

# Influência da Estrutura do Solo na Erodibilidade Sob Diferentes Condições de Campo

Laura Maria Gonçalves Ferreira

Aluna do Curso de Engenharia Civil, UNESP/FEG, Guaratinguetá, Brasil, [laura.mg.ferreira@unesp.br](mailto:laura.mg.ferreira@unesp.br)

Mariana Ferreira Benessiuti Motta

Professora Assistente Doutora, UNESP/FEG, Guaratinguetá, Brasil, [mariana.motta@unesp.br](mailto:mariana.motta@unesp.br)

Paulo Valladares Soares

Professor Assistente Doutor, UNESP/FEG, Guaratinguetá, SP, Brasil, [paulo.valladares@unesp.br](mailto:paulo.valladares@unesp.br)

**RESUMO:** A constante ocorrência de processos erosivos associados a obras de engenharia faz com que seja necessário compreender melhor a suscetibilidade dos solos à erosão, sendo a erodibilidade um dos principais fatores condicionantes para que isto ocorra. Este estudo analisou a erodibilidade de um perfil de solo em talude na região de Guaratinguetá a partir do uso do equipamento de Inderbitzen, o qual satisfatoriamente analisou a tendência de desagregação de partículas do solo a partir da erosão hídrica, com diferentes inclinações, vazões e condições de umidade. Além disso, os ensaios também foram realizados em amostras reconstituídas com o mesmo índice de vazios das indeformadas de um mesmo solo. Para cada ensaio, foram avaliadas as massas de solo erodido na imposição de um fluxo de água constante, em intervalos de 1, 5, 10 e 20 minutos. As amostras em condição saturada obtiveram uma menor taxa de solo erodido; além disso, foi possível notar que com uma maior vazão, o aumento da inclinação significava o aumento da perda. Por fim, as amostras reconstituídas com um mesmo solo e umidade apresentou uma perda acumulada maior. O solo foi classificado com erodibilidade média a alta frente à erosão hídrica.

**PALAVRAS-CHAVE:** erosão superficial, nderbitzen, taxa de erosão, amostras indeformadas, amostras reconstituídas.

**ABSTRACT:** The constant occurrence of erosive processes associated with engineering works necessitates a better understanding of soil susceptibility to erosion, with erodibility being one of the main conditioning factors for this to occur. This study analyzed the erodibility of a soil profile on a slope in the Guaratinguetá region using the Inderbitzen equipment, which satisfactorily analyzed the trend of soil particle disaggregation due to water erosion, considering different inclinations, flow rates, and moisture conditions. Furthermore, the tests were also conducted on reconstituted samples with the same void ratio as undisturbed samples of the same soil. For each test, the masses of eroded soil were evaluated under constant water flow, at intervals of 1, 5, 10, and 20 minutes. Samples under saturated conditions exhibited a lower rate of soil erosion; additionally, it was observed that higher flow rates resulted in increased loss with increased inclination. Finally, reconstituted samples with the same soil and moisture content showed higher cumulative loss. The soil was classified as having medium to high erodibility in the face of water erosion.

**KEYWORDS:** surface erosion, Inderbitzen, erosion rate, undisturbed samples, reconstituted samples.

## 1 INTRODUÇÃO

A constante ocorrência de problemas derivados da evolução de processos erosivos associados a obras de engenharia, tais como a execução de perfis de cortes rodoviários e obras de drenagem para coleta e transporte de águas pluviais em vias urbanas e rurais, aponta a necessidade de identificação da suscetibilidade à erosão de terrenos através de critérios que levem em consideração as propriedades geotécnicas envolvidas nesse processo (SILVA *et al.*, 2020).

Em diversas regiões do mundo são enfrentados problemas com a erosão do solo, sendo a erodibilidade do solo uma característica fundamental que influencia diretamente a suscetibilidade de uma área à erosão hídrica e eólica. Conforme afirmado por Wischmeier e Smith (1978), "a erodibilidade do solo é a propriedade

que reflete a habilidade relativa de um solo resistir à erosão quando submetido às forças de impacto da chuva e ao escoamento superficial". Além disso, constitui uma das propriedades de comportamento dos solos de maior complexidade em função dos grandes números de fatores físicos, químicos, biológicos e mecânicos intervenientes (BASTOS, 1999).

O ensaio de Inderbitzen se mostra como importante ferramenta para a compreensão da erodibilidade de uma amostra de solo, consistindo em um equipamento para verificar a perda de solo de uma amostra utilizando parâmetros como declividades do terreno, comprimento de rampa e condições de escoamento (CAMAPUM DE CARVALHO *et al.*, 2006).

A obtenção de amostras indeformadas é fundamental para garantir a representatividade das propriedades do solo, uma vez que permite a avaliação de parâmetros como porosidade, densidade, resistência à compressão, condutividade hidráulica e capacidade de retenção de água. Todavia, por conta do seu alto custo e trabalho para obtenção, se trata de uma prática comum a reconstituição de amostras indeformadas, o que pode impactar na modelagem e no planejamento de práticas de conservação do solo e água.

Neste contexto, este trabalho partiu do objetivo de avaliar a influência da estrutura do solo na erodibilidade talude da região de Guaratinguetá, a partir da utilização do equipamento de Inderbitzen com amostras tanto indeformadas quanto reconstituídas para diferentes condições de teor de umidade inicial, vazão e inclinação.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Solo Estudado

A região para o desenvolvimento do estudo faz parte da Bacia Ribeirão Guaratinguetá. O solo foi coletado no bairro Pingo de Ouro, município de Guaratinguetá, no estado de São Paulo, no Instituto Lucas Amoroso – ILA, coordenadas 22°46'47"S 45°15'00"W, conforme figura 1.

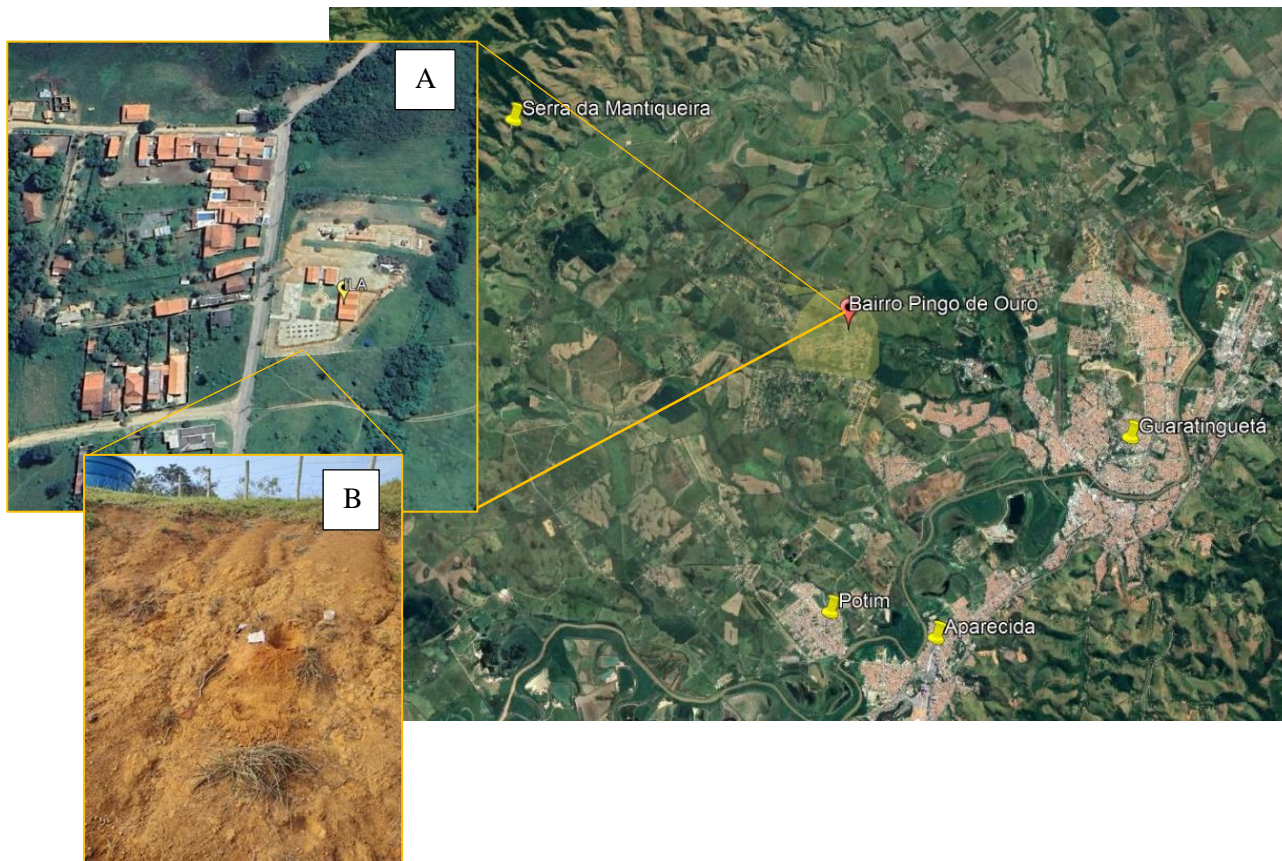


Figura 1. Localização da Área de Estudo A) Região e B) Talude.

Foram coletadas amostras de solo indeformadas em anéis de PVC e metálicos com diâmetro de 10 cm e altura de 5 cm, assim como amostras deformadas a serem utilizadas para reconstituição. De acordo com Pereira (2022), o solo é constituído de uma argila arenosa (classificação ABNT) de baixa plasticidade, como pode ser observado nas tabelas 1 e 2. De posse desses dados, Pereira (2022) avaliou qualitativamente que o solo em questão apresenta um grau de média a média-alta susceptibilidade à erosão hídrica.

Tabela 1. Caracterização do solo. Fonte: Pereira, 2022.

Propriedade	Valor	Unidade
Limite de Liquidez	50,08	%
Limite de Plasticidade	33,19	%
Índice de Plasticidade	16,89	%
Classificação ABNT	Argila Arenosa	-
Classificação SUCS	ML	-
Densidade Relativa dos Grãos	2,744	g/cm <sup>3</sup>

Tabela 2. Caracterização granulométrica. Fonte: Pereira, 2022.

Classificação ABNT	Granulometria	%
Pedregulho	> 2,0 mm	5,7
Areia	0,06 a 2 mm	31,5
Silte	0,06 a 0,002 mm	6,9
Argila	< 0,002 mm	55,9
D10	-	-
D30	-	-
D50	-	-
D60	-	0,036

### 3.2 Preparação das Amostras

As amostras indeformadas foram armazenadas a fim de conservar sua umidade no trajeto do campo ao laboratório, onde passaram por pesagem, aferição de umidade e preparadas para o ensaio nas condições seca ao ar e saturadas.

Na condição saturada, as amostras foram colocadas em um recipiente, acima de pedras porosas com papel filtro, mantendo um nível d'água, onde o processo de saturação ocorreu por capilaridade por pelo menos 3 dias.

Na condição seca ao ar, as amostras ficaram por pelo menos 3 dias exposta ao ar no Laboratório de Mecânica dos Solos da Faculdade de Engenharia e Ciências do Campus Guaratinguetá, sem contato com possíveis precipitações, conforme figura 2 abaixo.



Figura 2. Amostras indeformadas em processo de A) saturação e B) secagem.

Ademais, para a reconstituição de amostras foi utilizado solo coletado em amostras deformadas e seco em estufa a fim de garantir a determinação de sua umidade. As amostras foram reconstituídas com o mesmo índice de vazios da amostra indeformada e adicionada água a fim de manter o teor de umidade original. O processo de saturação ou secagem seguiu o mesmo padrão das amostras indeformadas.

### 3.3 Ensaios de Inderbitzen

Foi realizada a confecção de um aparelho de Inderbitzen (Figura 3) a partir de uma adaptação de uma mesa de desenho, sendo assim possível a mudança de inclinação. O vão possui um diâmetro de 10 cm, a abertura do canal inicial de 40 cm e final de 9 cm, possuindo um comprimento de escoamento de água de 67 cm no total.

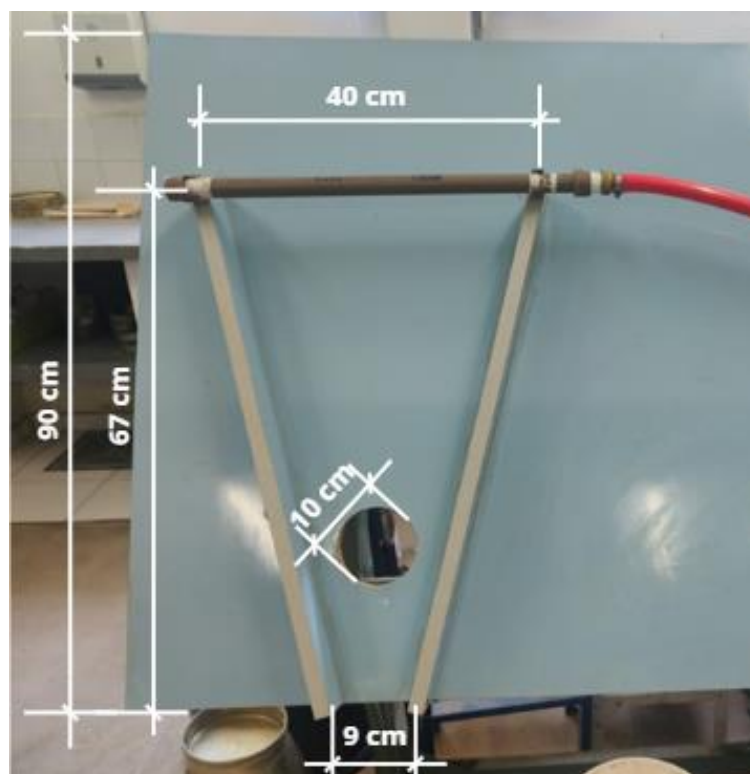


Figura 3. Aparelho de Inderbitzen adaptado.

Para o controle da vazão foi instalado um hidrômetro, a fim de acompanhar e controlar a vazão utilizada no equipamento. Além disso, foi utilizada uma mangueira com furos para que a água fosse distribuída ao longo do vão da rampa de forma uniforme.

As amostras indeformadas foram ensaiadas nas inclinações de 10, 20 e 45°, variando entre as vazões de 0,003 e 0,006 m<sup>3</sup>/min, com amostras saturadas por capilaridade e amostras secas ao ar. Visando comparar o efeito da estrutura do solo na erodibilidade, optou-se por avaliar as amostras reconstituídas nas três inclinações mencionadas, para a vazão de 0,003 m<sup>3</sup>/min, considerando somente as amostras saturadas por capilaridade.

O material solo desagregado e água escoada foi coletado separadamente nos tempos de 1, 5, 10 e 20 minutos e, posteriormente, passado na peneira #400. Todo o solo retido foi então levado à estufa para secagem, permitindo obter a massa de solo erodido pela amostra a cada tempo de coleta. A Figura 4 ilustra um exemplo de amostra reconstituída ao início e fim do ensaio.

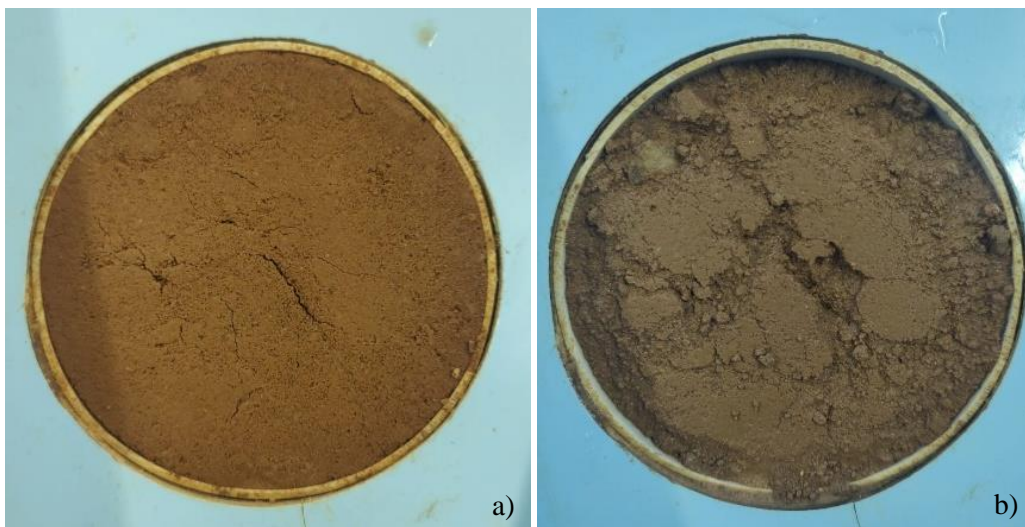


Figura 4. Amostra reconstituída A) antes e B) após ensaio.

#### 4 RESULTADOS

As figuras 5 e 6 a seguir mostram a evolução da perda de massa de solo nas amostras indeformadas, considerando a maior e menor vazão, respectivamente. As amostras que se encontravam em condição saturada apresentaram menores perdas durante o ensaio, havendo a maior concentração de perda de material durante os primeiros 5 minutos, para ambas as vazões testadas.

Os resultados permitem verificar que a secagem aumenta o potencial de desagregação do solo, assim como Bastos (1999) traz que os solos mais argilosos tem aumento significativo na taxa de erodibilidade em amostras secas ao ar.

É possível notar também que para a maior vazão estudada – 0,006 m<sup>3</sup>/min – o aumento da inclinação significou o aumento da perda de solo. Enquanto na menor vazão – 0,003 m<sup>3</sup>/min – o efeito foi o oposto, de tal forma que a inclinação de 10° possuiu valores significativamente maiores que a de 45°. Sendo assim, o aumento da erosão em uma maior vazão se dá com o aumento da inclinação e, conseqüentemente, da velocidade da água escoando.

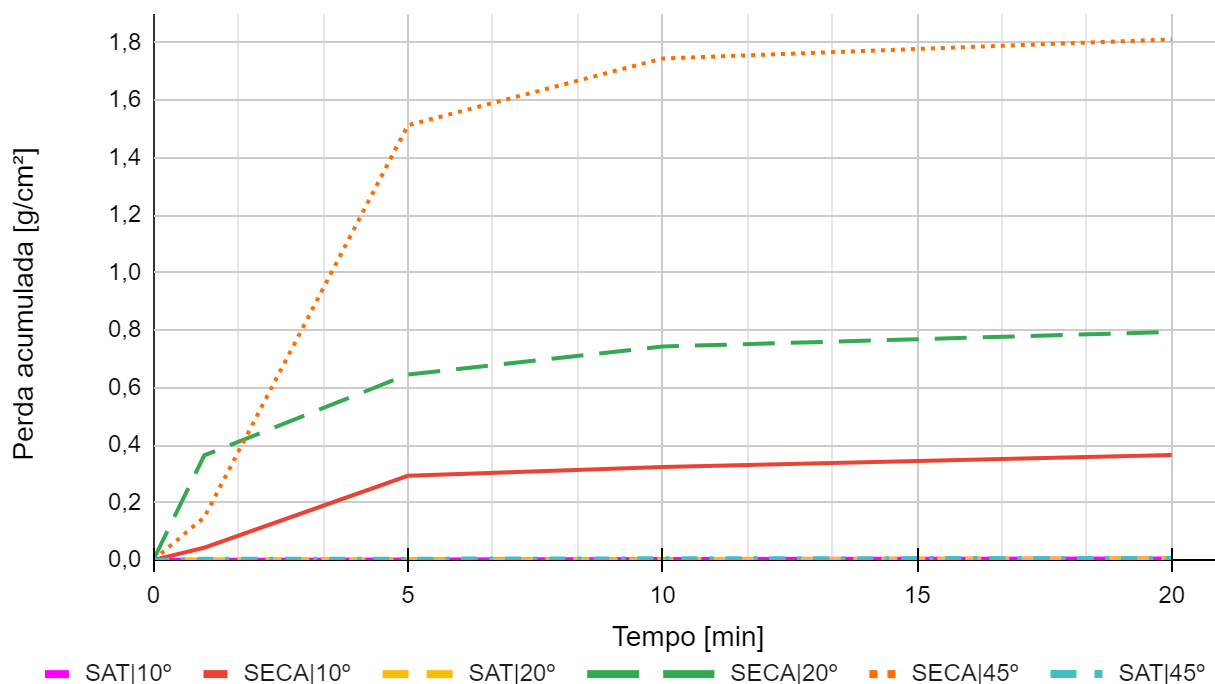


Figura 5. Ensaio em amostras indeformadas na vazão 0,006 m³/min.

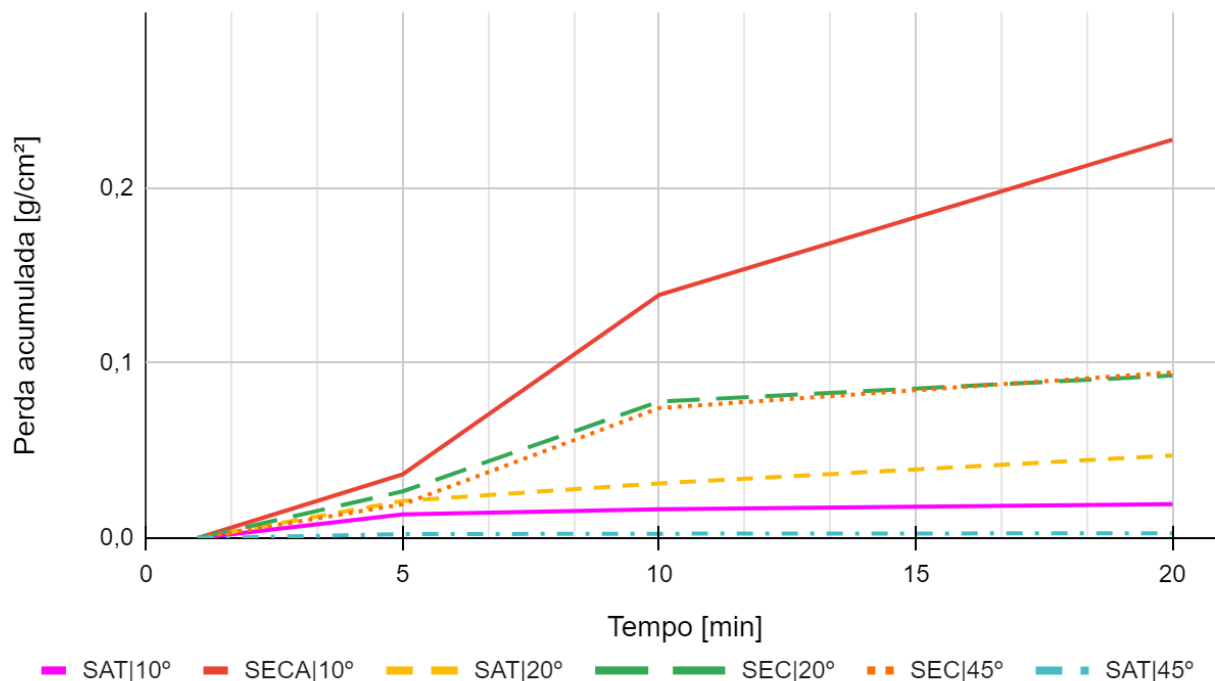


Figura 6. Ensaio em amostras indeformadas na vazão 0,003 m³/min.

A partir destes dados, determinou-se a taxa de erodibilidade  $K$  e classificação do solo em cada ensaio conforme tabela 3, levando em consideração a proposta de Bastos (1999), em que:

- Baixa erodibilidade –  $K < 0,001 \text{ g/cm}^2/\text{min}/\text{Pa}$
- Mediana erodibilidade –  $0,001 \leq K \leq 0,1 \text{ g/cm}^2/\text{min}/\text{Pa}$
- Alta erodibilidade –  $K > 0,1 \text{ g/cm}^2/\text{min}/\text{Pa}$ .

Tabela 3. Taxa de erodibilidade e classificação do solo quanto à susceptibilidade a erosão.

Inclinação	Vazão [L/min]	Condição	Taxa de Erodibilidade [g/cm <sup>2</sup> /min/Pa]	Erodibilidade
10°	3	Seca	0,281	Alta
		Saturada	0,021	Mediana
	6	Seca	0,263	Alta
		Saturada	0,0036	Mediana
20°	3	Seca	0,07	Mediana
		Saturada	0,043	Mediana
	6	Seca	0,424	Alta
		Saturada	0,0027	Mediana
45°	3	Seca	0,089	Mediana
		Saturada	0,0024	Mediana
	6	Seca	1,32	Alta
		Saturada	0,0053	Mediana

A partir de métodos indiretos, Pereira (2022) avaliou este solo nas condições indeformadas de campo concluindo que o mesmo apresenta comportamento de média a alta susceptibilidade a erodibilidade, ou seja, baixa resistência aos processos erosivos hídricos. Desta forma, este estudo complementa os dados já obtidos no solo, mostrando que o ensaio de Inderbitzen apresenta um resultado coerente com outras metodologias, classificando o solo com uma erodibilidade média a alta frente à erosão hídrica.

Ademais, as amostras reconstituídas, para um mesmo anel, mantendo-se o mesmo índice de vazios e teor de umidade inicial, apresentaram maior perda acumulada, conforme tabela 4. Desta forma é possível compreender melhor a importância da obtenção de amostras indeformadas para análise de determinado solo, pois ao ser reconstituída, a amostra pode apresentar valores diferentes dos reais. Tal fato reforça a importância da estrutura do solo na erodibilidade do mesmo.

Tabela 4. Comparativo entre amostras indeformadas e reconstituídas.

Condição	Inclinação	Tipo de Amostra	Perda acumulada [g/cm <sup>2</sup> ]				
			0 min	1 min	5 min	10 min	20 min
Saturada	10°	Indeformada	0	0,014	0,017	0,019	0,023
		Reconstituída	0	0,006	0,017	0,024	0,035
Saturada	20°	Indeformada	0	0,021	0,031	0,047	0,070
		Reconstituída	0	0,010	0,037	0,065	0,121
Saturada	45°	Indeformada	0	0,002	0,003	0,003	0,003
		Reconstituída	0	0,017	0,021	0,027	0,031

Para uma declividade de 10° houve o aumento de 52% de perda acumulada da amostra reconstituída em comparação com a indeformada, já para a inclinação de 20° houve um aumento de 73%, de tal forma que quanto maior a declividade, maior a diferença entre ambos valores. Todavia, em termos de classificação a partir da taxa de erodibilidade, tanto as amostras indeformadas quanto as reconstituídas são classificadas com mediana erodibilidade.

## 5 CONCLUSÃO

A erodibilidade do solo se trata de uma característica fundamental e que influencia diretamente sua suscetibilidade frente à erosão hídrica. Tal característica mostra a resistência do solo quando submetido a

forças de impacto de chuva e escoamento superficial. Devido a esta importância, este estudo avaliou a influência da estrutura do solo na erodibilidade do mesmo para diferentes condições de teor de umidade inicial, vazão e inclinação.

Neste estudo os casos mais críticos, classificados com erodibilidade alta, se tratam de amostras indeformadas na condição seca ao ar e, principalmente, na maior vazão estudada – de 0,006 m<sup>3</sup>/min – em todas as inclinações analisadas. As amostras previamente saturadas mostraram uma erodibilidade mediana, se mostrando mais resistentes ao processo erosivo.

Ao comparar amostras indeformadas e reconstituídas, observa-se que a perda acumulada de solo nos ensaios é cerca de pelo menos 50% maior em amostras reconstituídas do que indeformadas. Tal fato mostra que mesmo mantendo os mesmos índices físicos do solo, o processo de reconstituição implica em perda das características fundamentais associadas ao processo erosivo. Todavia, vale ressaltar que quando determinada a taxa de erodibilidade das amostras reconstituídas, obteve-se a mesma classificação do solo indeformado analisado, de erodibilidade mediana.

Por fim, verifica-se que a avaliação de forma direta da erodibilidade do solo em um talude na região de Guaratinguetá com a utilização do equipamento de Inderbitzen, o classificando como solo de mediana e alta erodibilidade, corrobora com a avaliação indireta realizada por Pereira (2022).

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BASTOS, C. A. B. *Estudo geotécnico sobre a erodibilidade de solos residuais não saturados*. Tese de Doutorado em Engenharia Civil, Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 303p. 1999.

CAMAPUM DE CARVALHO, J. et al. *Processos Erosivos no Centro-Oeste Brasileiro*. Universidade de Brasília, Brasília. FINATEC, 464 p. 2006.

PEREIRA, C. R. B. *Avaliação de erodibilidade em um solo do bairro Pingo de Ouro, Guaratinguetá/SP*. TCC, Curso de Engenharia Civil, UNESP, 92f. 2022.

SILVA, T. O.; PITANGA, H. N.; DIAS NETO, S. L. S.; FERRAZ, R. L.; PAES, B. S. T. Potencial erosivo de solos tropicais a partir de ensaios geotécnicos de avaliação direta e indireta. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG. *Revista Geociências*, UNESP/São Paulo, v. 39, n. 2, p. 573 – 584, 2020.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. *Predicting rainfall erosion losses—a guide to conservation planning*. Washington, D.C.: USDA Handbook, 1978.