v.7, n.4, 2026

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

ANÁLISE DE ESTABILIDADE DE TALUDE: ESTUDO DE CASO EM UMA REGIÃO PORTUÁRIA ÀS MARGENS DO RIO AMAZÔNAS, AMAZÔNIA-BRASIL

SLOPE STABILITY ANALYSIS: A CASE STUDY IN A PORT REGION ON THE BANKS OF THE AMAZON RIVER, AMAZON-BRAZIL

ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE TALUDES: UN ESTUDIO DE CASO EN UNA REGIÓN PORTUARIA A ORILLAS DEL RÍO AMAZONAS, AMAZONAS-BRASIL

Alyne Barboza da Costa Araújo[1], Matuzalem dos Santos Araújo[2], Eduarda Lima de Souza[1], Davi Barbosa Costa da Silva[3], Marcelo Rassy Teixeira[4]

e747666
https://doi.org/10.47820/recima21.v7i4.7666

PUBLICADO: 04/2026

RESUMO

Considerando a importância da estabilidade de taludes para a geotecnia e mecânica dos sólidos, o presente estudo teve como objetivo avaliar a estabilidade de taludes nas margens do rio Amazonas, com foco no estudo de solos moles, típicos da região. A investigação abrangeu caracterização geotécnica detalhada, ensaios de campo e de laboratório e modelagem numérica com software de análise geotécnica, para simular variações do nível fluvial e a influência de sobrecarga adicional na estabilidade do maciço. Os resultados indicaram que, no período de nível elevado do rio, o fator de segurança aumenta, mesmo com sobrecarga adicional, devido ao efeito de contenção hidráulica da água, que proporciona estabilidade temporária ao maciço. Porém, com a descida do nível, o fator de segurança cai significativamente, de 1,539 para 1,226, pela rápida perda da sustentação hidráulica externa. Nessa fase, a poropressão interna permanece alta devido à drenagem lenta dos solos argilosos, reduzindo a resistência ao cisalhamento. Embora considerado globalmente estável, o fator de segurança obtido mostrou-se inferior a 1,3, valor mínimo recomendado para o cenário analisado, conforme estabelecido pela NBR 11682 (ABNT, 2009). Uma comparação com estudo internacional confirma que instabilidades em margens fluviais de solos moles são dominadas por flutuações do nível d'água. A pesquisa destaca a integração de monitoramento contínuo e modelagem numérica como estratégia essencial para gerenciar riscos geotécnicos em taludes amazônicos, elevando a segurança de obras de engenharia e protegendo comunidades ribeirinhas.

PALAVRAS-CHAVE: Estabilidade de talude. Argila sensível. Região amazônica.

ABSTRACT

Considering the importance of slope stability for geotechnics and solid mechanics, this study aimed to evaluate the stability of slopes on the banks of the Amazon River, focusing on the study of soft soils, typical of the region. The investigation encompassed detailed geotechnical characterization, field and laboratory tests, and numerical modeling with geotechnical analysis software to simulate variations in river level and the influence of additional surcharge on the stability of the soil mass. The

[1] Engenheira Civil, mestranda pelo Programa de pós-graduação em Engenharia de Barragem e Gestão Ambiental (PEBGA) - NDAE/UFPA, Tucuruí, Pará, Brasil.
[2] Engenheiro Civil, mestrando pelo Programa de pós-graduação em Engenharia de Infraestrutura e Desenvolvimento Energético (PPGINDE) - NDAE/UFPA, Tucuruí, Pará, Brasil.
[3] Engenheiro Civil, mestre em Engenharia de Barragem e Gestão Ambiental (NDAE/UFPA) e professor de Engenharia Civil na UFPA, Campus Tucuruí, Pará, Brasil.
[4] Pós-doutor em Engenharia Civil, docente de Engenharia Civil na UFPA/Belém, docente nos programas de pós-graduação PEBGA e PPGINDE do NDAE/UFPA, Tucuruí, Pará, Brasil.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

results indicated that, during periods of high river level, the safety factor increases, even with additional surcharge, due to the hydraulic containment effect of the water, which provides temporary stability to the soil mass. However, with the decrease in level, the safety factor drops significantly, from 1.539 to 1.226, due to the rapid loss of external hydraulic support. In this phase, the internal pore pressure remains high due to the slow drainage of clayey soils, reducing shear strength. Although considered globally stable, the safety factor obtained was lower than 1.3, the minimum recommended value for the analyzed scenario, as established by NBR 11682 (ABNT, 2009). A comparison with an international study confirms that instabilities in riverbanks of soft soils are dominated by fluctuations in water level. The research highlights the integration of continuous monitoring and numerical modeling as an essential strategy for managing geotechnical risks in Amazonian slopes, increasing the safety of engineering works and protecting riverside communities.

KEYWORDS: *Slope stability. Sensitive clay. Amazon region.*

RESUMEN
Considerando la importancia de la estabilidad de taludes para geotecnia y mecánica de sólidos, este estudio tuvo como objetivo evaluar la estabilidad de taludes en riberas del río Amazonas, centrándose en suelos blandos típicos de la región. La investigación abarcó una caracterización geotécnica detallada, ensayos de campo y de laboratorio, y modelado numérico mediante software de análisis geotécnico para simular variaciones en el nivel del río y la influencia de la sobrecarga adicional en la estabilidad de la masa de suelo. Los resultados indicaron que, durante períodos de alto nivel del río, el factor de seguridad aumenta incluso con sobrecarga adicional debido al efecto de contención hidráulica del agua, que proporciona estabilidad temporal a la masa de suelo. Sin embargo, con la disminución del nivel, el factor de seguridad cae significativamente de 1,539 a 1,226 debido a la rápida pérdida del soporte hidráulico externo. En esta fase, la presión de poro interna permanece alta por el drenaje lento de suelos arcillosos, lo que reduce la resistencia al corte. Aunque se considera globalmente estable, el factor de seguridad obtenido fue inferior a 1,3, valor mínimo recomendado para escenario analizado según la NBR 11682 (ABNT, 2009). Una comparación con estudio internacional confirma que inestabilidades en riberas de ríos con suelos blandos se deben principalmente a fluctuaciones del nivel del agua. La investigación destaca integración de monitoreo continuo y modelado numérico como estrategia esencial para gestión de riesgos geotécnicos en laderas amazónicas, aumentando la seguridad de obras de ingeniería y protegiendo comunidades ribereñas.

PALABRAS CLAVE*: Estabilidad de taludes. Arcilla sensible. Región amazónica.*

INTRODUÇÃO

A estabilidade de taludes vem se destacando como um dos principais temas da geotecnia, uma vez que a manutenção de maciços estáveis previne rupturas capazes prejuízos imensuráveis, relacionados aos riscos à população, danos à infraestrutura, ao meio ambiente e à economia (Regmi; Dahal, 2024; Silva *et al*., 2024). De acordo com Sim *et al*., (2022), esses prejuízos podem superar os custos associados a outras catástrofes, ultrapassando significativamente os investimentos em contenção.

Os taludes, definidos como superfícies inclinadas naturais ou artificiais, tornam-se instáveis quando as forças resistentes não são suficientes para equilibrar as forças atuantes, resultando no deslocamento do material (Silva, 2024; Kang, 2023). Esses processos podem gerar movimentos de

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

massa de diferentes magnitudes e consequências severas. A instabilidade é condicionada por múltiplos fatores, incluindo características físicas do solo, ações antrópicas e condições ambientais (Behailu *et al*., 2022).

A intensificação de eventos de instabilidade tem sido associada à expansão urbana desordenada e ao aumento de eventos pluviométricos extremos, frequentemente relacionados às mudanças climáticas (Souza; Rodrigues; Almeida, 2021). No Brasil, o clima tropical e os elevados índices de precipitação, especialmente no período chuvoso, contribuem para o aumento da poropressão, reduzindo a resistência e favorecendo a desestabilização do solo (Das *et al*., 2020; Tang *et al*., 2023).

Na região amazônica, esses fatores são potencializados por condições geológicas, hidrológicas e geotécnicas específicas, além de um regime pluviométrico intenso (Souza *et al*., 2021). Soma-se a isso a presença da maior bacia hidrográfica do mundo, na qual a variação do nível dos rios provoca ciclos de carregamento e descarregamento nos taludes (Bandeira *et al*., 2021). A elevação rápida do nível da água pode induzir instabilidade em margens saturadas, enquanto a vazante reduz o suporte hidráulico na base, aumentando o risco de ruptura (Bandeira *et al.,* 2018). Além disso, a presença de sobrecargas pode intensificar a redistribuição de tensões, agravando as condições de instabilidade (Ishak *et al*., 2024).

Gariano e Guzzetti (2021) destacam diversos processos associados à instabilidade de taludes, cuja frequência aumentou significativamente nos últimos anos, com ampla distribuição espacial e elevados impactos socioeconômicos e ambientais. Esse cenário reforça a urgência no desenvolvimento de métodos mais eficazes para análise, previsão e mitigação de riscos.

A caracterização geotécnica constitui a base para a avaliação da estabilidade de um maciço, sendo realizada por meio de ensaios *in situ*, como SPT, CPTU, aliados a ensaios laboratoriais, que permitem determinar parâmetros como resistência ao cisalhamento e comportamento mecânico dos solos (Schnaid; Odebrecht, 2012; Robertson, 2016). Paralelamente, a modelagem numérica tem se consolidado como ferramenta essencial para simular o comportamento dos taludes sob diferentes condições de carregamento e variação do nível d'água (Li *et al*., 2021).

Eventos como os deslizamentos na região serrana do Rio de Janeiro e os rompimentos de barragens em Mariana (2015) e Brumadinho (2019) evidenciam a magnitude dos impactos associados à instabilidade de taludes no país (Ell'aringa *et al*., 2018). Apesar dos avanços, ainda há escassez de estudos voltados à região amazônica, especialmente em encostas fluviais, devido às dificuldades de acesso, altos custos de investigação e à variabilidade dos solos tropicais (Nascimento, 2021).

Diante desse contexto, esta pesquisa tem como objetivo avaliar a estabilidade de um talude na região amazônica por meio da caracterização geotécnica associada à modelagem numérica,

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

considerando diferentes cenários hidrológicos. Os resultados serão comparados com estudos de perfis semelhantes descritos na literatura, visando validar a metodologia e discutir suas potencialidades e limitações.

1. REFERENCIAL TEÓRICO

A análise da estabilidade de taludes envolve a compreensão dos mecanismos de ruptura, dos fatores condicionantes e da aplicação de métodos analíticos e computacionais para determinação do fator de segurança (FS) (Caputo, 1988; Silva; Santos, 2024; Qiu; Nie; Asadi, 2024; Strupler *et al*., 2016). Nas últimas décadas, avanços nessas técnicas têm permitido previsões mais precisas do comportamento dos taludes (Regmi; Dahal, 2024). A instabilidade ocorre quando há desequilíbrio entre forças atuantes e resistentes, podendo se manifestar desde movimentos lentos, como rastejo, até rupturas bruscas, como escorregamentos e quedas de blocos, inclusive em formas complexas (Silva, 2024; Lacroix; Handwerger; Bièvre, 2020; Varnes, 1978).

Os fatores de instabilidade são tradicionalmente classificados em internos e externos. Os internos referem-se às propriedades geotécnicas do solo, como coesão, ângulo de atrito, permeabilidade e peso específico, que controlam a resistência ao cisalhamento e o (FS) (Guidicini; Nieble, 1983; Duncan; Wright; Brandon, 2014; Macías *et al.,* 2024). Já os externos incluem condições climáticas, variações de água, ações antrópicas e aspectos geológicos regionais (Hoek; Bray, 2020).

Nesse sentido, o aumento do nível freático reduz as tensões efetivas e a resistência ao cisalhamento, enquanto a infiltração de água eleva as poropressões, podendo desencadear rupturas (Tian *et al*., 2024). Eventos climáticos extremos intensificam processos erosivos e alteram as condições de drenagem (Zhang; Shen, 2024; Cruden; Varnes, 1996), ao passo que ações antrópicas, como desmatamento e cortes de taludes, agravam a instabilidade ao modificar o equilíbrio natural do maciço (Kabeta *et al*., 2023; Nguyen *et al*., 2025).

A estrutura geológica também exerce papel fundamental, influenciando a distribuição de tensões e o tipo de ruptura, enquanto processos de intemperismo e composição mineralógica alteram o comportamento mecânico ao longo do tempo (Silva; Santos, 2024).

O monitoramento geotécnico é essencial para a detecção antecipada de sinais de instabilidade, o que possibilita a implementação de ações preventivas e a redução dos riscos relacionados a rupturas de taludes (Qiu; Nie; Asadi, 2024). Várias metodologias foram criadas para analisar a estabilidade de taludes, variando em complexidade, disponibilidade de dados e critérios de investigação. Em termos gerais, essas metodologias podem ser classificadas em dois grupos principais: os métodos de equilíbrio limite e os métodos numéricos (Rusydy *et al*., 2025).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

A resistência do solo é geralmente avaliada pelo critério de Mohr-Coulomb, que considera coesão e ângulo de atrito interno (Wei *et al*., 2025). Essa resistência corresponde à tensão cisalhante máxima suportada, definida por relação linear com a tensão normal (Das; Sobhan, 2019).

O Método de Equilíbrio Limite (MEL) é muito utilizado na análise de estabilidade de taludes, avaliando o equilíbrio de massas de solo por meio de superfícies de ruptura, podendo ser aplicado por métodos de massa ou de fatias, como Bishop, Janbu e Morgenstern–Price, permitindo calcular o (FS) (Gerscovich, 2016; Wei *et al*., 2025). Apesar de sua simplicidade e eficiência, o MEL desconsidera deformações e exige superfícies de ruptura pré-definidas (Nascimento, 2021).

Já os Métodos dos Elementos Finitos (MEF) permitem análises mais realistas, considerando interação solo-estrutura, fluxo de água e comportamento não linear, embora demandem maior capacidade computacional, sendo os resultados de (FS) geralmente compatíveis com o MEL (Zhou; Qin, 2022; Nascimento, 2021). Métodos probabilísticos também são empregados para avaliar incertezas e probabilidade de falha (Hwang *et al*., 2023).

A análise exige adequada caracterização geotécnica conforme a NBR 11682 (ABNT, 2009), com ensaios de campo e laboratório, além de modelagem integrada e uso de softwares geotécnicos, cuja confiabilidade depende da qualidade dos dados e calibração (Tamiru *et al.,* 2024).

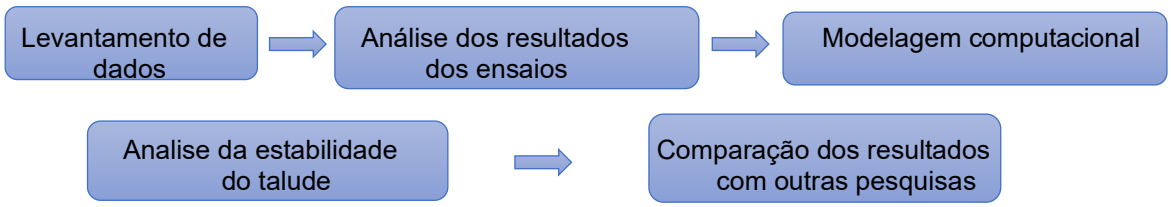
2. MÉTODOS

O presente estudo configura-se como um estudo de caso, baseado na caracterização geotécnica dos solos de uma área considerada instável. Essa abordagem é adequada por permitir a análise aprofundada de um contexto geológico e geotécnico específico, possibilitando a compreensão dos mecanismos que condicionam a estabilidade do talude investigado (Yin, 2015).

Do ponto de vista metodológico, adotou-se uma abordagem mista, integrando métodos quantitativos e qualitativos. A variável quantitativa baseia-se na análise dos resultados de ensaios de campo, laboratoriais e simulações computacionais, fornecendo dados objetivos sobre propriedades físicas, mecânicas e hidráulicas dos solos e parâmetros de estabilidade. Já a variável qualitativa envolve a interpretação integrada dos resultados, a comparação com a literatura e a contextualização das condições geológicas e ambientais, sendo essencial para compreender a complexidade dos processos de instabilidade. O desenvolvimento das etapas do estudo encontra-se organizado conforme apresentado na Figura 1.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Figura 1. Etapas da pesquisa



Fonte: Autora (2026).

De acordo com o cronograma, o estudo iniciou com o levantamento de dados históricos e relatórios técnicos do local de estudo. Para a análise foram utilizados os resultados dos ensaios *Standard Penetration Test* - SPT, ensaio de *piezocone* - CPTU, *Vane Test* e amostras *Shelby*, obtidos através do Laboratório Amazônico para o Desenvolvimento Sustentável (LADS) em Tucuruí–PA. As amostras foram submetidas a ensaios conforme a ABNT, para avaliar o comportamento do solo sob diferentes condições (Quadro 1).

Quadro 1. Ensaios de caracterização geotécnica

Ensaios	Características
Análise granulométrica (NBR 7181)	Determinação das proporções de argila, silte, areia e pedregulho, com o objetivo de determinar a textura do solo e sua distribuição por tamanho de grão.
Limite de liquidez (NBR 6459) e Limite de plasticidade (NBR 7180)	Extração dos índices de consistência do solo (LL, LP e IP) essenciais para classificar a plasticidade e prever a propensão do solo a deformações volumétricas.
Peso específico dos sólidos (NBR 6508)	Essencial para determinar o índice de vazios e o grau de saturação.
Teor de umidade natural (NBR 6457)	Relevante para analisar a condição de saturação e liquidez do solo no instante da coleta.
Resistência à compressão não confinada (NBR 12770)	Executado em amostras não deformadas, possibilitando a obtenção direta da resistência não drenada (su) em condição rápida, sem necessidade de drenagem.

Fonte: Autora (2026).

A partir dos resultados da caracterização do solo, foram determinados parâmetros geotécnicos que subsidiaram a modelagem computacional do talude. A análise de estabilidade ocorreu com o auxílio de um *software* geotécnico, utilizando o método de equilíbrio limite de Morgenstern–Price para determinar o (FS). O fator de segurança foi obtido pela razão entre forças resistentes e atuantes, sendo FS = 1 indicativo de equilíbrio limite e ruptura iminente (Duncan; Wright, 2014).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

$$FS = \frac{\tau f}{\tau d}$$ Equação 1

Onde:

FS: é o fator de segurança

τf: é a força resistente

τd: é a força solicitante

Assim,

- Se FS > 1 → as forças resistentes superam as atuantes → o talude está estável.
- Se FS = 1 → as forças resistentes são iguais às atuantes → o talude está em equilíbrio limite.
- Se FS < 1 → as forças resistentes são menores → o talude já rompeu ou está em colapso progressivo

Após a análise de estabilidade, foi realizado um estudo comparativo com resultados da literatura para validar os fatores de segurança, aprimorar a modelagem e avaliar criticamente as potencialidades, limitações e incertezas da metodologia, contribuindo para o entendimento dos mecanismos de instabilidade.

2.1. Caracterização do local da pesquisa

A área de estudo localiza-se na região amazônica, caracterizada por clima tropical úmido e elevados índices de precipitação. Nessa região, há aumento significativo de deslizamentos durante períodos chuvosos (Das *et al*., 2020). O talude possui uma sobrecarga em sua crista e está localizado às margens do rio Amazonas, onde há um regime de variação do nível d'água, uma oscilação local de aproximadamente 3,0 metros entre os níveis de cheia e vazante, ocorrendo duas vezes ao dia, em função do regime hidrodinâmico regional. Na região também ocorre o fenômeno natural denominado na literatura regional como "terras caídas", responsável por promover alterações contínuas na paisagem ribeirinha (Costa; Oliveira, 2020; Bandeira *et al*., 2018).

Esse fenômeno resulta da interação de fatores geotécnicos, hidrodinâmicos e geomorfológicos, destacando-se a presença de solos moles e sensíveis, suscetíveis à erosão, variações do nível do rio, ação das correntes e subpressões na base dos taludes (Queiroz; Alves, 2021; Marques; Silva; Almeida, 2019). Tais condições favorecem diferentes mecanismos de instabilidade, desde processos simples até eventos complexos, como escorregamentos e desabamentos, que podem variar de ocorrências localizadas a eventos de grande escala ao longo das margens fluviais (Marques, 2017; Ramos; Molinari, 2022; Souza *et al*., 2021).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir dos ensaios *in situ*, identificou-se uma fina camada de aterro sobre uma espessa camada de solo mole, seguida de solo residual. A caracterização indicou predominância de frações finas (argila: 11%–68%; silte: 18%–76%), com baixa presença de areia (1%–19%) e pedregulho (<2%), classificando o material como siltoso-argiloso, de baixa permeabilidade, alta retenção de água, elevada compressibilidade e baixa resistência ao cisalhamento quando saturado (Tabela 1). Foi identificado uma camada de argila sensível entre 9,5 m e 10,0 m, com elevada sensibilidade e baixa rigidez, tornando-a crítica à estabilidade do talude devido à menor resistência ao cisalhamento e maior suscetibilidade à ruptura.

Tabela 1. Caracterização geotécnica do solo mole

Ensaio	Resultado obtido
Análise granulométrica	Argila: 11 – 68 % Silte: 18 – 76 % Areia: 1 – 19 % Pedregulho: até 2 %
Limite de Liquidez	> = 1 em 50% da amostra
Limite de Plasticidade	Entre 5-10 m, solo heterogêneo com finas camadas (~0,5 m) de argilas CH e CL; abaixo, camadas mais espessas das mesmas argilas.
Peso específico dos sólidos	24 – 27
Teor de umidade natural	25 – 139
Peso específico natural	15 – 19
Índice de vazios	0,86 – 2,43

Fonte: Autora (2026).

3.1. Análise de estabilidade

O maciço foi dividido em duas seções geotécnicas, com base nos furos de sondagem, e modelado sob diferentes condições geotécnicas, hidráulicas e de carregamento. A Tabela 2 resume os parâmetros das camadas das Seções 1 e 2, com cores distintas para sua identificação.

Tabela 2. Propriedades das camadas de solos

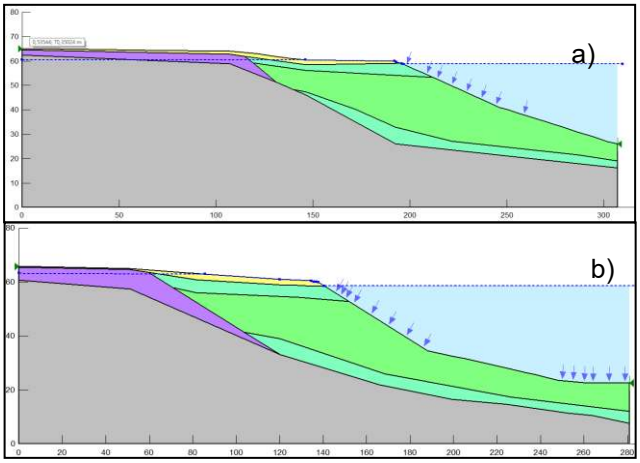
Material	S_u (kPa)	Ângulo de Atrito (°)	Peso Específico (kN/m³)	Cor de Referência
Aterro	10	30	17	
Argila 1	36	0	15	
Argila 2	41	0	15	
Argila Rija	90	0	18	
Solo Residual	150	40	19	

Fonte: Autores (2026).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

A análise dos ensaios indica que a porção superior do talude é formada por aterro, seguido por argila rija e solo residual, enquanto a porção inferior apresenta aterro sobre argila mole (Argila 1), com solo residual em maiores profundidades. A Figuras 2 mostra a distribuição dessas camadas nas Seções 1 e 2.

Figura 2. Geometria do talude: a) Seção 1; b) Seção 2



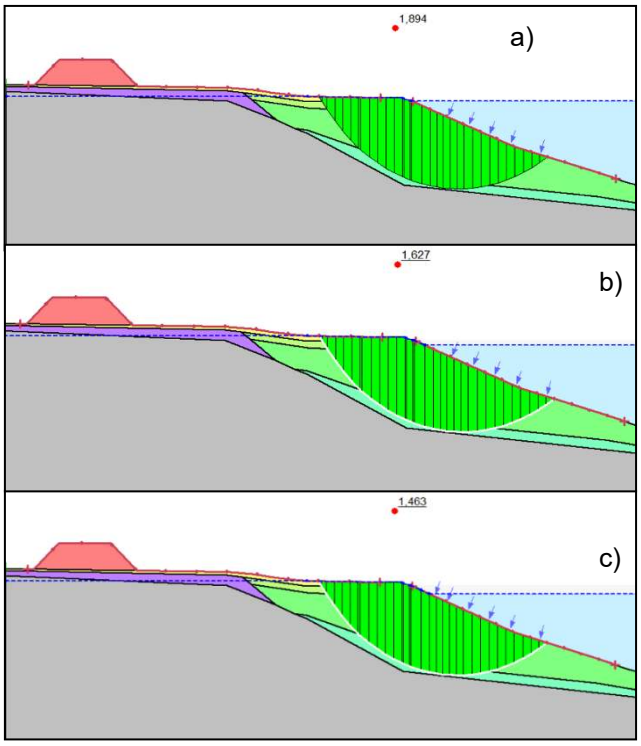
Fonte: Autores (2026).

Para a Seção 1, foram simuladas três condições de nível do rio alto, médio e baixo (Figura 3), mantendo o nível freático e o carregamento constantes, devido à lenta variação das pressões neutras em solos argilosos (Song *et al*., 2025).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

Figura 3. Seção 1: (a) análise com o nível do rio alto, (b) Com nível médio e (c) nível baixo

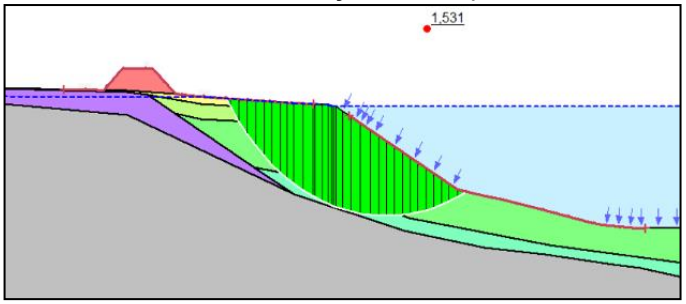


Fonte: Autores (2026).

A análise da Figura 4 indica que, mesmo com sobrecarga, o nível alto (FS = 1,894) e médio (FS = 1,627) apresentam fatores de segurança superiores ao mínimo recomendado de 1,5 para situações de alto risco (Silva *et al*., 2021). No nível baixo, o FS foi de 1,463, ligeiramente inferior ao limite, porém acima de 1,0, indicando ausência de ruptura iminente e estabilidade global do talude.

Na Seção 2, as análises com e sem sobrecarga para o nível do rio alto, mostraram pouca variação (< 1%) entre os casos analisados: com carregamento, FS = 1,531, e sem FS = 1,539 (Figura 4), evidenciando influência limitada da sobrecarga nesse cenário.

Figura 4. Análise de estabilidade da seção 2, com pilha e nível do rio alto

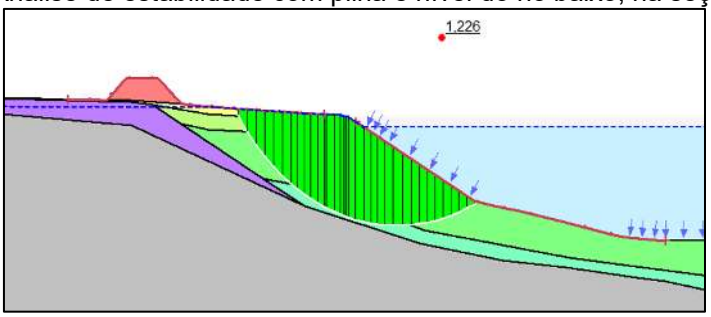


Fonte: Autores (2026).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Do mesmo modo, foram desenvolvidas análises de estabilidade para os níveis médio e baixo do rio, mantendo-se, em ambos os casos, o carregamento adicional. A Figura 5 apresenta o menor fator de segurança obtido entre os cenários analisados, com valor igual a 1,226, correspondente à condição de nível baixo do rio associada à sobrecarga adicional. É importante ressaltar que o círculo de ruptura está limitado à camada de solo residual, indicando que eventuais instabilidades afetariam apenas as camadas superficiais.

Figura 5. Análise de estabilidade com pilha e nível do rio baixo, na seção 2



Fonte: Autores (2026).

A Tabela 3 apresenta os fatores de segurança da Seção 2 para diferentes níveis do rio e condições de carregamento. Os resultados foram comparados aos critérios da ABNT NBR 11.682 (2009), permitindo avaliar a estabilidade do talude nas condições simuladas.

Tabela 3. Fatores de segurança para a seção 2 obtidos para cada hipótese

Modelo	Nível do rio	Pilhas	F. S
I	Alto	Com sobrecarga	1,531
XI		Sem sobrecarga	1,539
III	Baixo	Com sobrecarga	1,226
X		Sem sobrecarga	1,23
II	Médio	Com sobrecarga	1,383
IX		Sem sobrecarga	1,389

Fonte: Autores (2026).

As análises indicaram estabilidade global do talude nas Seções 1 e 2 (FS > 1,0), sem ruptura iminente. Contudo, é necessário verificar a conformidade com a ABNT NBR 11.682 (2009), que estabelece valores mínimos de FS conforme os níveis de risco (alto, médio e baixo), considerando perdas de vidas humanas, danos materiais e ambientais (Quadros 2 e 3).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Quadro 2. Nível desejado para evitar a perda de vidas humanas

Nível de segurança	Critérios
Alto	Espaços com fluxo intenso e permanência de pessoas. Locais urbanos ou não com elevada concentração de pessoas como ferrovias e rodovias de tráfego intenso
Médio	Ambientes com acesso limitado à movimentação e permanência de pessoas; ferrovias e rodovias com tráfego moderado.
Baixo	Ambientes com baixo acesso, movimentação e permanência de pessoas reduzido. (Ferrovias e rodovias de pouco tráfego).

Fonte: ABNT- NBR 11682 (2009).

Quadro 3. Nível desejado para evitar danos materiais e ambientais

Nível de segurança	Critérios
Alto	Danos materiais: áreas próximas a espaços com significativo valor histórico, social ou patrimonial, que impactem serviços essenciais. Danos ambientais: locais propensos a acidentes ambientais graves.
Médio	Danos materiais: ambientes localizados próximos a empreendimentos de valor mediano. Danos ambientais: ambientes propensos a acidentes ambientais de gravidade moderada.
Baixo	Danos materiais: espaços próximos a propriedades de baixo valor Danos ambientais: áreas sujeitas a eventos ambientais de menor impacto.

Fonte: ABNT- NBR 11682 (2009).

Considerando os níveis de segurança estabelecidos, a ABNT NBR 11.682 (2009) determina que o FS mínimo a ser adotado em projeto, conforme os critérios recomendados nos Quadros 1 e 2, deve ser definido de acordo com a relação apresentada na Tabela 4.

Tabela 4. Fatores de segurança mínimos para deslizamentos

Nível mínimo contra danos a vidas humanas / Nível mínimo contra danos materiais e ambientais	Alto	Médio	Baixo
Alto	1,5	1,5	1,4
Médio	1,5	1,4	1,3
Baixo	1,4	1,3	1,2

Fonte: ABNT- NBR 11682 (2009).

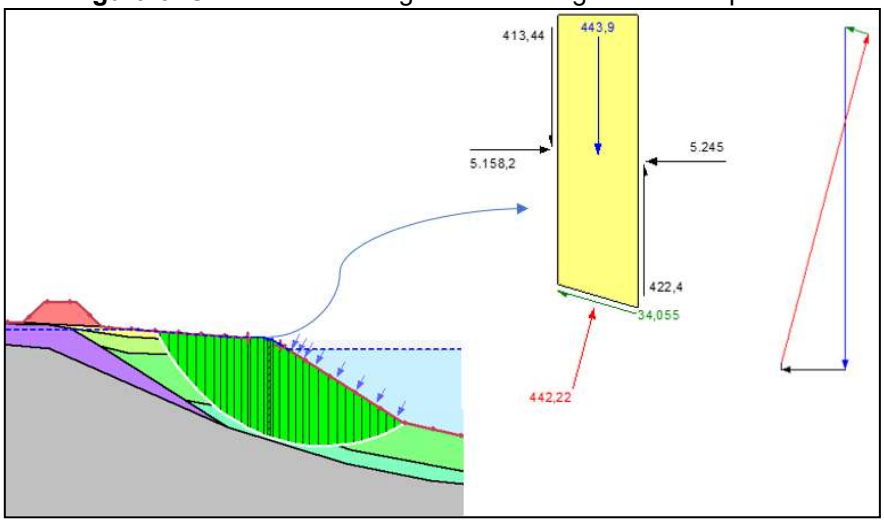
Com base nos critérios da ABNT NBR 11.682 (2009), o nível de segurança foi classificado como médio para risco à vida humana, devido à movimentação em área portuária, e baixo para danos materiais e ambientais, dada a simplicidade das estruturas e impactos restritos. Assim, o fator de segurança mínimo requerido é 1,30 (Tabela 4).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

A comparação com os resultados indica que, na Seção 1, todos os cenários (níveis alto, médio e baixo do rio) atenderam ao critério (FS > 1,30). Por outro lado, apesar de a Seção 2, não atender ao critério (FS) mínimo, talude o ainda pode ser pode ser considerado estável.

O diagrama de corpo livre (Figura 6) indica o peso da fatia de 443,9 kN, com influência mínima da sobrecarga no FS. Observou-se elevada poropressão (~294 kPa), gerando força de 299,4 kN, reduzindo as tensões efetivas. Assim, a variação do nível do rio é o principal fator de instabilidade, ao alterar as poropressões e a resistência ao cisalhamento.

Figura 6. Cunha de escorregamento e Diagrama de corpo livre



Fonte: Autores (2025).

Na base da fatia, a força normal (~442,2 kN) gera tensões responsáveis pela resistência ao cisalhamento, estimada em 41,7 kN, com resistência mobilizada de 34,1 kN, indicando proximidade ao limite de ruptura segundo Mohr-Coulomb. As forças laterais entre fatias (≈413,4 kN à esquerda e 5,2 kN à direita) evidenciam redistribuição interna de tensões, típica do método de Morgenstern-Price, essencial ao equilíbrio do sistema.

3.2. Estudo comparativo dos resultados

Para comparação, utilizou-se o estudo de Duong e Minh (2019), que analisou a estabilidade de margens do rio Vermelho (Vietnã) considerando propriedades geotécnicas, variações do nível d'água e erosão do pé do talude. Os autores aplicaram ensaios e modelagem numérica em dois cenários: com variação do nível e erosão, e apenas com variação do nível d'água.

O Quadro 4 compara o segundo cenário com esta pesquisa, evidenciando comportamento geotécnico semelhante, apesar das diferenças locais, destacando a influência das variações do nível d'água na instabilidade de margens fluviais.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Quadro 4. Análise Comparativa dos Resultados

Aspecto Comparado	Pesquisa atual	Duong e Minh (2019)
Variação Considerada	Nível d'água do rio	Nível d'água do rio
Tipo de solo	Argila sensível, solos moles, baixa coesão	Solos argilosos/coesivos e menos coesivos
Metodologia	Modelagem numérica SEEP/W + SLOPE/W, análise de estabilidade FS	Modelagem numérica SEEP/W + SLOPE/W, análise de estabilidade FS
Fator de Segurança (FS) ao baixar o nível do rio	Diminui progressivamente, com valores abaixo de 1,3	Diminui progressivamente, com valores abaixo de 1,3 em solos menos coesivos
Comportamento observado	Redução da resistência, aumento da poropressão	Redução da resistência, aumento da poropressão

Fonte: Autores (2026).

Ambos os estudos mostram que a queda do nível do rio reduz a resistência ao cisalhamento, devido à perda rápida da sustentação hidráulica e à manutenção de altas poropressões em solos argilosos, diminuindo as tensões efetivas e o fator de segurança. Nesse sentido, os resultados de Duong e Minh (2019) corroboram os achados desta pesquisa, reforçando a influência da dinâmica hidrológica na instabilidade de taludes e a consistência das análises realizadas.

4. CONSIDERAÇÕES

O estudo evidencia a complexidade da estabilidade de taludes na região amazônica, especialmente sob variações do nível do rio. A caracterização geotécnica de solos moles e sensíveis, associada à modelagem numérica, mostrou que, durante a cheia, o fator de segurança pode atingir valores elevados (até 1,539) devido à contenção hidráulica, proporcionando estabilidade temporária ao maciço.

Por outro lado, a condição mais crítica ocorre na vazante, quando o fator de segurança atinge valores mínimos (1,226), em função da perda do suporte hidráulico e da manutenção de elevadas poropressões em solos de baixa permeabilidade, reduzindo a resistência ao cisalhamento. Embora o talude permaneça globalmente estável (FS > 1,0), os valores ficam abaixo do mínimo normativo de 1,30. A comparação com Duong e Minh (2019) confirma que esse comportamento é consistente com padrões observados em margens fluviais com solos moles.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

O estudo reforça a importância de investigações geotécnicas detalhadas, modelagem numérica e análise de risco para a gestão de taludes, e recomenda estudos futuros utilizando análises de monitoramento em tempo real para melhorar a previsão de instabilidades e apoiar a tomada de decisão em áreas ribeirinhas.

REFERÊNCIAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11682**: estabilidade de encostas. 2. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

BANDEIRA, I. C. N.; ADAMY, A.; ANDRETTA, E. R.; COSTA, C. R. A.; ANDRADE, M. M. N. Terras caídas: Fluvial erosion or distinct phenomenon in the Amazon? **Environmental Earth Sciences**, v. 77, n. 222, p.1-16, 2018.

BEHAILU, G.; Habtemariam; KELIFA, B. Shirago; DEMOCRACY, D. Dirate. Effects of Soil Properties and Slope Angle on Deformation and Stability of Cut Slopes. **Hindawi Advances in Civil Engineering,** 2022. https://doi.org/10.1155/2022/4882095.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações**. 6. ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC. 1988. Vol. 1.

COSTA, J. E.; OLIVEIRA, M. A. Bank erosion and landslide hazards along the Amazon River. **Geomorphology**, v. 351, p. 106909, 2020. DOI: 10.1016/j.geomorph.2019.106909.

CRUDEN, D. M.; VARNES, D. Landslide Types and processes - Landslides Investigation and Mitigation. *In:* TURNER, A. Keith; SCHUSTER, Robert L. (Ed.). **Special Report/Transportation Research Board, National Research Council, 247**. Washington: National Academy Press, 1996.

DAS, B. M.; SOBHAN, K. **Fundamentos de engenharia geotécnica**. Porto Alegre: Cengage Learning, 2019.

DAS, H. S.; BHOWMICK, R.; MAHATA, K.; MALHOTRA, S.; SARKAR, B. M. IoT Based geotechnical monitoring of unstable slopes for landslide early warning in the Darjeeling Himalayas. **Sensors,** v. 20, n. 9, p. 2611, maio 2020. DOI: 10.3390/s20092611

DUNCAN, J. Michael; WRIGHT; BRANDON, Thomas L. **Soil Strength and Slope Stability**. 2. ed. New York: Wiley, 2014.

DUONG, T. V.; MINH, D. D. Slope stability analysis of riverbank considering water level fluctuation and erosion: A case study in the Red River, Vietnam. **Water**, v. 11, n. 12, p. 2572, 2019. DOI: https://doi.org/10.3390/w11122572.

ELL'ARINGA, M.; RANZANI, O.; BIERENS, J.; MURRAY, V. Região Montanhosa ("Região Serrana") 2011 Deslizamentos de terra: Impacto no Sistema Público de Saúde Mental. **Correntes de PLOS: Desastres**. 2018. doi: 10.1371/currents.dis.156b98022b9421098142a4b31879d866.

GARIANO, S. L.; GUZZETTI, F. Mass-Movements and Climate Change. In: Treatise on Geomorphology. 2nd ed., Vol. 5, p. 546-558. **Academic Press**, 2021. DOI: 10.1016/B978-0-12-818234-5.00043-2.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

GERSCOVICH, D. M. S. **Estabilidade de taludes**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2016.

GUIDICINI, G.; NIEBLE, C. M. **Estabilidade de taludes naturais e de escavação**. São Paulo: Blucher, 1983.

HOEK, E.; BRAY, J.W. **Rock Slope Engineering**. London: CRC Press, 2020.

HWANG, In-Tak; PARK, Hyuck-Jin; LEE Jung-Hyun. Probabilistic analysis of rainfall-induced shallow landslide susceptibility using a physically based model and the bootstrap method. **Landslides** 20, 829–844, 2023. DOI: https://doi.org/10.1007/s10346-022-02014-2

ISHAK, Aina Syahirah Ahmad; JELANI, Jestin; WONG, Soon Yee; SUIF, Zuliziana; MAZUKI, Ahmad Loqman Ahmad. Stability analysis of a silica sand slope model subjected to surcharge load using lem and fem methods. **International Journal of Geomate**, v. 27, sep. 2024. DOI: https://doi.org/10.21660/2024.121.g13442.

KABETA, Worku Firomsa; TAMIRU, Mulatu; TSIGE Damtew; WARE, Hashim. An integrated geotechnical and geophysical investigation of landslide in Chira town, Ethiopia. **Heliyon**, 2023, Doi: https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e17620.

KANG, Xingyu. **Some Innovative Studies on Stability Analysis, Landslide Mechanism and Stabilization Measure of Soil Slopes**. 2023. Thesis (Doctor of Philosophy) - Department of Civil Engineering, The University of Hong Kong, Hong Kong, 2023.

LACROIX, P.; HANDWERGER, A. L.; BIÈVRE, G. Life and death of slow-moving landslides. **Nat Rev Earth Environ,** v. 1, p. 404–419, 2020. https://doi.org/10.1038/s43017-020-0072-8.

MACÍAS, L.; QUIÑONEZ-MACÍAS, M.; TOULKERIDIS, T.; PASTOR, J. L Characterization and geophysical evaluation of the recent 2023 Alausí landslide in the northern Andes of Ecuador. **Landslides,** v. 21, n. 3, p. 529–540, 2024 DOI: https://doi.org/10.1007/s10346-023-02185-6.

MARQUES, R.; SILVA, J. R.; ALMEIDA, L. Slow-moving landslides in tropical soils: evidence from the Amazon basin. **Engineering Geology**, v. 259, p. 105178, 2019. DOI: 10.1016/j.enggeo.2019.105178.

MARQUES, Rildo Oliveira. **Erosão nas margens do rio Amazonas**: o fenômeno das terras caídas e as implicações para a cidade de Parintins-AM. 2017. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Federal do Amazonas, Manaus, AM, 2017.

NASCIMENTO, Rafael Silva do. **Confiabilidade aplicada à análise da estabilidade de taludes**: um estudo de caso de uma encosta fluvial no Norte Amazônico. 2021. Dissertação (Mestrado) - NDE/UFPA, 2021. Disponível em: https://repositorio.ufpa.br/jspui/handle/2011/16376. Acessado em: 13 mar. 2026.

NGUYEN, Huu Son; KHAU, Thi Ly; HUYNH, Trung Tin. Investigation of Natural and Human-Induced Landslides in Red Basaltic Soils. **Walter,** v. 17, n. 9, 1320, 2025. DOI: https://doi.org/10.3390/w17091320.

QIU, H; NIE, W; ASADI, A. Editorial:Monitoring, early warning and mitigation ofnatural and engineered slopes–volume III. *Front.* **Earth Sci**., v. 12, 146591, 2024. DOI: 10.3389/feart.2024.1465911

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

QUEIROZ, Matheus Silveira de; ALVES, Neliane. Conditioning Factors of "Terras Caídas" in Lower Solimões River -Brazil. **Caminhos de Geografia**, 2021. DOI:10.14393/RCG228054842

RAMOS, Jonhatan Eduardo; MOLINARI, Deivison Carvalho. Processos geodinâmicos no rio Negro: praia de Paricatuba – Iranduba, Amazonas. **GeoAmazônia**, 2022. eISSN: 2358-1778 DOI: https://dx.doi.org/10.18542.

REGMI, Sanjeev and DAHAL, Ranjan Kumar. Consequences of slope instability and existing practices of mitigation in hydropower projects of Nepal. **Geoenvironmental Disasters**, v. 11, p. 26, set. 2024. DOI:10.1186/s40677-024-00289-2.

ROBERTSON, P. K. Cone penetration test (CPT)-based soil behaviour type (SBT) classification system an update. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 53, n. 12, p. 1910-1927, 2016. DOI: 10.1139/cgj-2016-0044.

RUSYDY, Ibnu; CANBULAT, Ismet; ZHANG, Chengguo; *et al.* The development and implementation of design flowchart for probabilistic rock slope stability assessments: a review. **Desastres geoambientais,** v. 11, n. 28, 2024. DOI: https://doi.org/10.1186/s40677-024-00290-9.

SCHNAID, F.; ODEBRECHT, E. **Ensaios de campo e suas aplicações à engenharia de fundações**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

SILVA, D. P. B.; BARBOSA, J. P. O.; NASCIMENTO, F. G. C.; SILVA, C. M. G.; CRUZ, V. L. **Mapa Geológico e de Recursos Minerais do Estado do Amapá. Serviço Geológico do Brasil. Belém**: SGB, 2024.

SILVA, José Igor Gonçalves da; SANTOS, Fagner Campos dos. **Estabilidade e impermeabilização de talude.** Iguatu, CE: Quipá Editora, 2024. 69 p. ISBN 978-65-5376-390-6. DOI: 10.36599/qped-978-65-5376-390-6

SILVA, M. J. A.; CARVALHO, M. F.; TONIAL, T. M. Estabilidade de taludes: estudo de caso. **Revista Fasipe**, 2021. Disponível em: https://revistas.fasipe.com.br/index.php/readfasipe/article/view/90.

SONG, Wei; FENG, Ji; JUN-LING, Ding; MENG, Guan; YU-PENG, Lu. Influence of extremely rapid cyclic reservoir water level fluctuations on bank slope stability: Insights from model testing and numerical simulation of a pumped storage power station slope. **Engineering Geology,** v. 357, 2025, 108380. DOI: https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2025.108380.

SOUZA, Elias Santos; CAMPELO, Nilton de Souza; LIMA, Raimundo Humberto Cavalcante; AGUIAR, René Levy. Geotechnical characterization and modelling of the “Fallen Lands” phenomenon in the amazon environment. **Global Journal of Engineering and Technology Advances,** v. 09, n. 03, p. 122–132, 2021. DOI: https://doi.org/10.30574/gjeta.2021.9.3.0168.

SOUZA, R. M.; RODRIGUES, J. C.; ALMEIDA, M. S. Impacts of climate change on landslide occurrence in tropical regions. **Natural Hazards**, v. 108, n. 3, p. 2471-2488, 2021. DOI: 10.1007/s11069-021-04748-5.

STRUPLER, M.; HILBE, M.; ANSELMETTI, F. S.; KOPF, A. J.; FLEISCHMANN, T.; STRASSER, M. **Probabilistic stability evaluation and seismic triggering scenarios of submerged slopes in Lake Zurich,** (Switzerland) Geo-Mar Lett, 2016. DOI 10.1007/s00367-017-0492-8

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

TAMIRU, Mulatu ; KABETA, Worku Firomsa; TSIGE, Damtew; WARE, Hashim; ZEBERGA, Tenaye. Geotechnical analysis and stability assessment of a landslide event in Gera Woreda, Ethiopia. **Cogent Engineering,** v. 11, 2024. DOI: https://doi.org/10.1080/23311916.2024.2405745.

TANG, Qianhao; GRATCHEV, Ivan; RAVINDRAN, Sinnappoo. Effect of Rainfall Intensity on Landslide Initiation: Flume Tests and Numerical Analysis. **Geotechnics**, v. 3, n. 1, p. 104-115, 2023. https://doi.org/10.3390/geotechnics3010007.

TIAN, Wenjing; PEIFFER, Herman; MALENGIER, Benny; LIU, Gang; CHENG, Qingchao. Investigação numérica da estabilidade de taludes induzida por infiltração pluviométrica considerando escoamento bifásico água-ar. **Perspectivas Atuais sobre Geomorfologia Aplicada**, 2024. DOI: 10.5772/intechopen.113723

WEI, Wencheng; TANG, Hongxiang; SONG, Xiaoyu; YE, Xiangji. 3D slope stability analysis considering strength anisotropy by a micro structure tensor enhanced elasto-plastic finite element method. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, v. 17, n. 3, p. 1664-1684, 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2024.03.038.

YIN, Robert K. **Estudo de Caso**: planejamento e método. 5. ed. Porto Alegre: Bookman Editora, 2015. ISBN 9788582602324

ZHANG, Q.; SHEN, D. Rainfall-Induced Landslides: Influencing, Modelling and Hazard Assessment. **Water**, v. 16, 3384, 2024. https://doi.org/10.3390/w16233384.

ZHOU, Jianfeng; QIN, Changbing. Stability analysis of unsaturated soil slopes under reservoir drawdown and rainfall conditions: steady and transient state analysis. **Computers and Geotechnics,** v. 142, 104541, feb. 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2021.104541.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.