

Resistência Ao Cisalhamento E Estabilidade De Taludes Naturais Da Localidade Da Posse, Teresópolis, Rio De Janeiro.

Juliana Santos Fabre

UFJF, Juiz de Fora, Brasil, juliana.fabre@engenharia.ufjf.br

Tatiana Tavares Rodriguez

UFJF, Juiz de Fora, Brasil, tatiana.rodriguez@ufjf.edu.br

André Avelar

IGEO/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, andre.avelar@globo.com

Willy Alvarenga Lacerda

COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, willyl@globo.com

RESUMO: A Região Serrana do Rio de Janeiro frequentemente apresenta movimentos de massa decorrentes ou não de atividade antrópica. Esses fenômenos, em sua grande maioria, geram consequências catastróficas, como o fluxo de detritos que atingiu a localidade da Posse na cidade de Teresópolis. Nesta localidade, chama atenção a existência de cicatrizes de movimentos de massa ao lado de áreas preservadas, tanto em alta como em baixa encosta. Por isso, resolveu-se neste estudo determinar os parâmetros de resistência de solos locais a fim de verificar a interferência destes em situações geomorfológicas semelhantes. Para tanto, foram coletadas amostras deformadas e indeformadas de três pontos, denominados de Saprolito, Cachoeira e Caetés, nos quais foram realizados ensaios para caracterização física pelos procedimentos da ABNT. Os ensaios consistiram em determinação de: massa específica dos sólidos, teor de umidade, análise granulométrica e limites de consistência. O solo Cachoeira (areia argilosa) apresenta 50% de areia e 35% de argila, o solo Saprolito é composto por 80% de areia enquanto o solo Caetés (argila arenosa) apresenta 55% de argila e menos de 10% de silte. Os parâmetros de resistência ao cisalhamento foram obtidos a partir de envoltórias determinadas com resultados de ensaios de cisalhamento direto na condição embebida para tensões normais compatíveis com as tensões de campo. O Saprolito e o Cachoeira apresentaram, respectivamente, ângulos de atrito de 37° e 27° e intercepto coesivo de 8,6 kPa e 0,45 kPa. Por outro lado, o Caetés apresentou ângulo de atrito de 33,6° e intercepto coesivo de 26,2 kPa. Estes parâmetros de resistência permitiram realizar análises de estabilidade, para a condição de talude infinito, com e sem presença do nível freático, nas inclinações de 20° e 35° que são usuais destes locais. Os resultados indicam que apenas o solo Caetés apresenta fator de segurança aceitável para todas as condições analisadas. O Saprolito, mostrou fatores de segurança para inclinações de 20° suficientes para indicar estabilidade, mas para a inclinação de 35° não alcançam estabilidade. Quanto ao Cachoeira, tanto para a geometria de 20° quanto para a de 35° os fatores de segurança são muito baixos, isso pode indicar que a presença destes solos na condição encontrada no local se deve à sucção. Logo, é possível dizer que as propriedades dos solos explicam o comportamento diferenciado observado em campo e deveriam ser consideradas com maior relevância em análises de risco na localidade da Posse e também na região Serrana.

PALAVRAS-CHAVE: estabilidade de taludes, taludes infinitos, resistência ao cisalhamento.

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, recentemente, ocorreram muitos acidentes relacionados a deslizamentos de encostas. Vários exemplos em amplas regiões, podem ser citados, como o acidente ocorrido na região Serrana do estado do Rio de Janeiro no ano de 2011 e também no ano de 2012, gerando elevados prejuízos econômicos e sociais. Alguns destes acidentes têm causas naturais, porém muitos são consequência do crescimento desordenado das cidades, devido ao descontrole no uso e ocupação do solo, surgindo muitas construções em áreas de riscos ou gerando modificações superficiais no solo, como a retirada da cobertura florestal, que aumenta as possibilidades de ocorrência de um escorregamento.

Uma forma de evitar ou prevenir esses acidentes é analisar a resistência ao cisalhamento, identificando o ângulo de atrito e intercepto coesivo, através da realização de ensaios de laboratório.

Assim, decidiu-se estudar três solos de locais diferentes de Teresópolis, a partir da coleta de amostras deformadas e indeformadas para realização de ensaios de caracterização física e de cisalhamento direto. Obtidos esses dados, foram feitas análises de estabilidade de taludes infinitos para determinar os fatores de segurança atuantes nos taludes típicos da região que, de acordo com os estudos de Avelar et al. (2013), apresentam inclinações predominantes de 20° a 35° .

Os três solos escolhidos, foram denominados Cachoeira, Caetés e Saprolito e estão localizados na região mostrada na Figura 1. As figuras 2, 3 e 4 ilustram os locais de coletas de amostra.



Figura 1: Localidade da Posse (modificado de Avelar et al., 2013).



Figura 2: Amostragem Saprolito (Avelar et al., 2013)



Figura 3: Amostragem solo Cachoeira (Autores, 2016)



Figura 4: Amostragem solo Caetés (Autores, 2016)

2 ENSAIOS DE LABORATÓRIO

2.1 Caracterização Física

A caracterização física dos solos seguiu os procedimentos do DNIT (1994) para obtenção da densidade real dos grãos e da ABNT (1984) para determinação da curva granulométrica. A massa específica do solo foi definida a partir dos corpos de prova preparados para os ensaios de cisalhamento direto. Os valores de massa específica dos sólidos e massa específica do solo encontram-se na Tabela 1.

Tabela 1: Massa específica dos sólidos e do solo

SOLO	Massa específica dos sólidos (g/cm ³)	Peso específico natural (kN/m ³)	Peso específico saturado (kN/m ³)
CACHOEIRA	2,625	18,1	18,5
CAETÉS	2,635	19,5	19,6
SAPROLITO	2,663	19,0	19,2

A Figura 5 mostra as curvas granulométricas para os solos Caetés e Cachoeira, obtidas com e sem o uso de defloculante durante o ensaio de sedimentação. Nota-se que ambos apresentam alto percentual de finos, porém no ensaio sem defloculantes em seu estado natural, os dois solos apresentam granulometria arenosa. A

partir das duas curvas de cada ensaio é possível observar que o solo Caetés é mais agregável que o solo Cachoeira, já que a distância entre as curvas é mais expressiva. A classificação ABNT (1995) do solo Caetés indica uma argila-arenosa e do solo Cachoeira indica uma areia-argilosa.

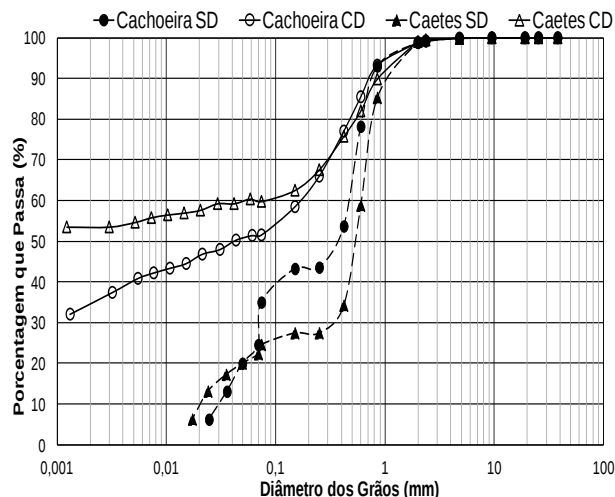


Figura 5: Curvas Granulométricas dos solos Caetés e Cachoeira (Autores, 2016)

Na Figura 6 encontram-se as curvas granulométricas com e sem defloculante para o solo Saprolito. A partir delas é possível concluir que o solo não apresenta potencial de agregação e é classificado como areia-argilosa.

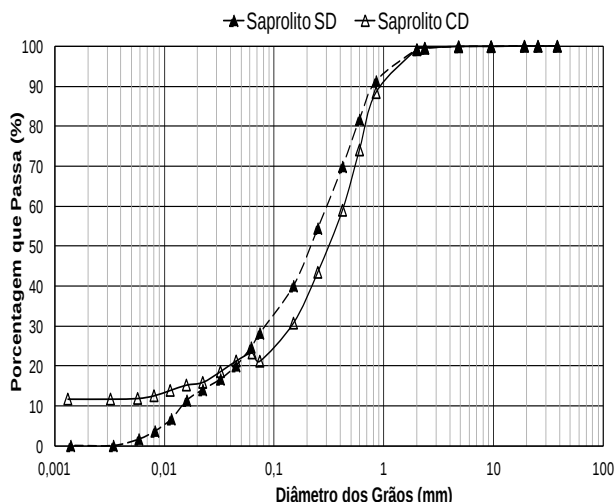


Figura 6: Curva Granulométrica Saprolito modificada (Avelar et al., 2013)

2.2 Resistência ao cisalhamento

Foram realizados ensaios de cisalhamento direto em três corpos de prova, tanto para o solo

Caetés quanto para o solo Cachoeira, de formato cilíndrico (2 cm de altura e 6 cm de diâmetro), com valores de tensões normais de 25 kPa, 50 kPa e 100 kPa e velocidade de ensaio de 0.1mm/s. Já o solo Saprolito foi ensaiado por por Avelar et al. (2013). Conforme as figuras 7, 8 e 9 observa-se comportamento diferenciado para a condição embebida das curvas Tensão Cisalhante *versus* Deslocamento Horizontal e Deslocamento Vertical *versus* Deslocamento Horizontal de cada solo.

Os solos Caetés e Cachoeira apresentaram pico de tensão no ensaio com tensão normal igual a 25 kPa. Este pico de tensão coincide com a dilatação observada nos gráficos de Deslocamento Vertical *versus* Deslocamento Horizontal. O mesmo não ocorre para o solo Saprolito, que como mostra a Figura 9, não apresentou pico de tensão para nenhum valor de tensão normal.

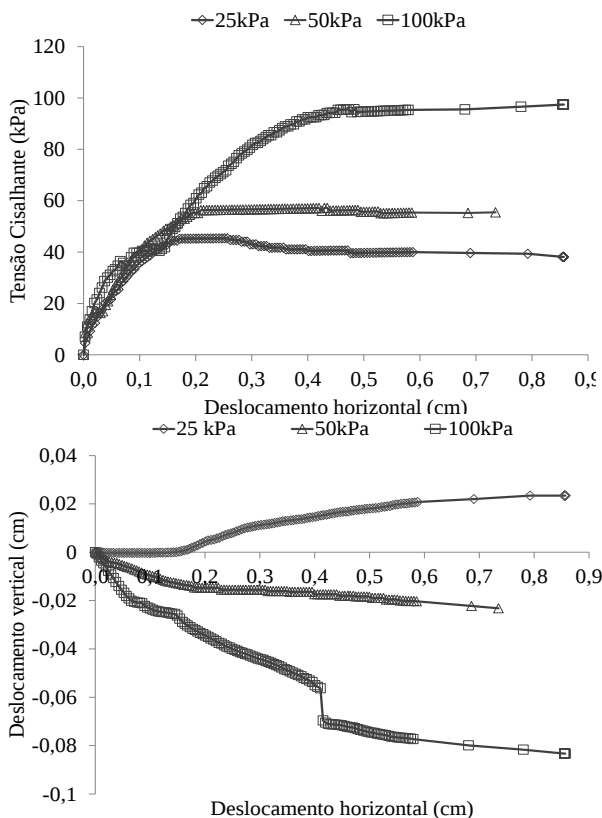


Figura 7: Tensão Cisalhante x Deslocamento horizontal e Deslocamento vertical x Deslocamento horizontal – solo Caetés (Autores, 2016)

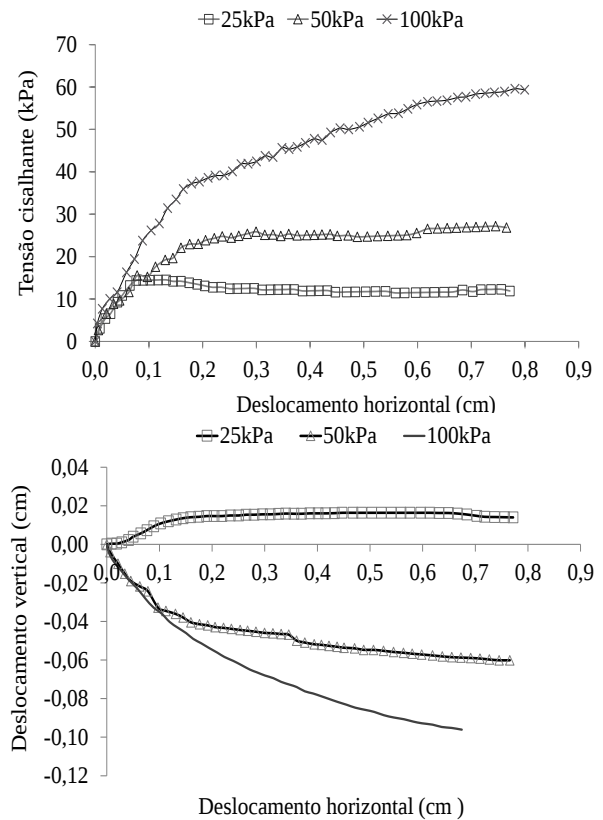


Figura 8: Tensão Cisalhante x Deslocamento horizontal e Deslocamento vertical x Deslocamento horizontal – solo Cachoeira (Autores, 2016)

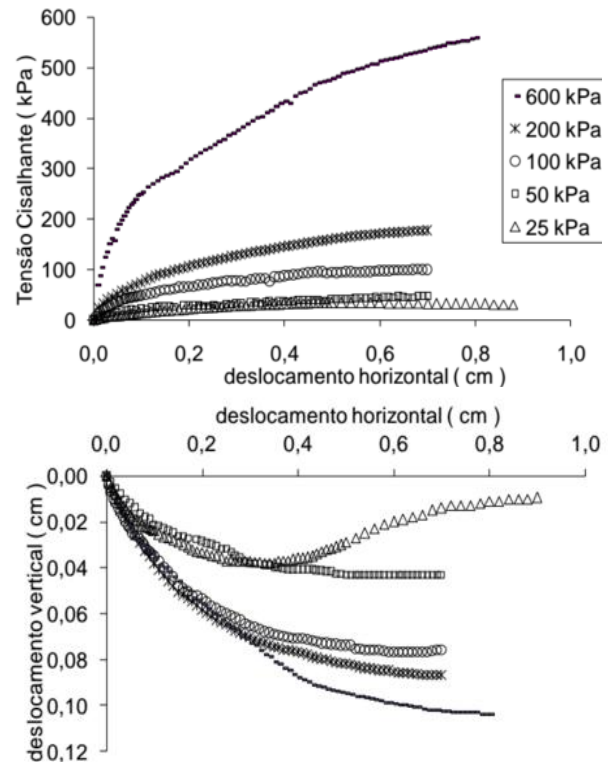


Figura 9: Tensão Cisalhante x Deslocamento horizontal e Deslocamento vertical x Deslocamento horizontal – solo Saprolito (Avelar et al., 2013)

Tal como expresso nas figuras 10, 11 e 12 a razão entre tensão cisalhante e tensão normal no desenvolvimento do deslocamento horizontal para os solos Caetés, Cachoeira e Saprolito mostram comportamentos ligeiramente diferentes.

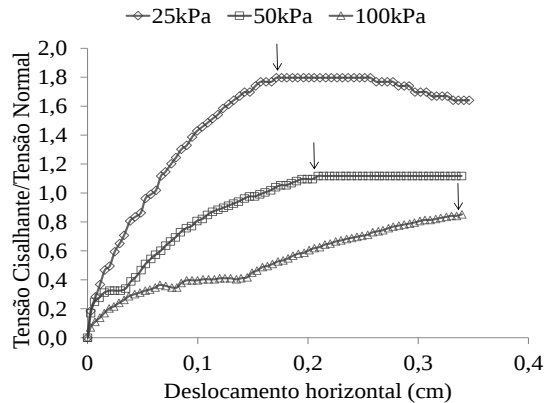


Figura 10: Tensão-deslocamento normalizado – Caetés (Autores, 2016)

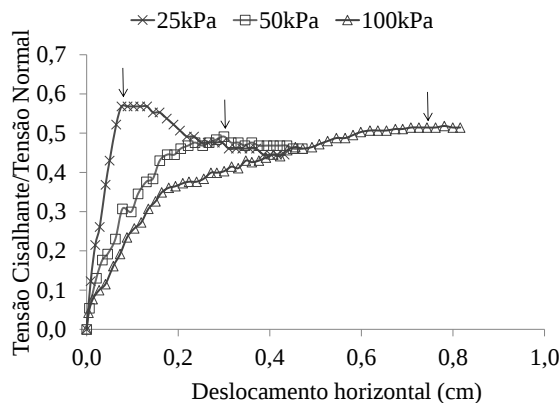


Figura 11: Tensão-deslocamento normalizado – Cachoeira (Autores, 2016)

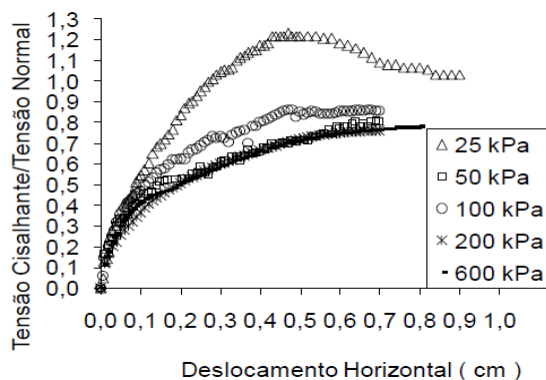


Figura 12: Tensão-deslocamento normalizado – Saprolito (Avelar et al., 2013)

A partir desses gráficos foi possível determinar a envoltória de resistência para cada

um dos solos. A Figura 13 mostra a envoltória linear do solo Caetés com ângulo de atrito de $33,6^\circ$ e o intercepto coesivo de 26,23 kPa. A aproximação da envoltória em uma reta indica uma correlação forte de acordo como valor encontrado de R igual a 0,993.

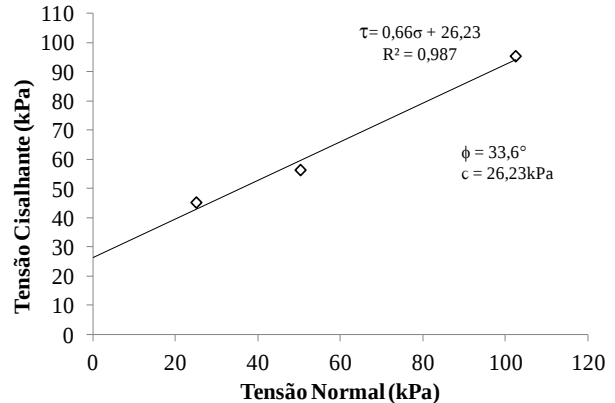


Figura 13: Envoltória de resistência para o solo Caetés (Autores, 2016)

A envoltória para o solo Cachoeira está na Figura 14 e apresenta um ângulo de atrito de 27° e um intercepto coesivo de 0,45 kPa, também com forte correlação ($R=0,998$).

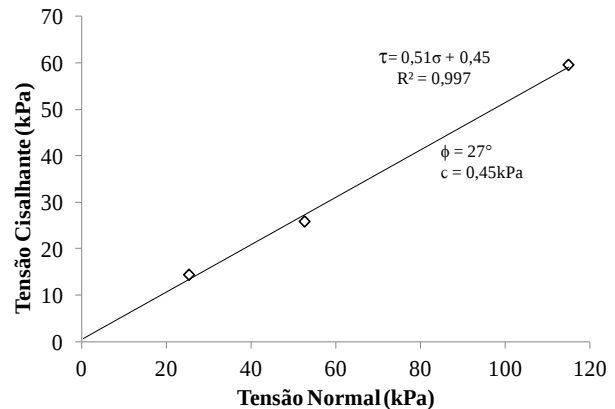


Figura 14: Envoltória de resistência para o solo Cachoeira (Autores, 2016)

Já a envoltória do solo Saprolito está na Figura 15 onde observa-se que um ângulo de atrito de $36,6^\circ$ e um intercepto coesivo de 8,6 kPa, com $R=0,999$.

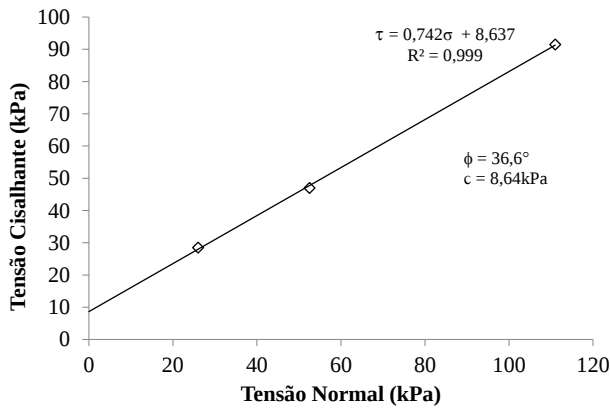


Figura 15: Envoltória de resistência para o solo Saprolito (modificada de Avelar et al., 2013)

As elevadas correlações encontradas para os três solos indicam que a aproximação linear para a envoltória de ruptura é a mais indicada, não sendo aplicáveis as envoltórias bi-lineares e/ou curvas sugeridas por outros trabalhos como os de Rodriguez (2005) e Lacerda (2014).

Vale observar que o solo Cachoeira, apesar de ter considerável fração argila, apresentou baixo intercepto coesivo, ao contrário do solo Saprolito.

3 ANÁLISES DE ESTABILIDADE

A determinação do fator de segurança a partir do método de talude infinito pode ser feita através da Equação 1, retirada de Bromhead (1985).

$$FS = \frac{c' + (\gamma H - \gamma_w h_w) \cos^2 \alpha \tan \phi'}{\gamma H \cos \alpha \sin \alpha} \quad (1)$$

Onde 'c' e 'φ' são os parâmetros de resistência; 'γ' é o peso específico do solo analisado; 'γ_w' é o peso específico da água; 'α' é a inclinação do talude (20° e 35°); 'H' é a espessura da camada de solo que será considerada 3 m; e 'h_w' é a altura do nível de água (NA).

Neste trabalho optou-se por diferenciar o peso específico do solo em saturado e natural, alterando a Equação 1 para a Equação 2.

$$FS = \frac{c' + (\gamma_{nat} h_1 + \gamma_{sat} h_2 - \gamma_w h_w) \cos^2 \alpha \tan \phi'}{(\gamma_{nat} h_1 + \gamma_{sat} h_2) \cos \alpha \sin \alpha} \quad (2)$$

Onde γ_{nat} é o peso específico do solo no estado natural; γ_{sat} é o peso específico do solo saturado; h₁ é a altura de solo acima do NA e h₂ é a altura de solo abaixo do NA.

As Figuras 16 e 17 apresentam os resultados da análise da variação do FS em função da variação da altura do nível de água (h_w) para taludes com inclinação de 20° e 35° respectivamente.

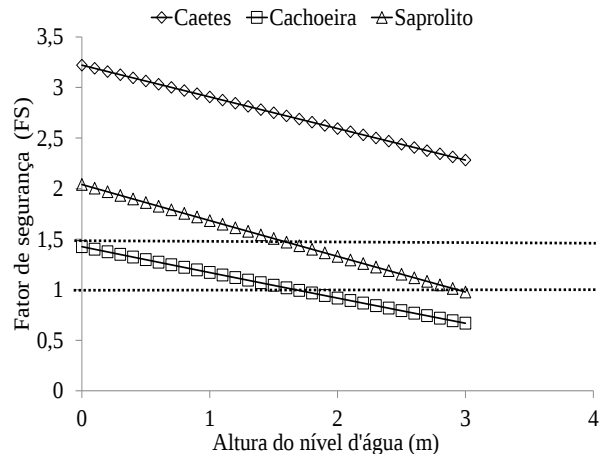


Figura 16: Fator de segurança (FS) versus altura do nível de água (h_w) para a inclinação de 20° (Autores, 2016)

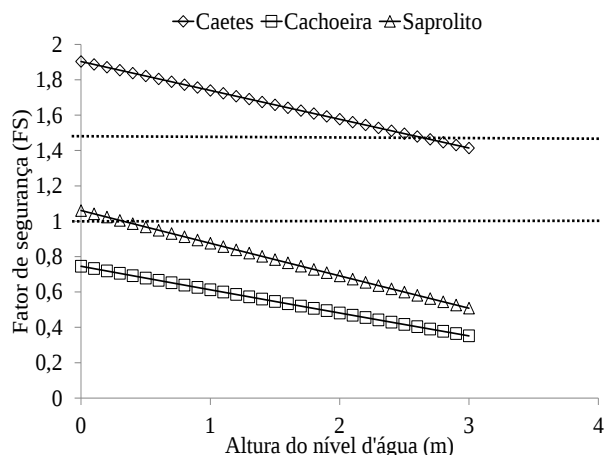


Figura 17: Fator de segurança (FS) versus altura do nível de água (h_w) para a inclinação de 35° (Autores, 2016)

Ao avaliar a estabilidade de taludes tem-se duas situações: (a) o fator de segurança considerado em projetos de corte de taludes, que deve ser maior que 1,5 e (b) o fator de segurança relacionado com seu estado natural, que é utilizado para avaliar se o talude em estudo encontra-se estável ou na eminência de ruptura (FS=1).

Observando o resultado para talude com a inclinação de 20°, tem-se que o solo Caetés

apresenta FS acima dos mínimos considerados para ambas situações. Já o solo Cachoeira não apresenta para nenhuma altura de NA, FS maior que 1,5 e somente para alturas de NA até 1,6 m aproximadamente, apresenta FS maior que 1,0. Por fim, o solo Sapolito, até a altura de NA de 1,5 m apresenta FS acima do mínimo de projeto, e para as demais alturas de NA encontra-se estável ou pelo menos na eminência de ruptura.

Para talude com a inclinação de 35°, observa-se que o solo Cachoeira não apresenta em nenhuma condição, FS maior que 1,0, e o solo Sapolito supera este valor apenas para alturas de NA menor que 0,30 m, podendo considerar que também não alcança o FS mínimo. Em contrapartida, o solo Caetés alcançou valores de FS sempre maiores que 1,0, e maiores que 1,5 para alturas de NA até 2,6 m, aproximadamente.

Considerando que o solo Cachoeira apresenta fatores de segurança muito baixos, na condição de existência de nível de água, mesmo para a menor inclinação do terreno (20°), foi feita uma análise de estabilidade com o objetivo de determinar o ângulo máximo de inclinação em que este solo estaria com FS acima de 1 em condição de ausência de NA. As análises paramétricas mostraram que o solo estaria com o valor mínimo de FS para taludes com inclinação de até 27° (Figura 18).

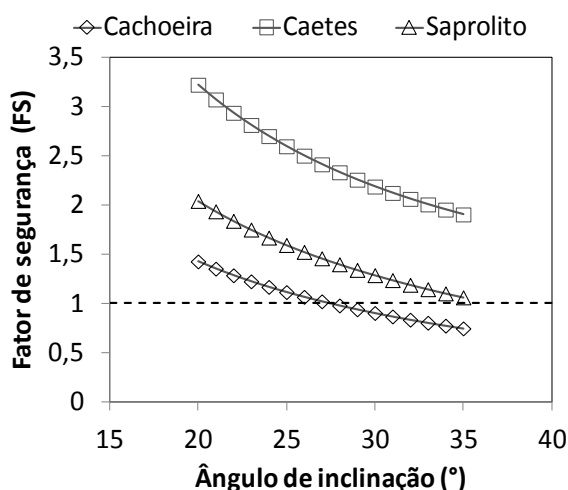


Figura 18: Fator de segurança (FS) versus inclinação do talude em condição sem NA (Autores, 2016)

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados mostram que o solo Caetés pode

permanecer estável para qualquer inclinação típica da região (até 35°) independente da condição hidrológica. Existe, portanto, grande possibilidade de existirem solos similares ao Caetés nas partes altas das montanhas onde as inclinações são elevadas, principalmente nos locais onde não há cicatrizes de escorregamento. A existência do solo Sapolito nas partes altas só é possível sem a presença do nível de água. Já o solo Cachoeira só estaria estável nestas condições devido a outros fatores, como sucção e vegetação.

Além disso, taludes com inclinações medianas, entre 20° e 27° podem ser formados por qualquer um dos três solos. Porém caso ocorram precipitações intensas, e consequentemente a saturação dos solos, o solo Sapolito tenderá a ficar em eminência de ruptura e o solo Cachoeira provavelmente irá romper.

5 CONCLUSÕES

As análises realizadas mostraram que o comportamento dos solos estudados apresentam diferenças quanto aos parâmetros de resistência ao cisalhamento, que influenciam nos movimentos de massa presentes no local.

As análises de talude infinito indicam que os taludes naturais da região que sofreram instabilidade, como deslizamentos translacionais, possivelmente são do solo tipo Cachoeira ou Sapolito.

Caso seja realizado algum projeto que inclua corte nestes taludes na área deve-se atentar para identificar o solo presente. Conforme foi mencionado, o solo Caetés é o mais estável em qualquer situação, atingindo o FS de 1,5, que é o indicado para projetos deste tipo. Se for identificado a presença de um dos dois outros solos é necessário uma melhor avaliação nas condições de corte e de soluções estabilizadoras.

É importante destacar que neste trabalho foi analisada a estabilidade de taludes apenas considerando as características de resistência para um talude genérico, mas que existem vários outros fatores que influenciam na determinação da estabilidade, como por exemplo a vegetação.

Por fim, indica-se que as propriedades dos solos deveriam ser consideradas com peso maior em análises de risco não apenas na localidade da Posse, mas também, na região Serrana como um todo

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao financiamento recebido pelo CNPq, FAPERJ, INCT REAGEO e aos técnicos Luis Carlos de Oliveira e Max pela coleta de amostras indeformadas.

REFERÊNCIAS

ABNT (1984). Solo – Análise Granulométrica – NBR 7181. Assoc. Bras. de Normas Técnicas, 13p.

ABNT (1995). Rochas e Solos – NBR 6502. Assoc. Bras. De Normas Técnicas, 18p.

DNIT (1994). Solos – determinação da densidade real – ME093/94. Dept. Nac. de Infraestrutura e Transportes (antigo Dept. Nac. de Estradas e Rodagens).

Avelar, S. A., Rodriguez, T. T., Lacerda, W. A., Coutinho, B. H., Barbosa, L. S., Almeida, I. R. P. L. (2013). *Geomorfologia, Mecanismos E Comportamento Dos Solos Do Movimento De Massa Da Posse–Teresópolis, Rio De Janeiro*. COBRAE 2013. 7 p.

Bromhead, E. N. (1986) *The stability of slopes*, 1nd ed., Blackie & Son Ltd, New York, NY, USA, 374p.

Lacerda, W. A. (2014). *A Suggested Shallow Slide Mechanism of Accidents in the Região Serrana of the State of Rio de Janeiro*, in *Extreme rainfall induced landslides an international perspective*, 1nd ed., Oficina de Textos, São Paulo, Brasil, 128 a 140p.

Rodriguez, T. T. (2005). *Proposta de Classificação Geotécnica para Colúvios Brasileiros [Rio de Janeiro]*. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Tese de doutorado. 370p.