

Avaliação geotécnica de estabilidade de barragem de terra em solo argiloso laterítico em Bossoroca – RS

Bóris Casanova Sokolovicz

Professor do curso de Engenharia Civil, Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões, Santo Ângelo, Brasil, boriscs@san.uri.br

Beatriz Correia de Moraes

Graduanda em Engenharia Civil, Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões, Santo Ângelo, Brasil, beatrizcmoraes@aluno.santoangelo.uri.br

Alexandre Hahn Ten Cathen

Graduando em Engenharia Civil, Uninter, Santo Ângelo, Brasil, hahntencathen@gmail.com

Aline Alice Schuster Ajala

Bióloga e Engenheira Agrônoma, PSK Consultoria Ambiental LTDA, Santo Ângelo, Brasil, aline.ayala@hotmail.com

Rodrigo Gustavo Bergmann

Engenheiro Agrônomo, PSK Consultoria Ambiental LTDA, Santo Ângelo, Brasil, rodrigobergmann85@gmail.com

RESUMO: O artigo aborda a avaliação geotécnica da estabilidade de uma barragem de terra em solo argiloso laterítico em Bossoroca, Rio Grande do Sul, com o objetivo de apresentar os ensaios geotécnicos de laboratório e calcular sua estabilidade. A barragem de terra possui 17 metros de altura no ponto mais alto, foi avaliada por meio de coletas em 10 pontos ao longo do talude de jusante, incluindo ensaios como granulometria, limite de liquidez, compactação, resistência ao cisalhamento e permeabilidade. Utilizou-se o Método de Morgenstern-Price para a avaliação da estabilidade e do fator de segurança, com o software GeoStudio. Os principais aspectos analisados foram a resistência do solo, sua capacidade de suporte e permeabilidade, destacando a importância da análise detalhada da geologia e dos ensaios para garantir a segurança de estruturas geotécnicas como a barragem em estudo. Como análise final verificou-se que a barragem apresentou fator de segurança satisfatório.

PALAVRAS-CHAVE: Barragem, Estabilidade, Solo Argiloso, Solo Laterítico, Ensaios Geotécnicos.

ABSTRACT: The article addresses the geotechnical assessment of the stability of an earthen dam in lateritic clayey soil in Bossoroca, Rio Grande do Sul, with the aim of presenting the laboratory geotechnical tests and calculating its stability. The earthen dam is 17 meters high at its highest point and was evaluated through collections at 10 points along the downstream slope, including tests such as granulometry, liquidity limit, compaction, shear resistance and permeability. The Morgenstern-Price Method was used to evaluate stability and safety factor, with the GeoStudio software. The main aspects analyzed were the soil resistance, its support capacity and permeability, highlighting the importance of detailed analysis of geology and tests to guarantee the safety of geotechnical structures such as the dam under study. As a final analysis, it was found that the dam presented a satisfactory safety factor.

KEYWORDS: Dam, Stability, Clayey Soil, Lateritic Soil, Geotechnical Tests.

1 INTRODUÇÃO

Este estudo tem como objetivo investigar a estabilidade de uma barragem de terra situada em solo argiloso laterítico na região de Bossoroca, Rio Grande do Sul. Ao focar nessa avaliação geotécnica, busca-se compreender os aspectos técnicos da estrutura, garantindo, assim, a segurança e servindo de exemplo para a região circundante.

Nesse contexto, a realização de ensaios geotécnicos de laboratório desempenha um papel crucial. Além de contribuir para a determinação da estabilidade da barragem, esses ensaios fornecem insights valiosos sobre as propriedades do solo, a resistência estrutural da obra e a capacidade de suportar cargas ao longo do tempo. Tais informações não apenas orientam as medidas de manutenção e segurança da barragem, mas também têm um impacto direto na qualidade de vida e na segurança dos habitantes das áreas circunvizinhas. Portanto, este estudo não se limita a uma análise técnica, mas também destaca a importância social e ambiental de compreender e monitorar estruturas geotécnicas como essa barragem em solo argiloso laterítico.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Para uma compreensão abrangente e precisa dos procedimentos apresentados neste estudo, é imprescindível uma explicação detalhada sobre a origem e as características do solo presente no local de análise, conforme ilustrado nas Figuras 1 e 2. A integração dessas informações é essencial para fundamentar a análise geotécnica, visando assegurar a segurança e a eficiência da estrutura em questão.



Figura 1. Vulcanismo no Brasil.

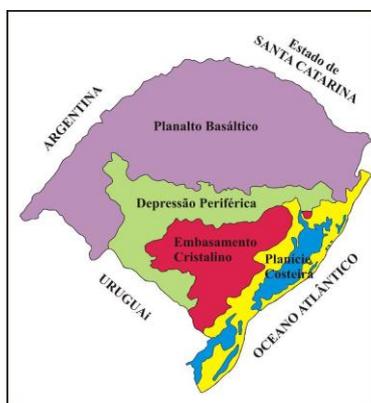


Figura 2. Regiões geológicas do RS.

Vale ressaltar que a barragem em questão está localizada na região geológica do Planalto, no Rio Grande do Sul. Esta região foi modelada por intensos processos vulcânicos que ocorreram há aproximadamente 135 milhões de anos. O produto desse vulcanismo foi uma rocha basáltica de coloração cinza, que, com o passar dos anos, devido ao intemperismo químico e físico, vai se desagregando. Durante esse processo, ocorre a laterização, que é o enriquecimento de óxidos de ferro e óxidos de alumínio, conferindo ao solo a coloração vermelha típica da Região das Missões. O óxido de ferro é responsável pela coloração, enquanto os óxidos de alumínio podem estar associados a pseudo ligações moleculares estáveis.

Casanova (1989) relata que os solos lateríticos ocorrem no Rio Grande do Sul, nas regiões do Planalto e das Missões, podendo atingir espessuras entre 15 e 20 metros. Nesses solos, predomina a fração argila. A Figura 3 apresenta a micrografia dos três principais tipos de argila.

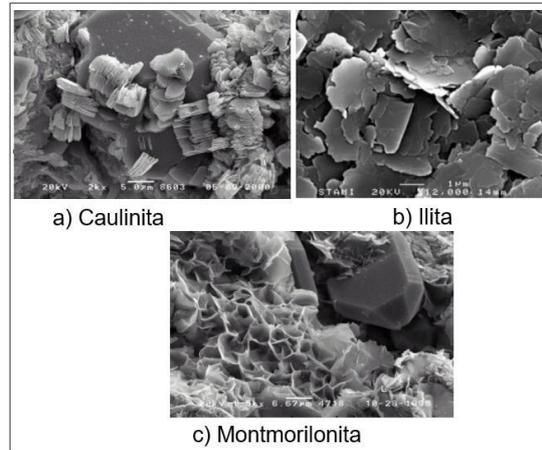


Figura 3. Micrografia dos Três Principais Tipos de Argila.

Conforme a Figura 3 nota-se que os três tipos de argilas apresentam microestrutura lamelar, ou seja, não são grãos, mas sim uma estrutura “folhada”.

As barragens de terra são estruturas essenciais na engenharia civil, projetadas para reter água mediante o uso de materiais como solo compactado. A estabilidade dessas barragens é determinada pela interação complexa entre o solo, a geometria da estrutura e os carregamentos hidráulicos. Estudos teóricos enfocam a análise de estabilidade, considerando aspectos como resistência do solo, erosão e potenciais rupturas, especialmente diante de eventos extremos (Terzaghi, 1943; Duncan & Wright, 2005).

A segurança operacional é fundamental e implica em técnicas avançadas de construção e monitoramento, visando mitigar riscos e otimizar a performance estrutural (Fannin et al., 2011; Sassa et al., 2016). A evolução no projeto e construção de barragens de terra também enfatiza a importância da sustentabilidade ambiental e da eficiência na gestão hídrica (Wagner et al., 2020). Avanços recentes destacam a aplicação de novas tecnologias para melhorar a eficácia e a durabilidade dessas estruturas, promovendo seu papel crucial no armazenamento de água, controle de cheias e geração de energia hidrelétrica (Wan et al., 2018).

3 ESTUDO DE CASO

A barragem estudada apresenta 17 metros de altura no ponto mais alto. A Figura 4 apresenta a vista superior da barragem, a Figura 5 mostra o perfil longitudinal, a Figura 6 detalha os cortes. A barragem está apoiada em cima de um perfil geológico de basalto.

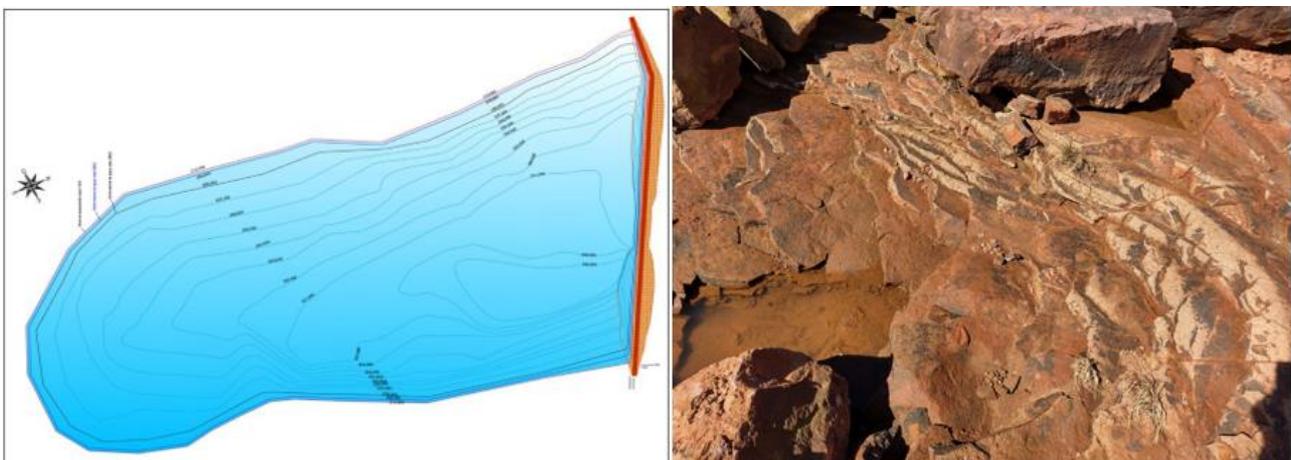


Figura 4. Vista da barragem, reservatório e fundação.

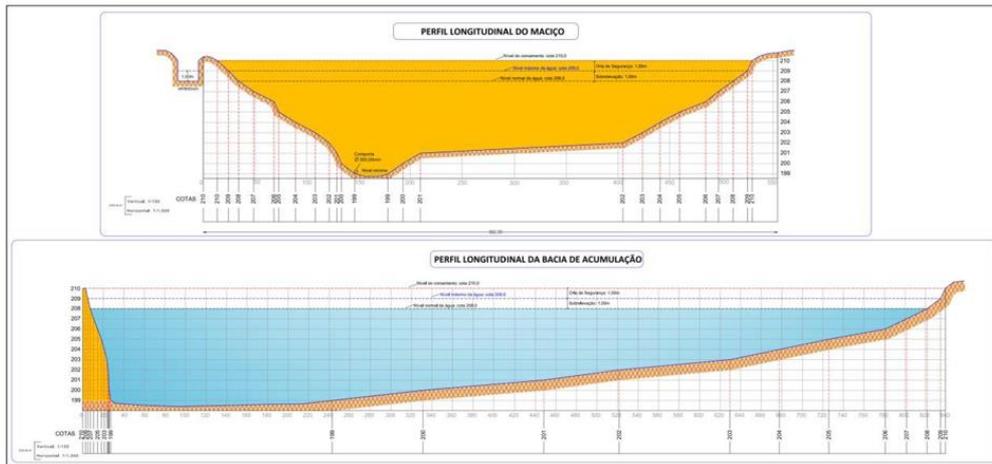


Figura 5. Perfil Longitudinal.

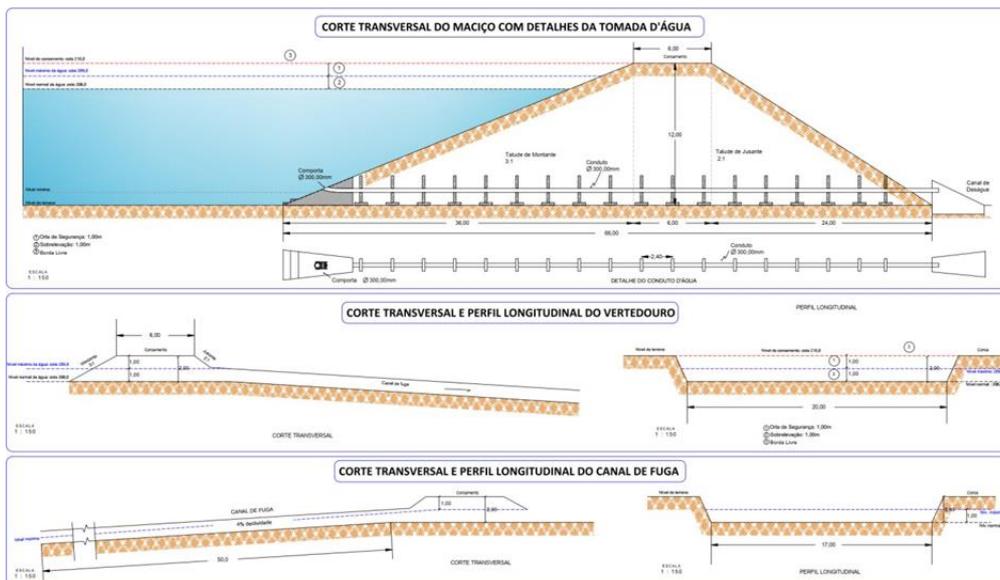


Figura 6. Corte Transversal do Barramento.

4 ENSAIOS REALIZADOS

Para uma amostragem adequada dos materiais da barragem, foram efetuadas coletas em 10 pontos ao longo do talude a jusante, conforme ilustrado na Figura 7.

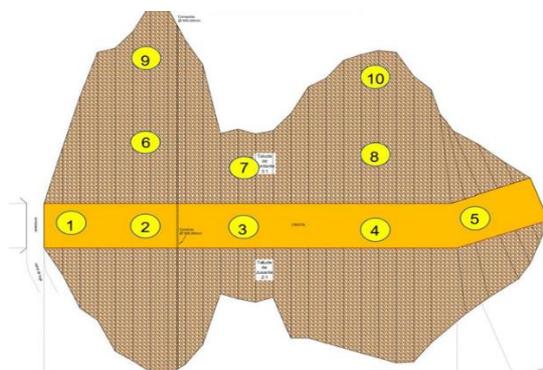


Figura 7. Pontos de Coleta de Solo ao Longo do Talude de Jusante.

4.1 Granulometria por Peneiramento e Sedimentação

O ensaio de granulometria por peneiramento e sedimentação foi realizado de acordo com as diretrizes da ABNT NBR 7181 (2018). A Tabela 1 apresenta os resultados dos pontos no local.

Tabela 1. Frações do Solo.

Ponto	Argila	Silte	Areia
1	77,60%	21,50%	0,90%
2	80,30%	19,50%	0,20%
3	82,50%	16,60%	0,90%
4	80,90%	18,50%	0,60%
5	78,90%	18,90%	2,20%
6	80,40%	17,50%	2,10%
7	79,90%	17,90%	2,20%
8	79,10%	18,20%	2,70%
9	80,20%	17,80%	2,00%
10	81,10%	18,10%	0,80%

Conforme a Tabela 1, verifica-se que a grande parcela do solo é argiloso.

4.2 Limite de Liquidez e Plasticidade

O ensaio do limite de liquidez (LL) foi realizado conforme as diretrizes da ABNT NBR 6459 (2016), enquanto o limite de plasticidade (LP) foi determinado segundo a ABNT NBR 7180 (2016). O índice de plasticidade (IP) é calculado pela diferença entre LL e LP. A Tabela 2 apresenta os resultados.

Tabela 2. Limite de Liquidez, Plasticidade e Índice de Plasticidade.

Ponto	LL	LP	IP
1	43,50%	30,10%	13,40%
2	41,20%	27,80%	13,40%
3	40,60%	25,90%	14,70%
4	43,10%	29,50%	13,60%
5	40,90%	27,10%	13,80%
6	39,60%	24,70%	14,90%
7	38,90%	24,60%	14,30%
8	41,20%	28,10%	13,10%
9	42,50%	28,60%	13,90%
10	39,60%	25,60%	14,00%

Os Índices de Plasticidade (IP) são classificados como:

- $IP \geq 15$ – Altamente Plástico
- $7 > IP > 15$ – Medianamente Plástico
- $1 > IP > 7$ – Fracamente Plástico

Conforme a Tabela 2 observa-se que todos os pontos são classificados como Medianamente Plástico.

4.3 Compactação Normal e Grau de compactação

O ensaio de compactação na energia normal foi realizado conforme as diretrizes da ABNT NBR 7182 (2020). O grau de compactação foi verificado de acordo com a ABNT NBR 9813 (2016). Os resultados dos pontos no local estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Compactação normal.

Ponto	Densidade aparente seca máxima (g/cm ³)	Umidade ótima (%)	Grau de Compactação no local (superficialmente) (%)
1	1,62	25,5%	83,6%
2	1,69	24,2%	85,6%
3	1,72	23,1%	88,1%
4	1,66	24,4%	84,1%
5	1,63	24,3%	82,6%
6	1,66	24,9%	85,1%
7	1,67	24,8%	84,1%
8	1,65	25,1%	87,8%
9	1,62	24,9%	85,1%
10	1,59	26,5%	81,3%

Conforme indicado na Tabela 3, observa-se que as densidades máximas de massa específica seca e umidade ótima foram bastante semelhantes. Quanto ao grau de compactação, variou entre 81,3% e 88,1%.

4.4 Resistência ao Cisalhamento

O ensaio de resistência ao cisalhamento do solo foi realizado de acordo com as diretrizes da ASTM D3080 - 04 (2004). A Tabela 4 apresenta os resultados dos pontos no local.

Tabela 4. Resistência ao Cisalhamento.

Ponto	Coesão (KPa = kN/m ²)	Ângulo de atrito (graus)
1	14,1	31,1
2	19,2	35,2
3	16,6	33,9
4	17,3	32,2
5	16,1	31,1
6	15,2	30,5
7	17,5	31,9
8	15,4	32,4
9	16,1	33,2
10	14,3	29,9

Conforme a Tabela 4 observa-se que tanto a coesão quanto o ângulo de atrito foram muito semelhantes.

4.5 Permeabilidade

O ensaio de permeabilidade do solo foi realizado conforme as diretrizes da ABNT NBR 14545 (2021). A Tabela 5 apresenta os resultados dos pontos analisados no local.

Tabela 5. Permeabilidade.

Ponto	Coefficiente de permeabilidade K (m/s)	Coefficiente de permeabilidade K (cm/s)
1	1,63 x 10 ⁻⁸	1,63 x 10 ⁻⁶
2	2,44 x 10 ⁻⁸	2,44 x 10 ⁻⁶
3	1,39 x 10 ⁻⁸	1,39 x 10 ⁻⁶
4	2,85 x 10 ⁻⁸	2,85 x 10 ⁻⁶
5	3,21 x 10 ⁻⁸	3,21 x 10 ⁻⁶
6	2,36 x 10 ⁻⁸	2,36 x 10 ⁻⁶
7	1,89 x 10 ⁻⁸	1,89 x 10 ⁻⁶
8	3,56 x 10 ⁻⁸	3,56 x 10 ⁻⁶
9	2,74 x 10 ⁻⁸	2,74 x 10 ⁻⁶
10	1,96 x 10 ⁻⁸	1,96 x 10 ⁻⁶

Conforme a Tabela 5 observa-se que os valores de permeabilidade foram baixos, compatíveis com o solo de granulometria argilosa, com influência do silte.

4.6 Tensão admissível pelo penetrômetro de anel dinamométrico

A Tabela 6 apresenta os resultados do ensaio para determinar a capacidade de suporte do solo.

Tabela 6. Tensão admissível pelo penetrômetro de anel dinamométrico.

Ponto	Tensão (Kgf/cm ²)
1	1,15
2	1,30
3	1,27
4	1,33
5	1,06
6	1,12
7	1,41
8	1,33
9	1,22
10	1,09

Os valores obtidos, variando de 1,06 Kgf/cm² a 1,41 Kgf/cm², indicam áreas com diferentes capacidades de suporte dentro do terreno argiloso. Essa análise foi superficial, ou seja, a 50 cm de profundidade.

5 ANÁLISE GEOTÉCNICA DE ESTABILIDADE

Para a avaliação da estabilidade da barragem e do fator de segurança, empregou-se o Método de Morgenstern-Price, considerado o mais apropriado para o presente estudo de caso. O software utilizado foi o GeoStudio e o fluxo foi considerado saturado.

Foram utilizadas as seguintes variáveis: coesão de 14 kN/m², ângulo de atrito de 33 graus, permeabilidade de $3,21 \times 10^{-8}$ m/s e peso específico de 16 kN/m³. A Figura 8 apresenta os resultados do fator de segurança. Os 10 pontos de ensaios foram avaliados e através de uma análise estatística chegou nos valores que foram utilizados no Gestudio.

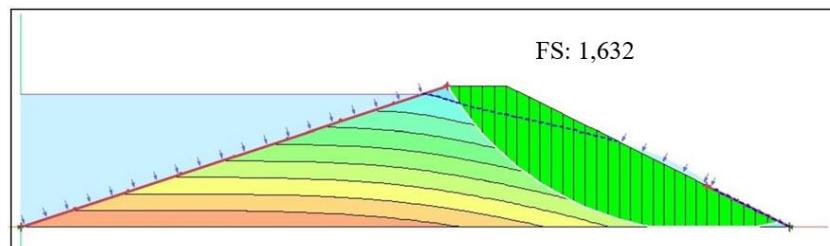


Figura 8. Fator de Segurança.

Conforme indicado na Figura 8, o fator de segurança foi de 1,632. Devido ao caráter rural da área a jusante e à ausência de riscos significativos para vidas humanas em caso de possível inundação, o fator de segurança é considerado satisfatório. A simulação foi realizada sem filtro por motivos de segurança, em conformidade com as condições observadas no local. A Figura 9 ilustra o sentido de fluxo da água no interior do maciço, enquanto a Figura 10 representa a distribuição das pressões ao longo do maciço.

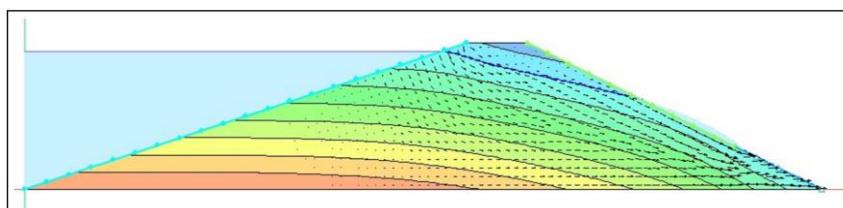


Figura 9. Sentido de fluxo da água pelo interior do maciço.

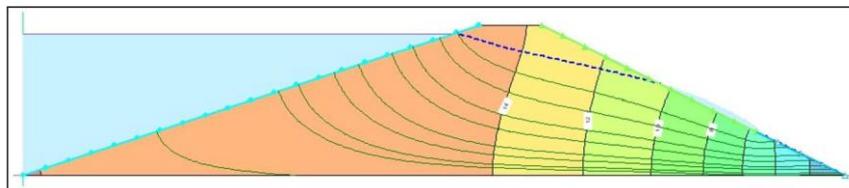


Figura 10. Distribuição das pressões ao longo do maciço.

6 CONCLUSÃO

Após a análise dos ensaios geotécnicos e dos cálculos realizados para avaliação da estabilidade da barragem, verificou-se que a estrutura atende aos critérios de segurança estabelecidos pela ABNT NBR 11682 (2009). Os ensaios realizados forneceram dados precisos e confiáveis para a análise geotécnica.

A aplicação do Método de Morgenstern-Price e a utilização do software GeoStudio possibilitaram uma avaliação abrangente da estabilidade, considerando aspectos como resistência do solo, capacidade de suporte de carga e permeabilidade. O resultado final indica que a barragem está estável diante das condições geotécnicas presentes no local de estudo. Esta conclusão é de suma importância não apenas para a segurança da estrutura, mas também para a tranquilidade e bem-estar da comunidade local e áreas circundantes, assegurando que a barragem desempenhe seu papel essencial de armazenamento e controle de água de maneira segura e eficaz.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6457: *Amostras de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização*. Rio de Janeiro, 2016.
- _____. NBR 6459: *Solo - Determinação do limite de liquidez*. Rio de Janeiro, 2017.
- _____. NBR 7180: *Solo - Determinação do limite de plasticidade*. Rio de Janeiro, 2016.
- _____. NBR 7181: *Solo - Análise granulométrica*. Rio de Janeiro, 2018.
- _____. NBR 7182: *Solo - Ensaio de compactação*. Rio de Janeiro, 2020.
- _____. NBR 9813: *Solo - Determinação da massa específica aparente in situ, com emprego de cilindro de cravação*. Rio de Janeiro, 2016.
- _____. NBR 11682: *Estabilidade de encostas*. Rio de Janeiro, 2009.
- ASTM International (2004). ASTM D3080 - 04 - *Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions*. 2004.
- CASANOVA, F.J. O ensaio de azul de metileno na caracterização de solos lateríticos. Anais da 21ª Reunião Anual de Pavimentação. Vol II, pp. 276- 286. Salvador, BA. 1986.
- DUNCAN, J. M., & Wright, S. G. (2005). *Soil Strength and Slope Stability*. John Wiley & Sons, Inc.
- FANNIN, R. J., Mackay, M., Best, A. I., Wilson, G. W., & Cassidy, M. J. (2011). The evolution of dam safety practice in Canada. *Canadian Geotechnical Journal*, 48(9), 1243-1267.
- PALEOTOCAS. Projeto de pesquisa para estudar as paleotocas na Região Sul do Brasil. UNESP, USP, UFRGS, FZB, FURG. 2021.
- PUC RIO. Argilominerais, propriedades e aplicações. Classificação Estrutural dos Argilominerais. Rio de Janeiro, 2011.
- SASSA, K., Fukuoka, H., & Wang, G. (2016). Integrated landslide disaster risk management in urban areas: Multiple-case studies from Japan. *Landslides*, 13(6), 1299-1318.
- Sociedade Brasileira de Geologia. *Vulcanismo no Brasil*. 2020.
- TERZAGHI, K. (1943). *Theoretical Soil Mechanics*. John Wiley & Sons, Inc.
- WAGNER, M., Motta, D., Schleiss, A. J., & Franca, M. J. (2020). Seismic performance assessment of embankment dams considering climate change effects: Case study of Rialb dam. *Engineering Structures*, 212, 110453.
- WAN, C., Zhao, J., Zhang, L., & Tang, H. (2018). Experimental study on the deformation characteristics of compacted clay in earth-rockfill dams under cyclic wetting and drying conditions. *Engineering Geology*, 237, 206-215.