DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.4/58

Dimensionamento de Modelo Físico Reduzido para Análise da Resiliência de Taludes em Solos Tropicais face a Ações Hidrodinâmicas Extremas

Luís Disse Júnior
Mestre, Programa de Pós-graduação em Engenharia Geotécnica, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Brasil, luis.disse@aluno.ufop.edu.br

Lucas Deleon Ferreira
Professor, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Brasil, lucas@ufop.edu.br

Denise de Carvalho Urashima
Professora, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Varginha, Brasil, urashima@cefetmg.br

Rafael Pinheiro Curto Bueno
Graduando, Departamento de Engenharia Urbana, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Brasil, rafael.curto@aluno.ufop.edu.br

RESUMO: A intensificação de eventos climáticos extremos aumenta a necessidade de infraestruturas hidráulicas mais resilientes, como barragens e taludes de terra. Nesse contexto, a modelagem física reduzida constitui uma ferramenta importante para investigar a resposta dessas estruturas a ações hidrodinâmicas, como a propagação de ondas. Este trabalho apresenta o dimensionamento e a aplicação de um modelo físico em escala 1:30 para analisar a interação entre ondas e taludes constituídos por solo tropical laterítico. O modelo foi desenvolvido com base no critério de semelhança de Froude, garantindo a representação adequada dos fenômenos hidrodinâmicos dominantes. Os ensaios experimentais permitiram observar processos de erosão superficial e instabilidade progressiva, evidenciando a influência da integridade estrutural do solo na resistência à erosão. Taludes construídos com solo menos perturbado apresentaram menores taxas de perda de massa. Os resultados indicam que o modelo físico desenvolvido é uma ferramenta promissora para estudos de resiliência de taludes e obras hidráulicas em solos tropicais.

PALAVRAS-CHAVE: Modelagem física, leis de escala, número de Froude, ação de ondas, solos tropicais.

ABSTRACT: Extreme climate events have increased the need for more resilient hydraulic infrastructures, such as earth dams and slopes. In this context, reduced-scale physical modeling represents an important tool for investigating the response of these structures to hydrodynamic actions, particularly wave propagation. This study presents the design and application of a 1:30 scale physical model to analyze the interaction between waves and slopes composed of tropical lateritic soil. The model was developed based on the Froude similarity criterion, ensuring an adequate representation of the dominant hydrodynamic phenomena. Experimental tests allowed the observation of surface erosion and progressive instability processes, highlighting the influence of soil structural integrity on erosion resistance. Slopes constructed with less disturbed soil exhibited lower mass loss rates under cyclic wave action. The results indicate that the proposed physical model is a promising experimental tool for investigating the resilience of slopes and hydraulic earth structures in tropical soils.

KEYWORDS: Physical modeling, scale laws, Froude number, wave action, tropical soils.

1 INTRODUÇÃO

A segurança de infraestruturas hidráulicas, como barragens de terra e taludes marginais, tem se tornado uma preocupação crescente diante da intensificação de eventos climáticos extremos (Fiori, 2015). No Brasil, essa questão é particularmente relevante devido à predominância de solos tropicais em obras de terra, materiais

que apresentam comportamento hidromecânico singular associado à sua estrutura microagregada e ao elevado grau de intemperismo (DNIT, 2023; Marinho et al., 2020; Espósito et al., 2010). Sob ações hidrodinâmicas severas, como o impacto de ondas e variações rápidas do nível d'água em reservatórios, esses solos podem sofrer processos erosivos progressivos capazes de comprometer a estabilidade de taludes.

Nesse contexto, a modelagem física reduzida constitui uma ferramenta importante para investigar esses fenômenos, permitindo a reprodução controlada de mecanismos de instabilidade e erosão em condições laboratoriais (Yasuhara e Recio-Molina, 2007). Modelos físicos têm sido amplamente utilizados na engenharia geotécnica para reproduzir, em escala reduzida, condições representativas de campo, possibilitando maior controle das variáveis envolvidas e observação direta dos processos de instabilização (Fernandes, 2021; Jacobini, 2019).

A confiabilidade dos resultados obtidos em modelos físicos depende da aplicação rigorosa das leis de semelhança, que asseguram a correspondência geométrica, cinemática e dinâmica entre o modelo e o protótipo. Para fenômenos em que predominam forças gravitacionais e inerciais, como a propagação de ondas e o escoamento em superfície livre, o Número de Froude constitui o principal parâmetro adimensional de controle da similitude (Hughes, 1993; Sutherland & Soulsby, 2011). Nesse tipo de modelagem, o fator de escala (λ), definido como a razão entre o valor de um parâmetro no protótipo e no modelo, permite estabelecer relações entre grandezas físicas como comprimento, tempo, velocidade e força, garantindo a representatividade dos processos observados em laboratório (Chanson, 2004).

Apesar dos avanços nas pesquisas que utilizam modelagem física em geotecnia, ainda são limitados os estudos experimentais voltados à investigação da interação entre ondas e taludes constituídos por solos tropicais, especialmente aqueles que consideram simultaneamente os critérios de similitude hidrodinâmica e as particularidades geotécnicas desses materiais.

Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo desenvolver e validar um modelo físico reduzido capaz de investigar os mecanismos de erosão em taludes de solos tropicais submetidos à ação de ondas.

Para isso, apresenta-se o dimensionamento e a aplicação de um modelo físico em escala 1:30, baseado no critério de semelhança de Froude, destinado à análise da resiliência de taludes frente a solicitações hidrodinâmicas. O estudo contempla o dimensionamento do modelo, sua construção e instrumentação experimental, bem como a análise dos processos erosivos observados durante os ensaios.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Caracterização do Solo

O solo utilizado nos ensaios foi coletado no município de Ouro Preto (MG), sendo classificado como solo tropical laterítico argiloso. A caracterização geotécnica seguiu normas brasileiras e o sistema MCT (Miniatura, Compactado, Tropical), específico para solos tropicais.

A preparação das amostras foi realizada conforme a ABNT NBR 6457 (2016). A análise granulométrica foi conduzida pelos métodos de peneiramento e sedimentação, de acordo com a ABNT NBR 7181 (2018).

2.1.1 Parâmetros de permeabilidade e retenção

A condutividade hidráulica foi determinada em permeâmetro de carga variável, conforme o Método B da ABNT NBR 14545 (2021), utilizando corpos de prova compactados na energia do Proctor Normal e vedação lateral com argila bentonítica.

A caracterização hidráulica do solo foi complementada pela determinação da curva de retenção de água, obtida pelo método do papel filtro (ASTM D5298-10, 2016). Foram utilizados papéis filtro Whatman nº 42 e corpos de prova com dimensões de 5 cm de diâmetro e 3 cm de altura, moldados com solo reconstituído.

Os corpos de prova foram inicialmente saturados por capilaridade indireta durante 24 h e posteriormente submetidos à secagem controlada, permitindo a obtenção de diferentes teores de umidade e respectivos valores de sucção matricial.

2.2 Configuração do Modelo Físico

O experimento foi realizado em canal de ondas com dimensões de 3,00 m de comprimento, 0,80 m de largura e 0,80 m de altura ((Figura 2). No interior do canal foi construído um talude com 0,70 m de altura e inclinação de 45° (1V:1H).

O modelo foi concebido com base nos princípios de semelhança geométrica, cinemática e dinâmica, adotando-se escala geométrica de 1:30 (λ L=30). Essa escolha considerou as dimensões do canal experimental e a necessidade de minimizar efeitos de contorno e reflexões de ondas. (Novak *et al*., 2007). Nessa escala, o talude do modelo representa um protótipo de aproximadamente 21 m de altura, compatível com barragens de pequeno a médio porte.

O critério de semelhança dominante adotado foi o Número de Froude (Fr), uma vez que os fenômenos analisados são governados principalmente pela interação entre forças inerciais e gravitacionais, típicas de escoamentos em superfície livre e propagação de ondas (Chanson, 2004; van Verseveld *et al*., 2015).

Para os parâmetros geotécnicos, não foi aplicado fator de escala, sendo utilizado o solo natural, de forma a preservar suas propriedades de resistência, estrutura e erodibilidade.

2.2.1 Construção e Instrumentação do Modelo

O aparato experimental (Figura 1 e Figura2) consistiu em um canal de vidro temperado equipado com gerador de ondas do tipo pistão, com controle de frequência e amplitude, além de sistema de drenagem que permite simular rebaixamento rápido. Maiores detalhes sobre o modelo físico são apresentados em Disse Júnior (2025).

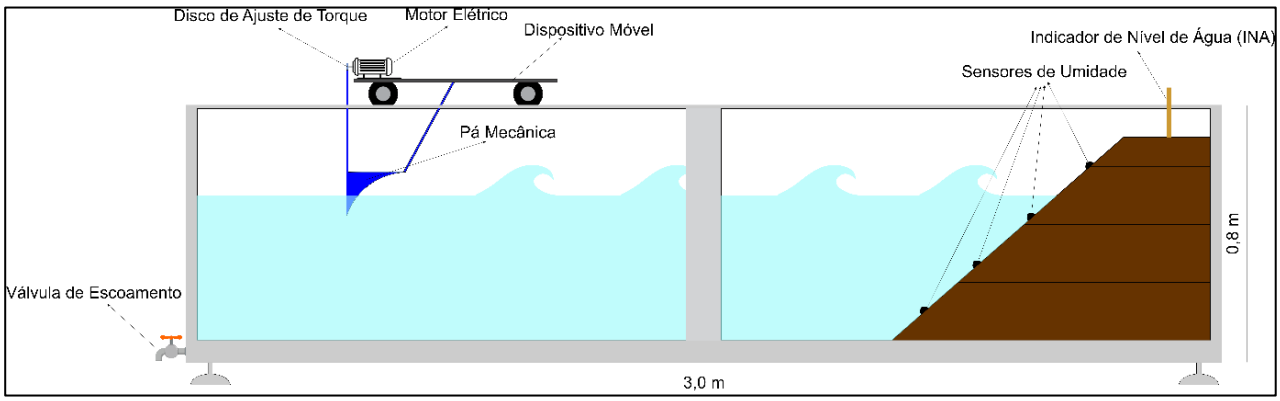


Figura 1. Representação gráfica do modelo físico reduzido (Disse Júnior, 2025).



Figura 2. Aparato com modelo reduzido saturado (vista lateral do talude 1) (Disse Júnior, 2025).

Foram construídos dois taludes experimentais idênticos, com altura e base de 0,70 m e inclinação de 1V:1H. A construção iniciou-se com o preparo do solo por secagem ao ar, destorroamento e ajuste de umidade até o valor ótimo obtido no ensaio Proctor Normal. (Gomes *et al*., 2022; ABNT NBR 6457, 2016).

A compactação foi executada manualmente em camadas de 10 cm, buscando atingir grau de compactação entre 90% e 100%, verificado pelo método do cilindro de cravação (ABNT NBR 7182, 2016; ABNT NBR 9813, 2016). Para evitar planos de fraqueza, adotou-se a estratégia de compactar inicialmente um bloco maciço, posteriormente esculpido até atingir a geometria final do talude (Lima *et al*., 2022).

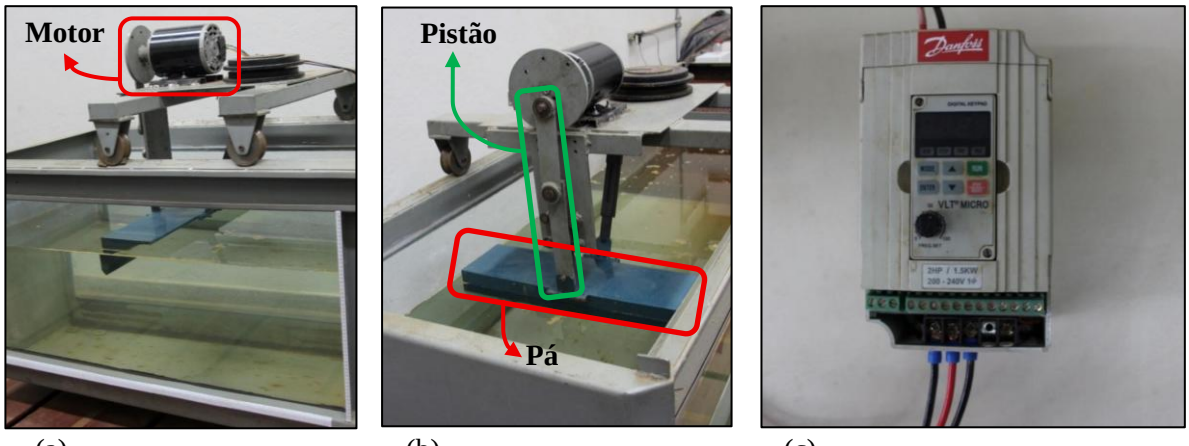
Quanto à instrumentação, foram instalados na face do talude quatro sensores capacitivos de umidade (TDR) com espaçamento de 15 cm para monitorar saturação e sucção, previamente calibrados em bancada (R^2 > 0,99) conforme a ABNT NBR 16914 (2021), além de piezômetros para monitoramento de poro-pressões e câmeras de alta resolução para registro visual, sendo um dos modelos submetido ainda a escaneamento a laser para mapeamento 3D pós-ensaio.

2.3 Simulação da Ação de Ondas

A geração de ondas foi realizada por meio de um sistema eletromecânico do tipo pistão, composto por batedor com pá horizontal acionado por motor de 1,5 kW e controlado por inversor de frequência (Figura 3 a, b e c).

Considerando a semelhança de Froude na escala 1:30, os ensaios reproduziram condições equivalentes a ventos moderados (graus 4 e 5 da Escala Beaufort). Foram aplicados períodos de onda entre 0,4 s e 1,2 s, com tempos de exposição variando de 30 s a 1 h. A Tabela 1 ilustra o resumo das escalas adotadas (1:30), (Hughes, 1993: Yasuhara e Recio-Molina, 2007).

A análise concentrou-se nos processos de interação onda–talude, com monitoramento dos ciclos de avanço (*run-up*) e refluxo (*backwash*) das ondas. Esses ciclos permitem avaliar o carregamento hidrodinâmico imposto ao talude, bem como os mecanismos associados à geração de poro-pressões e ao transporte de sedimentos.



(a) (b) (c)

Figura 3. Componentes de geração de ondas. (a) Motor, (b) pá e pistão, e (c) Inversor de frequência (Disse Júnior, 2025).

Tabela 1. Resumo das escalas adotadas (1:30)

Parâmetro	**Símbolo**	**Escala**	**Exemplo (modelo → protótipo)**
Comprimento	λL	30	1 cm → 30 cm
Altura de onda	λH	30	2 cm → 0,6 m
Tempo	λt	√30 ≈ 5,477	0,4 s → 2,2 s
Velocidade	λv	√30 ≈ 5,477	—
Profundidade	λd	30	80 cm → 24 m

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Caracterização Geotécnica e Mineralógica

A caracterização física do solo (Tabela 2) indica um material predominantemente fino, com 73% de fração passante na peneira #200, apresentando plasticidade média (IP = 10%) e limites de Atterberg de LL = 56% e LP = 46%. A razão IP/%finos = 0,15 sugere erodibilidade intermediária (Couto, 2020), indicando que, embora a fração fina seja predominante, sua plasticidade relativamente baixa favorece processos de desagregação quando submetida a ações hidráulicas.

Pela classificação MCT, o material foi enquadrado como LG' (solo laterítico argiloso), característico de solos tropicais altamente intemperizados, com estrutura microagregada e elevada estabilidade volumétrica.

A análise mineralógica (DRX) e química (FRX) indicou predominância de quartzo (49% SiO_2), associado a argilominerais do tipo caulinita/ilita (22,1% Al_2O_3) e presença significativa de óxidos de ferro (14,8% Fe_2O_3). A ausência de minerais expansivos e o baixo teor de carbonatos explicam a reduzida suscetibilidade à expansão volumétrica.

A curva de retenção de água, obtida pelo método do papel filtro, evidenciou elevada capacidade de sucção matricial em baixos níveis de saturação, característica típica de solos lateríticos microagregados. Essa condição contribui para o aumento da resistência ao cisalhamento em estado parcialmente saturado, fator importante para a estabilidade inicial dos taludes ensaiados.

Tabela 2. Caracterização física do Solo

Propriedade	**Resultado**
Análise granulométrica	Pedregulho: 3% Areia: 24% Silte: 35% Argila: 38%
Limite de Liquidez (LL)	56%
Limite de Plasticidade (LP)	46%
Índice de Plasticidade (IP)	10%
Densidade real dos sólidos	2,69 g/cm³
Porosidade do CP compactado	32,8%
Umidade natural	34,59%
Permeabilidade (k)	$3{,}42 \times 10^{-5}$ cm/s
Ensaio de compactação Proctor	Umidade ótima: 32,5% Massa específica seca máxima: 1,375 g/cm³
Classificação MCT	LG' (Solo argiloso laterítico)

3.2 Interação Onda-Talude

Os ensaios simularam ondas com alturas entre 0,04 m e 0,07 m, correspondentes a aproximadamente 1,2 m a 2,1 m em escala real. O programa experimental foi estruturado em duas fases distintas.

Na fase exploratória (Talude 1), foram avaliadas diferentes combinações de frequência de ondas (3,6 a 4,4 Hz), nível d'água (50,5 a 56 cm) e tempo de exposição (30 s a 1 h), com o objetivo de identificar condições críticas para o início da erosão. Observou-se que o aumento da frequência das ondas e do tempo de exposição intensificou o carreamento de partículas finas, evoluindo de um processo inicial de erosão superficial para instabilidades progressivas no talude.

Com base nesses resultados, foi definida a fase padronizada (Talude 2), na qual os parâmetros hidráulicos foram mantidos constantes (frequência de 4 Hz, nível d'água de 54,5 cm e ciclos de 10 minutos), permitindo avaliar de forma mais isolada a influência da ação das ondas no processo erosivo.

A Tabela 3 apresenta um comparativo entre os ensaios realizados nos Taludes 1 e 2.

Tabela 3. Comparativo entre os Ensaios do Talude 1 e Talude 2.

Parâmetro	Talude 1 (Exploratório)	Talude 2 (Padronizado)
Objetivo	Definir padrões críticos de onda, nível de água e tempos de exposição para posterior padronização dos ensaios	Avaliar comportamento erosivo sob condições controladas, com os parâmetros definidos no Talude 1
Frequências de onda	Variadas (3,6 a 4,4 Hz)	Frequência única (4 Hz)
Altura da lâmina de água	Variada (50,5 a 56 cm)	Altura constante (54,5 cm)
Tempo de aplicação	Variado (30 s a 1 h)	10 minutos por ciclo
Número de ciclos	Variável (1 a 10 ciclos por etapa)	10 ciclos
Intervalo de repouso	Variado (3 min a 6 h)	20 minutos
Principais observações	Identificação de limiares de carreamento de finos e início de erosão progressiva com aumento de frequência e tempo de exposição	Isolamento dos efeitos de ondas sob condições constantes, permitindo avaliação clara de erosão e deslocamento de finos.
Finalidade	Definição de parâmetros críticos de agitação e rebaixamento para simulação em modelo físico	Análise do comportamento erosivo em condições controladas e replicáveis

3.2.1 Erosão Superficial e Perda de Massa

A quantificação da erosão foi realizada por meio da coleta e secagem do material transportado, conforme procedimento normativo (ABNT NBR 6457, 2016). Os resultados indicaram comportamento significativamente distinto entre os dois taludes.

O Talude 1 apresentou maior resistência à erosão, com taxa inicial de aproximadamente 0,12 g/min, reduzindo-se para cerca de 0,05 g/min após 60 minutos. Essa estabilização sugere que a erosão inicial remove preferencialmente partículas menos agregadas da superfície, restando posteriormente uma camada relativamente mais resistente.

Por outro lado, o Talude 2 apresentou comportamento muito mais suscetível à erosão, com taxa inicial de aproximadamente 0,48 g/min e valor residual de 0,22 g/min. Essa diferença está associada às perturbações prévias do solo, decorrentes da instalação de instrumentação e dos ciclos de molhagem e secagem, que tendem a reduzir a cimentação natural típica dos solos lateríticos.

Esse resultado evidencia um aspecto importante do comportamento dos solos tropicais: a estrutura microagregada desempenha papel fundamental na resistência à erosão, sendo significativamente afetada por perturbações mecânicas ou alterações no regime de umidade.

A comparação entre os taludes evidencia a magnitude dessa influência. Enquanto o Talude 1 apresentou perda total equivalente a 1,11% de sua massa, o Talude 2 atingiu perda de 6,79%. Quando extrapolados para a escala de protótipo, esses valores correspondem a aproximadamente 92,7 toneladas e 988 toneladas, respectivamente. A taxa de erosão em escala real atingiu 6,58 ton/min no cenário mais crítico. A Tabela 4 apresenta os valores médios de volume total erodido após término de ensaio para cada talude.

Embora essa extrapolação deva ser interpretada com cautela, os resultados indicam que pequenas alterações estruturais no solo podem resultar em variações significativas no comportamento erosivo, sobretudo em cenários de carregamento hidrodinâmico repetitivo.

Tabela 4. Valores médios de volume total erodido após término de ensaio para cada talude

	Talude 1	**Talude 2**
Volume inicial do Prisma trapezoidal (m³)	0.224	0.392
Massa do Prisma (kg)	308	539
Massa erodida (kg)	3.43	36.6
Percentual erodido (%)	1.114	6.793
Extrapolação em escala 1:30 (ton)	92.67	988.09
Tempo de ensaio em modelo (min)	60	150
Tempo real equivalente (hh:min)	05:29	13:41
Taxa de erosão em modelo por minuto (g)	0.06	0.24
Taxa de erosão em escala real por minuto (ton)	1.54	6.58

4 CONCLUSÕES

O presente trabalho apresentou o dimensionamento e a aplicação de um modelo físico reduzido em escala 1:30 para investigar a interação entre ondas e taludes constituídos por solo tropical laterítico. A adoção do critério de semelhança de Froude mostrou-se adequada para representar os fenômenos hidrodinâmicos dominantes, permitindo a reprodução experimental de processos erosivos em condições controladas de laboratório.

A caracterização geotécnica indicou comportamento típico de solos lateríticos, com predominância de fração fina, presença de óxidos de ferro e estrutura microagregada, fatores associados à estabilidade inicial do solo e a elevados níveis de sucção matricial em condição parcialmente saturada. Os ensaios evidenciaram que a integridade estrutural do solo influencia significativamente a resistência à erosão, sendo observadas menores taxas de perda de massa em taludes construídos com solo menos perturbado.

Os resultados ressaltam a importância da preservação da estrutura natural dos solos tropicais em obras de terra, uma vez que alterações estruturais podem aumentar a suscetibilidade à erosão sob carregamentos hidrodinâmicos cíclicos. Apesar das limitações inerentes à modelagem física em escala reduzida, o modelo desenvolvido demonstrou potencial como ferramenta experimental para investigar processos erosivos em taludes submetidos à ação de ondas, contribuindo para o aprimoramento de metodologias de modelagem física em geotecnia aplicada a solos tropicais.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Núcleo de Geotecnia (NUGEO) da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP) pela disponibilidade de infraestrutura e suporte técnico, bem como à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo financiamento da bolsa de estudos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alves, L. M. (2023). *Estudo comparativo em modelo reduzido do uso de enrocamento e geomembrana em proteção do talude de montante de barragens de terra* [Trabalho de conclusão de curso, Universidade Federal do Pampa]. https://dspace.unipampa.edu.br/handle/riu/7940

ASTM International. (2016). ASTM D5298-10: *Standard test method for measurement of soil potential (suction) using filter paper*. ASTM International.

Chanson, H. (2004). *The hydraulics of open channel flow: An introduction*. Butterworth-Heinemann.

Couto, B. de O. C. (2020). *Estudo da erodibilidade em horizontes de taludes de corte rodoviário por meio de procedimentos de laboratório e de campo* [Tese de doutorado, Universidade Federal de Ouro Preto].

Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. (2023). DNIT 259/2023 – CLA: *Solos — Classificação de solos finos tropicais para finalidades rodoviárias utilizando corpos de prova compactados em equipamento miniatura* — Classificação. DNIT.

Disse Júnior, L. (2025). *Efeitos da ação de ondas na estabilidade de taludes de barragem de água construídos com solos tropicais: modelo físico reduzido*. Dissertação (Mestrado Acadêmico). Universidade Federal de Ouro Preto. Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas. Programa de Pós- Graduação em Geotecnia.

Espósito, T., Naghettini, M., Ladeira, J., & Caldeira, L. (2010). *Análise por árvore de eventos: Ferramenta para gestão de risco em barragens de terra*. Revista Luso-Brasileira de Geotecnia.

Fernandes, H. C. L. (2021). *Estudo experimental e numérico para avaliação da estabilidade de talude em solos não saturados* [Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto].

Fiori, A. P. (2015). *Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas: Aplicações na estabilidade de taludes.* Oficina de Textos.

Gomes, E. J. S., Lima, I. S., Castanheira Neto, P. P., Silva, F., & Pires, R. C. S. (2022). *A utilização de solos tropicais em obras na engenharia*. In Geotecnia: Análise dos solos (pp. 66–89). Editora Epitaya.

Hughes, S. A. (1993). *Physical models and laboratory techniques in coastal engineering*. World Scientific.

Jacobini, L. (2019). *Avaliação da estabilidade hidráulica de diques homogêneos de enrocamento galgáveis utilizando modelo físico reduzido* [Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais]. Repositório UFMG.

Lima, C. S., Rocha, M. B., & Almeida, T. F. (2022). *Construção e monitoramento de modelos reduzidos de taludes em laboratório*. Geotecnia Aplicada, 29(4), 112–130.

Marinho, M. S., Costa, S. C. F. E., & Almeida, H. C. (2020). *Development of web application for geotechnical classification of tropical soils based on MCT methodology*. Revista de Engenharia Civil IMED, 7(1), 71–87. https://doi.org/10.18256/2358-6508.2020.v7i1.3373

Martins, L. F., & Lima, P. R. (2023). *Aplicação de modelos físicos reduzidos na análise de problemas geotécnicos: Calibração e validação de simulações numéricas*. Revista Brasileira de Geotecnia, 38(2), 85–98. https://doi.org/10.1590/rbg.v38n2.2023.0085

Massad, F. (2016). *Mecânica dos solos experimental*. Oficina de Textos.

Novak, P., Moffat, A. I. B., Nalluri, C., & Narayanan, R. (2007). *Hydraulic structures (4th ed.).* CRC Press. https://doi.org/10.1201/9781315274898

Seki, K., Toride, N., & van Genuchten, M. T. (2023). *Evaluation of a general model for multimodal unsaturated soil hydraulic properties.* Journal of Hydrology and Hydromechanics, 71(1), 22–34. https://doi.org/10.2478/johh-2022-0039

Sutherland, J., & Soulsby, R. (2011). *Guidelines for physical modelling of mobile sediments*. HR Wallingford. https://eprints.hrwallingford.com/762/1/HRPP463-Guidelines_for_physical_modelling_of_mobile_sediments.pdf

van Verseveld, H. C. W., van Dongeren, A. R., Plant, N. G., Jäger, W. S., & den Heijer, C. (2015). *Modelling multi-hazard hurricane damages on an urbanized coast with a Bayesian network approach*. Coastal Engineering, 103, 1–14. https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2015.05.006

Yasuhara, K., & Recio-Molina, J. (2007). *Wave-induced erosion of clayey slopes*. Marine Georesources & Geotechnology.