

# Estudo Geotécnico de Talude em Barragem com Solo Residual de Basalto: Contribuições da Retroanálise e Simulações Numéricas

Maria Vitoria dos Guimarães Vidal

Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, guimavidal@hotmail.com

Danilo de Carvalho Moraes

Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, danilo\_ishihira@hotmail.com

Murilo S. Espíndola

Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, murilo.espindola@ufsc.br

Jonathan Ecks

Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, ecks@grad.ufsc.br

**RESUMO:** O caso tratado era um talude em uma barragem no sul do Brasil em solo residual basáltico, submetido a uma falha de escorregamento no início do projeto de construção. A caracterização e análise geotécnica sob diferentes cenários foram determinadas usando testes laboratoriais e análise retrospectiva com o método de Bishop, usando o *software* Slide. O estudo revela que o aumento no nível do lençol freático contribuiu significativamente para o deslizamento. Readequar a inclinação do talude para 2V:3H aumentou o fator de segurança (FS) para 1,22, classificando o talude como estável. Em condições semissubmersas, o FS foi superior a 2,0. No entanto, na rápida diminuição do nível da água, o FS saiu da margem de segurança (ou seja, menos de 1), sugerindo que, mesmo após a readequação do talude, a instabilidade ainda é uma preocupação. O estudo destaca a necessidade de simular cenários de pior caso e a complementaridade da análise numérica e dos testes laboratoriais na engenharia civil geotécnica. Essas análises fundamentaram recomendações de drenagem e estabilização com base na criticidade da estrutura.

**PALAVRAS-CHAVE:** Talude, Solo residual basáltico, Fator de segurança, Barragem.

**ABSTRACT:** The case addressed involved a slope in a dam site in southern Brazil build over residual basaltic soil, which experienced a sliding failure in the early stages of construction. Geotechnical characterization and stability analysis under different scenarios were conducted using laboratory tests and back-analysis with the Bishop method in the Slide software. The study reveals that the rise in the water table significantly contributed to the landslide. Regarding the slope to a 2V:3H inclination increased the safety factor (SF) to 1.22, classifying the slope as stable. Under semi-submerged conditions, the SF exceeded 2.0. However, during rapid drawdown, the SF dropped below unity, indicating that failure would still occur even after reprofiling. The study emphasizes the importance of simulating worst-case scenarios and highlights the complementary roles of numerical analysis and laboratory testing in geotechnical engineering. Based on the structure's low criticality, the analysis supported stabilization and drainage recommendations without initially proposing complex reinforcement methods such as deep drains or retaining structures.

**KEYWORDS:** Slope stability, Residual basaltic soil, Safety factor, Limit equilibrium, Rainfall-induced failure, Dam slope

## 1 INTRODUÇÃO

Instabilidades de taludes têm sido há muito tempo um tópico de interesse primário no campo da engenharia geotécnica devido aos seus efeitos potencialmente perigosos na integridade de estruturas civis e na

segurança de pessoas e propriedades. Falhas de taludes e cortes podem causar perdas econômicas e de tráfego severas e podem levar a fatalidades.

O comportamento do talude está intimamente ligado às propriedades geomecânicas dos materiais que o compõem, assim como à geometria do talude, às características hidrológicas e às cargas externas. Portanto, a necessidade de estudos de estabilidade no planejamento, projeto e operação de qualquer tipo de corte, aterro ou projetos de movimento de massa continua a ser primordial.

A Teoria do Equilíbrio Limite representa a abordagem mais comum para tais análises, nas quais se busca o equilíbrio entre forças resistentes e atuantes ao longo de planos de ruptura postulados. Essa teoria, além de permitir o cálculo do fator de segurança — indicativo da condição de estabilidade do corpo —, é amplamente utilizada por sua compatibilidade com o nível de conhecimento geológico-geotécnico geralmente disponível (GUIDICINI; NIEBLE, 1984). com o avanço dos programas computacionais, como o *software* Slide, tornou-se possível considerar diferentes condições hidrológicas e geométricas, o que amplia significativamente a compreensão do comportamento dos taludes em cenários críticos.

No presente trabalho, o método Simplificado de Bishop (1955) é utilizado para avaliar a estabilidade de um talude em solo basáltico residual a montante de uma barragem em construção no estado de Santa Catarina, que falhou posteriormente sob forte chuva.

A investigação geotécnica foi estruturada considerando três principais materiais: coluvião superficial, solo residual saprolítico e basalto sã. As amostras deformadas coletadas foram destinadas à análise granulométrica e aos limites de Atterberg, enquanto amostras indeformadas foram submetidas a ensaios triaxiais. Esse procedimento assegura que as curvas granulométricas e os limites de consistência possam ser relacionados às camadas geológicas identificadas em campo, garantindo maior representatividade nos parâmetros empregados nas simulações.

## 2 METODOLOGIA

O propósito da metodologia desenvolvida teve dois principais objetivos, que foram aplicados para avaliar a estabilidade de um talude lateral alto em situação de solo residual basáltico a montante de uma barragem em construção, no interior de Santa Catarina - Brasil, e que sofreu falha durante um período de chuvas intensas no ano de 2014. Isso foi realizado por meio de uma combinação de testes físicos, testes laboratoriais e modelagem numérica.

Durante a investigação geotécnica foram coletadas amostras deformadas e indeformadas ao longo do talude rompido, abrangendo desde o material coluvionar superficial até o solo residual de alteração basáltica imediatamente sobreposto ao topo rochoso. As amostras foram obtidas em diferentes cotas entre as elevações 747 m e 761 m, correspondendo à faixa de ocorrência da superfície de ruptura observada em campo (Figura 1).

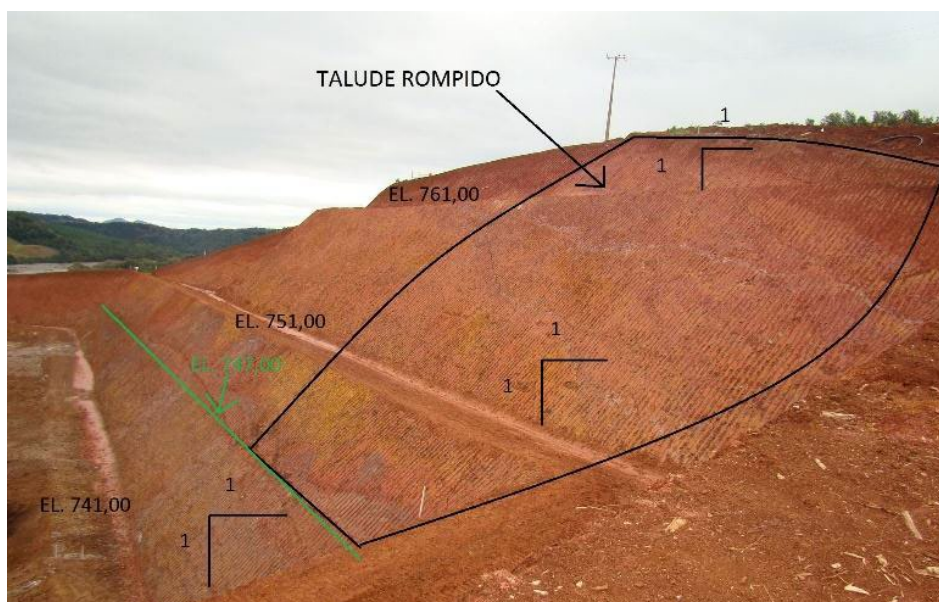


Figura 1. Vista geral do talude rompido entre as El. 761 e 747.

As amostras deformadas foram utilizadas nos ensaios de caracterização (granulometria e limites de Atterberg, conforme NBR 7181:1984 e NBR 7180:1984) e as indeformadas, no ensaio triaxial do tipo CIU, conduzido segundo a BS 1377-8:1990. Essa abordagem, recomendada por Abramson et al. (2002) e Gerscovich (2012), permitiu representar adequadamente as propriedades físicas e de resistência das principais camadas constituintes do talude — colúvio, solo residual e saprólito basáltico — refletindo o comportamento real do maciço nas análises de estabilidade subsequentes.

A pesquisa foi realizada considerando um talude que falhou entre as elevações de 761,00 m e 747,00 m, durante a construção de uma nova barragem. A geometria, os materiais existentes e o estado piezométrico da área foram levantados em campo e utilizados como dados de entrada para análises de estabilidade. (SKEMPTON; HUTCHINSON, 1969; TRISTÁ AGUILERA; VARGAS JR.; FIGUEIREDO, 2009; MASSAD, 2010).

Para a determinação dos parâmetros geotécnicos do solo (BISHOP, 1955; ABRAMSON et al., 2002; EBERHARDT, 2003), foram realizados testes físicos e de resistência:

- Limite de Liquidez e Limite de Plasticidade de acordo com a NBR6459/1984 e NBR 7180/1984.
- Análise de Granulometria (Figura 2) realizada de acordo com a NBR 7181/1984 e classificada segundo a NBR 6502/1995.

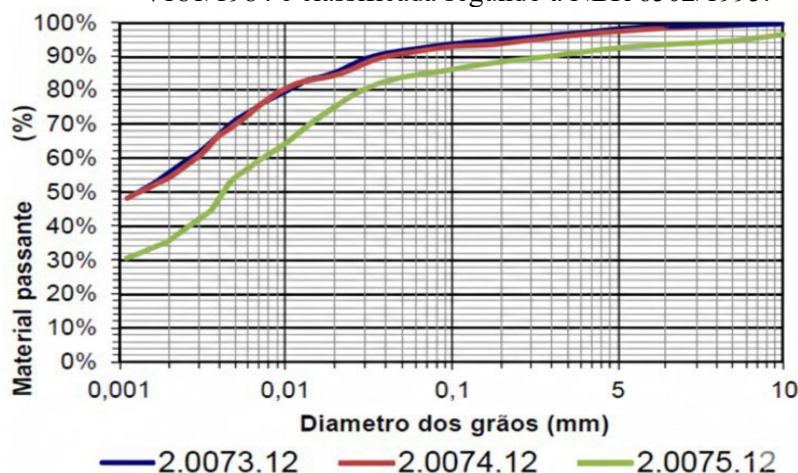


Figura 2. Resultado da análise granulométrica.

- Ensaio Triaxial CIU (Consolidado Isotropicamente e Não Drenado) conforme a norma BSI 1377 (1990) para determinação da coesão efetiva (Figura 3) e ângulo de atrito efetivo ( $\phi$ ) sob tensão efetiva.

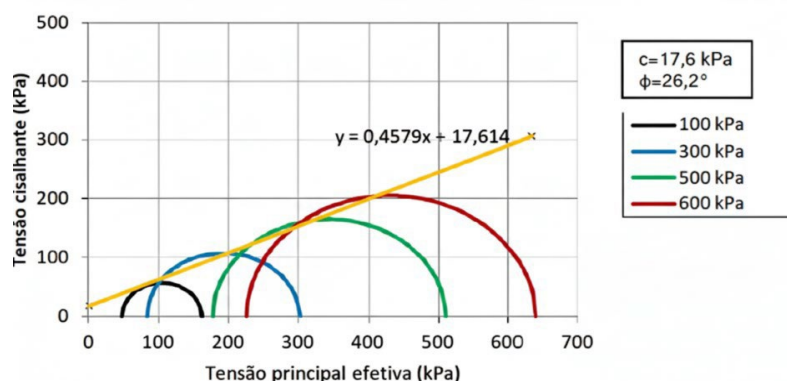


Figura 3. Envolvória de Mohr-Coulomb.

Os resultados evidenciam a coerência entre a granulometria predominantemente argilo-siltosa, os elevados índices de plasticidade e os parâmetros obtidos em ensaios triaxiais. Essa combinação indica baixa



permeabilidade, fator que, associado à elevação do nível freático, conduziu ao colapso do talude. A retroanálise confirma esse cenário e demonstra que o retaludamento foi eficaz em condições normais, mas insuficiente em situações de rebaixamento rápido, ressaltando o papel crucial da drenagem.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As análises de estabilidade da Teoria do Equilíbrio Limite permitiram avaliar o comportamento de uma encosta com alto declive quando em solo basáltico residual de grande altura, localizada a montante de uma barragem que está sendo construída no estado de Santa Catarina. O colapso da encosta ocorreu após um junho especialmente chuvoso em 2014. A análise retrospectiva mostrou que o aumento do nível freático foi um fator determinante para a instabilidade, sendo possível estimar a ocorrência de uma condição crítica, com fator de segurança (FS) próximo a 1, que representa o momento de ruptura iminente.

Os parâmetros geotécnicos obtidos nos ensaios triaxiais foram coesão ( $c$ ) de 17,6 kPa e ângulo de atrito ( $\phi$ ) de  $26,2^\circ$ , correspondentes a solos argilosos originados do intemperismo do basalto da Formação Serra Geral. (RIGO, 2005) Alterar a geometria da encosta de 1V:1H para 2V:3H aumentou o fator de segurança para 1,22, podendo assim ser alcançada uma mitigação efetiva do risco de colapso. O FS tornou-se 2,105 sob max. N.A. (760 m), indicando que a imersão parcial aumenta a contribuição para a estabilidade pelo peso da coluna de água. Por outro lado, o rápido abaixamento da linha d'água levou a uma queda do FS abaixo de 1 (0,852) e, mesmo reclassificando, o valor foi 0,947, demonstrando que, mesmo regenerando o cenário, esta ruptura ainda é uma ameaça.

Tabela 1. Parâmetros físicos e de resistência de solos residuais.

Amostra Solo	Wn (%)	e	Sr (%)	c (kN/m <sup>2</sup> )	$\phi$ (°)	WL (%)	Wp (%)	Ip (%)
Def. 1	39,80	1,73	-	-	-	74,00	48,00	26,00
Def. 2	32,10	1,77	-	-	-	70,00	41,00	29,00
Def. 3	27,20	1,99	-	-	-	52,00	34,00	18,00
Indef. 1	36,20	1,58	75,00	17,60	26,20	-	-	-

Os resultados obtidos foram analisados utilizando o *software Slide v6.00* (Rocscience Inc.) empregando a Teoria do Equilíbrio Limite e o Método Simplificado de Bishop, considerando superfícies de falha circulares. (VAUGHAN, 1988; PINTO, 2006; FIORI; CARMIGNANI, 2009).

Diferentes cenários foram avaliados:

- Reanálise com FS = 1, a fim de ajustar os parâmetros conforme a geometria da falha (Figura 4);

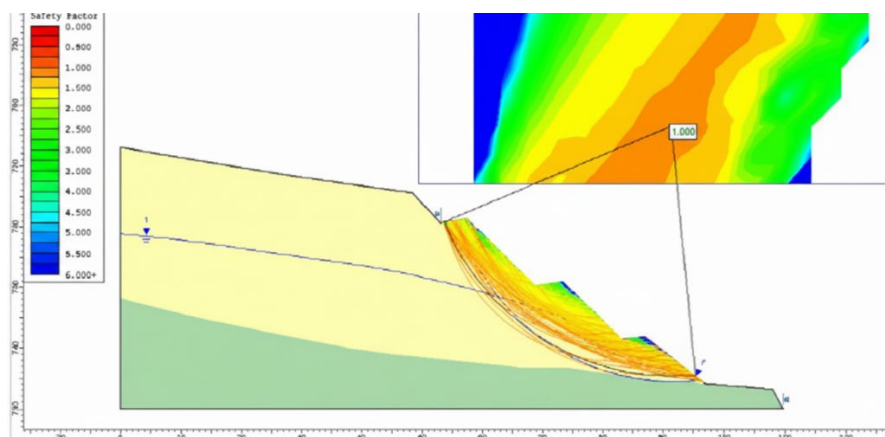


Figura 4. Condição de equilíbrio-limite do talude estudado.

- Simulações de fatores de segurança com variações no nível freático (Figura 5);

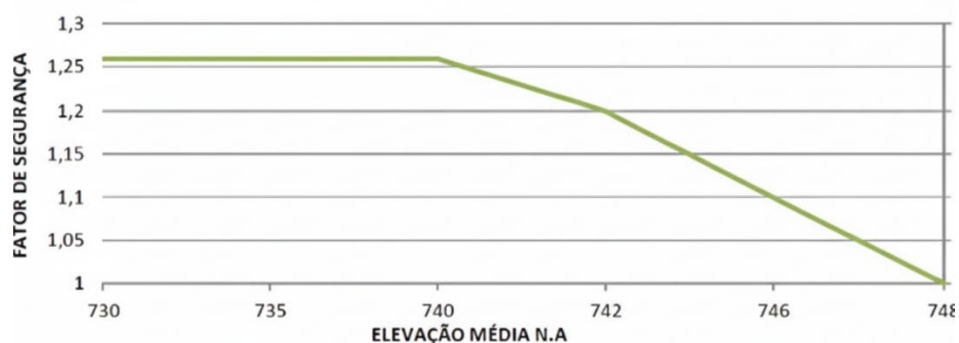


Figura 5. Relação entre a elevação do nível freático e a diminuição do FS.

- Talude com inclinação de 2V:3H para retaludamento Figura 6;

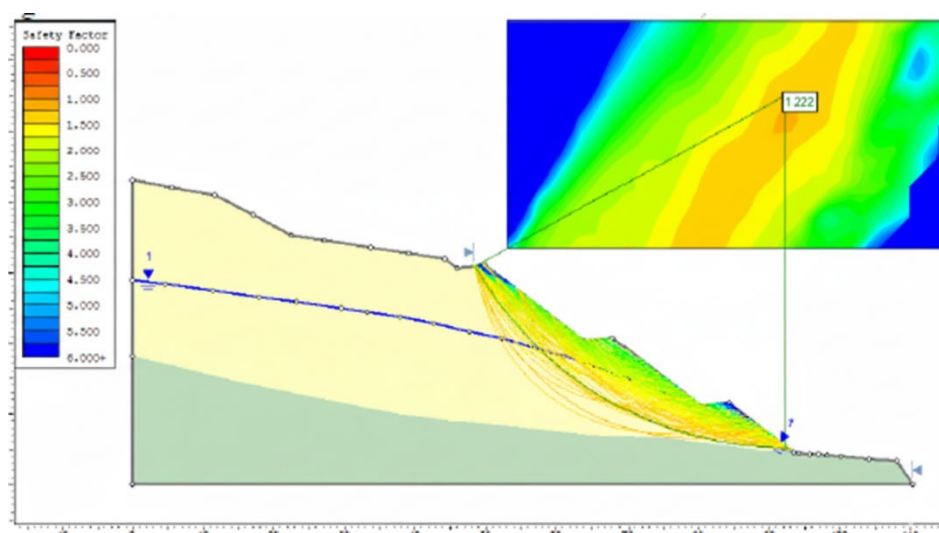


Figura 6. Resultado da análise de estabilidade com FS=1,222.

- Em rápida diminuição do nível de água (Figura 7.).

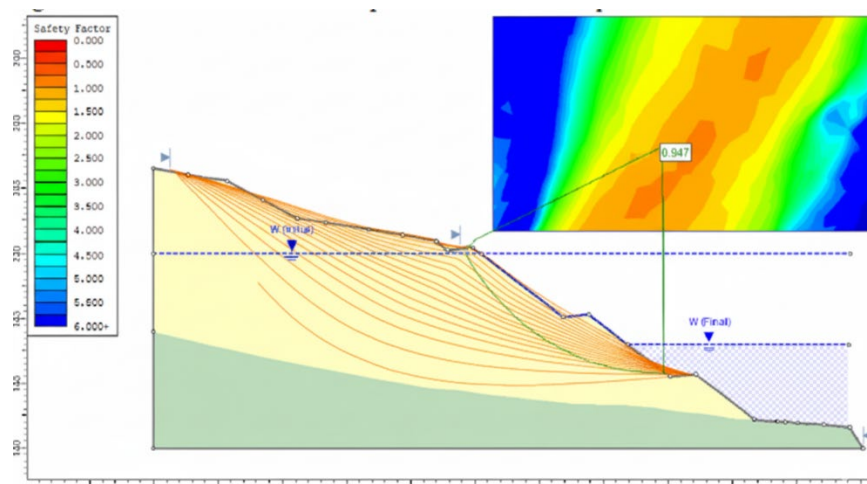


Figura 7. Resultado da análise para rebaixamento rápido.

As premissas adotadas são: condição de equilíbrio bidimensional, a aplicação da equação (1) de (TERZAGHI; PECK, 1967), e a equação (2) de Coulomb. Presumiu-se também que o fator de segurança permaneceu constante ao longo da superfície de falha.

$$\sigma = \sigma - u \quad (1)$$

$$\tau = c + (\sigma - u) \tan \varphi \quad (2)$$

A análise revela variações nas condições de instabilidade e demonstra a elevação do nível freático como o fator de gatilho dominante, destacando-se assim o papel das obras de drenagem para o controle hidrogeológico. A resposta do solo esteve em boa concordância com a encontrada na literatura local sobre o assunto, indicando que o procedimento adotado e os parâmetros são válidos para o caso presente. A consideração do cenário mostra que é necessário levar em conta diferentes cenários hidrológicos e geométricos nas análises de encostas com caráter estrutural crítico, mesmo se for acreditado que a influência da estrutura é considerada principalmente negligível (TANAKA, 1976).

#### 4 CONCLUSÃO

As análises realizadas foram consideradas adequadas para uma descrição apropriada do comportamento geotécnico do solo residual basáltico na encosta analisada e para a simulação de estabilidade dessa encosta sob diferentes condições de carga e nível do lençol freático.

A retroanálise revelou que o aumento do nível freático foi determinante para o colapso e permitiu estimar as condições anteriores à falha. O reperfilamento com uma inclinação de 2V:3H foi bem-sucedido (1,2 foi a probabilidade do fator de segurança) para demonstrar que a encosta estava agora estável. Em uma condição futura mais benéfica, com a encosta parcialmente submersa, o fator de segurança será quase o dobro do atual.

Mas, em casos extremos, como a redução excessiva do nível de água, o valor calculado para o fator de segurança reduziu para abaixo de 1 mesmo após a correção geométrica. Isso argumenta a necessidade de tratar a estabilização complementar dependendo do projeto.

Consequentemente, sistemas de drenagem superficial e subsuperficial devem ser implementados junto com a avaliação de medidas de contenção suplementares em locais críticos.

A pesquisa fornece evidências adicionais de que uma sinergia entre testes laboratoriais, retroengenharia e modelagem numérica é necessária ao se tomar uma decisão sobre questões técnicas relacionadas a obras geotécnicas.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abramson, L. W.; Lee, T. S.; Sharma, S.; Boyce, G. M. (2002). *Slope Stability and Stabilization Methods*. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1984). *NBR 7181 – Solo: Análise granulométrica*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1984). *NBR 7180 – Solo: Determinação do limite de plasticidade*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1995). *NBR 6502 – Rochas e solos: Terminologia*. Rio de Janeiro.
- Bishop, A. W. (1955). The use of the slip circle in the stability analysis of slopes. *Geotechnique*, v. 5, n. 1, p. 7–17.
- British Standards Institution (1990). *BS 1377-8:1990 – Methods of test for soils for civil engineering purposes – Part 8: Shear strength tests (effective stress)*. London.
- Eberhardt, E. (2003). *Rock slope stability analysis – Utilization of advanced numerical techniques*. [s.l.: s.n.].
- Ecks, J. (2014). *Aplicação da Teoria do Equilíbrio-Limite na Análise de Estabilidade de Taludes: Estudo de Caso*. Monografia (Graduação em Geologia) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- Fiori, A. P.; Carmignani, L. (2009). *Fundamentos de Mecânica dos Solos e das Rochas: Aplicações na Estabilidade de Taludes*. 2. ed. Curitiba: Editora UFPR.



- Gerscovich, D. M. S. (2012). *Estabilidade de Taludes*. São Paulo: Oficina de Textos.
- Guidicini, G.; Nieble, C. M. (1984). *Estabilidade de Taludes Naturais e de Escavação*. 2. ed. São Paulo: Edgard Blucher.
- Massad, F. (2010). *Obras de Terra: Curso Básico de Geotecnia*. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos.
- Pinto, C. de S. (2006). *Curso Básico de Mecânica dos Solos com Exercícios Resolvidos*. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos.
- Rigo, M. L. (2005). *Comportamento geotécnico de solos saprolíticos de rochas vulcânicas básicas e ácidas da Formação Serra Geral no estado do Rio Grande do Sul*. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Skempton, A. W.; Hutchinson, J. (1969). Stability of natural slopes and embankment foundations. In: *Conference on Soil Mechanics and Foundations*, Mexico. *Anais...* Mexico, p. 291–340.
- Tanaka, A. (1976). *Algumas Considerações sobre a Resistência ao Cisalhamento do Solo Residual de Basalto de São Simão*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Terzaghi, K.; Peck, R. B. (1967). *Soil Mechanics in Engineering Practice*. 2. ed. New York: John Wiley & Sons.
- Tristá Aguilera, C. E.; Vargas Jr., E. do A.; Figueiredo, R. P. de (2009). *Aplicação de Métodos de Análise de Estabilidade de Taludes de Grande Altura em Mineração*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Vaughan, P. R. (1988). Characterizing the mechanical properties of *in-situ* residual soil. In: *International Conference on Geomechanics in Tropical Soils*, 2., Singapore. *Anais...* Singapore, v. 2, p. 469–487.