XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.3/27

Protótipo didático de barragem de terra zoneada: sequência de falha por galgamento para fins didáticos

Lyzandra Maria da Silva Dias
Engenheira Civil, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Angicos, Brasil, lyzandradias.eng@gmail.com

Arthur Dantas Gomes de Araújo
Professor, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Angicos, Brasil, arthur.araujo@ufersa.edu.br

Alex da Silva Dantas
Estudante, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Angicos, Brasil, alex.dantas59352@ufersa.edu.br

Adna Érica Melo de Sousa Fontes
Engenheira Civil, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Angicos, Brasil, adna.melo@ufersa.edu.br

RESUMO: Este trabalho apresenta o desenvolvimento e a simulação de uma barragem de terra zoneada em laboratório, focando na análise do comportamento do talude, sistema de drenagem interno e núcleo argiloso compactado. A pesquisa apresenta as propriedades dos materiais e a análise dos procedimentos construtivos adotados para a execução do modelo em laboratório. A metodologia utilizada incluiu a realização de ensaios laboratoriais para caracterização física dos materiais, o desenvolvimento da barragem de terra em laboratório destinado a simulação em condições de cheia. Durante a simulação, inicialmente foram observadas fissuras no talude de montante, seguido de passagem de água pelos filtros vertical e horizontal. Após o galgamento forçado pela crista foi verificado o rompimento do talude de jusante, o que possibilitou uma análise do comportamento da barragem sob condições extremas. Os resultados obtidos mostraram que o modelo desenvolvido em laboratório permitiu visualizar a formação de fissuras, o fluxo de água pelo sistema de drenagem interno e o processo de ruptura por galgamento. Essas observações possibilitaram analisar o comportamento dos principais elementos da barragem em condições extremas, evidenciando o potencial do protótipo como ferramenta didática.

PALAVRAS-CHAVE: Barragem de terra zoneada, Compactação do solo, Permeabilidade, Simulação, Estabilidade de taludes.

ABSTRACT: This study presents the development and simulation of a zoned earth dam in a laboratory setting, focusing on the analysis of the behavior of the slope, the internal drainage system, and the compacted clay core. The research presents the material properties and an analysis of the construction procedures adopted for building the laboratory model. The methodology employed included conducting laboratory tests to characterize the physical properties of the materials and constructing the earthen dam in the laboratory to simulate flood conditions. During the simulation, cracks were initially observed in the upstream slope, followed by water flow through the vertical and horizontal filters. After overtopping was forced over the crest, a breach in the downstream slope was observed, which enabled an analysis of the dam's behavior under extreme conditions. The results showed that the laboratory model made it possible to observe the formation of cracks, the flow of water through the internal drainage system, and the overtopping failure process. These observations allowed for an analysis of the behavior of the dam's main components under extreme conditions, highlighting the prototype's potential as an educational tool.

KEYWORDS: Zoned earth dam, Soil compaction, Permeability, Simulation, Slope stability.

1. INTRODUÇÃO

As barragens são grandes elementos estruturais projetados para desempenhar papéis fundamentais na sociedade, favorecendo o desenvolvimento socioeconômico e o controle ambiental (MEDEIROS, 2019). Como barreiras artificiais para retenção de água ou rejeitos, possuem finalidades diversas, que abrangem desde o controle de enchentes e irrigação até a geração de energia e abastecimento humano (RIBEIRO et al., 2019).

A diferenciação entre os tipos de barragem ocorre, primordialmente, pela variedade de materiais utilizados no maciço, podendo ser classificadas como homogêneas ou zoneadas (VIEIRA, 2015). As barragens de terra zoneadas são empregadas quando há facilidade de exploração de áreas de empréstimo com materiais argilosos e granulares distintos (GAIOTO, 2003). Nesta configuração, o núcleo de argila é frequentemente utilizado devido à sua baixa permeabilidade, funcionando como a principal barreira contra a infiltração de água.

A estabilidade dessas estruturas depende rigorosamente do controle da compactação do solo. Estudos indicam que a compactação na umidade ótima é essencial para alcançar a densidade máxima e a resistência ideal do material. Conforme García (2013), a construção de aterros deve seguir critérios técnicos rigorosos, uma vez que solos argilosos compactados de forma inadequada podem sofrer colapso ou recalques adicionais durante o enchimento do reservatório. À medida que se atinge a umidade ótima, esses riscos são minimizados, embora o excesso de umidade possa levar à perda de resistência e ao aumento da compressibilidade (GARCÍA, 2013).

Diante da complexidade que envolve o monitoramento de estruturas reais, a simulação em laboratório apresenta-se como uma estratégia eficaz. O uso de protótipos em ambientes controlados permite superar as dificuldades de observação interna e avaliar as interações entre os materiais e a dinâmica do fluxo de água.

Assim, este trabalho propõe a análise didática de um dispositivo de barragem de terra zoneada, compactado na umidade ótima e dotado de filtros de areia, visando compreender as condições que garantem a estabilidade estrutural e o desempenho dos taludes sob condições de operação.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais Utilizados

A pesquisa utilizou uma combinação de solos e agregados para simular as diferentes zonas de uma barragem. Para o núcleo impermeável e a trincheira de vedação (cut-off) empregou-se solo argiloso. Os taludes de montante e jusante foram moldados com areia siltosa e revestidos com brita nº 0. O sistema de drenagem, composto por filtros verticais e horizontais, foi composto por areia fina e média, de origem fluvial.

Foram executados ensaios de granulometria (ABNT NBR 7181/2016), limite de liquidez (ABNT NBR 6459/2016) e limite de plasticidade (ABNT NBR 7180/2016) para todos os materiais. Para o material utilizado nos filtros vertical e horizontal foram também realizados ensaios de índice de vazios máximo (ABNT NBR 16840/2020) e mínimo (ABNT NBR 16843/2020). Já para a argila utilizada no núcleo e cut-off, realizaram-se ainda os ensaios de compactação (ABNT NBR 7182/2016) com energia Proctor normal, com secagem prévia do material, e ensaio de permeabilidade com carga variável (ABNT NBR 14545/2021).

2.2 Construção do protótipo de barragem

A estrutura do protótipo foi confeccionada em madeirite naval (base e extremidades) e vidro temperado de 8 mm de espessura, nas laterais, permitindo a visualização externa da seção da barragem. A vedação foi assegurada com silicone acético, sela-trincas e argamassa polimérica.

A construção da barragem seguiu uma sequência de etapas iniciada pela disposição de uma camada de 5 cm de brita n° 2 e a execução de uma trincheira de vedação. O núcleo foi compactado em quatro camadas, no teor de umidade ótimo igual a 24%. Devido à sensibilidade estrutural do protótipo, a energia de compactação foi adaptada, utilizando-se 80 golpes por camada com uma altura de queda reduzida para 15 cm, seguida de escarificação para garantir a aderência entre camadas. Simultaneamente ao núcleo, foram executados os filtros vertical e horizontal, compostos por areia. Os taludes de montante e jusante foram

moldados com um solo composto por areia siltosa, com inclinações de aproximadamente 42º e 40º, respectivamente. A superfície dos taludes e o dreno de pé foram executados com o uso de brita n°0. A Figura 1 apresenta algumas etapas de construção do protótipo e da barragem, enquanto a Figura 2 apresenta o desenho esquemático com as dimensões do protótipo e da seção da barragem.



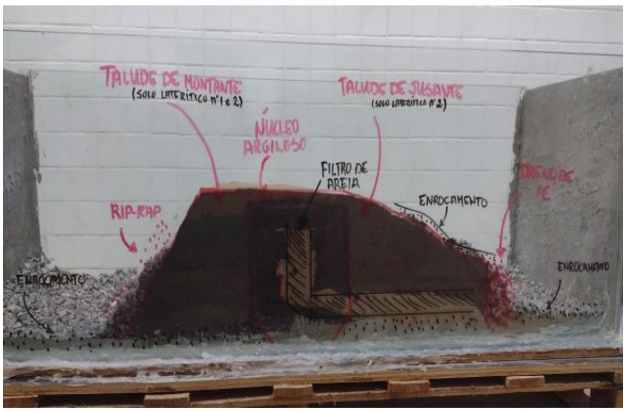
(a) Vista do protótipo de barragem



(b) Impermeabilização da base



(c) Execução do filtro horizontal



(d) Barragem finalizada

Figura 1: Construção do protótipo de barragem no laboratório

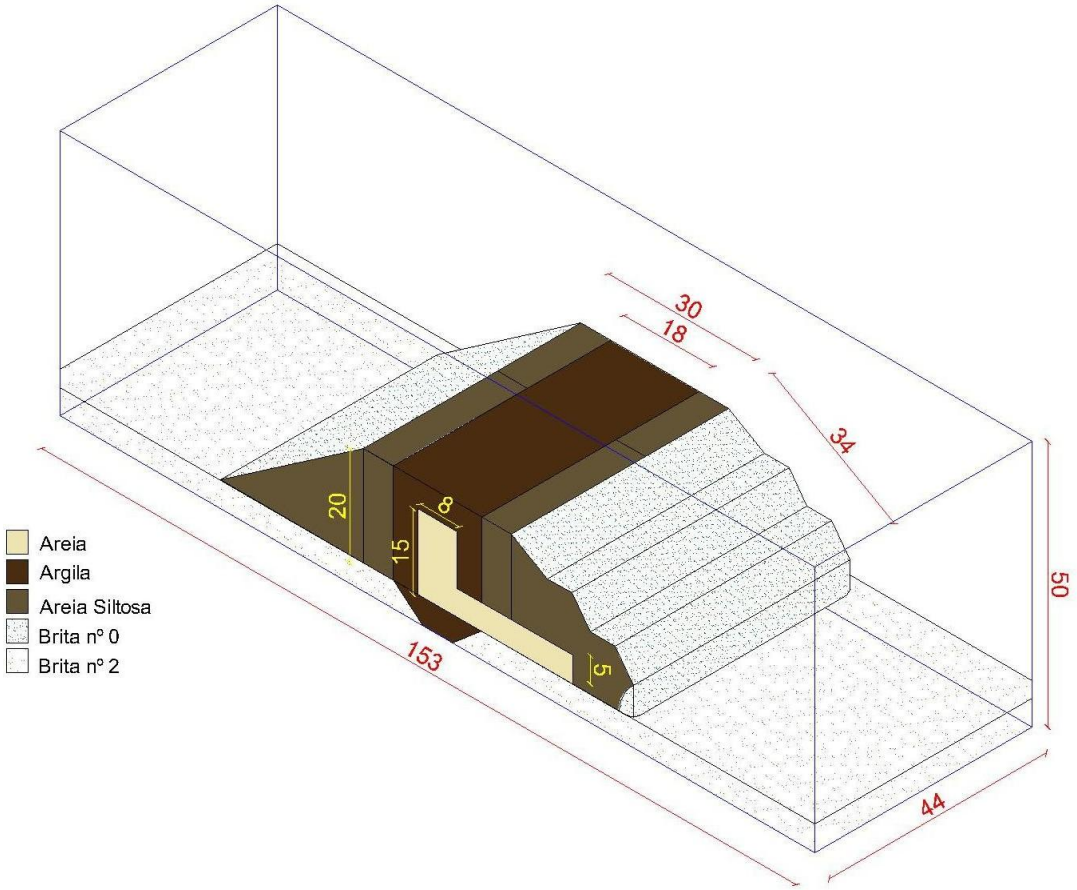


Figura 2: Desenho esquemático do protótipo e da barragem executada.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Caracterização Geotécnica dos Materiais

Os ensaios de caracterização física permitiram classificar os materiais conforme o sistema unificado de classificação do solo (SUCS). O material usado no núcleo e cut-off, apresentou 58% de argila, 37% de silte e 5% de areia fina. Os resultados de LL e LP foram iguais a 64% e 27,5%, respectivamente, resultando em um Índice de Plasticidade de 36,5%. Tais valores o caracterizam como uma argila inorgânica de alta plasticidade (CH), ideal para núcleos impermeáveis devido à sua baixa condutividade hidráulica, que foi confirmada através de ensaio de permeabilidade com carga variável com valores na ordem de 10^{-8} cm/s.

O ensaio de compactação da argila usada no núcleo, revelou um comportamento com pico duplo, com a massa específica aparente seca máxima de 1,50 g/cm³ ocorrendo em dois teores de umidade (9,6% e 24%). Durante o processo de compactação foi utilizada a umidade ótima de 24%, visando garantir a maior estanqueidade e deformabilidade do núcleo, conforme indicado por Gaioto (2003) reduzindo os riscos de fissuração na estrutura.

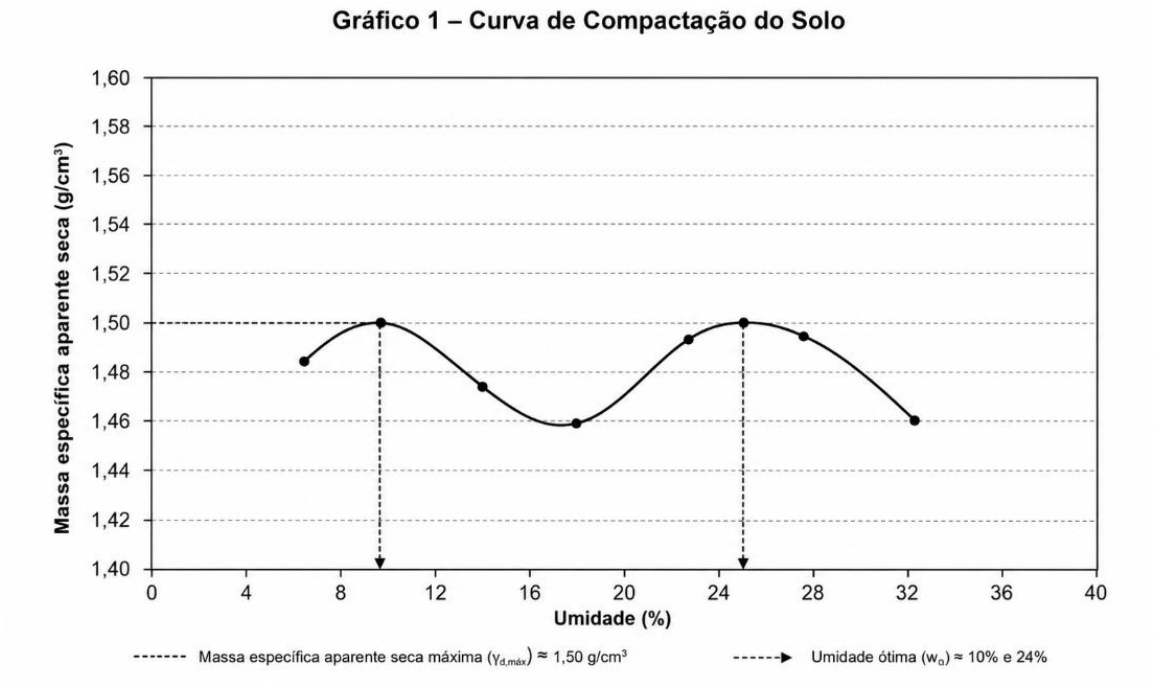


Figura 3: Resultado do ensaio de compactação.

Em relação ao material utilizado no sistema de drenagem interna, a areia empregada no filtro apresentou predominância de fração arenosa, sendo composta por 23% de areia fina, 69% de areia média e 8% de areia grossa, sem presença relevante de finos (silte e argila). A partir dessa distribuição granulométrica, o material foi classificado como areia bem graduada (SW). Essa condição favorece sua utilização como material filtrante, uma vez que proporciona boa permeabilidade, permitindo o escoamento da água percolada, ao mesmo tempo, em que dificulta o transporte de partículas mais finas provenientes do núcleo.

O solo utilizado na moldagem dos taludes de montante e jusante é composto por 6% de argila, 25% de silte, 19% de areia fina, 32% de areia média, 13% de areia grossa e 5% de pedregulhos. O limite de liquidez e de plasticidade foram iguais a 19% e 12%, respectivamente, indicando o índice de plasticidade igual a 7%. De acordo com a classificação unificada, o solo foi classificado como uma areia siltosa (SM).

Por fim, a brita utilizada no dreno de pé e na proteção dos taludes apresentou granulometria grossa e ausência de finos, classificada como pedregulho bem graduado (GW). Sua utilização, associada ao filtro arenoso, assegura um sistema eficiente de drenagem interna, fundamental para o desempenho da barragem. Além de ser um material adequado para simular o enrocamento utilizado na proteção dos taludes de montante e jusante. A Tabela 1 apresenta o resumo das propriedades geotécnicas dos materiais utilizados na barragem.

Tabela 1: Propriedades e classificação dos materiais empregados na barragem.

Material	**Composição granulométrica**	**LL (%)**	**LP (%)**	**IP (%)**	**Classificação (SUCS)**
Núcleo / Cut-off	58% argila, 37% silte, 5% areia fina	64	27,5	36,5	CH – Argila inorgânica de média a alta compressibilidade
Filtro	23% areia fina, 69% areia média, 8% areia grossa				SW – Areia bem graduada
Taludes (montante e jusante)	6% argila, 25% silte, 19% areia fina, 32% areia média, 13% areia grossa, 5% pedregulho	19	12	7	SM – Areia siltosa
Rip-rap / Dreno de pé	Predomínio de pedregulho, ausência de finos				GW – Pedregulho bem graduado

3.2 Comportamento do sistema de drenagem interno

Inicialmente, o reservatório foi preenchido com água até a altura igual a 10 cm da base, ou seja, metade da altura do barramento. Após 7 minutos, foi observado a percolação de água no talude de montante, seguida do núcleo até atingir o filtro vertical. Esse comportamento evidenciou a eficiência do sistema de drenagem interna em rebaixar a linha freática, impedindo que a saturação atingisse o talude de jusante. Durante todo o processo, o núcleo manteve-se visualmente íntegro. A Figura 4 apresenta o reservatório parcialmente cheio e o funcionamento dos filtros vertical e horizontal.



Figura 4: Percolação inicial da água no interior da barragem.

3.3 Análise de Ruptura

A fase crítica do experimento foi atingida com o galgamento forçado (Figura 5,a). Antes da passagem da água sobre a crista, o aumento das poropressões e a saturação do solo provocaram o surgimento de fissuras longitudinais no talude de montante (Figura 5,b) e transversais entre o núcleo e a aba de jusante. Essas fissuras indicam provável concentração de tensões e a perda de resistência ao cisalhamento do material.



(a) Percolação após 25 min



(b) Aparecimento de Fissuras

Figura 5: Ruptura da barragem: (a) Elevação do nível de água no reservatório. (b) Surgimento de fissuras longitudinais no talude de montante.

Com o galgamento, a erosão superficial acelerou a falha estrutural, resultando em uma rachadura profunda que expôs a seção zoneada da barragem (Figura 6). O colapso final demonstrou que, embora os filtros tenham cumprido seu papel hidráulico durante a operação normal, o galgamento permanece como a condição de ruptura mais severa para barragens de terra, reforçando a importância do dimensionamento adequado de vertedouros em estruturas reais.



Figura 6: Rompimento da barragem após galgamento.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A simulação laboratorial de uma barragem de terra zoneada demonstrou ser uma ferramenta eficaz para a melhor compreensão didática de percolação e instabilidade em barragens de terra. Com esse estudo, foi possível construir um protótipo adequado para simular barragens de terra, o que permitiu observar o comportamento de diferentes materiais aplicados.

Os filtros vertical e horizontal demonstraram eficácia no controle da percolação de água, assegurando a integridade da barragem no período observado. Desse modo, o uso de filtros e do cut-off contribuiu para a estabilidade estrutural. No entanto, durante o galgamento forçado, observou-se o aparecimento de fissuras

longitudinais no talude de montante e, posteriormente, o colapso do talude de jusante, uma característica comum associada a rupturas de barragens.

Conclui-se que a simulação em laboratório da eficiência do sistema de drenagem interno e do colapso de uma barragem se configurou como uma ferramenta valiosa para fins didáticos, permitindo a análise crítica de cada etapa estudada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT (2016). NBR 7182: *Solo – Ensaio de compactação.* Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT (2021). NBR 14545: *Solo – Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos à carga variável*. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT (2020). NBR 16840: *Solo – Determinação do índice de vazios máximos de solos não coesivos*. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT (2020). NBR 16843: *Solo – Determinação do índice de vazios mínimos de solos não coesivos*. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT (2016). NBR 6459: *Solo – Determinação do limite de liquidez*. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT (2016). NBR 7180: *Solo – Determinação do limite de plasticidade*. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT (2016). NBR 7181: *Solo – Análise granulométrica*. Rio de Janeiro.

GAIOTO, N. (2003). *Introdução ao projeto de barragens de terra e de enrocamento*. São Carlos: EESC-USP. 126 p.

GARCÍA, J. A. B. (2013). *Análise de comportamento de barragens construídas com núcleos argilosos compactados no ramo super úmido*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade de Brasília. Disponível em: http://icts.unb.br/jspui/handle/10482/15402. Acesso em: 15 jul. 2024.

MEDEIROS, M. A.; SOUZA, W. A. R. (2019). *Modos de falha, risco e potencial de liquefação em barragens de rejeito*. Brasília: UNB.

RIBEIRO, L. F. dos S.; Dantas, A. A. N.; Silva, L. S. F.; Júnior, P. M.; Silva, R. H. de M.; Camozzi, A. B. F.; Mendes, T. A. (2019). *Development of geotechnical didactic device in support of civil engineering courses – rockfill dam*. In: XVI Congresso Pan-Americano de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (XVI PCSMGE), Sessão Técnica S18 – Educação.

VIEIRA, G. M. L. *Análise da percolação de água em barragem de terra pelo método da eletrorresistividade*. 2015. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Universidade Estadual Paulista, Campus de Rio Claro, 2015.