

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/33

Avaliação geotécnica de estabilidade de barragem de terra em solo argiloso laterítico em Condor – 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 Condor, Rio Grande do Sul, com o objetivo de apresentar os ensaios geotécnicos de laboratório e calcular sua estabilidade. A barragem, construída em 2007 e com 9 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 clay laterite soil in Condor, Rio Grande do Sul, with the aim of presenting the laboratory geotechnical tests and calculating its stability. The dam, built in 2007 and 9 meters high at its highest point, 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 Condor, 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.

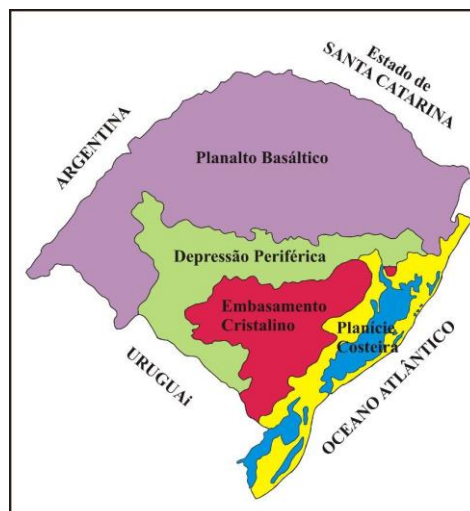


Figura 2. Regiões geológicas do RS.

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.

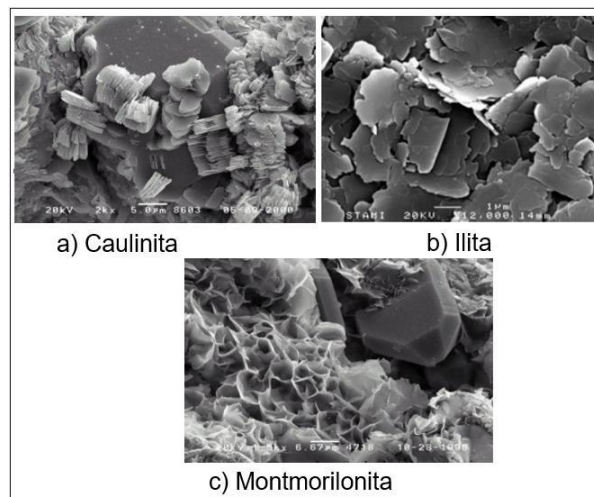


Figura 3. Micrografia dos Três Principais Tipos de Argila.

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”.

3 ESTUDO DE CASO

A barragem em estudo foi construída em 2007 e possui 9 metros de altura em seu ponto mais elevado. A Figura 4 apresenta a vista superior da barragem; a Figura 5 exhibe o perfil longitudinal da bacia de acumulação; a Figura 6 ilustra a planta baixa do barramento; e a Figura 7 detalha os cortes.

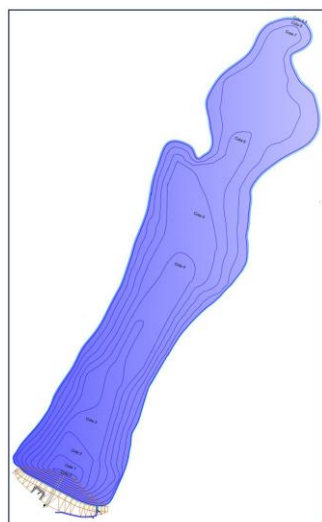


Figura 4. Vista Superior da Barragem.

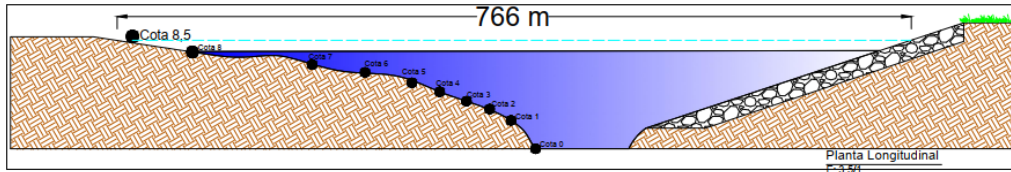


Figura 5. Perfil Longitudinal.

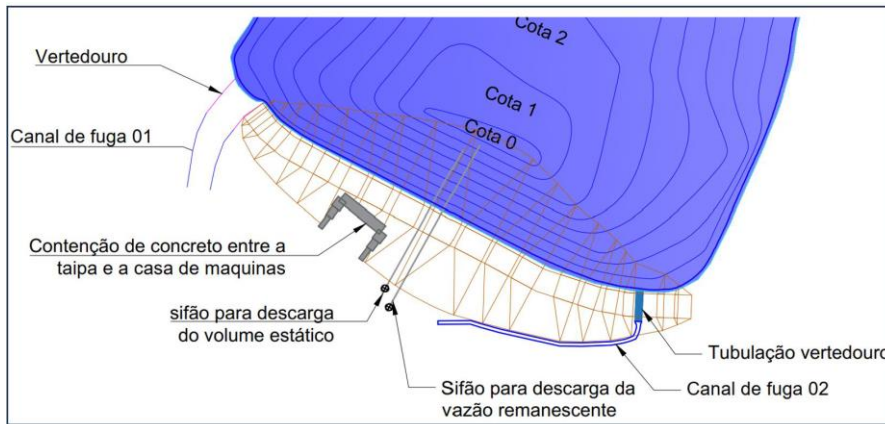


Figura 6. Vista da Planta Baixa do Barramento.

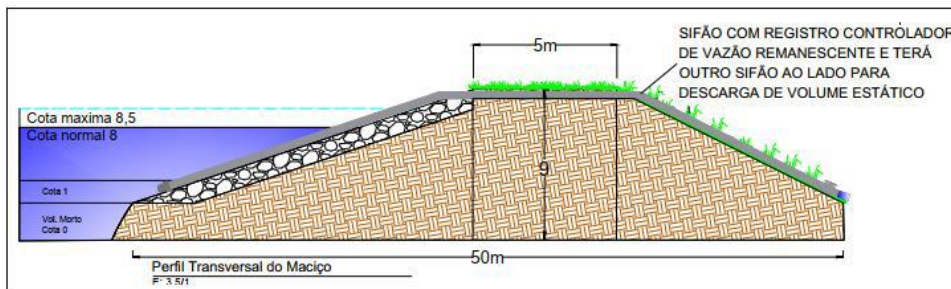


Figura 7. Corte Transversal do Barramento.

4 ENSAIOS REALIZADOS

Para uma amostragem adequada da barragem, foram realizadas coletas em 10 pontos ao longo do talude de jusante, conforme apresentada na Figura 8.

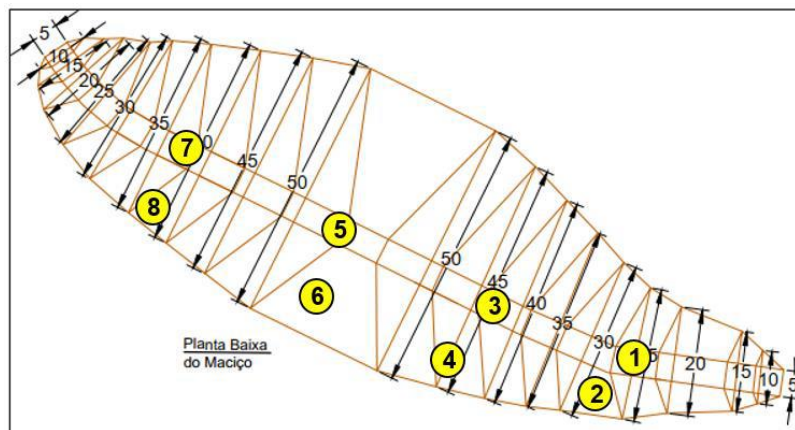


Figura 8. Pontos de Coleta de Solo ao Longo do Talude de Jusante.

4.1 Granulometria por Peneiramento e Sedimentação

O ensaio de granulometria por peneiramento e sedimentação foram realizados 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	78,20%	19,50%	2,30%
2	76,80%	20,30%	2,90%
3	77,70%	19,50%	2,80%
4	78,60%	18,70%	2,70%
5	77,30%	19,80%	2,90%
6	78,00%	18,90%	3,10%
7	78,30%	18,50%	3,20%
8	77,70%	19,50%	2,80%

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 dos pontos analisados no local.

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

Ponto	LL	LP	IP
1	43,50%	29,34%	14,16%
2	44,20%	29,80%	14,40%
3	43,50%	30,20%	13,30%
4	45,60%	32,50%	13,10%
5	44,50%	31,20%	13,30%
6	43,20%	30,20%	13,00%
7	42,80%	28,90%	13,90%
8	43,60%	31,10%	12,50%

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 Granulometria por Peneiramento e Sedimentação

O ensaio de compactação utilizando energia normal foi realizado de acordo com as diretrizes da ABNT NBR 7182 (2020). O grau de compactação foi determinado conforme a ABNT NBR 9813 (2016). A Tabela 3 apresenta os resultados dos pontos analisados no local.

Tabela 3. Compactação normal.

Ponto	Densidade aparente seca máxima (g/cm ³)	Umidade ótima (%)	Grau de Compactação no local (superficialmente) (%)
1	1,42	31,5%	83,4%
2	1,49	27,4%	88,8%
3	1,41	31,2%	82,3%
4	1,42	32,9%	83,9%
5	1,50	28,0%	89,4%
6	1,46	27,8%	87,2%
7	1,47	29,6%	88,1%
8	1,45	29,5%	87,5%

Conforme observado na Tabela 3, as densidades aparentes secas máximas e a umidade ótima foram muito semelhantes para todos os pontos avaliados.

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	17,15	31,9
8	15,4	32,4

Conforme observado na Tabela 4, tanto a coesão quanto o ângulo de atrito apresentaram valores muito semelhantes. Isso indica que o solo é de mesma origem.

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

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.

Foram utilizadas as seguintes variáveis: coesão de 16 kN/m², ângulo de atrito de 30 graus, permeabilidade de $3,21 \times 10^{-8}$ m/s e peso específico de 16 kN/m³. A Figura 9 apresenta os resultados do fator de segurança.

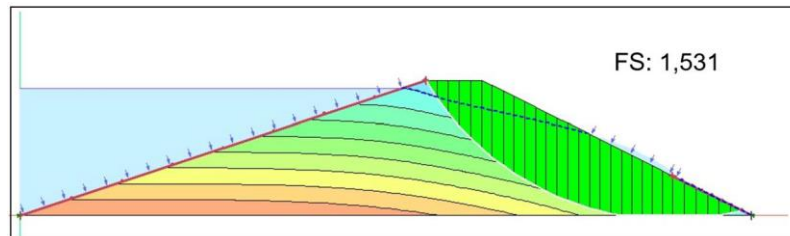


Figura 9. Fator de Segurança.

Conforme indicado na Figura 9, o fator de segurança foi de 1,531. Dado que a área a jusante é rural e não apresenta risco significativo de inundação que poderia colocar vidas em perigo, o fator de segurança é considerado satisfatório.

A simulação foi conduzida sem filtro por questões de segurança inicial. No entanto, a barragem será equipada com um filtro de pé horizontal, cuja largura corresponde a 15% da base do barramento e altura a 10% da altura do mesmo.

A Figura 10 ilustra o fluxo da água no interior do maciço, enquanto a Figura 11 mostra a dissipação das pressões ao longo do maciço. Ressalta-se que este fator de segurança é calculado após a conclusão das obras estruturais e a implementação das inclinações do talude jusante na proporção de 2 (horizontal) para 1 (vertical).

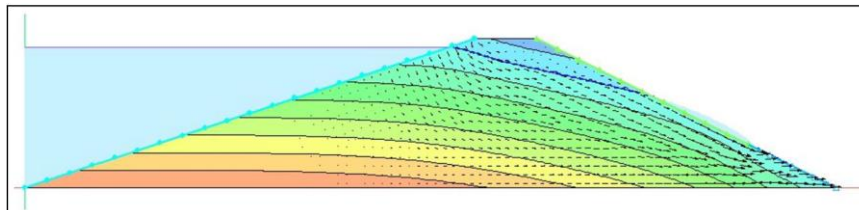


Figura 10. Sentido de fluxo da água pelo interior do maciço.

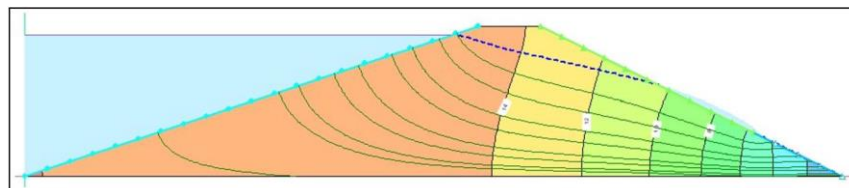


Figura 11. Dissipação das Pressões ao Longo do Maciço.

A figura 12 apresenta a proposta de reforço de jusante da barragem.

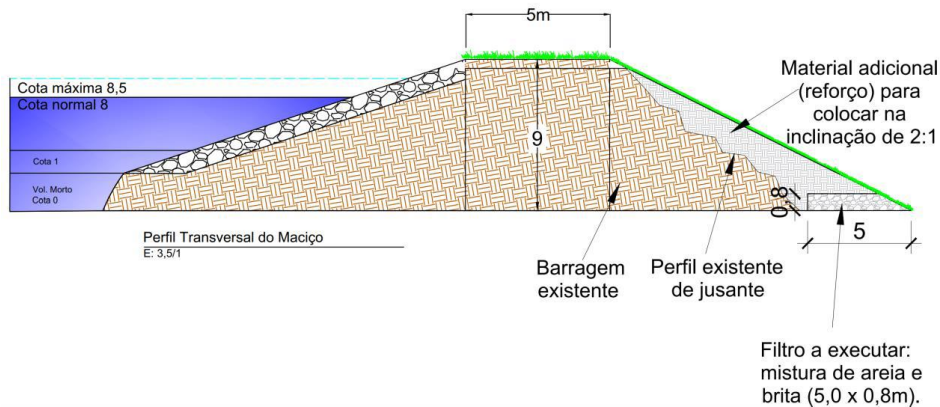


Figura 12. Reforço no Talude de Jusante

6 CONCLUSÃO

Após a análise completa dos ensaios geotécnicos e dos cálculos realizados para avaliar a estabilidade da barragem, conclui-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 o uso do software GeoStudio permitiram 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 permanecerá 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.
- 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.
- Sociedade Brasileira de Geologia. Vulcanismo no Brasil. 2020.