XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.6/93

Estudo do Potencial de Erodibilidade do Solo de uma Encosta do Alto da Penha, em Crato – CE

Francisco Wandson Vieira Nelo
Discente do Curso de Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Cariri, Juazeiro do Norte/CE, Brasil, wandson.viera@aluno.ufca.edu.br

Maria Luana Pinheiro Pinto
Discente do Curso de Graduação em Engenharia Civil , Universidade Federal do Cariri, Juazeiro do Norte/CE, Brasil, maria.luana@aluno.ufca.edu.br

Ana Patrícia Nunes Bandeira
Professora Associada, Universidade Federal do Cariri, Juazeiro do Norte/CE, Brasil, ana.bandeira@ ufca.edu.br

RESUMO: Os processos erosivos quando ocorrem de forma descontrolada e sem remediação geram graves impactos ambientais, sociais e econômicos. Os principais efeitos incluem: assoreamento e contaminação de rios e lagos, levando à perda da fauna aquática; perda da fertilidade do solo que resulta na diminuição da produção de alimentos; e deslizamentos de terra que podem causar a perda de vidas e bens materiais. Em áreas urbanas, os processos erosivos são intensificados pelo escoamento das águas pluviais e servidas. A erodibilidade do solo é determinada por características como textura, estabilidade de agregados, estrutura, permeabilidade, compactação e sucção. O presente trabalho tem como foco o estudo do potencial de erodibilidade de uma encosta localizada no bairro Alto da Penha, na cidade de Crato (CE), que apresenta erosão intensa. Esta encosta possui aproximadamente 28 m de altura, 35% de declividade e uma extensão média de 81 m, contendo dois pontos críticos de erosão que ameaçam moradias e a população local. Para o conhecimento das propriedades do solo, o estudo foi conduzido por meio de ensaios básicos de caracterização geotécnica e de técnicas indiretas de avaliação do potencial de erodibilidade do solo. Os resultados indicaram que o solo é predominantemente arenoso (78%), sendo classificado como Areia Siltosa (SM). Os ensaios no equipamento de cisalhamento direto revelaram uma redução significativa nos parâmetros de resistência do solo sob condições de inundação: a coesão do solo reduziu de 7,85 kPa para 0 kPa e o ângulo de atrito reduziu de 37° para 26°. Os resultados obtidos através dos ensaios de Crumb Test, Desagregação e Estabilidade de Agregados classificaram o solo como não dispersivo e de alta resistência à erosão pluvial, contudo a imprecisão e a especificidade do que cada um avalia devem ser consideradas. Durante o ensaio de Inderbitzen, percebeu-se que tanto a amostra na condição previamente inundada quanto na condição de umidade natural, a perda de solo ocorreu com facilidade, com o aumento da vazão. Já a amostra compactada apresentou resistência à perda de solo. A avaliação combinada dos ensaios de caracterização, resistência ao cisalhamento, Inderbitzen e a comparação com estudos prévios (Lloppis Trillo, 1999; Bastos, 1999) indicam uma elevada suscetibilidade do solo à erosão. O resultado crítico dos ensaios de resistência (cisalhamento) sob inundação é determinante. Conclui-se, portanto, que o solo estudado é potencialmente erodível. Este resultado confirma a necessidade urgente de medidas mitigadoras para reduzir o risco de erosão e proteger a área.

PALAVRAS-CHAVE: Erosão, Encosta, Degradação Ambiental.

ABSTRACT: Uncontrolled and unremediated erosive processes generate severe environmental, social, and economic impacts. The main effects include: siltation and contamination of rivers and lakes, leading to the loss of aquatic fauna; loss of soil fertility resulting in decreased food production; and landslides that can cause loss of life and property. In urban areas, erosive processes are intensified by stormwater and wastewater runoff. Soil erodibility is determined by characteristics such as texture, aggregate stability, structure, permeability, compaction, and suction. This study focuses on the erodibility potential of a slope located in the Alto da Penha neighborhood, in the city of Crato (CE), which exhibits intense erosion. This slope is approximately 28 m high, has a 35% gradient and an average length of 81 m, containing two critical erosion points that threaten housing

and the local population. To understand the soil properties, the study was conducted through basic geotechnical characterization tests and indirect techniques for evaluating soil erodibility potential. The results indicated that the soil is predominantly sandy (78%), classified as Silty Sand (SM). Direct shear tests revealed a significant reduction in soil strength parameters under flooded conditions: soil cohesion dropped from 7.85 kPa to 0 kPa, and the friction angle decreased from 37° to 26°. Results obtained through the Crumb Test, Disaggregation, and Aggregate Stability tests classified the soil as non-dispersive and highly resistant to rainfall erosion; however, the imprecision and specificity of each test must be considered. During the Inderbitzen test, it was observed that in both the pre-flooded and natural moisture conditions, soil loss occurred easily as the flow rate increased. In contrast, the compacted sample showed resistance to soil loss. The combined evaluation of characterization tests, shear strength, Inderbitzen tests, and comparison with previous studies (Lloppis Trillo, 1999; Bastos, 1999) indicates high soil susceptibility to erosion. The critical outcome of the shear strength tests under flooding is the determining factor. It is concluded, therefore, that the studied soil is potentially erodible. This result confirms the urgent need for mitigating measures to reduce erosion risk and protect the area.

KEYWORDS: Erosion, slope, Environmental Degradation.

1 INTRODUÇÃO

A erosão caracteriza-se pelo desgaste natural de solos e rochas, sob a influência de agentes naturais e atividades antrópicas. Na ausência de medidas mitigadoras, os processos erosivos desencadeiam severos impactos socioambientais e econômicos. Entre as principais consequências desses processos, destacam-se o assoreamento e a poluição de corpos hídricos, a degradação da biodiversidade local, a perda da produtividade agrícola, danos a infraestrutura viária e o aumento do potencial de deslizamentos de taludes, que colocam em risco a vida das pessoas e os patrimônios.

Em ambientes de clima tropical, de média a elevada pluviometria, os processos erosivos hídricos são mais intensos. O conhecimento do clima, relevo, tipo do solo, forma do uso e ocupação são determinantes no entendimento desses processos. Para a análise da erodibilidade do material, é importante conhecer o tipo de solo, textura, estrutura e a permeabilidade, além do teor de umidade e, consequentemente, da sucção, que interfere na perda de massa e na desestruturação devido aos processos erosivos (MASCARENHAS *et al.,* 2023).

Nesse contexto, foi investigado por meio de ensaios de laboratório, o solo de uma encosta, que vem apresentando focos de processos erosivos intensos e colocando em riscos a vida da população.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para este trabalho foram coletadas amostras deformadas e indeformadas de solo, de uma encosta situada no município do Crato, no interior do Ceará, que apresenta processos erosivos (Figuras 1 e 2). A encosta apresenta dimensões geométricas estimadas em: altura de 28 m; extensão de 80 m; e declividade de 35%; e localiza-se especificamente no bairro Alto da Penha, nas proximidades do Parque de Exposição, sendo georreferenciada pelas coordenadas UTM 454577.28 E / 9199489.27 S (Zona 24 M).



Figura 1. Encosta da Área de Estudo
(Autores, 2025)



Figura 2. Dtalhe de Ravina
(Autores, 2025)

Para o desenvolvimento do trabalho, realizou-se as seguintes atividades: a) Coleta de amostras de solo deformado e indeformado; b) Carecterização básica do solo; c) Ensaios de resistência ao cisalhamento do solo; d) Estudos Indiretos da erodibilidade; e) Ensaios de Inderbitzen.

2.1 Coleta de amostras de solo deformado e indeformado

A coleta das amostras foi realizada no terço inferior da amplitude da encosta, em uma área com baixo potencial de riscos de desmoronamento. O procedimento seguiu as diretrizes da ABNT NBR 9604/2024 - Abertura de poço e trincheira de inspeção, com retirada de amostras deformadas e indeformadas. Foram extraídos blocos indeformados, destinados aos ensaios de resistência ao cisalhamento, aos estudos indiretos de erodibilidade e de Inderbitzen. Também, coletaram-se amostras deformadas para os ensaios de caracterização geotécnica. Durante a amostragem, percebeu-se que o solo, embora umedecido, apresentava elevada resistência à moldagem dos blocos.

2.2 Ensaios de laboratório para o estudo da erodibilidade por meio de métodos indiretos

Inicialmente foram realizados os ensaios básicos de caracterização geotécnica, de acordo as normas técnicas brasileiras mais atualizadas. Os ensaios foram: Análise granulométrica; Determinação da massa específica dos sólidos da fração passante na peneira com abertura de 2,0 mm; Determinação do limite de plasticidade; Determinação do limite de liquidez.

A fim de obter os parâmetros de resistência do solo, nas condições de umidade natural de saturado; e estimar o potencial de erodibilidade, de acordo com a proposta de Bastos (1999), foram realizados ensaios de cisalhamento direto, de acordo com a norma técnica internacional ASTM D3080 - Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions. Durante o procedimento, os corpos de prova foram submetidos a tensões normais de 50, 100, 150 e 200 kPa.

Para avaliação do potencial de erodibilidade dos solos, por meio de técnicas indiretas, foram realizados os seguintes ensaios: ensaio de desagregação, *crumb test* e estabilidade de agregados. O ensaio do *Crumb Test*, foi empregado seguindo as diretrizes da ABNT NBR 13601/2020. O ensaio de desagregação e a avaliação da estabilidade de agregados (em aparelho de Yoder) foram realizados seguindo a proposta de Mascarenha *et al*. (2023). Na avaliação de estabilidade dos agregados utilizou-se duas porções de 25g de amostras de solo do mesmo bloco, com teores de umidade de 2,12%, e massas secas de 24,481 g.

2.3 Estudo da erodibilidade por meio de Ensaios de Inderbitzen

O ensaio de Inderbitzen é um método direto de quantificar a erodibilidade do solo (Figura 4). Por meio da simulação do escoamento superficial sobre um corpo de prova cilíndrico (10 cm de diâmetro e altura de 13,5 cm), a perda de solo é quantificada, em um tempo e velocidade pré-estabelecidas, ou seja, a erodibilidade do solo é quantificada diretamente do ensaio.

Devido a este ensaio não ser normatizado, utilizou-se para o desenvolvimento deste trabalho a metodologia descrita por Fácio (1991, *apud* MASCARENHA *et al*., 2023), com algumas adaptações. Foram realizados ensaios em três condições da amostra: i) indeformada e pré-inundada por 24 horas; ii) amostra indeformada na umidade natural; iii) amostra compactada com parâmetros ótimos da energia normal (densidade seca máxima de 1,82 g/cm³, e umidade ótima de 14%).

Os ensaios foram realizados com as seguintes vazões de escoamento: 3 L/min, 5 L/min e 7 L/min; quanto ao tempo mínimo de ensaio, foi de 20 minutos; a inclinação utilizada na rampa foi de aproximadamente 35°, se assemelhando a da encosta em estudo. A Figura 5 representa o corpo de prova de solo no aparelho de Inderbitzen, durante a realização do ensaio.

Através dos resultados obtidos nos ensaios, também foi possível obter a classificação da erodibilidade, através da proposta de Bastos (1999), que qualifica a potencialidade da erodibilidade de acordo com o valor da taxa de erodibilidade (K). Para Bastos (1999), o solo pode se enquadrar como de; i) Alta erodibilidade (K> 0,1g/cm²/min/Pa); ii) Média erodibilidade (0,1≥ K≥ 0,001g/cm²/min/Pa); ou iii) Baixa erodibilidade (K< 0,001g/cm²/min/Pa).

Para a determinação da taxa de erodibilidade (K) montou-se um gráfico de tensão cisalhante hidráulica *versus* perda de solo (por unidade de área e tempo de ensaio), em que K é o valor do coeficiente angular da equação da reta que melhor ajuste os pontos desse gráfico.



Figura 4. Aparelho de Inderbitzen
(Autores, 2025)



Figura 5. Realização do ensaio de Inderbitzen
(Autores, 2025)

(1)

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Resultados dos ensaios básicos de caracterização geotécnica

A distribuição granulométrica do solo, obtida por meio dos ensaios de peneiramento e sedimentação com uso de defloculante, encontra-se ilustrada na Figura 6.

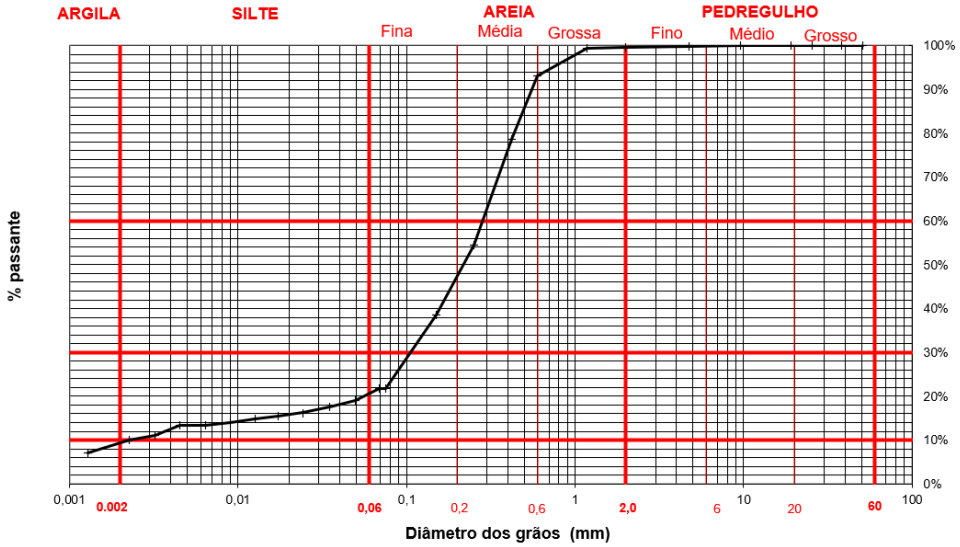


Figura 6. Curva granulométrica do solo (Autores, 2025)

O solo caracteriza-se como predominantemente arenoso, sendo composto por 78% de areia (fina, média e grossa). A fração passante na peneira de 0,075 mm representa 22% da amostra, sendo composta por 11% de silte e 10% de argila. A massa específica dos sólidos foi estimada em 2,63 g/cm³.

Os ensaios de consistência indicaram que o solo é não plástico (NP), uma vez que a amostra não apresentou a maleabilidade necessária para a moldagem durante os testes de Limite de Plasticidade (LP) e Limite de Liquidez (LL). Combinando os dados da análise granulométrica aos Limites de Atterberg, o solo foi classificado como SM (Areia Siltosa), segundo o SUCS. De acordo com a relação entre erodibilidade e textura do solo, proposta por Lloppis Trillo (1999, *apud* LAFAYETTE, 2006), os solos SM são considerados de elevada suscetibilidade à erosão. Segundo Bastos (1999), a amostra é considerada potencialmente erodível, visto que apresenta menos de 55% do material passante na peneira 0,075mm e IP menor que 10%.

3.2 Resultados dos ensaios de resistência ao cisalhamento do solo

Através dos dados obtidos no ensaio de cisalhamento direto, foram elaboradas as envoltórias de resistência ao cisalhamento do solo para as condições natural e inundada, conforme ilustrado na Figura 7. Estas envoltórias permitem a comparação direta da influência do grau de saturação na resistência ao cisalhamento do solo.

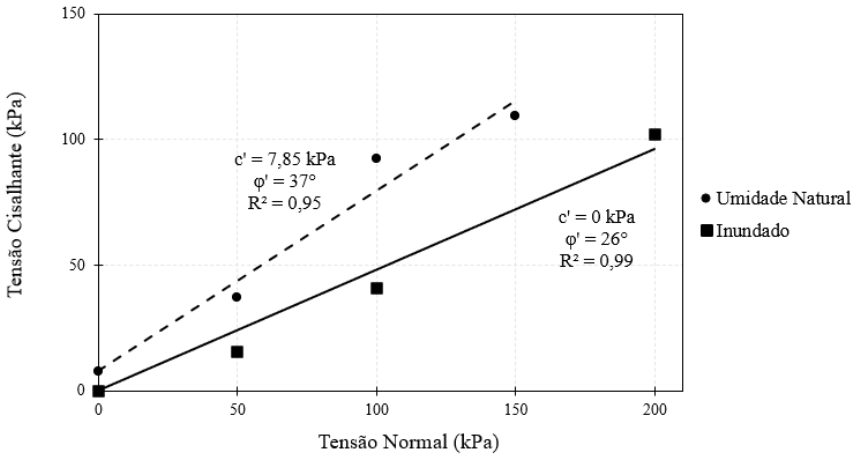


Figura 7. Envoltórias de resistência ao cisalhamento (Autores, 2025)

Observa-se na Figura 7 que os parâmetros de resistência do solo sofreram variação, quando se compara os resultados do solo na umidade natural (c’ = 7,85 kPa e φ’ = 37°) com o solo inundado (c’ = 0 kPa e φ’ = 26°). A redução dos valores de intercepto de coesão e atrito com a inundação indica que o solo perde resistência em contato com água, sendo um fator que contribui para as ocorrências de erosões. De acordo com a proposta de Bastos (1999), solos que apresentam variação de mais de 85% no intercepto de coesão, com a inundação, são considerados potencialmente erodíveis.

3.3 Resultados dos ensaios indiretos para o estudo da erodibilidade

Os resultados dos ensaios de *Crumb Test* indicaram que preservação da forma da amostra, sem a ocorrência de turvação na água; podendo enquandrao o solo, de acordo com a ABNT NBR 13601 (2020), como de grau 1 de dispersão, ou seja, solo não dispersivo.

Quanto ao ensaio de desagregação, percebeu-se nas etapas de inundação da amostra, que não ocorreram mudanças significativas na forma dos corpos de prova, apenas pequenas desagregações. Porém notou-se a saída de muitas bolhas de ar. A resposta deste ensaio pode indicar um solo de comportamento sem resposta, de acordo com Holmoren e Flanagan (1977, *apud* MASCARENHA *et al*, 2023).

Os resultados dos ensaios de estabilidade dos agregados estão apresentados na Tabela 1. Os diâmetros médios ponderados (DMP) obtidos foram 1,776 e 1,838. Esses valores próximos permitem enquadrar o solo como não erodível, pelo critério de Alcântara (1997), que considera erodível o solo que apresenta DMP < 1,5 mm. Considerando o material retido nas peneiras de diâmetro igual ou inferior a 0,25 mm foi de 0,739 g para a Amostra A e 0,497 g para a Amostra B, os índices de estabilidade de agregado são, respectivamente, 96,98% e 97,97%. Com esses valores, pode-se dizer que o solo possui estabilidade entre os grãos.

Tabela 1. Porcentagens retidas em cada peneira (Autores, 2025).

Abertura da Peneira (mm)	Amostra A				Amostra B			
	Cápsula	MS (g)	%	DP	Cápsula	MS (g)	%	DP
2,00	10	20,821	85,05%	1,701	10-2	22,110	90,31%	1,806
1,00	18	1,114	4,55%	0,046	18-2	0,298	1,22%	0,012
0,50	35	1,115	4,55%	0,023	35-2	0,743	3,03%	0,015
0,25	60	0,614	2,51%	0,006	60-2	0,415	1,70%	0,004
0,15	100	0,125	0,51%	0,001	100-2	0,082	0,33%	0,01
	DMP (Σ DP)			1,776	DMP (Σ DP)			1,838

3.4 Resultados dos Ensaios de Inderbitzen

Os resultados dos ensaios de Inderbitzen, realizados nas três condições da amostra, estão apresentados na Figuras 11. Essa figura apresenta a relação da massa erodida acumulada e a tensão cisalhante hidráulica.

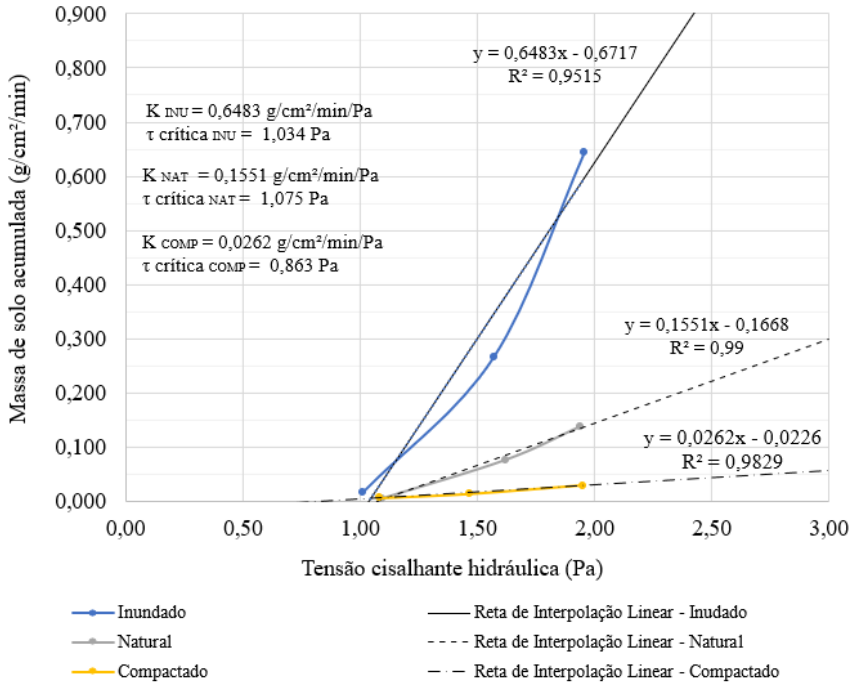


Figura 11. Massa erodida acumulada *versus* Tensão cisalhante hidráulica das amostras natural, inundada e compactada na umidade ótima (Autores, 2025)

Durante o ensaio de Inderbitzen, percebeu-se que tanto a amostra na condição previamente inundada quanto na condição de umidade natural, a perda de solo ocorreu com facilidade, com o aumento da vazão. A amostra inundada indicou um valor de K = 0,6483 g/cm²/min/Pa; e a amostra em umidade natural indicou K = 0,1551 g/cm²/min/Pa. Segundo a proposta de Bastos (1999), essas condições dos corpos de prova permitem enquadrar o solo como de alta erodibilidade. Já a amostra compactada apresentou resistência à perda de solo. A taxa de erodibilidade (K) deste corpo de prova foi de 0,0262 g/cm²/min/Pa, permitindo classificá-lo como de mediana erodibilidade, pelo critério de Bastos (1999).

4 CONCLUSÃO

O solo analisado apresenta textura predominantemente arenosa com baixo teor de finos. A avaliação da erodibilidade, fundamentada na caracterização geotécnica e nos parâmetros de resistência ao cisalhamento, corrobora os estudos de Llopis Trillo (1999) e Bastos (1999), indicando elevada suscetibilidade a erosão. Embora os ensaios indiretos de erodibilidade (*Crumb Test*, desagregação e estabilidade de agregados) sugiram potencial baixo de erodibilidade do solo, deve-se considerar a especificidade e as limitações desses métodos laboratoriais. Os ensaios de Inderbitzen indicaram elevadas perdas de solo e enquadramento como de alta erodibilidade do solo indeformado. Conclui-se, portanto, que o solo é potencialmente erodível, demandando medidas mitigadoras para redução do risco de erosão/deslizamentos na área. Ressalta-se que os processos erosivos locais são agravados por ações antrópicas inadequadas, como o descarte de águas servidas, a supressão da vegetação e o lançamento indiscriminado de lixo, fatores que agravam a situação.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à CNPq pelo apoio à realização deste trabalho através da concessão de bolsa de iniciação científica e tecnológica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alcântara, M. A. T. (1997). *Estudo da erodibilidade de alguns solos do Estado de São Paulo.* Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Departamento de Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos / USP, 129 p. Disponível em: < https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18132/tde-18072024-123116/publico/Alcantara_Marcelo_ME.pdf>. Acesso em: 27 fev. 2026.

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 (2020). NBR 13601. *Solo – Avaliação da dispersibilidade de solos argilosos pelo ensaio do torrão (Crumb test)*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2024). NBR 9604. *Solo - Abertura de poço ou trincheira de inspeção, com retirada de amostras deformadas e indeformadas – Procedimento.* Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2025). NBR 17212. *Solo – Determinação da massa específica dos sólidos da fração passante na peneira com abertura de 2,0mm*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (2025). NBR 7181. *Solo – Análise Granulométrica*. Rio de Janeiro.

ASTM International (2011). ASTM D3080: *Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions.*

Bastos, C. A. B. (1999). *Estudo geotécnico sobre a erodibilidade de solos residuais não saturados.* Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, 303 p. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/2978/000242000.pdf>. Acesso em: 27 jan. 2026.

Lafayette, K. P. V. (2006). *Estudo geológico-geotécnico do processo erosivo em encostas no parque metropolitano Armando de Holanda Cavalcanti – Cabo de Santo Agostinho/PE*. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil, UFPE, 358 p. Disponível em: < https://repositorio.ufpe.br/bitstream/123456789/5359/1/arquivo6543_1.pdf>. Acesso em: 25 jan. 2026.

Mascarenha, M. M. A.; Mahler, C.; Lafayette, K. P. V.; Nacinovic, M. G. G.; Bandeira, A. P. N.; Almeida, J. G. R. Erosão. *In*: CARVALHO, José Camapum de *et al*. *Solos não saturados no contexto geotécnico*. 2a ed. - São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica - ABMS, 2023. p. 825 - 860. *E-book*. Disponível em: <https://abms.com.br/livros/arquivos/Ebook_Solos%20N%C3%A3o%20Saturados%20no%20Contexto%20Geot%C3%A9cnico_2023.pdf>. Acesso em: 01 fev 2026.