XII Simpósio de Práticas de Engenharia Geotécnica da Região Sul
GEOSUL 2019 – 17 a 19 de Outubro, Joinville, Santa Catarina, Brasil
©ABMS, 2019

Aplicação de uma Metodologia de Retroanálise em um Talude em São José dos Pinhais

André Luis Meier
UFPR, Curitiba, Brasil, de.luis.meier@gmail.com

Larissa Krüger Tabalipa
UDESC, Jaraguá do Sul, Brasil, eng.larissakt@gmail.com

Vitor Pereira Faro
UFPR, Curitiba, Brasil, vitorpereirafaro@gmail.com

RESUMO: A retroanálise é a análise da estabilidade de um talude que sofreu ruptura com o intuito de se determinar os parâmetros de resistência ao cisalhamento (coesão e ângulo de atrito) dos materiais que o compõem para as condições de carregamento e características geométricas que provocaram a movimentação de massa. Este trabalho tem por objetivo aplicar a metodologia de retroanálise proposta por Gomes (2003) em um estudo de caso real de ruptura de talude, localizado no município de São José dos Pinhais/PR, para determinação dos parâmetros médios de resistência do solo local e compará-los com resultados de ensaios de cisalhamento direto. O talude apresenta inclinação da ordem de 2:3 (V:H), sendo composto por aterro sobre solo residual. Com os resultados se notou que a metodologia de Gomes (2003) obteve um bom desempenho, indicando parâmetros de resistência semelhantes aos advindos dos ensaios laboratoriais.

PALAVRAS-CHAVE: Retroanálise, Estabilidade de Taludes, Parâmetros de Resistência ao Cisalhamento.

1 INTRODUÇÃO

Guidicini e Nieble (1984) afirmam que a retroanálise é um método bastante rápido e de baixo custo para se obterem os dados de resistência ao cisalhamento em locais que já sofreram colapso.

Conforme Augusto Filho e Virgilli (1998), para a utilização da retroanálise são consideradas, nos métodos determinísticos, as condições geométricas, geotécnicas e hidrológicas do talude no momento da ruptura.

Contudo, Gomes (2003) traz o fato de que a determinação dos parâmetros de resistência é muito influenciada pela escolha do profissional responsável pelo projeto de estabilização do maciço. Assim, existe a necessidade de informações precisas sobre as características do terreno e a utilização de uma metodologia de retroanálise capaz de determinar os parâmetros de resistência mais representativos da ruptura ocorrida.

Portanto, este trabalho se propõe a aplicar o método de retroanálise de Gomes (2003) em um caso real de escorregamento circular em um talude localizado no município de São José dos Pinhais/PR. O objetivo desta pesquisa é determinar os parâmetros médios de resistência do solo local através da metodologia e fazer uma comparação com ensaios de cisalhamento direto.

2 METODOLOGIA

A metodologia de retroanálise utilizada se baseia em métodos determinísticos e traz uma resposta analítica. O primeiro passo do procedimento é a determinação das características citadas por

©ABMS, 2019

Augusto Filho e Virgilli (1998), obtidas através do levantamento topográfico da área de estudo, de visitas à campo, da campanha de investigação geotécnica e, se disponíveis, de dados pluviométricos do local.

A etapa subsequente da metodologia é a escolha do método de análise de estabilidade a ser utilizado. Nesta pesquisa foi escolhido o de Bishop Simplificado, em virtude a sua boa precisão e relativa simplicidade de aplicação. A formulação do método foi alterada para determinação da coesão em função do fator de segurança e do ângulo de atrito, como expresso nas Equações 1 e 2:

$$c' = \frac{FS \cdot \sum W \cdot \sin(\alpha) - \sum\left[(W-U) \cdot \tan(\varphi') \cdot \frac{1}{m_\alpha}\right]}{\sum b \cdot \frac{1}{m_\alpha}} \quad (1)$$

$$m_\alpha = \cos(\alpha) \cdot \left[1 + \frac{\tan(\varphi') \cdot \tan(\alpha)}{FS}\right] \quad (2)$$

nas quais FS é o fator de segurança; W o peso próprio do solo; α o ângulo entre a base da fatia e a horizontal; U o peso da água; φ' o ângulo de atrito interno efetivo; c'a coesão real efetiva.

O processo de cálculo se inicia com a divisão da região de ruptura em fatias, tendo sido adotadas 25 no caso do presente estudo, e obtenção dos parâmetros geométricos, de peso específico e de saturação para cada lamela. De posse destes dados, é fixado o valor de FS em um, caracterizando a ruptura, e variado o ângulo de atrito. Para cada valor estipulado é calculada a coesão correspondente, gerando uma curva c = f(φ). O intervalo analisado vai de φ'=0 até um valor de ângulo de atrito que cause uma coesão quase nula, mas ainda acima de zero, devido à hipótese de ruptura circular.

Na sequência são realizadas análises de estabilidade para cada par de parâmetros da curva c = f(φ), buscando determinar o fator de segurança crítico correspondente. Neste passo é utilizado um software para o cálculo do FS, sendo escolhido nesta pesquisa o Slide 6.0, da empresa Rocscience, por meio da licença gratuita para teste. O critério de ruptura adotado foi o de Mohr-Coulomb e os solos foram considerados secos acima do NA, portanto, sem contribuição de resistência devido à sucção.

Com os resultados das análises de estabilidade é elaborada a curva FS crítico, cujo pico se aproxima do valor unitário. O par de parâmetros correspondentes a esse ponto é considerado aquele que ocasiona uma superfície de ruptura crítica mais próxima à real e, portanto, o que melhor representa as condições do talude no momento da ruptura. Além disso, Gomes (2003) afirma que quanto mais próximo o pico for do valor unitário, mais preciso foi o levantamento de dados das condições do talude.

3 RESULTADOS

A região de estudo se localiza no município de São José dos Pinhais/PR. O talude foi executado para implantação de uma via, possuindo altura máxima de 19 metros, com inclinações da ordem de 2:3 (V:H). Na porção central do talude há uma canaleta para drenagem superficial e na sua crista está a via.

Foi observado um escorregamento rotacional a meia encosta do talude de aterro, cuja crista parte da cota na qual havia uma canaleta de drenagem, conforme indicado na Figura 1.

As hipóteses para a ruptura foram a execução do aterro com resistência e inclinação inadequados e a infiltração nas canaletas existentes, em razão da obstrução pela vegetação, falta de declividade ou má junção das meia-canas pré-moldadas, que contribuíram para saturação do maciço e consequente redução da resistência ao cisalhamento do solo (SUOLI, 2016).

A área em estudo está inserida no Complexo Gnáissico Migmatítico (Aplmgm), formado por Migmatitos oftálmicos, com paleosoma de biotita gnaisse, biotita-hornblenda gnaisse e hornblenda gnaisse, localmente com quartzitos. A Figura 2 apresenta a geologia regional do entorno, com destaque para a área do talude estudado (SUOLI, 2016).

©ABMS, 2019

Figura 1. Escorregamento rotacional no talude em estudo (SUOLI, 2016).

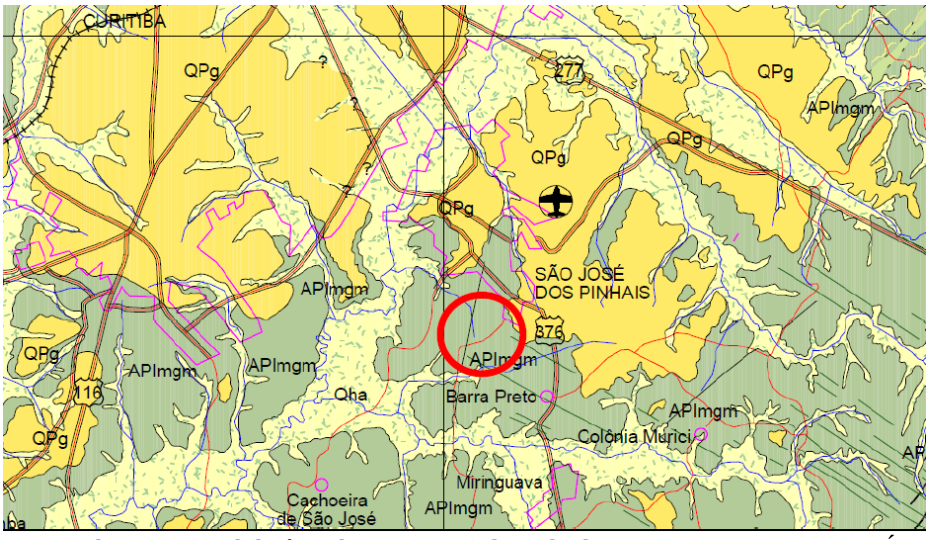

Figura 2. Geologia regional da área de interesse (adaptado de GOVERNO DO PARANÁ, 2005).

Para obtenção das características geométricas do talude e localizar os pontos de investigação geotécnica, foi realizado o levantamento planialtimétrico da região em dezembro de 2015, apresentado na Figura 3. Neste levantamento estão indicadas as curvas de nível, as seções de estudo, as canaletas de drenagem, as construções e a locação dos furos de sondagem (SP), dos poços de inspeção do pavimento (PI) e da coleta das amostras indeformadas (AMI).

Com intuito de se obter os parâmetros geotécnicos do talude, foram disponibilizados para consulta 05 (cinco) laudos de sondagem à percussão (SPT) e 03 (três) ensaios de cisalhamento direto.

De acordo com Suoli (2016), o ensaio de cisalhamento realizado nas amostras indeformadas foi na condição alagada e pré-adensada, com velocidade de carregamento de 0,70 mm/min, para tensões normais de 50, 100 e 150 kPa. A cota e profundidade de cada amostra, bem como suas características iniciais e resultados podem ser observadas na Tabela 1.

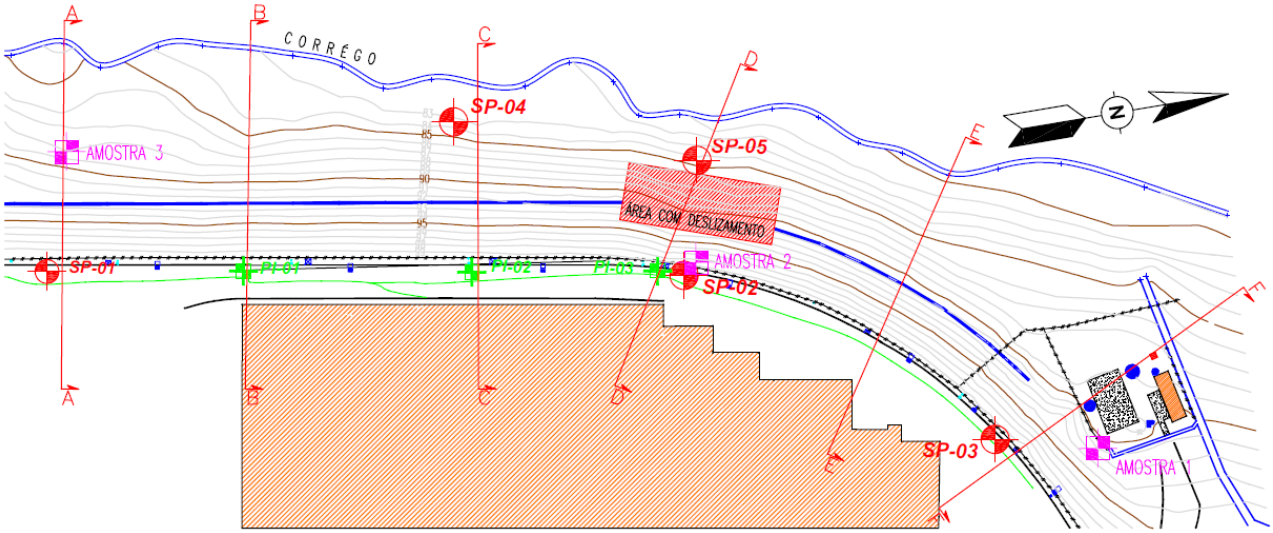

Figura 3. Levantamento planialtimétrico do local de estudo (adaptado de SUOLI, 2016).

Tabela 1. Resultados dos ensaios de cisalhamento direto

Furo	Cota (m)	Profundidade (m)	Densidade real de grãos (g/cm3)	Umidade natural (%)	Coesão (kN/m2)	Ângulo de atrito (º)
AMI-01	90,849	1,00 a 1,25	2,636	29,8	20	30
AMI-02	98,421	0,60 a 0,85	2,645	31,1	0	33
AMI-03	87,752	1,00 a 1,25	2,564	35,6	10	30

A partir das vistorias, investigação geotécnica, topografia e geologia, Suoli (2016) estimou um modelo geológico-geotécnico representativo da região. O modelo se inicia com uma camada de revestimento, composta pelo pavimento e base. Em seguida contempla uma camada superior classificada como aterro superficial, tendo sido encontrados detritos, além de pedregulhos esparsos, sem compactação controlada. Abaixo desta ocorre uma camada de silte com N_{SPT} inferior a 10 golpes, com resistência crescente com a profundidade, caracterizando solo residual. Na porção mais inferior há o substrato mais resistente, classificado como silte residual com N_{SPT} superior a 10 golpes. Nas sondagens realizadas no pé do talude foi identificada uma camada superficial pouco resistente, com N_{SPT} inferior a 2 golpes, que foi classificada como argila. O nível d'água (NA) não foi identificado nas sondagens próximas à crista, entretanto, nas sondagens de pé o NA se encontrou a 3,60 metros de profundidade.

A seção D, objeto deste estudo, teve o perfil anterior à ruptura apresentado na Figura 4, no qual se nota a cicatriz do escorregamento em vermelho, a provável superfície de ruptura em rosa e a cota do NA superior à encontrada nas sondagens após a ruptura, em razão da saturação do maciço devido à infiltração nas canaletas. A posição da superfície de ruptura foi estimada em função da cicatriz observada nas vistorias e da interface entre o aterro e a argila no pé do talude. Ela apresenta seu centro nas coordenadas (15,3; 109,1) e raio de 28,9 metros.

Os parâmetros geotécnicos de cada camada também são mostrados na Figura 4, cujos valores foram adaptados dos propostos por Suoli (2016), que tiveram como base as sondagens SPT e a experiência do projetista em materiais semelhantes. Os parâmetros de coesão e ângulo de atrito para o aterro não foram apresentados, pois o objetivo da retroanálise é a sua determinação, já que a ruptura observada ocorreu nesta camada.

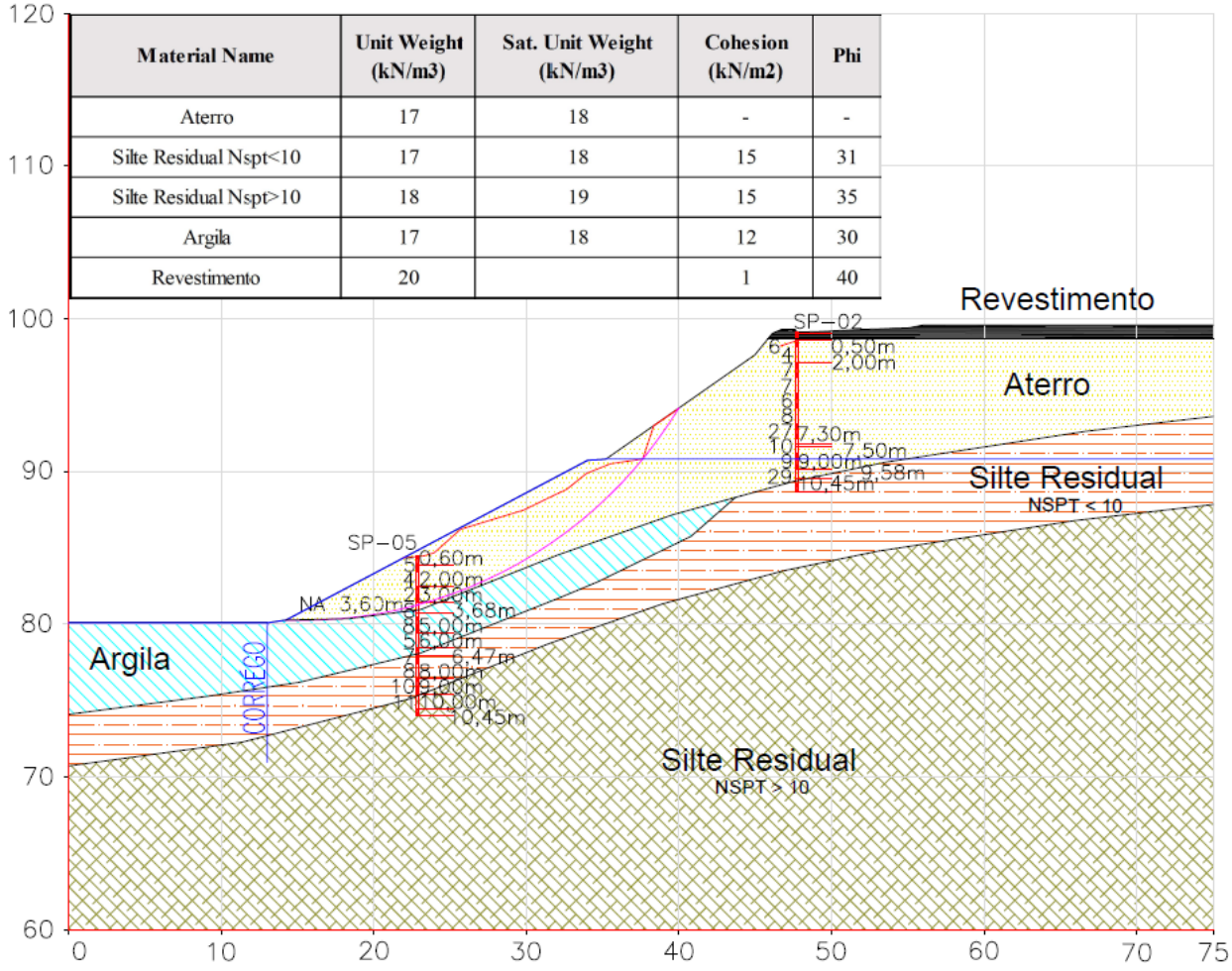

Figura 4. Modelo geológico-geotécnico da Seção D (adaptado de SUOLI, 2016).

Ao se analisar a região de ruptura através da Equação 1, foi obtido o intervalo de ângulo de atrito com valores entre 0° e 50°. Devido à elevada quantidade de possibilidades, foram calculados os valores de coesão a cada 5º, com um refino de 1º na região central, onde está o provável valor crítico, em virtude das características do material e inclinação do talude. Com a obtenção de todos os pares de parâmetros, foi elaborada a curva c = f(φ), apresentada na Figura 5.

Foi então calculada a estabilidade do talude na condição anterior à ruptura, para cada par de parâmetros da curva c = f(φ), através do software Slide 6.0. Obteu-se um fator de segurança crítico correspondente, sendo gerada a curva FS crítico (Figura 6).

A curva FS crítico teve um pico no valor de 0,991, para o qual a ruptura teve centro nas coordenadas (17,0; 104,5) e raio de 24,1 metros, geometricamente semelhante à posição da provável superfície de ruptura, conforme apresentado na Figura 7.

Portanto, de acordo com a metodologia proposta, pode-se concluir que o par de parâmetros que melhor representa as condições do talude no instante da ruptura corresponde aos valores de c'=9,51 kN/m² e φ'=31,0°.

©ABMS, 2019

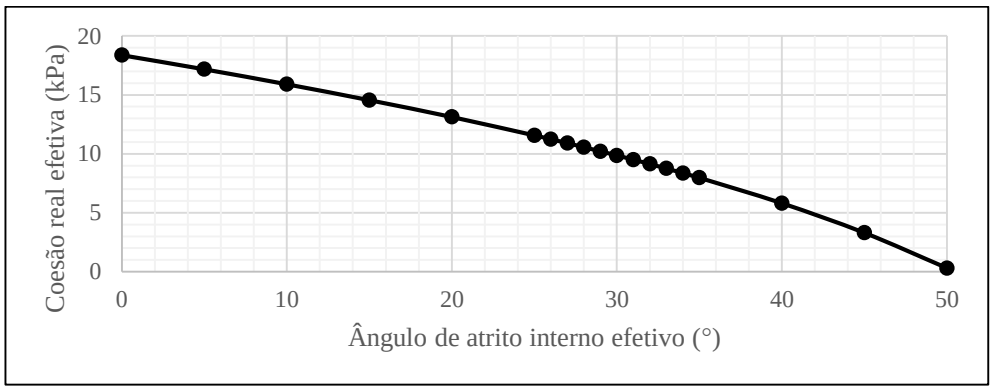

Figura 5. Curva c = f(φ).

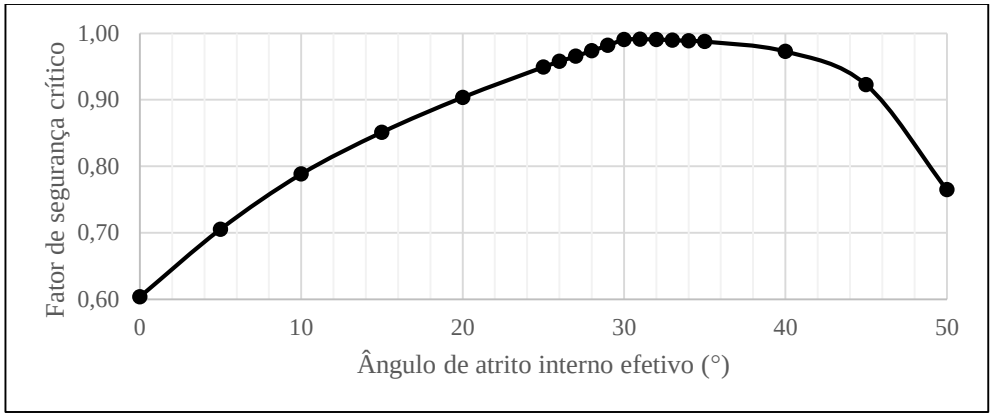

Figura 6. Curva FS crítico.

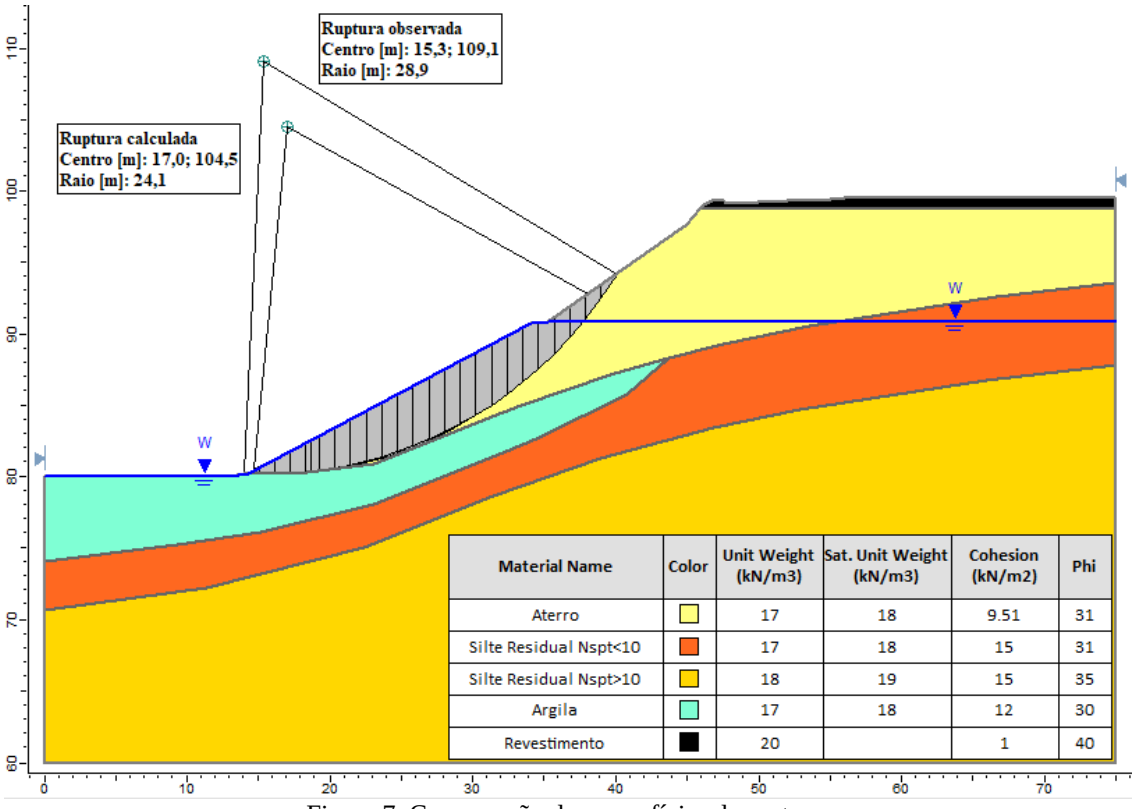

Figura 7. Comparação das superfícies de ruptura.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos através da metodologia de retroanálise tiveram comportamento próximo aos encontrados por Gomes (2003), sendo notadas apenas pequenas diferenças, discutidas a seguir.

As curvas c = f(φ) e FS crítico foram semelhantes às do autor, contudo esta última apresentou um comportamento mais retilíneo na região próxima ao pico. Uma hipótese para este fato é a influência da camada de argila na posição da superfície de ruptura, que pode ser maior que a pequena alteração dos valores de coesão e ângulo de atrito naquele intervalo.

A superfície de ruptura calculada e a provável superfície de ruptura do talude possuem uma diferença entre os centros de 4,9 metros e entre os raios dos círculos de ruptura de 4,8 metros. Apesar dessa divergência as superfícies estão quase sobrepostas, em virtude da compensação entre essas diferenças na região de interesse.

Uma pequena diferença também ocorre no valor fator de segurança crítico, cujo pico foi de 0,991, inferior ao máximo teórico de 1,00. Essa pequena discrepância pode ter sido causada por imperfeições no levantamento da geometria do talude, na estimativa da posição da superfície de ruptura e do nível do lençol freático ou por aproximações introduzidas pelo método de cálculo. Em virtude do elevado número de hipóteses são indicados levantamentos mais precisos das condições do talude anterior à ruptura, através de medições dos índices pluviométricos e coleta de informações sobre as características do movimento de massa.

Os parâmetros de resistência obtidos através da retroanálise foram de c'=9,51 kN/m² e φ'=31,0°, muito semelhantes aos resultados dos ensaios de cisalhamento direto apresentados na Tabela 1. Nota-se, contudo, uma diferença na comparação com o valor da AMI-02 (c'=0 kPa e φ'=33,0°) para o qual era esperada a maior proximidade com a metodologia, em razão da sua localização na seção de estudo. A provável causa dessa disparidade se deve ao fato da retroanálise englobar as condições do maciço em sua totalidade, enquanto que no ensaio de cisalhamento direto o plano de ruptura é imposto como horizontal.

Portanto, a metodologia de retroanálise proposta por Gomes (2003) demonstrou um desempenho satisfatório e apontou resultados compatíveis com os obtidos através de ensaios de cisalhamento direto, indicando sua validade.

A utilização desta metodologia, todavia, necessita de um levantamento de informações muito preciso sobre as condições do talude no instante da ruptura, algo que não é possível em alguns casos. Assim, a experiência do projetista e a investigação geotécnica são fundamentais na elaboração do modelo geológico-geotécnico que embasa toda a técnica e dá confiabilidade aos resultados obtidos.

Por fim, a aplicação desta metodologia não substitui a execução de ensaios de resistência ao cisalhamento, em razão da quantidade de variáveis que podem influenciar nos valores obtidos através da retroanálise. Contudo, quando bem aplicada, pode garantir ao projetista maior segurança na utilização dos parâmetros de resistência advindos de outros ensaios, devido à comparação de valores.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Os autores também agradecem o Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil (PPGECC) da Universidade Federal do Paraná (UFPR) pelo auxílio na elaboração deste estudo.

REFERÊNCIAS

Augusto Filho, O.; Virgilli, J. C. (1998) Estabilidade de Taludes. In: Oliveira, A. S.; Brito, S. N. A. (Eds). *Geologia de Engenharia*. Associação Brasileira de Geologia de Engenharia (ABGE), São Paulo, cap. 15, p. 243-269.

Gomes, C. L. R. (2003) *Retroanálise em Estabilidade de Taludes em Solo: Metodologia para Obtenção de Parâmetros de Resistência ao Cisalhamento*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, 146 p.

Governo do Paraná (2005) Folha de Curitiba. Escala: 1:250.000.

Guidicini, G.; Nieble, C. M. (1984) *Estabilidade de Taludes Naturais e de Escavação*, 2nd ed., Edgar Blücher, São Paulo, 216 p.

Suoli - Engenharia Geotécnica (2016) *Projeto de Estabilização de Talude e Recuperação de Pavimento*, Florianópolis. Relatório Técnico. 119 p.