DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.1/29

Caracterização Geotécnica de Solos Tropicais para Núcleos Impermeáveis em Pequenas Barragens no Semiárido Brasileiro

Dennis Oliveira Galdino
Doutorando em Engenharia ambiental, Instituto Federal, Patos-PB, Brasil, dennis.galdino@ifpb.edu.br

Athirson Erick Lopes da Silva
Bacharelando em Engenharia civil, Instituto Federal, Patos-PB, Brasil, athirson.erick@academico.ifpb.edu.br

RESUMO: A construção de pequenos barramentos para captação de águas pluviais constitui uma alternativa estratégica para o semiárido brasileiro, especialmente no apoio à agricultura familiar. A escolha adequada dos solos é essencial para garantir estabilidade, durabilidade e eficiência hidráulica dessas estruturas. Este estudo caracteriza as propriedades geotécnicas de solos tropicais utilizados em dois reservatórios rurais na região de Campina Grande-PB. Foram realizados ensaios de caracterização física, análise granulométrica, limites de consistência, compactação e permeabilidade, seguindo normas da ABNT. Os resultados indicaram solos bem graduados, com teores de finos adequados para conferir impermeabilidade, plasticidade moderada e boa capacidade de densificação. A permeabilidade apresentou valores compatíveis com o uso em núcleos impermeáveis de barragens de terra. A classificação pelo SUCS confirmou a adequabilidade dos materiais, permitindo a proposição de critérios técnicos para seleção e utilização em obras de captação hídrica. Os achados reforçam a viabilidade de aproveitamento de solos locais na construção de barramentos rurais, fornecendo base científica para otimização de projetos no semiárido e contribuindo com soluções práticas para agricultores e engenheiros da região.

PALAVRAS-CHAVE: Solos tropicais; Barramentos rurais; Caracterização geotécnica; Semiárido; Classificação de solos.

ABSTRACT: The construction of small dams for rainwater harvesting is a strategic alternative for Brazil's semi-arid region, particularly in supporting family farming. Proper soil selection is essential to ensure the stability, durability, and hydraulic efficiency of these structures. This study characterizes the geotechnical properties of tropical soils used in two rural reservoirs located in the Campina Grande-PB region. Physical characterization, grain size analysis, consistency limits, compaction, and permeability tests were conducted in accordance with ABNT standards. The results indicated well-graded soils with fine contents suitable for providing impermeability, moderate plasticity, and good densification capacity. Permeability values were compatible with the use of these soils in impermeable cores of earth dams. The SUCS classification confirmed the suitability of the materials, allowing the proposal of technical criteria for their selection and application in water harvesting structures. The findings reinforce the feasibility of using local soils in the construction of rural dams, providing a scientific basis for project optimization in the semi-arid region and contributing practical solutions for farmers and engineers.

KEYWORDS: Tropical soils; Rural dams; Geotechnical characterization; Semi-arid region; Soil classification.

1 INTRODUÇÃO

A escassez hídrica é um dos principais desafios para o desenvolvimento sustentável em regiões semiáridas, comprometendo a produção agrícola, a segurança alimentar e a qualidade de vida das populações rurais. No contexto nordestino, a implantação de pequenos barramentos tem se mostrado uma solução eficaz para armazenamento de águas pluviais e mitigação da irregularidade das chuvas. Essas estruturas, conhecidas como açudes, barreiros ou reservatórios rurais, desempenham papel fundamental no abastecimento para consumo humano e animal, além de garantir suporte às atividades agropecuárias.

A qualidade dos barramentos depende diretamente da seleção dos materiais empregados, em especial os solos. Os mesmos devem apresentar resistência mecânica suficiente, deformidade controlada e baixa permeabilidade, de modo a assegurar estabilidade estrutural e eficiência hidráulica. Assim, a caracterização geotécnica detalhada é etapa essencial no planejamento e execução de obras de captação hídrica.

Estudos prévios no semiárido nordestino têm mostrado que a caracterização granulométrica e a plasticidade dos solos são parâmetros determinantes para a escolha de materiais em barragens (MARQUES et al., 2015). Trabalhos mais recentes também destacam a importância de se avaliar a permeabilidade e o comportamento de solos não saturados em condições de colapso, já que esses fatores influenciam diretamente a segurança e a durabilidade das estruturas (LOBO NETO; SILVA FILHO; LOPES, 2018). Além disso, a literatura recomenda que os solos sejam classificados segundo sistemas padronizados, como o SUCS e o SiBCS, de forma a padronizar critérios técnicos e permitir comparações regionais (EMBRAPA ,2020).

A região de Campina Grande-PB, situada no Planalto da Borborema, apresenta solos residuais derivados de rochas cristalinas submetidas a intenso intemperismo, com propriedades que influenciam diretamente sua adequação em obras de terra. O estudo desses materiais possibilita identificar potenciais de aplicação, reduzir custos construtivos e valorizar recursos locais.

Este trabalho tem como hipótese que os solos da região apresentam características geotécnicas favoráveis para utilização em pequenos barramentos. O objetivo geral é caracterizar integralmente essas propriedades, propondo critérios técnicos para seleção de materiais. Os objetivos específicos incluem: Determinar a distribuição granulométrica e a classificação dos solos, avaliar os limites de consistência e comportamento plástico da fração fina, caracterizar parâmetros de compactação e permeabilidade, verificar a adequabilidade dos solos para diferentes componentes dos barramentos, estabelecer recomendações técnicas para aproveitamento em obras de captação hídrica no semiárido.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa foi realizada no Sítio Lucas, localizado na zona rural de Campina Grande, estado da Paraíba (Planalto da Borborema), região caracterizada por clima semiárido com precipitação média anual de 800 mm concentrada entre dezembro e maio, e altitude média de 550 m. As condições climáticas e a presença de solos residuais tropicais tornam o local adequado para o estudo de barragens de pequeno porte utilizadas em captação de águas pluviais (MARQUES et al., 2015; STEPHENS, 2010).

Foram analisados dois reservatórios de terra, ambos construídos de forma artesanal. O Reservatório 1 possui altura máxima de 3,5 m e capacidade aproximada de 2.000 m³, enquanto o Reservatório 2 apresenta altura de 3,0 m e capacidade de 1.500 m³.

As coletas de solo foram realizadas em diferentes pontos dos reservatórios, abrangendo tanto o corpo da barragem quanto áreas de empréstimo adjacentes. O objetivo foi identificar o comportamento geotécnico e o potencial de uso desses materiais em obras de terra de pequeno porte. As amostras foram retiradas em profundidades de até 1,5 m, acondicionadas em sacos plásticos, devidamente identificadas e encaminhadas ao laboratório para caracterização.

2.1 Caracterização dos locais e coleta das amostras

A caracterização dos locais de coleta considerou aspectos como profundidade, tipo de solo, cor, drenagem e observações de campo. As informações estão resumidas no Quadro 1.

Quadro 1 - Caracterização dos locais e coleta das amostras

Reservatórios	Localização	Profundidade (m)	Tipo de solo	Cor (Munsell)	Condições de drenagem	Observações
R1	Sítio Lucas – Zona rural de Campina Grande (PB)	1,5	Areia argilosa bem graduada	7.5YR 5/6	Moderada	Presença de concreções lateríticas dispersas
R2	Sítio Lucas – Zona rural de Campina Grande (PB)	1	Areia fina com silte e argila	10YR 4/4	Baixa	Material mais plastico e coeso

Fonte: Elaborado pelo autor (2025), com base em observações de campo e registros laboratoriais.

2.2 Ensaios laboratoriais e classificação dos solos

As amostras foram submetidas a ensaios de caracterização física e geotécnica, conforme metodologias padronizadas pela ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). As análises realizadas incluíram granulometria, limites de Atterberg, compactação, permeabilidade e massa específica dos grãos.

Todos os ensaios seguiram rigorosamente as normas correspondentes, permitindo a determinação de parâmetros essenciais para a avaliação da aptidão construtiva dos solos.

A classificação final foi realizada conforme o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS) (ASTM D2487:2021) e o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS) (EMBRAPA, 2020).

Os detalhes metodológicos estão apresentados no **Quadro 2**, que sintetiza os ensaios aplicados, as normas utilizadas e os parâmetros obtidos.

Quadro 2 – Ensaios realizados, normas aplicadas e classificação dos solos

Tipo de Ensaio	Norma técnica	Parâmetros obtidos
Análise granulométrica	ABNT NBR 7181:2016	D_{10}, D_{30}, D_{60}, Cu, Cc
Limites de Atterberg	ABNT NBR 6459:2010	LL, LP, IP
Compactação (Proctor Normal)	ABNT NBR 7182:2016	ρd_{max}, w_{opt}
Permeabilidade (carga variável)	ABNT NBR 14545:2000	k(cm/s)
Massa específica dos grãos	ABNT NBR:6508:2016	ρ_S

Fonte: Elaborado pelo autor (2025), conforme normas ABNT e resultados laboratoriais.

2.3 Procedimentos de análise

Após os ensaios, os dados obtidos foram processados por meio de planilhas eletrônicas, permitindo o cálculo de parâmetros derivados, como coeficiente de uniformidade (Cu) e curvatura (Cc). Os resultados de granulometria foram representados graficamente (Figura 1).

Os valores de densidade seca máxima (ρd_{max}) e umidade ótima (w_{opt}) foram determinados a partir do ponto de inflexão da curva, conforme metodologia de Pinto (2006) e Head (2014). Por fim, os resultados foram confrontados com os limites de adequação propostos por Stephens (2010) e Das (2017) para solos empregados em barragens de terra, subsidiando a análise crítica apresentada na seção de discussão.

3 RESULTADOS

3.1 Análise granulométrica

Os resultados da análise granulométrica indicam que os materiais coletados apresentam distribuição predominantemente arenosa, característica típica de solos residuais do Planalto da Borborema (MARQUES et al., 2015; BORGES; FERREIRA; AMORIM, 2023). A Amostra 1, proveniente do Reservatório 1, apresentou 66,3 % de areia, 18,3 % de cascalho e 15,4 % de finos, enquanto a Amostra 2 apresentou 69,5 % de areia, 12,7 % de cascalho e 17,8 % de finos.

Os coeficientes de uniformidade (Cu) e curvatura (Cc) indicaram solos bem graduados, com Cu = 28,4 e Cc = 1,8 para a Amostra 1 e Cu = 22,1 e Cc = 1,4 para a Amostra 2, o que demonstra boa compactabilidade e estabilidade estrutural (HEAD, 2014; PINTO, 2006).

Essa distribuição granulométrica é ideal para camadas de barragens de pequeno porte, pois confere equilíbrio entre permeabilidade e resistência, conforme observações semelhantes em barramentos estudados por Stephens (2010) e Silva (2022).

3.2 Limites de consistência e plasticidade

Os resultados dos limites de Atterberg, estão representados abaixo.

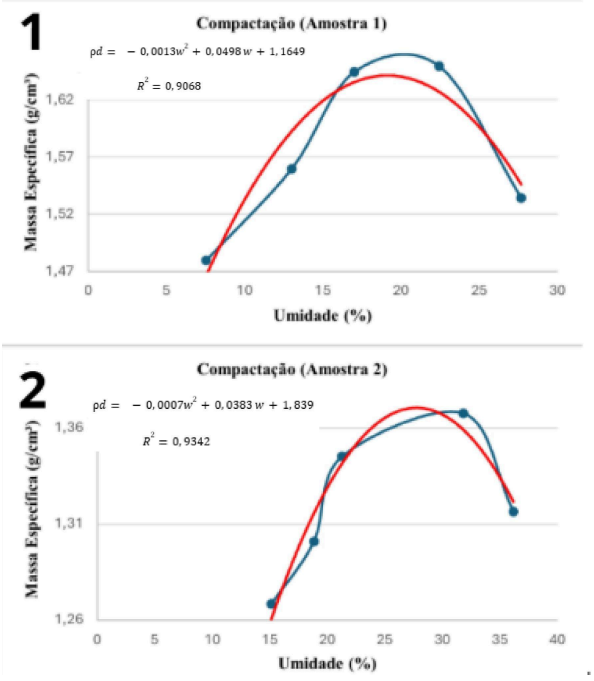
- **Amostra 1:** LL = 32,4 %, LP = 18,6 %, IP = 13,8 %;
- **Amostra 2:** LL = 29,7 %, LP = 16,9 %, IP = 12,8 %.

Esses valores indicam plasticidade média, dentro da faixa considerada adequada para materiais de núcleo impermeável de barragens (IP entre 7 e 17 %) (PINTO, 2006; DAS, 2017). A atividade da argila (A) variou de 2,7 a 3,3, apontando para presença de minerais do grupo caulinita e óxidos de ferro, típicos de solos tropicais não expansivos (SILVA; FERREIRA, 2018).

3.3 Ensaio de compactação

As curvas de compactação obtidas pelo ensaio Proctor Normal (NBR 7182:2016) estão apresentadas na Figura 1. Observa-se o formato parabólico regular característico de solos arenosos com teor moderado de finos.

Figura 1 – Curvas de compactação (Proctor Normal) das amostras analisadas.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Os resultados indicaram:

- **Amostra 1:** ρd_{max} = 1,646 g/cm³ e w_{opt} = 19,7 %;
- **Amostra 2:** ρd_{max} = 1,354 g/cm³ e w_{opt} = 26,5 %.

Essas diferenças refletem a variação granulométrica e a fração de finos de cada solo. A Amostra 1, mais arenosa e bem graduada, apresentou maior densificação e menor umidade ótima, enquanto a Amostra 2, mais fina e plástica, demandou umidade mais elevada para atingir sua densidade máxima (HEAD, 2014; WASILAH et al., 2020).Essas diferenças refletem a variação granulométrica e a fração de finos de cada solo. A Amostra 1, mais arenosa e bem graduada, apresentou maior densificação e menor umidade ótima, enquanto a Amostra 2, mais fina e plástica, demandou umidade mais elevada para atingir sua densidade máxima (HEAD, 2014; WASILAH et al., 2020).

3.4 Ensaio de permeabilidade

O ensaio de carga variável, conforme a NBR 14545:2000, indicou valores de permeabilidade compatíveis com o uso dos solos em barragens de pequeno porte. A Amostra 1 apresentou coeficiente de permeabilidade (k) igual a $3{,}2 \times 10^{-5}$ cm/s, enquanto a Amostra 2 apresentou $1{,}8 \times 10^{-5}$ cm/s.

Estes valores enquadram-se nos limites recomendados pela Food and Agriculture Organization (FAO) (STEPHENS, 2010) e DAS (2017) para materiais de núcleo impermeável, que sugerem $k \leq 10^{-4}$ cm/s. A diferença entre as amostras reflete a influência da fração fina: a Amostra 2, com maior teor de silte e argila, apresentou menor permeabilidade, devido à redução da continuidade dos poros e aumento da coesão entre as partículas.

Esse comportamento é típico de solos tropicais de textura média a fina, como descrito por Silva (2022) e Wasilah et al. (2020), e reforça o potencial de utilização desses materiais na construção de núcleos impermeáveis de barragens de terra.

3.5 Massa específica dos grãos

Os valores de massa específica dos grãos (ρ_s) foram:

- **Amostra 1:** 2,671 g/cm³;
- **Amostra 2:** 2,684 g/cm³.

Esses valores são ligeiramente superiores ao do quartzo puro (2,65 g/cm³), indicando a presença de minerais pesados como hematita e goethita, o que confirma o caráter laterítico do solo (EMBRAPA, 2020; SILVA, 2022).

3.5 Classificação dos solos

Com base nos resultados dos ensaios, as amostras foram classificadas conforme o Sistema Unificado (SUCS) e o Sistema Brasileiro (SiBCS), apresentados no Quadro 3.

Quadro 3 – Classificação final dos solos segundo SUCS e SiBCS

Amostra	Sistema Unificado (SUCS)	Parametros obtidos	Sistema Brasileiro (SiBCS)	Classificação SiBCS	Uso tecnico recomendado
Amostra 1	ASTM D2487:2021	SC - Areia argilosa	Embrapa (2020)	Argiloso amarelo eutrófico	Núcleo impermeavel da barragem
Amostra 2	ASTM D2487:2022	SW-SC- Areia bem graduada com argila	Embrapa (2020)	Argiloso amarelo eutrófico	Zona de transição ou corpo da barragem

Fonte: Elaborado pelo autor (2025), com base nos resultados laboratoriais e sistemas de classificação SUCS e SiBCS.

4 DISCUSSÃO

A análise dos resultados evidencia que os solos avaliados apresentam características favoráveis à aplicação em estruturas de barragens de pequeno porte, especialmente em áreas rurais do semiárido. As propriedades granulométricas e de plasticidade observadas indicam um comportamento geotécnico equilibrado entre permeabilidade e resistência, o que é essencial para o desempenho hidráulico e a estabilidade dessas estruturas.

Segundo Pinto (2006) e Head (2014), a presença de uma fração arenosa bem distribuída, associada a um teor moderado de finos plásticos, confere ao solo boa trabalhabilidade durante a compactação e baixa suscetibilidade à fissuração. Esse comportamento foi verificado nas amostras analisadas, que apresentaram índices de plasticidade médios (12–14 %), semelhantes aos observados por Marques et al. (2015) em solos empregados em barragens subterrâneas no Sertão alagoano.

Os resultados do ensaio de compactação confirmam o bom potencial de adensamento dos solos locais, em especial da Amostra 1, que apresentou maior massa específica seca máxima (1,646 g/cm³) e menor umidade ótima (19,7 %). Esses valores estão dentro das faixas reportadas por Wasilah et al. (2020) e Silva e Ferreira (2018) para solos tropicais arenosos compactados sob energia normal. De acordo com Das (2017) e Stephens (2010), densidades superiores a 1,60 g/cm³ em solos arenosos com teor de finos entre 10 % e 20 % indicam excelente desempenho estrutural e baixa deformabilidade, características desejáveis para o corpo da barragem e para camadas de fundação.

No que se refere à permeabilidade, os coeficientes médios obtidos ($1{,}8 \times 10^{-5}$ a $3{,}2 \times 10^{-5}$ cm/s) enquadram-se nos limites recomendados pela FAO (Stephens, 2010) para materiais de núcleo de barragens de terra. Valores semelhantes foram relatados por Silva (2022) e Lobo Neto et al. (2018) em solos residuais compactados do Nordeste, demonstrando que, mesmo em condições tropicais, é possível alcançar níveis adequados de impermeabilidade sem a necessidade de aditivos ou tratamentos especiais.

A massa específica dos grãos (ρ_s) (2,67–2,68 g/cm³) reforça o caráter laterítico do material, com presença de óxidos de ferro e alumínio. Essa composição mineralógica está associada à boa estabilidade volumétrica e menor expansibilidade (EMBRAPA, 2020; Borges; Ferreira; Amorim, 2023), o que reduz o risco de colapsos ou variações significativas de volume em condições de alternância entre períodos secos e úmidos. Do ponto de vista da classificação geotécnica, os solos enquadraram-se como SC e SW-SC (SUCS) e como Argissolos Amarelos eutróficos (SiBCS), o que indica material coeso, bem graduado e com plasticidade moderada. Essa combinação é considerada ideal para núcleos impermeáveis e zonas de transição (Stephens, 2010; Das, 2017).Além disso, o uso de solos locais reduz custos e impactos ambientais, fortalecendo práticas de engenharia sustentável e acessível, em consonância com recomendações de Marques et al. (2015) para barragens de caráter social no semiárido.

Por fim, é importante ressaltar que o desempenho desses solos está intimamente relacionado às condições de compactação em campo. Como demonstrado por Fredlund e Rahardjo (1993), o controle da umidade e da energia de compactação é determinante para o comportamento hidráulico de solos não saturados. Assim, recomenda-se que futuras construções adotem controle de umidade próximo ao $w_o$pt e energia equivalente ao Proctor Normal, garantindo que as propriedades laboratoriais sejam reproduzidas em campo. Em síntese, a comparação com a literatura mostra que os solos analisados possuem condições geotécnicas compatíveis com o uso em barragens rurais, combinando boa resistência mecânica, baixa permeabilidade e estabilidade volumétrica. Esses resultados reforçam a viabilidade técnica e econômica do aproveitamento de materiais locais na implantação de estruturas de armazenamento hídrico sustentáveis para o semiárido nordestino.

5 CONCLUSÃO

A caracterização física e geotécnica dos solos utilizados nos reservatórios estudados demonstrou que os materiais locais possuem condições adequadas para aplicação em barragens de pequeno porte, especialmente em regiões semiáridas. As análises granulométricas e de plasticidade indicaram solos arenosos bem graduados, com teores moderados de finos e plasticidade média, características que favorecem a compactação e reduzem o risco de fissuração.

Os resultados de compactação revelaram boas densidades secas máximas e umidades ótimas compatíveis com o uso em obras de terra, enquanto os coeficientes de permeabilidade se mantiveram em níveis satisfatórios para materiais de núcleo impermeável. Esses parâmetros, aliados à massa específica dos grãos próxima de 2,68 g/cm³, evidenciam o caráter laterítico e estável dos solos, reforçando sua aptidão para uso em estruturas hidráulicas.

A classificação segundo o SUCS e o SiBCS confirmou a predominância de areias argilosas e bem graduadas (SC e SW-SC), enquadradas como Argissolos Amarelos eutróficos, o que consolida o potencial de uso desses materiais em núcleos e zonas de transição de barragens de terra.

De modo geral, os resultados obtidos estão em concordância com pesquisas de Pinto (2006), Silva e Ferreira (2018) e Stephens (2010), demonstrando que, mesmo sob as condições climáticas do semiárido, os solos locais apresentam desempenho técnico satisfatório quando adequadamente compactados.

Por fim, o estudo reforça a importância da utilização racional de materiais locais na engenharia de barragens, contribuindo para redução de custos, sustentabilidade ambiental e autonomia técnica das comunidades rurais. Recomenda-se que futuras investigações ampliem a análise para ensaios triaxiais e de sucção matricial, de modo a aprofundar o entendimento do comportamento desses solos em condições não saturadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2000). *NBR 14545: Solo – Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares a carga variável*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). *NBR 7181: Solo – Análise granulométrica*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). *NBR 7182: Solo – Ensaio de compactação*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). *NBR 7180: Solo – Determinação do limite de plasticidade*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). *NBR 6459: Solo – Determinação do limite de liquidez*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). *NBR 6508: Solo – Determinação da massa específica dos grãos de solos*. Rio de Janeiro.

ASTM International (2021). *ASTM D2487: Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)*. West Conshohocken, PA, USA.

Borges, J. J. S.; Ferreira, S. R. M.; Amorim, S. F. (2023). Utilização do Sistema de Informação Geográfica para identificar solos colapsíveis na região do Semiárido brasileiro. *Journal of Environmental Analysis and Progress*, 8(2), p. 140–155. DOI: 10.24221/jeap.8.2.2023.5681.140–155. Disponível em: https://journals.ufrpe.br/index.php/JEAP/article/view/5681. Acesso em: 28 out. 2025.

Das, B. M. (2017). *Principles of Geotechnical Engineering*, 9th ed. Stamford: Cengage Learning.

Embrapa (2020). *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*, 6. ed. Brasília: Embrapa Solos. Disponível em: https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1123470/sistema-brasileiro-de-classificacao-de-solos. Acesso em: 28 out. 2025.

Fredlund, D. G.; Rahardjo, H. (1993). *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*. New York: John Wiley & Sons.

Head, K. H. (2014). *Manual of Soil Laboratory Testing: Soil Classification and Compaction Tests*, Vol. 1, 3rd ed. Dunbeath: Whittles Publishing. Disponível em: https://books.google.com/books/about/Manual_of_Soil_Laboratory_Testing.html?id=2CINZ0A_B-kC. Acesso em: 28 out. 2025.

Kim, M. H.; Song, C. M. (2023). Prediction of the Soil Permeability Coefficient of Reservoirs Using a Deep Neural Network Based on a Dendrite Concept. *Processes*, 11(3), art. 661. Disponível em: https://www.mdpi.com/2227-9717/11/3/661. Acesso em: 28 out. 2025.

Lobo Neto, J. B.; Silva Filho, F. C.; Lopes, C. P. A. (2018). Análise numérica de solos não saturados colapsíveis: aplicação em uma pequena barragem de terra experimental. *Geotecnia* (Lisboa), n. 144, p. 5–19. DOI: 10.24849/j.geot.2018.144.03.

Marques, F. A. et al. (2015). *Caracterização e classificação de solos de barragens subterrâneas do Sertão alagoano*. Embrapa Solos. Disponível em: https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1036049/. Acesso em: 28 out. 2025.

Pinto, C. S. (2006). *Curso básico de mecânica dos solos em 16 aulas*, 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos. Disponível em: https://www.bvirtual.com.br/NossoAcervo/Publicacao/170502. Acesso em: 28 out. 2025.

Silva, R. V.; Ferreira, S. R. M. (2018). *Geotecnia de solos tropicais: fundamentos e aplicações*. São Paulo: Oficina de Textos.

Silva, T. F. (2022). Comportamento da permeabilidade não saturada em solos tropicais sob variação de umidade volumétrica. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, 27(2), e20210123. Disponível em: https://www.scielo.br/j/esa/a/QWQYSypjBFzxVMGmwBf6kJC/?format=pdf&lang=pt. Acesso em: 28 out. 2025.

Stephens, T. (2010). *Manual on Small Earth Dams: A Guide to Siting, Design and Construction*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Disponível em: https://www.fao.org/4/i1531e/i1531e.pdf. Acesso em: 28 out. 2025.

Wasilah, M. N.; Adhi, K. P.; Kusuma, I. G. B.; Suryolelono, K. B. (2020). Compaction Control Using Degree of Saturation and Plasticity Index: Investigation on Tropical Soils from Indonesia. *Journal of Engineering and Technological Sciences*, 52(5), p. 707–731. Disponível em: https://journals.itb.ac.id/index.php/jets/article/view/21276. Acesso em: 28 out. 2025.