

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

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

Francisco Wandson Vieira Nelo

Discente do Curso de Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Cariri, Juazeiro do Norte-CE, Brasil. wandson.vieira@aluno.ufca.edu.br

**RESUMO:** Os processos erosivos geram impactos ambientais, sociais e econômicos, quando ocorrem de forma desenfreada e sem qualquer forma de remediação. A erodibilidade do solo depende de características como: textura, estabilidade de agregados, estrutura, permeabilidade, densidade e sucção do solo. Na cidade de Crato, interior do estado do Ceará, uma encosta localizada no bairro Alto da Penha apresenta focos de erosões intensas, colocando em risco algumas moradias e a população. Neste contexto, este trabalho apresenta resultados de um estudo do potencial de erodibilidade do solo desta encosta, que tem altura estimada em 28 m e declividade em torno de 35%, com extensão média de 81 m. 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. Os resultados obtidos mostraram que o solo é predominantemente arenoso (78%), sendo classificado como Areia Siltosa (SM). Os ensaios do equipamento de cisalhamento direto mostraram que os parâmetros de resistência do solo reduzem com a inundação; a coesão do solo reduziu de 7,85 kPa para 0 kPa e o ângulo de atrito reduziu de 37° para 26° com a inundação. Por meio dos ensaios indiretos, conclui-se que os parâmetros do solo apresentam baixa erodibilidade, contudo os focos de erosão encontrados no local são intensificados por meio de ações antrópicas inadequadas, tais como: o despejo de águas servidas no solo, a retirada da cobertura vegetal e despejo de lixo na encosta.

**PALAVRAS-CHAVE:** Erosão, Encosta, Degradação Ambiental.

**ABSTRACT:** Erosive processes can generate significant environmental, social, and economic impacts when they occur in an uncontrolled manner and without the implementation of adequate mitigation measures. Soil erodibility is influenced by a range of intrinsic characteristics, including texture, aggregate stability, structure, permeability, density, and suction. In the municipality of Crato, located in the interior region of Ceará State, a slope situated in the Alto da Penha neighborhood has exhibited pronounced erosional features, posing risks to both residential structures and the local population. Within this context, the present study reports the findings of an investigation into the erodibility potential of this slope, which is approximately 28 m in height, with an average gradient of 35% and an estimated length of 81 m. To evaluate the geotechnical properties of the soil, the study employed standard characterization tests in conjunction with indirect assessment techniques of erodibility potential. The results demonstrated that the soil is predominantly sandy (78%) and was classified as Silty Sand (SM). Direct shear test results indicated a marked reduction in soil shear strength parameters under saturated conditions, with cohesion decreasing from 7.85 kPa to 0 kPa and the internal friction angle decreasing from 37° to 26°. Indirect evaluation methods further indicated that the soil exhibits a relatively low intrinsic erodibility potential. Nevertheless, the erosional processes observed on site are exacerbated by inadequate anthropogenic interventions, such as the discharge of wastewater onto the slope, removal of native vegetation cover, and improper disposal of solid waste.

**KEYWORDS:** Erosion, Hillside, Environmental Degradation.

## 1 INTRODUÇÃO

A erosão do solo é um problema que aflige todas as nações do globo e pode ser definida como o processo de desgaste de solos e rochas causados pelos agentes naturais e pela intervenção humana. Os processos erosivos geram impactos ambientais, sociais e econômicos, quando ocorrem sem qualquer forma de remediação. Os principais impactos causados são: assoreamento e contaminação de rios e lagos, danos à fauna do local; infertilidade do solo; deslizamentos que podem ocasionar perdas de vidas e de bens materiais; e destruição de estradas que impactam a sociedade. De acordo com Panagos *et al.* (2017, *apud* Miguel *et al.*, 2021), a erosão quando em processo acelerado, constitui sério problema de degradação ambiental, causando forte impacto na segurança alimentar, na biodiversidade e na manutenção dos sistemas produtivos.

Nas encostas os principais tipos de processos erosivos são: erosão por impacto da gota de chuva (splash), erosão linear ou por fluxo concentrado.

Segundo Wischmeier e Smith (1978), a erodibilidade refere-se a capacidade do solo resistir ou não aos processos erosivos. Nas encostas diversos fatores interferem na erodibilidade do solo, destacando-se a declividade, o comprimento e a forma da encosta. Também se salienta que a cobertura vegetal é o fator de maior relevância na proteção dos solos, pois afeta a sua erosão de várias maneiras, a saber: através dos efeitos espaciais da cobertura vegetal, dos efeitos de energia cinética da chuva e do papel da vegetação na estabilidade dos agregados de solos (GUERRA, 1994). Para a análise do potencial de erodibilidade de uma encosta deve-se analisar diversos fatores.

Nesse contexto, foi investigado um solo de uma encosta localizada na cidade de Crato, que apresenta processos erosivos.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

A área de estudo trata-se de uma encosta localizada no município do Crato, interior do Ceará (Figura 1). A encosta localiza-se próxima ao Parque de Exposição da cidade, no bairro Alto da Penha, tendo as coordenadas UTM 24 M 454577.28 E; 9199489.27 S. A encosta possui altura estimada em 28 m e uma declividade em torno de 35%, com extensão média de 80 m. As Figuras 2 a 5 apresentam ilustrações da área de estudo. Para obtenção dos resultados foram realizadas as seguintes atividades: a) Coleta de amostras deformadas e indeformadas de solo; b) Realização de ensaios básicos de caracterização geotécnica; c) Realização de ensaios de resistência ao cisalhamento do solo; d) Realização de ensaios indiretos para o estudo da erodibilidade.

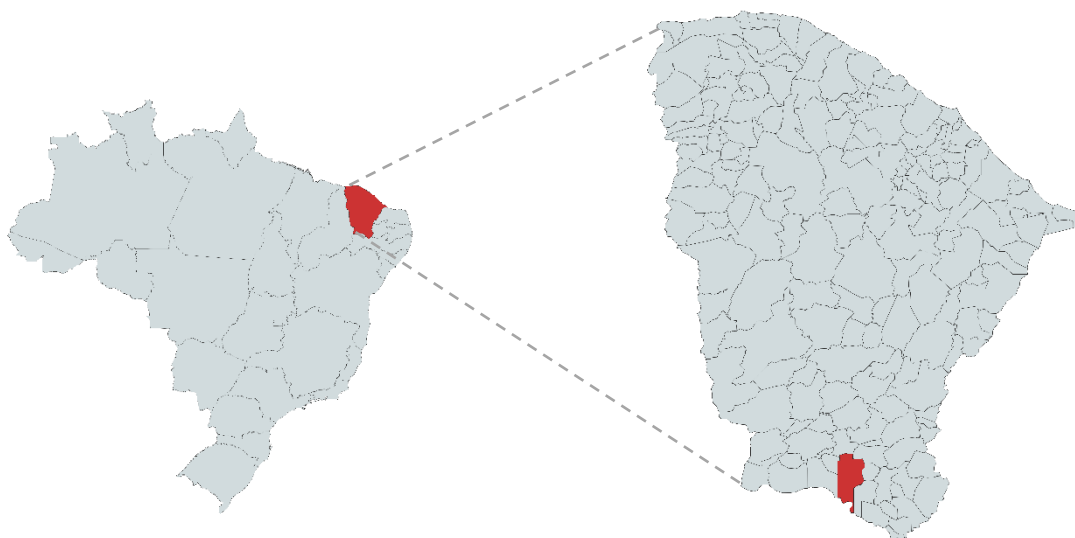


Figura 1. Localização do município de Crato-CE, Fonte: Os autores (2025).





Figura 2. Localização da Área de Estudo, Fonte: Google Earth (2025).



Figura 3. Focos de Erosão na Área de estudo, Fonte: Google Earth (2024).



Figura 4. Árvores em bordas do processo erosivo na área de estudo, Fonte: Os autores (2024).



Figura 5. Local da coleta de amostra na área de estudo da encosta, Fonte: Os autores (2024).

## 2.1 Coleta de amostras deformadas e indeformadas de solo

A coleta de amostras de solo foi realizada na base da encosta, em um ponto que não houvesse risco de desmoronamento. A retirada das amostras do solo seguiram as recomendações da ABNT NBR 9604 – Abertura de poço e trincheira de inspeção, com retirada de amostras deformadas e indeformadas. A Figura 6 ilustra as amostras coletadas do talude. Foram coletados dois blocos de amostras indeformadas, para a realização dos ensaios de resistência ao cisalhamento e dos ensaios indiretos para estudos de erodibilidade. Além disso, foram coletadas amostras deformadas, utilizadas nos ensaios básicos de caracterização do solo. Durante a coleta das amostras observou-se que o solo estava umedecido e mesmo assim apresentava uma grande resistência para a sua retirada, dificultando a moldagem dos blocos. As amostras foram utilizadas nos ensaios geotécnicos realizados no Laboratório de Geotecnia da UFCA.



Figura 6. Retirada de amostra indeformada na base da encosta, Fonte: Os autores (2024).



## 2.2 Ensaios básicos de caracterização geotécnica

Os ensaios básicos de caracterização geotécnica compreendem: análise granulométrica, massa específica dos grãos, limite de plasticidade e limite de liquidez. Esses ensaios foram realizados de acordo as seguintes normas:

- ABNT NBR 7181/2025: Solo – Análise granulométrica;
- ABNT NBR 17212/2025: Solo – Determinação da massa específica dos sólidos da fração passante na peneira com abertura de 2,0 mm;
- ABNT NBR 7180/2016: Solo – Determinação do limite de plasticidade;
- ABNT NBR 6459/2017: Solo – Determinação do limite de liquidez.

## 2.3 Ensaios de resistência ao cisalhamento do solo

Os parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo foram obtidos por meio do ensaio em prensas de cisalhamento direto, seguindo a norma americana ASTM D3080 - Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions. Foram realizados ensaios com corpo de prova em condição inundada e não inundada. As tensões de adensamento utilizadas nos ensaios foram de 50 kPa, 100 kPa, 150 kPa e 200 kPa.

## 2.4 Ensaios indiretos para o estudo da erodibilidade

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 *crumb test* é utilizado para avaliar o comportamento de torrões de solo quando submersos em água. O ensaio foi realizado seguindo as recomendações da ABNT NBR 13601/2020: Solo — Avaliação da dispersibilidade de solos argilosos pelo ensaio do torrão (*Crumb test*).

O ensaio de desagregação não possui uma norma técnica, sendo utilizada a metodologia descrita por Mascarenha *et al* (2023). Nele se observa o comportamento de um corpo de prova quando submerso, para verificar a estabilidade do solo. Para este procedimento foi necessário moldar cubos com 6 cm de arestas, a partir de amostras indeformadas. A execução do ensaio pode ocorrer por meio de inundação total ou parcial das amostras. Onde a amostra foi colocada em uma pedra porosa inundada por 30 minutos. Na inundação parcial, foi adicionado água até 1/3 da amostra e observado o comportamento do solo por 15 minutos. Esta etapa se repetiu para 2/3 e imersão completa da amostra, depois de submerso o corpo de prova foi novamente observado após 24 horas. No ensaio de inundação total, inunda-se o corpo de prova totalmente, durante 24h horas.

A realização do ensaio de estabilidade de agregados também foi baseada no método descrito por Mascarenha *et al* (2023). Esse ensaio consiste em analisar a estabilidade das frações dos agregados em água. Para este procedimento foi obtido 3 amostras de 25g, passante na peneira de 4,75mm e retido na peneira de 2mm. Se utilizou uma das amostras para a determinação do teor de umidade. As outras duas amostras foram umedecidas, e após 2 horas, cada uma foi colocada em um conjunto de peneiras de malha: 2 mm, 1 mm, 0,5 mm, 0,25mm e 0,15mm. O conjunto de peneiras foi posto no aparelho de Yoder, com nível de água atingindo a malha da peneira de 2 mm, sem submergir as amostras na água. As peneiras permaneceram por um período de 15 minutos no aparelho de Yoder com uma frequência de 32 oscilações por minuto. Após esse tempo, o conteúdo de cada peneira foi transferido para a estufa, para a determinação de cada fração desagregada.

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 3.1 Ensaios básicos de caracterização geotécnica

Os resultados dos ensaios de granulometria (peneiramento e sedimentação com o uso do defloculante) estão apresentados na Figura 7, por meio da curva granulométrica do solo.



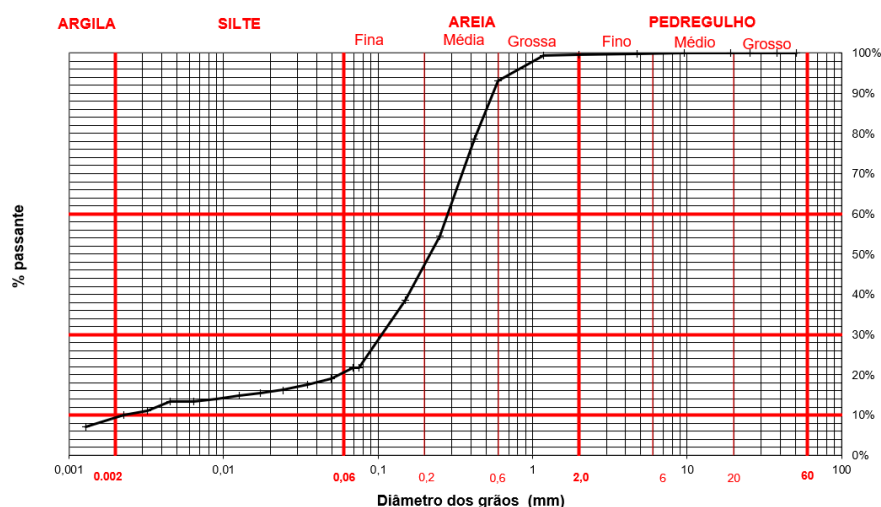


Figura 7. Curva granulométrica do solo da área de estudo, Fonte: Os autores (2025).

Observa-se que o solo é predominantemente arenoso, sendo constituído por 78% de areia (fina, média e grossa). As frações passantes na peneira de 0,075 mm somam 22%, onde é composto por 12% de silte e 10% de argila. A massa específica dos sólidos obtida em laboratório foi de 2,63 g/cm<sup>3</sup>.

Segundo Evans (1980, *apud* RAMIDAN, 2003), esse solo possui pouca resistência ao impacto das gotas de chuvas, e consequentemente não resiste a erosão, visto que a porcentagem de argila é abaixo de 30%, não formando um solo com agregados estáveis.

Os resultados dos ensaios de Limite de Liquidez (LL) e Limite de Plasticidade (LP) permitiram classificar o solo como não plástico, devido ao fato da amostra não apresentar coesão suficiente para a moldagem durante realização do ensaio. A partir das informações de granulometria e dos limites de consistência do solo, a amostra foi classificada como SM (Areia Siltosa), pelo Sistema Unificado de Classificação dos Solos (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 a erosão, ficando atrás apenas dos solos classificados ML (Siltes de baixa plasticidade e areias muito finas). 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 Ensaios de resistência ao cisalhamento do solo

A partir dos resultados do equipamento de cisalhamento direto, foram construídas as envoltórias de resistência ao cisalhamento do solo, para as duas condições do ensaio (natural e inundado), que estão apresentadas na Figura 8.

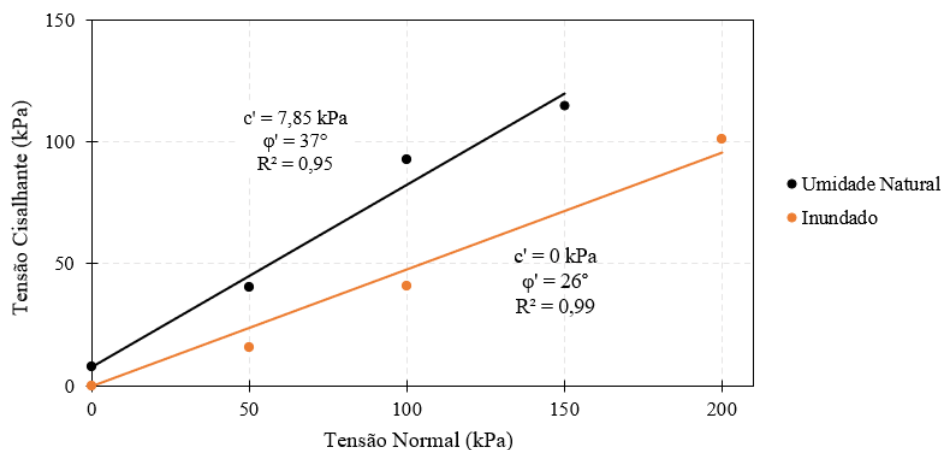


Figura 8. Envoltórias de resistência ao cisalhamento, Fonte: Os autores (2025).

Observa-se da Figura 8 que os parâmetros de resistência do solo sofreram grande variação, quando se compara os resultados do solo na umidade natural ( $c' = 7,85$  kPa e  $\phi' = 37^\circ$ ) com o solo inundado ( $c' = 0$  kPa e  $\phi' = 26^\circ$ ). A redução dos valores de coesão e atrito com a inundação indica que o solo perde resistência quando em contato com água, sendo um fator que contribui para as ocorrências de erosões. De acordo com Bastos (1999), solos que apresentam variação de mais de 85% na coesão, com a inundação, são considerados potencialmente erodíveis.

### 3.5 Ensaios indiretos para o estudo da erodibilidade

O ensaio de *crumb test* está ilustrado na Figura 9a. Após os torrões atingirem o fundo béquer, uma das amostra se fraturou em duas partes, enquanto nas outras amostras houve uma pequena desagregação de partículas, mas sem perda de forma. A Figura 9b apresenta os torrões após 1 hora do início do ensaio, se observou que outra amostra também sofreu fratura, enquanto a terceira amostra manteve sua forma. Em todas elas foi possível detectar uma pequena desagregação de partículas, mas sem haver turvação da água.

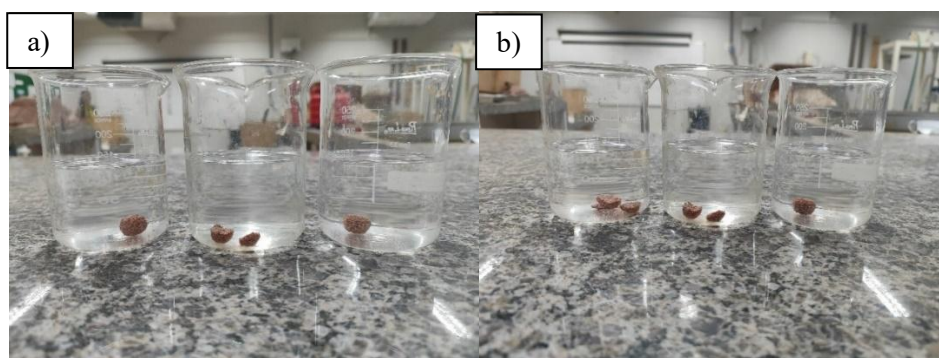


Figura 9. a) Início do ensaio de *crumb test*; b) Final do ensaio de *crumb test*, Fonte: Os autores (2025).

De acordo com a ABNT NBR 13601 (2020), este solo é classificado com grau 1 de dispersão, sendo considerado não dispersivo, visto que não se observou sinal de turvação no líquido, provocado por colóides em suspensão.

No ensaio de desagregação com imersão total a amostra não apresentou grandes alterações. A Figura 8a mostra o início do ensaio onde houve uma pequena desagregação de partículas, mas sem perda de forma ou formação de nuvens de sedimentos. Durante o ensaio foi perceptível muitas bolhas de ar saindo do cubo, o que pode indicar um maior índice de vazios no solo. Após as 24 horas, não se notou nenhuma alteração na amostra, como é apresentado na Figura 10b.

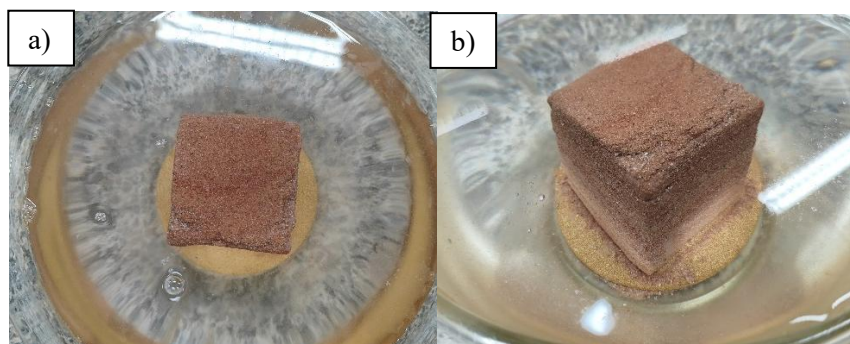


Figura 10. a) Início do ensaio de desagregação com imersão total; b) Final do ensaio de desagregação com imersão total, Fonte: Os autores (2025).

No ensaio de desagregação com inundação parcial a amostra também não apresentou grandes alterações. A Figura 11 mostra as etapas de inundação do ensaio.

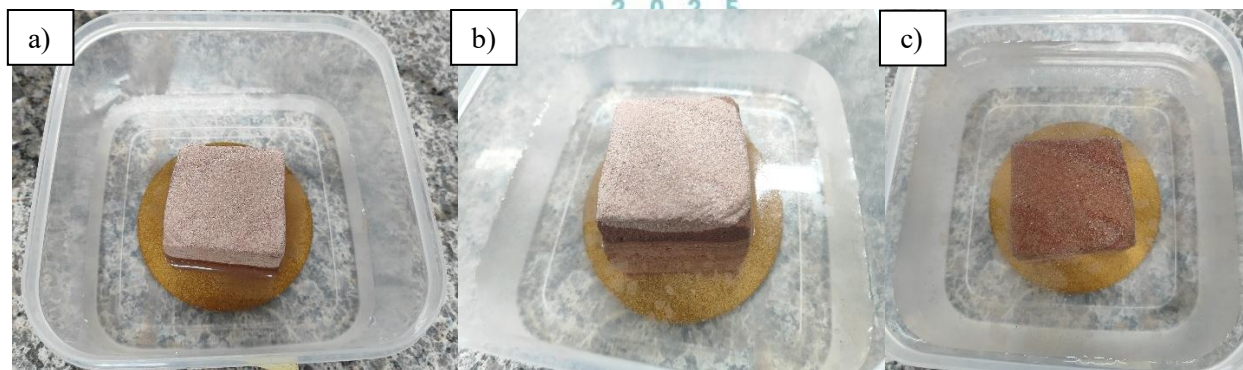


Figura 11. a) Inundação até 1/3; b) Inundação até 2/3; c) Inundação total, Fonte: Os autores (2025).

Durante as etapas de inundação da amostra não ocorreram mudanças significativas em sua forma, apenas a desagregação de uma pequena quantidade de partículas. Assim como na amostra de imersão total, no decorrer do ensaio também foi perceptível a saída de muitas bolhas de ar do solo, o que pode indicar um maior índice de vazios no solo. Após as 24 horas, não se notou nenhuma alteração na amostra. De acordo com Holmoren e Flanagan (1977, *apud* MASCARENHA *et al*, 2003), com os resultados obtidos para inundação total e inundação parcial, o comportamento do corpo de prova é descrito como sem resposta, visto que a amostra manteve a sua forma.

Os resultados do ensaio de estabilidade de agregados são apresentados na Tabela 1. Para as amostras de 25g utilizadas no ensaio, foi obtida uma umidade de 2,12%, logo a massa seca das amostras é de 24,481g.

Tabela 1. Porcentagens retidas em cada peneira, Fonte: Os autores (2025).

Abertura da Peneira (mm)	Amostra 1				Amostra 2			
	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

Segundo Alcântara (1997), se o diâmetro médio ponderado (DMP) encontrado for menor que 1,5 mm, o solo pode ser considerado como erodível. Os diâmetros médios ponderados obtidos pelo ensaio de estabilidade dos grãos foram 1,776 e 1,838, sendo considerado um solo não erodível pelo critério apresentado acima. Considerando o material retido nas peneiras de diâmetro igual ou inferior a 0,25 mm foi de 0,739 g para a amostra 1 e 0,497 g para a amostra 2, 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 e, conseqüentemente, resiste a erosão hídrica.

#### 4 CONCLUSÕES

O solo estudado tem textura arenosa, com baixo teor de finos. A avaliação da erodibilidade a partir dos ensaios de caracterização e de resistência ao cisalhamento do solo, associados aos resultados obtidos nos experimentos dos autores, Evans (1980), Lloppis Trillo (1999) e Bastos (1999), indicam que o solo possui uma elevada suscetibilidade a erosão. Apesar dos resultados obtidos nos ensaios indiretos (*Crumb test*, desagregação, estabilidade dos grãos), apresentarem a amostra como um solo não erodível, deve-se considerar a imprecisão destes ensaios, além da especificidade que cada um avalia a erodibilidade do solo. Sendo assim, conclui-se que o solo estudado é potencialmente erodível, este resultado orienta a necessidade de medidas mitigadoras para redução do risco de erosão na área. Além disso, os focos de erosão observados no local estão intensificados por meio de ações antrópicas inadequadas, por meio do despejo de águas servidas, retirada da vegetação e despejo de lixo na encosta, sendo também necessárias medidas para extinguir esses fatores.



## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq pela bolsa de iniciação científica e tecnológica para a realização deste trabalho.

## 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](https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18132/tde-18072024-123116/publico/Alcantara_Marcelo_ME.pdf)>. Acesso em: 29 jun. 2025.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). NBR 7180. *Solo – Determinação do limite de plasticidade*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2017). 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 (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 jun. 2025.
- Guerra, A. J. T. (1994). *A erosão dos solos no contexto social*. Anuário do Instituto de Geociências, Rio de Janeiro, v. 17, p. 14–23.
- 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](https://repositorio.ufpe.br/bitstream/123456789/5359/1/arquivo6543_1.pdf)>. Acesso em: 30 jun. 2025.
- 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](https://abms.com.br/livros/arquivos/Ebook_Solos%20N%C3%A3o%20Saturados%20no%20Contexto%20Geot%C3%A9cnico_2023.pdf)>. Acesso em: 27 jun 2025.
- Miguel, P.; Dalmolin, R. S. D.; Moura-Bueno J. M.; Soares, M. F.; Cunha, H. N., Albert, R. P.; Stumpf, L.; Leidemer, J. D. (2021). Mapeamento da erodibilidade e erosão potencial do solo em uma bacia hidrográfica de encosta. *Engenharia Sanitária e Ambiental*. Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental. v.26 n.1. jan/fev. p. 1-9.
- Ramidan, M. A. S. (2003). *Estudo de um processo de voçorocamento próximo a UHE de Itumbiara-GO*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, PUC-Rio, 242 p.
- Wischmeier, W. H.; Smith, D. D. (1978). *Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning*. Agriculture Handbook. Washington, USDA. 58p.