



Determinação de Potencial de Ruptura de Taludes na Cidade de Cascavel/PR

Bruna Anible Sost

Centro Universitário Assis Gurgacz, Cascavel, Brasil, brunaa_anible@hotmail.com

Maycon André de Almeida

Centro Universitário Assis Gurgacz, Cascavel, Brasil, mayconalmeida@creapr.org.br

RESUMO: Com o crescimento populacional no município de Cascavel-PR e a crescente expansão territorial, é comum que ocorram ocupações de áreas com maiores declives e propensas a deslizamentos de maciços de solos. Por isso fez-se necessário um estudo para a determinação do potencial de ruptura de taludes no município. Foram realizados ensaios triaxiais do tipo adensado não-drenado em amostras indeformadas de dois taludes, obtendo-se suas envoltórias de resistência. Os dados obtidos passaram por modelagem numérica no software Geoslope, através dos métodos Bishop, Fellenius, Janbu, Morgenstern e Corps of Engineers, a fim de avaliar a diferença entre eles. Obteve-se então os fatores de segurança para cada talude, e verificou-se que o método de Corps of Engineers indicou fatores de segurança inferiores ao mínimo de 1,50 recomendado pela ABNT NBR 11682 (2009). Já o software Geoslope mostrou-se uma ferramenta interessante e uma boa aliada na análise de estabilidade de taludes.

PALAVRAS-CHAVE: Estabilidade de taludes, Ensaio triaxiais, Modelagem numérica.

1 INTRODUÇÃO

Caputo (1988) afirma que de um ponto de vista teórico, um talude se apresenta como uma massa de solo submetida a três campos de forças: ao peso, ao escoamento de água e à resistência ao cisalhamento.

As forças de cisalhamento são capazes de induzir o movimento do talude, quando a ação da tensão de cisalhamento mobilizante atua sobre a superfície de ruptura, e as tensões resistentes se opõem ao movimento deste volume, por meio da resistência de cisalhamento do próprio material. Quando a tensão de cisalhamento mobilizante se iguala a força resistente, ocorre um movimento do volume de massa, gerando um deslizamento.

Em épocas de chuva, o maior número de acidentes provenientes do deslizamento de

taludes ocorre em áreas de ocupação irregular, onde a população não respeita o plano diretor de crescimento do município, construindo e utilizando áreas sobre taludes instáveis ou próximo a eles.

Devido a problemática gerada pela presença de taludes próximos ao perímetro urbano, com possibilidade de ocupação, o presente trabalho teve como objetivo analisar a estabilidade de 2 taludes do município, através de modelos numéricos realizados no software Geoslope® 2018 R2. Para tanto, foram utilizados parâmetros de resistência determinados através de ensaios triaxiais conduzidos em amostras indeformadas coletadas nos locais a serem analisados.



2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Resistência ao Cisalhamento

Pinto (2006) afirma que a resistência ao cisalhamento de um solo define-se como a máxima tensão de cisalhamento que o solo pode suportar sem sofrer ruptura, analisando os fenômenos de atrito e coesão. Cavalcante (2006) descreve que a ruptura por cisalhamento ocorre quando as tensões entre as partículas são tais que deslizam ou rolam umas sobre as outras. Portanto, pode-se dizer que a resistência ao cisalhamento depende da interação entre as partículas, e esta interação pode ser dividida em duas categorias de resistência: por atrito e por resistência coesiva.

A resistência por atrito entre partículas pode ser demonstrada por analogia como um problema de deslizamento de um corpo sobre uma superfície plana horizontal. No caso das argilas, o número de partículas é muito maior, e a parcela de força transmitida em cada contato é extremamente reduzida. Como as partículas de argilas são envolvidas por moléculas de água quimicamente adsorvida a elas, as forças de contato não são suficientes para remover essas moléculas de água, e são elas as responsáveis pela transmissão de forças (PINTO, 2006).

A parcela de coesão em solos sedimentares é muito pequena perante a resistência devido ao atrito entre os grãos. Entretanto, existem solos naturalmente cimentados por agentes diversos, como os solos evoluídos pedologicamente, que apresentam parcelas de coesão real de significativo valor (PINTO, 2006).

O círculo de Mohr, apresentado na Figura 1, pode ser facilmente traçado quando são conhecidas as tensões verticais e horizontais num terreno com superfície horizontal, ou em dois planos quaisquer, desde que as tensões normais dos dois planos não sejam iguais (PINTO, 2006).

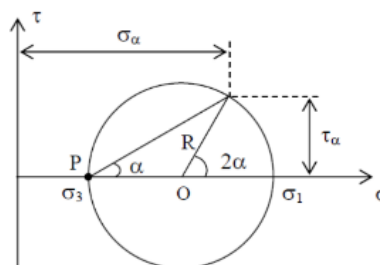


Figura 01. Determinação das tensões num plano genérico por meio do círculo de Mohr.

2.2 Ensaio de compressão triaxial

Das (2007) afirma que o ensaio de compressão triaxial é um dos mais confiáveis métodos disponíveis para a determinação de resistência ao cisalhamento. A amostra é submetida a uma pressão de confinamento por compressão do fluido na câmara, e então se aplica uma tensão axial por meio de uma haste de carregamento vertical. O procedimento do ensaio é normatizado pela ASTM D 4675 (1995).

Simons e Menzies (1981) explicam que o corpo de prova é envolvido por uma membrana de borracha montada sobre uma pedra porosa, a qual se apoia no pedestal da base da célula. O par de pedras porosas é colocado entre a amostra, dessa forma durante o carregamento a água é liberada, ocorrendo assim a variação de volume. A amostra fica isolada pela membrana enquanto é aplicada uma pressão confinante. Os dutos de contrapressão e pressão neutra são interligados com a base da célula conforme mostrado na Figura 2, permitindo assim que a água dos vazios da amostra se comunique por meio das pedras porosas. A contrapressão garante a saturação do corpo de prova, de forma que se estinguem as bolhas de água, como também qualquer variação de pressão neutra.

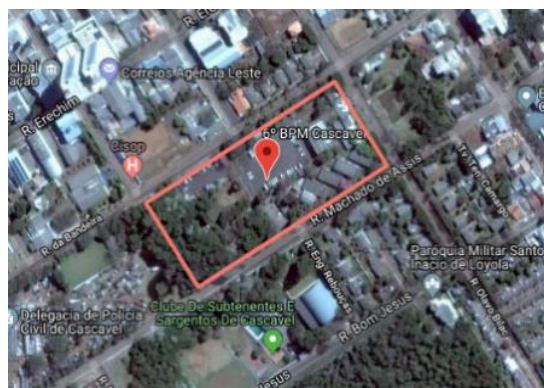


Figura 3. Localização talude A

Dentro do 6º BPM, o talude encontra-se no estande de tiro, onde será realizada uma reforma que contemplará uma contenção para o talude escolhido.

Durante visita ao local, observou-se a existência de árvores em quase toda a extensão do talude e baixa proteção com grama, como é possível verificar na Figura 4, além de um solo pouco compacto. Com auxílio do levantamento topográfico foi possível determinar sua angulação de 43° , apresentando uma altura de 2.63 metros.



Figura 4. Foto do local e inclinação

Já o talude B está localizado em uma obra na Rua Recife com a Rua Carlos de Carvalho, Centro, Lote 017A, Quadra 313A, Loteamento Centro, onde se encontra um edifício em execução, como pode ser visto na Figura 5.

O talude A, conforme apresenta a Figura 3, faz parte do 6º Batalhão da Polícia Militar de Cascavel, localizado na Rua da Bandeira com Rua Olavo Bilac, Centro, Lote 0001, Quadra 001, Loteamento Curitiba.



Figura 5. Localização do talude B

O talude se localiza nas laterais da construção de um edifício com 12 pavimentos, estando a obra em fase de fundação. Para a execução da obra foi necessária uma contenção temporária, que garantisse maior sustentação do talude, o qual anteriormente era usado como descarte de entulho e resíduos da construção civil. Possuindo um solo pouco compacto, a área é frequentada por operários que trabalham na obra.

Foi possível verificar uma grande variação de desnível no terreno, e através de medição com trena foi possível adquirir a geometria do talude, conforme demonstra na Figura 6, com uma angulação de 51° e uma altura 7 metros, sendo assim o talude B foi a pior situação analisada.



Figura 6. Foto do local e inclinação

3.2 Coleta de amostras

A fim de realizar ensaios triaxiais em laboratório e prever adequadamente os esforços atuantes nos taludes, foram coletadas amostras

indeformadas utilizando amostradores metálicos com diâmetro 5 cm e 10 cm de altura, conforme apresenta a Figura 7. As amostras indeformadas foram extraídas com o mínimo de alteração, mantendo ao máximo as condições de umidade e consistência, ou seja, mantendo sua estrutura original.



Figura 7. Moldes utilizados e coleta de material

Inicialmente, com o talude analisado e identificado o local da coleta, foi necessário um corte de 10 cm na superfície do local para a extração do solo superficial, deixando a superfície plana e consistente. Logo após foi posicionado o cilindro metálico com a face biselada em contato com o solo, facilitando a cravação.

Após a cravação total do molde, realizou-se a escavação em torno do molde para sua remoção. Com espátula, retirou-se o molde e em seguida as amostras foram levadas até o laboratório de mecânica dos solos do Centro Universitário Assis Gurgacz (FAG). As amostras foram removidas cuidadosamente dos moldes com o auxílio de extrator de amostras, a fim de não permitir deformações, garantindo assim parâmetros de resistência precisos e corretos.

Após a extração, as amostras foram armazenadas a fim de manter suas condições naturais, sendo envolvidas por papel filme, sem exposição ao sol. Foi também necessário cuidado durante o manuseio para que não sofressem nenhum tipo de alteração.

3.3 Execução de ensaios triaxiais



Os ensaios foram realizados no laboratório de Mecânica dos Solos II do Centro Universitário Assis Gurgacz na cidade Cascavel-PR. Foi utilizada uma prensa triaxial automatizada, conforme demonstrado na Figura 8, interligada ao software Pavitest Triaxial I-1077 para a realização das leituras dos ensaios e determinação das envoltórias de resistência.



Figura 8. Equipamento Triaxial

Para a determinação do Círculo de Mohr de cada talude, foram utilizadas três amostras idênticas, a fim de obter uma envoltória de resistência coerente e válida do solo. Houveram perdas de amostras durante a etapa de coleta e extração, além de amostras ensaiadas que apresentaram resultados inválidos.

A modalidade de ensaio triaxial utilizada nos ensaios foi o adensado não drenado (CU), também conhecido como ensaio consolidado rápido, pois permite determinar a envoltória de resistência, em termos de tensão totais, em um tempo reduzido quando comparado ao ensaio consolidado drenado. Para a aplicação da tensão axial, foi utilizada uma velocidade de 0,064 mm/min., pois conforme Bjerrum (1954, apud Gerscovich, 2016), a geração de poro-pressão torna-se independente do tempo de ruptura após 5 horas.

Foram posicionados os corpos de prova dentro da câmara cilíndrica, que ficaram entre duas pedras porosas e papel filtro, conforme apresentado na Figura 9. O corpo de prova foi

envolvido por uma membrana fina de borracha e vedado com anéis de borracha na base e no topo. Com a câmara fechada e o extravasor superior aberto, encheu-se a câmara com água, cuidando para que não permanecessem bolhas de ar. Apoiou-se a câmara na base do equipamento e a haste sobre a câmara.



Figura 9. Amostra indeformada na câmara de ensaio

Conforme a norma ASTM D 4767 (1995), foi realizada a saturação das mangueiras, controlada pelo *software*, e posteriormente a saturação do corpo de prova e aguardada a estabilização da pressão neutra sobre o mesmo, sendo a seguir realizada a consolidação das amostras devido a aplicação de uma pequena pressão hidrostática no corpo de prova, e verificando as variações volumétricas ocorridas nele. Esse procedimento teve uma duração média de 30 minutos para cada amostra e foi finalizado quando pelo menos três pontos das leituras da variação de volume se estabilizaram formando uma reta.

O ensaio de ruptura foi iniciado com o posicionamento do extensômetro sobre a câmara, e aplicação de força axial através de um pistão. O carregamento foi interrompido quando a deformação do corpo de prova atingiu 20% do tamanho da amostra, segundo a norma ASTM D 4767 (1995). Repetiu-se o ensaio até obter plena concordância entre pelo menos 3 círculos de Mohr.



3.4 Modelagem numérica

Para a avaliação da estabilidade foi empregado o programa computacional SLOPE/W da Geoslope 2018 R2, que é voltado para a análise de estabilidade de taludes, fundamentando-se em análises de equilíbrio limite, além de análises de estruturas reforçadas com geossintéticos, cortinas atirantadas e outras técnicas construtivas.

Para a determinação do fator de segurança foram utilizados métodos baseados em lamelas, dentre os quais foram escolhidos os métodos de: Bishop, Fellenius, Morgenstern-Price e Corps of Engineers.

A modelagem pelo Geoslope foi realizada após os ensaios de cada talude, e identificado o perfil mais crítico com suas informações, como a geometria e parâmetros do solo (ângulo de atrito, intercepto de coesão e peso específico).

Inicialmente, foi necessário definir as unidades de medidas usadas e os tipos de materiais de cada talude. O programa permite a aplicação de múltiplas camadas de solo com características diferentes caso seja necessário. Em seguida, inseriu-se os valores de intercepto de coesão, ângulo de atrito e peso específico obtidos no ensaio triaxial.

4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Por meio do ensaio de compressão triaxial foi possível determinar as envoltórias de resistência, definindo o intercepto de coesão e ângulo de atrito do solo dos taludes analisados. A partir dos resultados, foi possível modelar os taludes e definir os fatores de segurança por vários métodos, comparando-os.

4.1 Determinação dos parâmetros de resistência do solo

4.1.1 Talude A

Foram realizados ensaios em 4 corpos de prova, e a envoltória de resistência de Mohr-Coulomb foi definida a partir da combinação de 3 deles. Na Figura 10 são apresentados os círculos de Mohr, sendo utilizadas tensões confinantes (σ_3) de 0,5, 1,0 e 2,0 kgf/cm².

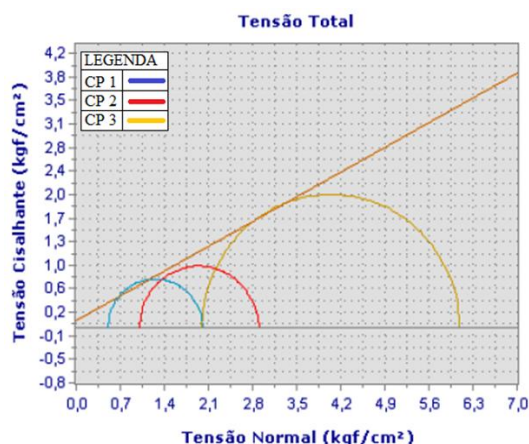


Figura 10. Envoltórias de Mohr-Coulomb com 3 ensaios do Talude A.

Os valores de intercepto de coesão e ângulo de atrito foram determinados através da envoltória de resistência, com um intercepto de coesão definido como 10,78 kPa e o ângulo de atrito de 28°. Na Figura 11 são apresentadas curvas que relacionam a tensão desviadora x deformação dos corpos de prova.

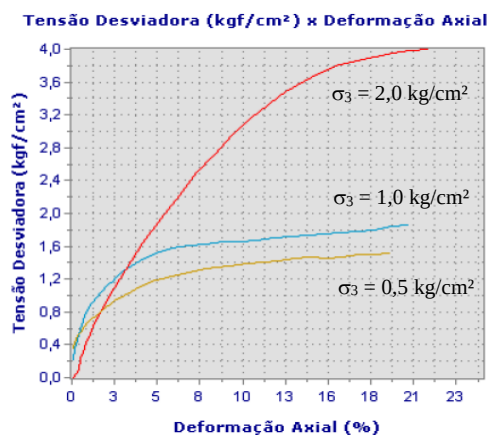


Figura 11. Envoltória de Mohr-Coulomb com 3 ensaios do Talude A.



Figura 13 . Envoltória de Mohr-Coulomb com 3 ensaios do Talude B.

4.1.2 Talude B

Foram realizados ensaios em 7 corpos de prova, e a envoltória de resistência de Mohr Coulomb foi definida a partir da combinação de 3 deles, conforme a Figura 12. As tensões σ_3 utilizadas foram de 1,0, 1,5 e 2,0 kgf/cm².

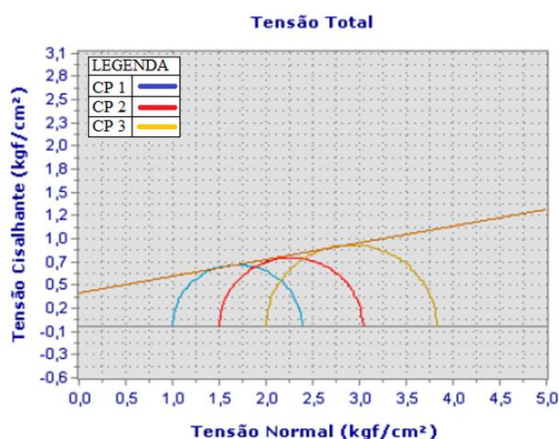
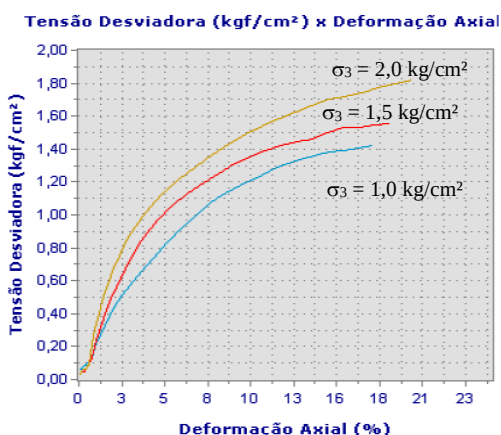


Figura 12. Envoltória de Mohr-Coulomb com 3 ensaios do Talude B.

Com a realização dos ensaios foi possível determinar os parâmetros de resistência do solo local, apresentando um intercepto de coesão de 37,26 kPa e um ângulo de atrito de 10°. Na Figura 13 são apresentadas curvas que relacionam a tensão desviadora x deformação dos corpos de prova.



4.2 Modelagem numérica dos taludes

A análise de estabilidade foi realizada através de simulações no software Geoslope para os dois taludes, utilizando 4 métodos de equilíbrio limite disponíveis no programa, a fim de realizar uma comparação entre os métodos.

Para o início da modelagem numérica foi necessário desenhar cada talude, utilizando suas dimensões com o acréscimo do valor da crista e do pé. Na Tabela 2 são apresentados os dados utilizados para discretizar o solo de cada talude.

Tabela 2. Dados utilizados no Software SLOPE/W.

	Talude A	Talude B
Altura (m)	2,63	7,00
Peso específico (kN/m³)	16,45	17,61
Intercepto de coesão (kPa)	10	37
Ângulo de atrito (°)	28	10

Como não foram realizadas sondagens a percussão do tipo SPT nos terrenos e os taludes analisados apresentavam-se visualmente todos com características homogêneas, considerou-se nas modelagens que os perfis de solo apresentavam parâmetros de resistência e massa específica constantes com a profundidade.

Logo após foram inseridos dados como sobrecarga, caso existentes, que deveriam ser aplicadas ao longo de sua superfície. Conforme ABNT NBR 7188 (2013), locais com baixo tráfego devem ser dimensionados com uma carga distribuída de 5 kN/m², pois se faz necessário considerar a existência de pedestres devido a colégios e moradias próximos ao talude, para que assim se obtenha uma análise mais coerente e segura.

Todas as simulações foram realizadas considerando condições naturais dos taludes, ou seja, sem saturação completa, por serem estarem parcialmente cobertos por vegetação e árvores (Talude A) e protegido por nata de cimento (Talude B).



4.2.1 Talude A

O talude A, com ângulo de 43° , apresentou pequenas diferenças nos fatores de segurança determinados para os 4 métodos, sendo o maior fator obtido no valor de 2,74 através do método Corps of Engineers, conforme representado na Figura 14. Já o método que apresentou menor fator de segurança foi o de Fellenius, com um valor de 2,45, conforme representa a Figura 15

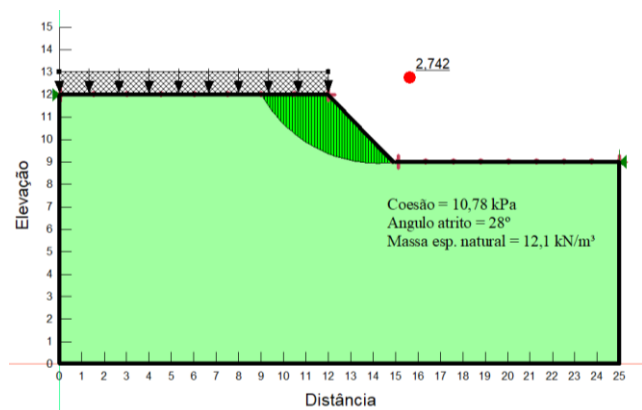


Figura 14. Círculo de deslizamento com maior fator de segurança do talude A.

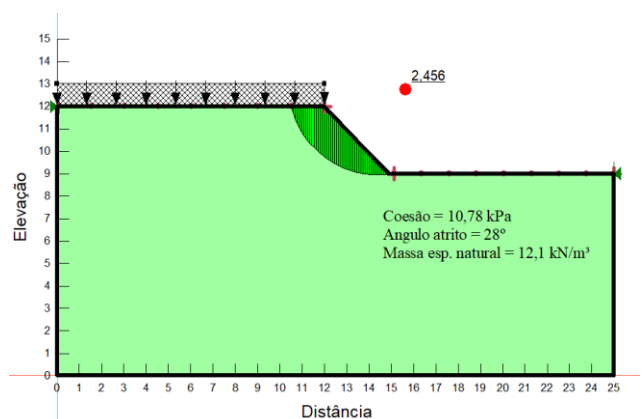


Figura 15. Círculo de deslizamento com menor fator de segurança do talude A.

Apesar de ser um solo visualmente fofo e instável, o Talude A apresentou fatores de

segurança que variaram entre 2,45 e 2,74. Os outros dois métodos (Bishop e Morgstern-Price) apresentaram valores idênticos de 2,55. Os valores foram satisfatórios e dentro do esperado, considerando o ângulo e os parâmetros obtidos de resistência.

É importante relatar que o talude possui densa vegetação, resultando em um benéfico aumento da resistência ao cisalhamento do solo e aumentando a coesão solo-raiz provocada pelas raízes da vegetação, conforme apresenta SIC (2016), mantendo maior estabilidade, além de ser uma técnica de baixo custo.

4.2.1 Talude B

O talude B, com ângulo de 51° , apresentou fatores de segurança menores, como era esperado, com o menor fator de segurança determinado de 2,31 (Fellenius), como pode ser observado na Figura 16.

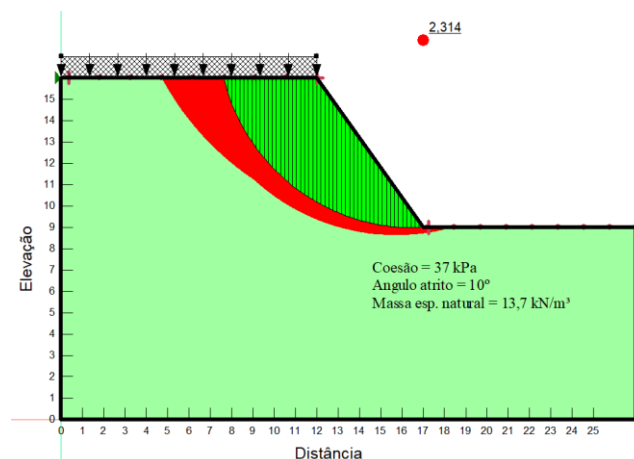


Figura 16. Círculo de deslizamento com menor fator de segurança do talude B.

O maior fator de segurança para esse talude foi obtido pelo método do Corps of Engineers, que obteve um valor de 2,52, conforme a Figura 17. Observa-se que os valores dos fatores de segurança para esse talude atingiram os menores valores com relação aos demais. Os métodos de Bishop e Morgenstern-Price



apresentaram fatores de 2,31 a 2,52, respectivamente.

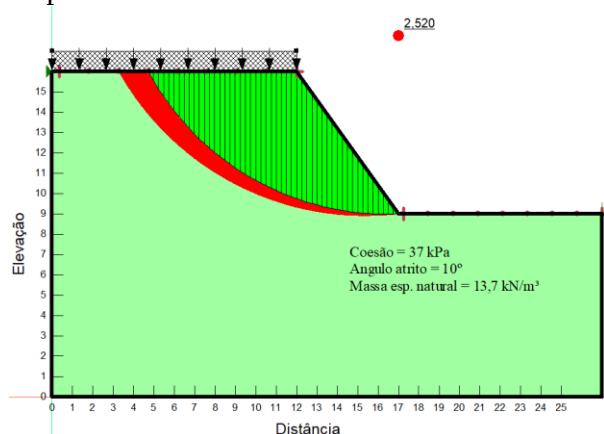


Figura 17. Círculo de deslizamento com menor fator de segurança do talude B.

A alta resistência ao cisalhamento se justifica nessa situação, apesar do ângulo do talude ser maior com relação ao Talude A, pelo valor do intercepto de coesão ser alto (37 kPa) e influenciar fortemente a resistência ao cisalhamento.

Em geral, para projetos onde se estima a resistência ao cisalhamento por dados de sondagem SPT, muito projetistas acabam não considerando a contribuição do intercepto de coesão na resistência do maciço.

4 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A realização do presente trabalho teve como objetivo determinar o potencial de ruptura de dois taludes, a partir da coleta de amostras indeformadas in loco.

Para a pesquisa foram analisados dois taludes na cidade de Cascavel-PR, com potencial risco de instabilidade. Foram coletadas amostras indeformadas nos locais para a realização de ensaios triaxiais, e posteriormente executou-se o ensaio de compressão triaxial adensado rápido, definindo os parâmetros de resistência do solo dos 2 locais.

Os valores do intercepto de coesão em parâmetros de tensões totais obtidos para o taludes A e B foram 10,78 kPa e 37,26 kPa, respectivamente. Os valores de ângulo de atrito resultantes foram de 28° e 10° para o talude A e B, respectivamente.

Os dados obtidos nos ensaios foram então utilizados para modelagem numérica através do software GeoSlope 2018 R2, para a determinação dos fatores de segurança através dos métodos de equilíbrio limite de Bishop, Corps of Engineers, Fellenius e Morgenstern-Price.

Para o talude A, o método de Fellenius foi o que apresentou o menor fator de segurança, no valor de 2,45, já para o talude B o menor valor foi de 2,31, determinado também pelo método de Fellenius, indicando que ambos os taludes se encontram dentro do limite de 1,50 indicado pela ABNT NBR 11682 (2009).

Por fim, para se obter maior confiabilidade nos fatores de segurança finais, determinados pelos modelos realizados no software, é importante uma discretização rigorosa das camadas de solo que constituem os taludes e abaixo dos mesmos, além de avaliar a influência da saturação nos fatores de segurança.

REFERÊNCIAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT NBR 6484 (2001). *Sondagens De Simples Reconhecimento Com Spt - Método De Ensaio: Referências*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT NBR 7181 (2016). *Análise Granulométrica*, Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT NBR 11682 (2009). *Estabilidade de taludes: Referências*. Rio de Janeiro, p. 18
- American Society for Testing and Materials. *ASTM D 4767 (1995). Standard Test Method for Consolidated Undrained Triaxial Compression Test for Cohesive Soils*. In: Annual Book of ASTM Standards.
- Cavalcante, E. H. (2006). *Mecânica dos solos II*. Aracaju: Universidade Federal de Sergipe.
- Caputo, H. P. (1988). *Mecânica dos solos e suas aplicações*. 6° ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A.



- Das, B. M. (2007). *Fundamentos da Engenharia Geotécnica*; São Paulo, Thomson Learning.
- Gerscovich, D; Danziger, B. R; e Saramago, R. (2016) *Contenções: teoria e aplicações em obras*. São Paulo: Oficina de Textos.
- Pinto, C. S. (2006). *Curso básico de mecânica dos solos*. 3º ed. São Paulo: Oficina de Textos.
- Simons, N e Menzies, B. (1981). *Introdução à engenharia de fundações*. Rio de Janeiro: Interciência.
- Zen, B. A. B. e Almeida, M. A. (2018). *Implantação e Caracterização Geotécnica do Campo Experimental de Engenharia do Centro Universitário Assis Gurgacz em Cascavel/Pr*. XIX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica Geotecnia e Desenvolvimento Urbano COBRAMSEG. Salvador -BA.