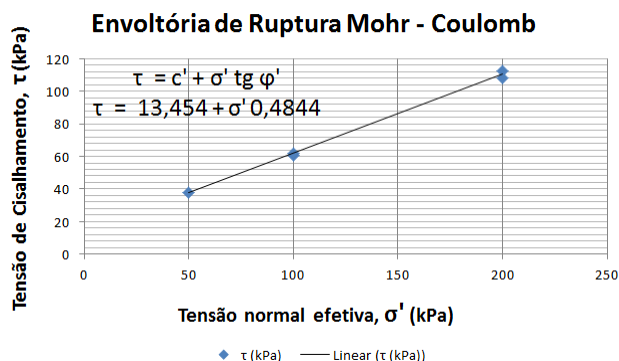


Figura 5. Envoltória Mohr-Coulomb de ruptura.

Na Figura 6 e 7, são apresentadas a retroanálise do talude em estado seco e parcialmente saturado, respectivamente,

obtendo um fator de segurança (FS) através do método Spencer (GEO-SLOPE..., 2015), em simulações geradas pela ferramenta computacional SLOPE-W da Geostudio, versão 2007.

O fator de segurança do talude em estado seco resulta em 2,181 na fatia mais externa. O fator de segurança do talude em estado parcialmente saturado resulta em 1,420 na fatia mais externa.

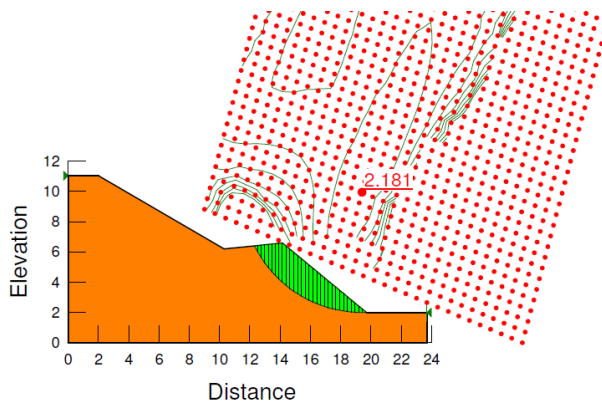


Figura 6. Talude seco analisado pela ferramenta computacional (distância e elevação em metros)

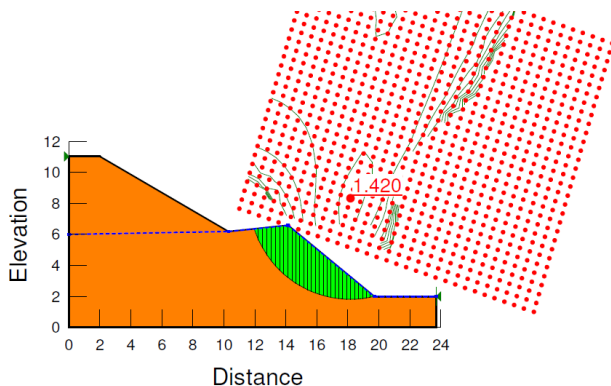


Figura 7. Talude parcialmente saturado analisado pela ferramenta computacional (distância e elevação em metros)

Como o talude apresenta estabilidade, fez-se simulações do talude parcialmente saturado, reduzindo o intercepto de coesão obtido em laboratório de 13,45 kPa até um valor onde o fator de segurança resulte na unidade.

A Figura 8 apresenta a relação do intercepto de coesão do talude parcialmente saturado com o fator de segurança. Para que um fator de segurança igual à unidade fosse atingido, verifica-se que o intercepto de coesão do talude parcialmente saturado deveria ser igual a 8,62 kPa (Figura 9). Utiliza-se, na análise de

equilíbrio limite, o método de Spencer, em iterações geradas pela ferramenta computacional SLOPE-W (Geoslope 2007).

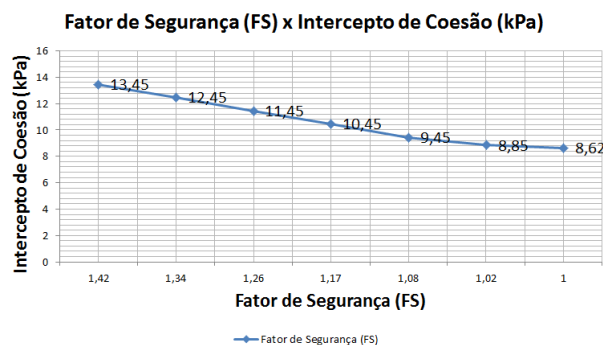


Figura 8. Fator de segurança (FS) x Intercepto de coesão (kPa)

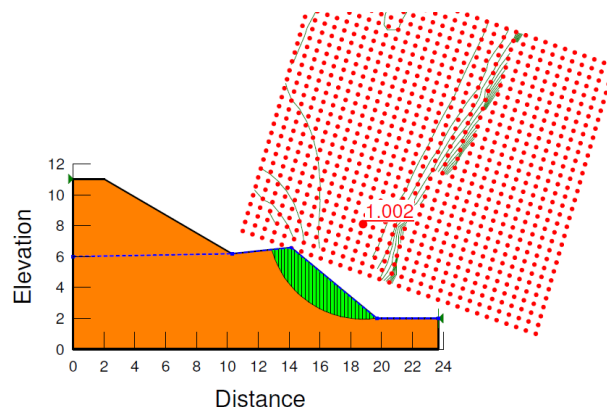


Figura 9. Talude parcialmente saturado com coesão reduzida analisado pela ferramenta computacional (distância e elevação em metros)

O caso estudado encaixa-se em alto risco contra danos a vidas humanas e médio risco contra danos materiais e ambientais, exigindo um fator de segurança igual a 1,5 conforme norma NBR 11682 (ABNT, 2009).

Como o talude apresenta um fator de segurança, para o caso parcialmente saturado, menor que 1,5, adota-se a instalação de drenos profundos de 2,5 metros de comprimento cada, espaçados em 1,5 metros, para assim obter o fator de segurança acima de 1,5 desejado. A análise de estabilidade do talude em estado parcialmente saturado e com o intercepto de coesão igual a 13,45 (valor obtido em laboratório), aplicados os drenos profundos, resulta em um fator de segurança (FS) igual a 1,62 (Figura 10). Utiliza-se, para a análise de equilíbrio limite, o método de Spencer, em iterações geradas pela ferramenta

computacional SLOPE-W (Geoslope 2007).

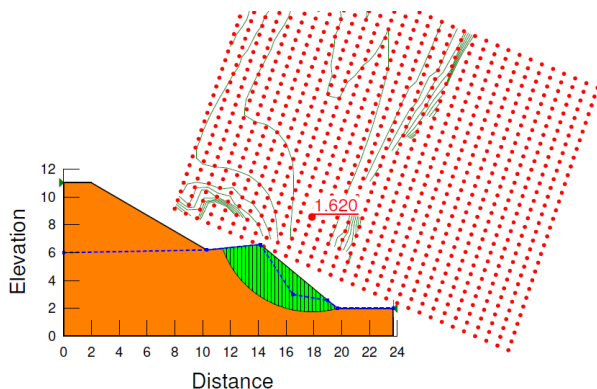


Figura 10. Talude parcialmente saturado com dreno analisado pela ferramenta computacional (distância e elevação em metros)

Também se recomenda recompor o ponto de rompimento de talude, inclusive sua vegetação gramínea.

As superfícies do talude seco e parcialmente saturado apresentam um fator de segurança acima da unidade, ou seja, numa situação de equilíbrio. Com este resultado, não é necessário a aplicação de uma contenção para equilibrar o talude.

6 CONCLUSÕES

O talude encontra-se estável no ponto de ruptura existente, pois seu fator de segurança com o talude seco é igual a 2,18, e com o talude parcialmente saturado é igual a 1,42. Visto que o talude encontra-se rompido, levanta-se a questão de saber quais foram as alterações que se deram entre a estabilidade e o escorregamento do talude, já que o talude não poderia ter deslizado possuindo forças estabilizadoras maiores que forças instabilizadoras.

Possíveis causas do rompimento do talude foram levantadas. A primeira hipótese seria uma ruptura devido a uma infiltração localizada no patamar justamente acima, devido às falhas na drenagem fluvial do patamar, ocasionando um fluxo de água que conseqüentemente removeu uma parcela significativa de finos do solo com o tempo. Dentro desta hipótese, o intercepto de coesão do solo poderia ter diminuído para 8,62 Kpa (Figura 23), chegando

assim no fator de segurança unitário. Acredita-se que esta hipótese seja a mais provável.

Outra hipótese plausível seria uma lente no local da ruptura, abaixo do ponto de coleta de solo, com parâmetros de resistência inferiores aos obtidos em laboratório.

Como o talude apresenta um fator de segurança, para o caso parcialmente saturado, menor que 1,5 (valor recomendado pela norma NBR 11682 (ABNT, 2002), adotou-se a instalação de drenos profundos de 2,5 metros de comprimento cada, espaçados em 1,5 metros, para assim obter o fator de segurança acima de 1,5 desejado. Também se recomenda recompor a massa de solo e a vegetação do ponto de rompimento do talude.

Como as superfícies do talude seco e parcialmente saturado apresentam um fator de segurança acima da unidade, ou seja, numa situação de equilíbrio, não é necessário a aplicação de uma contenção para equilibrar o talude.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CCR Rodo Norte, concessionária responsável pela rodovia Curitiba-Ponta Grossa, por concederem acesso ao talude para a coleta das amostras.

REFERÊNCIAS

- American Society for Testing and Materials. *D 3080: Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions*. West Conshohocken, Estados Unidos, 1998.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 6459: Solo – Determinação do Limite de Liquidez: método de ensaio*. Rio de Janeiro, 1984.
- _____. *NBR 7180: Solo – Determinação do Limite de Plasticidade: método de ensaio*. Rio de Janeiro, 1984.
- _____. *NBR 7181: Solo - Análise Granulométrica: método de ensaio*. Rio de Janeiro, 1984.
- _____. *NBR 11682: Estabilidade de taludes*. Rio de Janeiro, 2009.
- Bianchini, Mara R. *Estudo da Instabilidade de um Talude Rodoviário em São Jerônimo/RS*. 2000. 108 f. Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-Graduação de Engenharia Civil) – Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2000.

- Confederação Nacional do Transporte. *Pesquisa CNT de rodovias* 2015. Disponível em: <http://pesquisarodoviascms.cnt.org.br/Relatorio%20Geral/PESQUISA_CNT2015_BAIXA.pdf>. Acesso em: 22 set. 2015.
- Craig, Robert F. *Mecânica dos solos*. 365 p. Rio de Janeiro: LTC, 7. ed., 2007.
- Duncan, J. M.; Stark, T. D. 1992. *Soil strengths from back analysis of slope failures: proc. of specialty conf. stability and performance of slopes and embankments*. Vol. 1, pp. 890-904. Berkeley, CA.
- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. *Solos – Determinação da densidade real: método de ensaio*. DNER 093. Brasília, 1994.
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. *Evolução do perfil da rede rodoviária federal pavimentada*. Disponível em: <<http://www.dnit.gov.br/download/planejamento-e-pesquisa/planejamento/evolucao-da-malha-rodoviaria/evolucao-da-condicao-da-malha-ate-2011-por-uf-2001-a-2014-sf.pdf>>. Acesso em: 17 set. 2015.
- Geo-slope International Ltda. *GUIA DE USUÁRIO SLOPE/W*. Disponível em: <<https://geotechinternship.files.wordpress.com/2015/06/documentation.pdf>>. Acesso em: 12 jan. 2016.
- Gomes, Cláudio. L. R. *Retroanálise em Estabilidade de Taludes em Solo: Metodologia para Obtenção dos Parâmetros de Resistência ao Cisalhamento*. 2003. 167 f. Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-Graduação de Engenharia Civil) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.
- Kormann, Alessander C. M. *Comportamento Geomecânico da Formação Guabirotuba: estudos de campo e laboratório*. 2002. 448 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Solos) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.
- Machan, G. Landslide mitigation. 2006. *Engineering Geology and Geotechnical Engineering Symposium*. Logan, UT. <<http://geotechpedia.com/Publication/Show/550/LANDSLIDE-MITIGATION>>, acessado em 18/01/2016.
- Mineropar. *Características geológico-geotécnicas na formação Guabirotuba: Erosão – movimentos gravitacionais de massa*. Curitiba: Serviço Geológico do Paraná – Mineropar, 2011.
- Road Traffic Technology. *The world's biggest road networks*. Londres, jan. 2014. <<http://www.roadtraffic-technology.com/features/featurethe-worlds-biggest-road-networks-4159235>>, acessado em 15/09/2015.
- Sestrem, Liamara P.; Dyminski, Andrea S.; Kormann, Alessander C. M.; Santos, Cleverson J. A. dos. *Retroanálise de estabilidade de talude rodoviário em uma encosta litorânea em Santa Catarina*, 2012. COBRAMSEG 2012, Porto de Galinhas, PE. <<http://www.cobramseg2014.com.br/anais/2012/arquivos/2012.175.pdf>>, acessado em 20/02/2016.
- Tang, Wilson H.; Stark, Timothy D.; Angulo, Mauricio. *Reliability in back analysis of slope failures*. Soils and Foundations, Tokyo, v. 39, n. 5, p. 73-80, out. 1999.
- <https://www.jstage.jst.go.jp/article/sandf1995/39/5/39_5_73/_article>, acessado em 28/08/2015.
- Tonus, Bianca P. A. *Estabilidade e Taludes: avaliação dos métodos de equilíbrio limite aplicados a uma encosta coluvionar e residual da serra do mar paranaense*. 2009. 147 f. Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-Graduação de Engenharia Civil) – Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2009.
- Usace – US Army Corp of Engineers. (2003). *Slope stability*. Engineer Manual. Department of the Army. Washington, DC. <http://www.publications.usace.army.mil/Portals/76/Publications/EngineerManuals/EM_1110-2-1902.pdf>, acessado em 19/01/2016.