

XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
IX Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas
IX Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
VI Conferência Sul Americana de Engenheiros Geotécnicos Jovens
XI Congresso Luso Brasileiro de Geotecnia
23 a 26 de Agosto de 2022 – Campinas – SP



COBRAMSEG 2022
23 A 26 DE AGOSTO | CAMPINAS | SP | BRASIL
COBRAMSEG | SBMR | GEOJOVEM | CLBG

Análise da erodibilidade de um solo da região Oeste da Bahia utilizando equipamento Inderbitzen

Letícia Santos de Oliviera Purificação Ribeiro

Discente, Universidade Federal do Oeste da Bahia, Barreiras-Ba, Brasil, leticiasoprr@outlook.com

Vinícius de Oliveira Kühn

Professor, Universidade Federal do Oeste da Bahia, Barreiras-Ba, Brasil, vinicius.kuhn@ufob.edu.br

José Leonardo Vanderlei de Carvalho

Professor, Universidade Federal do Oeste da Bahia, Barreiras-Ba, Brasil, leonardo.carvalho@ufob.edu.br

Simone Cristina Jesus de Moraes

Professora, Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Uberaba-MG, Brasil, simone.jesus@uftm.edu.br

RESUMO: A erosão dos solos é um processo natural no qual as partículas de solo são desagregadas e arrastadas de um lugar para outro por agentes externos, podendo ser acelerado por ações antrópicas, causando problemas ambientais, sociais e econômicos. Assim, é importante avaliar a erodibilidade dos solos visando mitigar os possíveis problemas propondo soluções de correção viáveis. Dentre as técnicas de análise de erodibilidade dos solos, o ensaio de Inderbitzen é muito empregado devido a sua simplicidade e baixo custo. O objetivo deste trabalho é estudar a erodibilidade de um solo coletado na cidade de Barreiras-BA. Foram coletadas amostras deformadas e indeformadas no Centro de Referência em Recuperação de Áreas Degradadas (CRAD) do Campus Reitor Edgar Santos, na cidade de Barreiras/BA e efetuados os ensaios de caracterização e erodibilidade. O solo foi classificado como uma areia siltosa não plástica. Pode-se constatar que o solo apresentou baixa erodibilidade apesar da sua característica arenosa, o que pode estar relacionado ao baixo índice de vazios. O equipamento inderbitzen construído mostrou-se eficaz para a análise de erodibilidade. Ademais, o ensaio de desagregação corroborou com os resultados obtidos.

PALAVRAS-CHAVE: Erodibilidade, Ensaio Inderbitzen, Ensaio de desagregação.

ABSTRACT: Soil erosion is a natural process in which soil particles are broken down and dragged from a place to another by external agents, which can be accelerated by human actions causing environmental, social and economic problems. It is important to assess soil erodibility in order to mitigate possible issues by proposing viable correction solutions. Among the techniques for analyzing soil erodibility, the Inderbitzen test is widely used due to its simplicity and low cost. The objective of this work is to study the erodibility of a soil collected in the city of Barreiras-BA. Deformed and undisturbed samples were collected at the Reference Center for Recovery of Degraded Areas (CRAD) of the Rector Edgar Santos Campus, in the city of Barreiras/BA and the characterization and erodibility tests. The soil was classified as non-plastic silty sand. It can be seen that the soil had low erodibility despite its sandy characteristic, which may be related to the low void index. The Inderbitzen equipment proved to be effective for the erodibility analysis. Furthermore, the disaggregation test corroborated the results obtained.

KEYWORDS: Erodibility, Inderbitzen Test, Disaggregation Test.

1 Introdução

A erosão dos solos é um processo comumente visto no meio ambiente por se tratar de um fenômeno natural onde partículas de solo são desagregadas e arrastadas de um lugar para o outro por agentes externos. Contudo, a ação do homem atua de forma a acelerar os processos erosivos gerando, muitas vezes, graves



problemas ambientais. A remoção de vegetação em margens de rios, por exemplo, atua diminuindo a infiltração da água da chuva, aumentando a velocidade de escoamentos superficiais e consequentemente facilitando a remoção de partículas do solo. Segundo Camapum de Carvalho *et al.* (2006), a rapidez e intensidade com que esse processo acontece são determinadas pela soma dos fatores que possibilitaram a isso, como tempo, volume de chuva, incidência do vento no local, inclinação do terreno, tipo de solo erodido, a compactação natural desse solo, mudança de temperatura, entre outros.

As consequências desse fenômeno interferem diretamente na paisagem local, na qualidade do solo e dos rios, e na vida da população, social e economicamente. Quando ocorre em áreas rurais pode comprometer a atividade agrícola, diminuindo a fertilidade dos solos, assoreando nascentes de rios e reservatórios, reduzindo a biodiversidade comprometendo fauna e flora. Nas zonas urbanas os efeitos são notáveis principalmente em comunidades carentes nas residências construídas em áreas de risco, em encostas, sem nenhum tipo de projeto para a segurança dos moradores.

A erodibilidade do solo é a propriedade que determina o grau de facilidade com que os grãos de solo se desagregam e são transportados de um ponto a outro por agentes erosivos. O estudo dessa propriedade vem sendo aprimorado com o passar dos anos, fazendo-se ajustes nos ensaios já conhecidos e adicionando-se novas técnicas para o conhecimento do solo estudado. Dentre as técnicas de análise de erodibilidade dos solos, o ensaio de Inderbitzen é um dos mais utilizados para esse tipo de estudo, pela simplicidade da execução e do baixo custo de instalação do equipamento. Apesar de ter sido proposto por Inderbitzen em 1961, e ainda não haver normatização, outros autores (BASTOS, 1999; FÁCIO, 1991) já apresentaram versões modificadas e aprimoradas do mesmo, com o objetivo de torná-lo fiel às condições em que o terreno natural estaria submetido.

Na região Oeste da Bahia, alguns trabalhos foram desenvolvidos ao longo dos anos. Dois deles têm como objetivo o mapeamento de regiões susceptíveis a erosão nas Bacias Hidrográficas dos Rios Grande, Corrente, Carinhonha e afluentes do São Francisco (ANDRADE *et al.*, 2002; VALLADARES *et al.*, 2002). Outro trabalho objetiva analisar estimativas de perda de solo para condições atuais de uso e ocupação da Bacia do Rio de Ondas (FISTAROL *et al.*, 2016). As três produções têm em comum a forma como a pesquisa foi realizada, fazendo-se uso de ferramentas de geoprocessamento para localizar áreas sujeitas ao processo de erosão. Nos trabalhos citados, notou-se que nenhum realizou um estudo direto da erodibilidade do solo no Oeste da Bahia. Desde modo, o objetivo deste trabalho é estudar a erodibilidade de um solo da cidade de Barreiras-BA por meio de ensaios Inderbitzen, ensaios de desagregação e ensaios de caracterização.

2 Materiais e métodos

A área escolhida para a coleta das amostras de solo está situada no Campus Reitor Edgard Santos da Universidade Federal do Oeste da Bahia - UFOB, próximo ao Centro de Referência em Recuperação de Áreas Degradadas (CRAD), na cidade de Barreiras-BA. Segundo Passo *et al.* (2010), a posição geográfica da cidade de Barreiras, mesorregião do extremo Oeste Baiano, garante que as temperaturas se mantenham muito elevadas por quase todo o ano variando entre 26°C e 20°C, médias máximas e mínimas. Em relação à pluviosidade anual, é registrada uma variação de 800 mm a 1600 mm, concentrada entre os meses de novembro a março, com umidade relativa média do ar de 70%.

Foram coletadas amostras deformadas para os ensaios de caracterização e amostras indeformadas para os ensaios de erodibilidade. Por conta da pouca umidade e escassez de chuva, foi necessário o umedecimento prévio do solo para que a cravação dos anéis na coleta das amostras indeformadas fosse possível.

As amostras foram preparadas seguindo as recomendações da norma NBR 6457 (ABNT, 2016a). Para a determinação da massa específica real dos grãos foi utilizada a NBR 6458 (ABNT, 2017a). Enquanto a análise granulométrica do solo foi executada de acordo com a NBR 7181 (ABNT, 2017b), e os ensaios de Limite de Liquidez e Limite de Plasticidade, utilizaram as especificações das normas NBR 6459 (ABNT, 2016b) e NBR 7180 (ABNT, 2016c), respectivamente.

Para o ensaio de Inderbitzen, foi construído o equipamento baseando-se nas dimensões adaptadas por Bastos (1999). O procedimento de ensaio e os parâmetros utilizados neste trabalho foram definidos de acordo com Bastos (1999), Fácio (1991) e Santos (1997). A rampa do equipamento foi feita de aço inox e sua adaptação tem inclinações que variam de 0° a 45° graus. Os anéis de aço utilizados para a retirada das amostras foram identificados e suas dimensões e pesos aferidos para os cálculos dos índices físicos do solo. Após



instalação no equipamento, a peneira granulométrica de número 200 (abertura de 0,075 mm) posicionada em frente à rampa, coletou-se o solo extraído da amostra, substituindo-se a peneira nos tempos de 1, 5, 10, 20 e 30 min, sem interromper o escoamento pela rampa. Para uma melhor representação dos dados e um maior conhecimento do solo estudado, foram escolhidas três vazões, 3, 4,5 e 6 L/min, para quatro inclinações, 5°, 10°, 26° e 45°. A Figura 1 apresenta o aparelho de Inderbitzen durante a realização de um dos ensaios.

Para determinar quantitativamente a erodibilidade de solo, Bastos (1999) relacionou a Perda de solo por área por minuto ($\text{g}/\text{cm}^2/\text{min}$) com a Tensão hidráulica τh (Pa), para cada vazão de ensaio. A partir disso, são ajustadas retas em que é possível estimar os parâmetros de erodibilidade: tensão cisalhante hidráulica crítica, τ_{hcrit} (Pa), que corresponde ao máximo valor de τh para erosão nula, e a taxa de erodibilidade, K ($\text{g}/\text{cm}^2/\text{min}/\text{Pa}$), que representa o gradiente de perda de solo em relação às tensões hidráulicas aplicadas.



Figura 1. Ensaio de Inderbitzen em andamento.

O ensaio de desagregação foram realizados com amostras indeformadas de dimensões 6 x 6 x 6cm. Seguiu-se os dois procedimentos realizados por Santos (1997). No primeiro, por imersão parcial, a amostra foi colocada dentro de um recipiente, sobre a pedra porosa, com água destilada até a sua base, permanecendo por um período de 30 minutos. Em seguida, acrescentou-se água até que se cobrisse 1/3 de altura da amostra, deixando por 15 minutos. Depois acrescentou-se mais água até 2/3 da altura, por 15 minutos. Assim se fez até que a amostra estivesse completamente coberta por água, terminando o ensaio após 24h. O segundo procedimento, por imersão total, consistiu em colocar a amostra no recipiente, com imersão total de água destilada, observando o seu comportamento no período de 24 horas.

3 Resultados e discussões

A análise granulométrica foi realizada com e sem o uso de defloculante (Figura 2). Os resultados apresentaram pequenas diferenças nas porcentagens de areia e pedregulho. No entanto, o ensaio com defloculante apresentou maior porcentagem de finos em relação ao ensaio sem defloculante. O solo foi classificado segundo o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS) como SM, solo arenoso com finos, e segundo o Sistema de Classificação do TRB (Transportation Research Board), o solo está inserido no grupo A-2-4, areia siltosa. A massa específica dos grãos do solo foi de $2,578 \text{ g}/\text{cm}^3$ e este ainda, não apresentou limites de liquidez e de plasticidade, sendo considerado como NP- Não Plástico, resultado típico de solos arenosos.

Os resultados dos ensaios de Inderbitzen são apresentados na Tabela 1, e na Tabela 2 são apresentados os índices físicos do solo. Com esses dados é possível perceber que os índices físicos não diferem consideravelmente entre as amostra, como o índice de vazios que apresentou um desvio padrão de 0,03. Trata-se de um solo tropical superficial com a presença de raízes. É importante salientar que as amostras apresentam teor de umidade natural diferente por conta da umidificação do solo no momento da coleta.

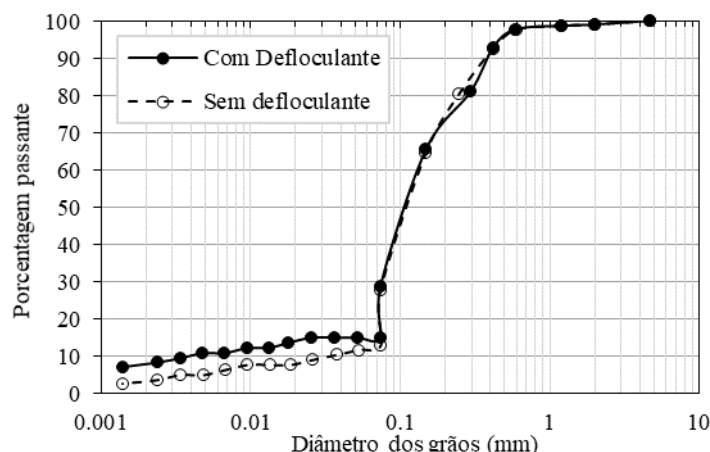


Figura 2. Curva granulométrica com e sem defloculante.

Tabela 1. Índices físicos das amostras do ensaio de Inderbitzen.

Vazão (L/min)	3				4,5				6			
Inclinação (°)	5	10	26	45	5	10	26	45	5	10	26	45
e	0,68	0,67	0,60	0,65	0,65	0,65	0,64	0,68	0,60	0,74	0,65	0,63
w (%)	12,7	16,1	13,8	14,0	13,3	14,1	12,8	13,1	13,6	15,4	15,3	12,7
S (%)	46,9	60,0	57,7	54,1	51,0	54,3	49,6	48,0	56,3	51,7	59,2	50,7

Tabela 2. Média e desvio padrão dos índices físicos das amostras empregadas no ensaio de Inderbitzen.

	w (%)	e	ρ_d (g/cm ³)	n (%)	ρ_n (g/cm ³)
Média	13,9	0,65	1,560	39,5	1,777
Desvio padrão	0,9	0,03	0,025	0,01	0,029

As Figuras 3 (a), (b) e (c) apresentam-se a relação entre perda de solo, acumulada na peneira 200, por área da amostra (g/cm²) e os tempos de ensaio delimitados para cada uma das vazões e inclinações. A observação da relação entre a perda de solo e o tempo, possibilitou verificar o aumento da perda de solo com o aumento da inclinação da rampa, a uma mesma vazão. Isso indica uma vulnerabilidade do solo à erosão em locais com relevo acentuado, como encostas e taludes, como observado por Fácio (1999).

Contudo, essa tendência não foi observada para as maiores declividades, no ensaio com vazão de 3 L/min. Nesse caso, a amostra 3-45 (inclinação 45°) perdeu uma quantidade menor de solo que a amostra 3-26 (inclinação 26°), como mostrado na Figura 2 (a). Nota-se que, para algumas amostras, a perda de solo acumulada por área da amostra é crescente nos primeiros minutos e depois tende a se estabilizar. O formato hiperbólico das curvas obtidas é semelhante ao que se observa nos trabalhos de Fácio (1991), Santos (1997), Stephan (2010) e Campos (2014). Por conta da tensão de cisalhamento hidráulica alta, para as inclinações de 45°, 26° e 10°, a perda de solo é notável logo no primeiro minuto de ensaio onde o solo tende a desagregar uma quantidade maior superficialmente. Contudo, as perdas de solo nas amostras 3-10 e 4,5-45 não se estabilizaram nos 30 minutos de ensaio, tendendo a perder mais solo a partir de 20 minutos.

As Figuras 4 (a), (b) e (c) mostram a situação das amostras antes e depois do ensaio, de cada uma das amostras. As setas vermelhas indicam o fluxo da água sobre a amostra no momento do ensaio.

Através da Figura 3(a) é possível observar que a amostra 3-45 não perdeu tanto solo quanto se era esperado, comparada à amostra 3-26. Uma razão para isso pode ser a presença de mais raízes finas, que podem agir evitando que o solo seja desagregado com facilidade, pois ao se observar outros parâmetros, como o índice de vazios e porosidade, não existem diferenças consideráveis em seus valores para esse comportamento. Esse dado divergente é mostrado na Figura 5. Em relação a amostra 4,5-5, Figura 3(b), nota-se uma raiz protuberante próximo à superfície da amostra. Sabe-se que a presença de vegetação e raízes auxilia na resistência do solo a intempéries tornando-o menos erodível, mas, nesse caso, a presença significativa da raiz na amostra fez com que a perda de solo se concentrasse ao redor dela. Podemos supor que a influência dessa raiz na amostra de



solo se tornaria mais evidente se estivesse sido ensaiada a inclinação ou vazão maior. Fica claro uma tendência de erosão maior próximo ao anel e menos no meio da amostra.

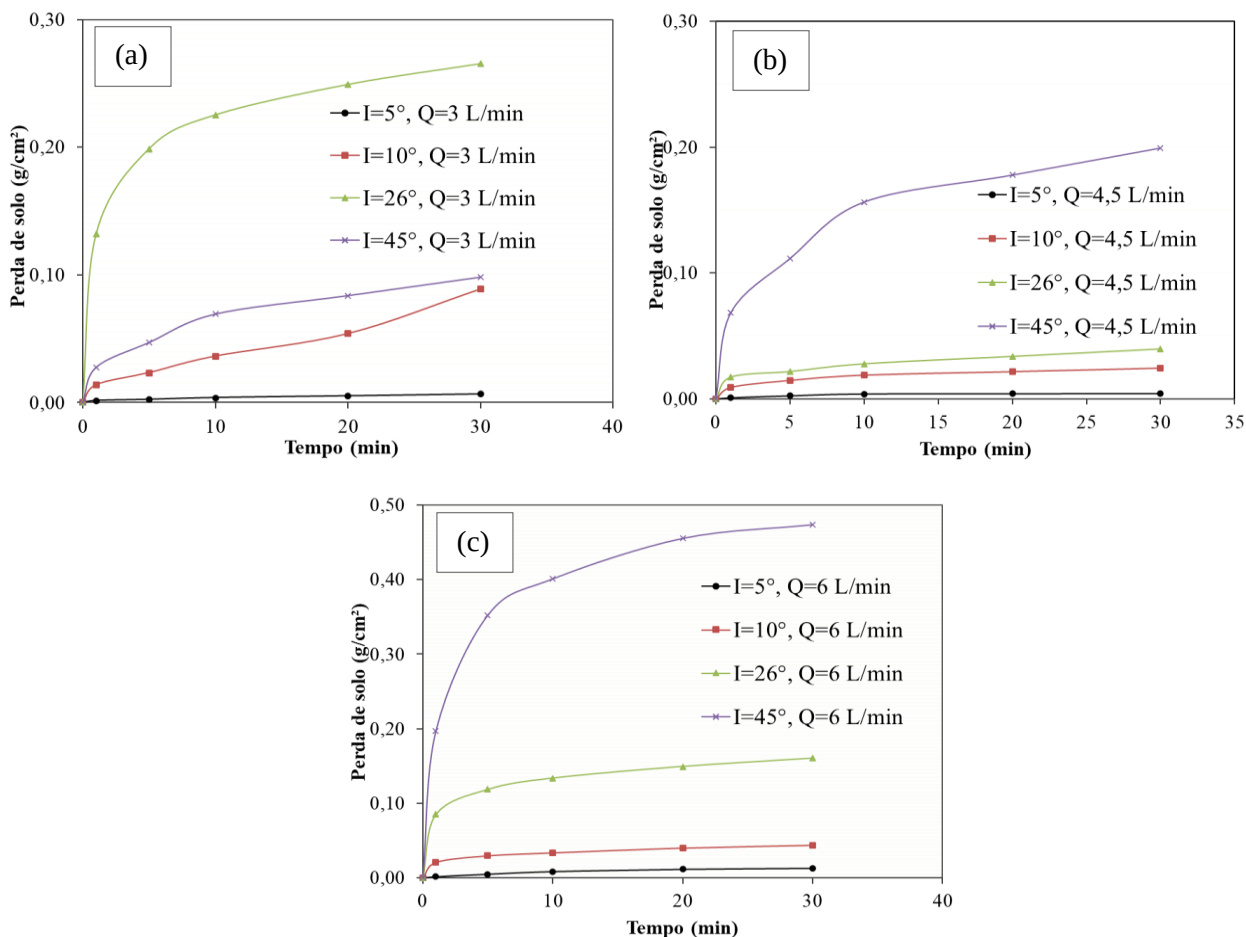


Figura 3. Curvas de perda de solo acumulada (g/cm²) por tempo (min) para a vazão de (a) 3 L/min, (b) 4,5 L/min e (c) 6 L/min.

Para as inclinações de 5°, 10° e 26°, o ponto mais deteriorado da amostra é o qual o fluxo d'água atinge primeiro na hora do ensaio, enquanto que para a inclinação de 45°, nota-se a erosão ocorrendo por toda superfície lateral da amostra. É possível que o motivo dessa erosão das bordas da amostra ocorra por um pequeno ressalto hidráulico causado pela lâmina d'água e, ou pelo fato das laterais das amostras estarem mais instáveis, por conta da coleta com o anel. Como os ensaios realizados com inclinação de 45° são os que apresentaram as menores lâminas d'água e maiores velocidades, o transporte de grãos de solo se torna mais fácil pelas laterais por onde a água está entrando na amostra.

A Figura 5 relaciona a perda de solo com a inclinação da rampa para cada amostra ensaiada. A perda de solo com vazão de 6 L/min se mostrar superior a de 4,5 L/min em qualquer inclinação. No entanto, para as inclinações de 10° e 26° a perda de solo com vazão de 3 L/min se apresentou superior a de 6 L/min. Isso mostra que o aumento da vazão não é o fator preponderante na perda de solo, mas sim a inclinação da rampa, conforme apresentado na Figura 3. Os valores dos parâmetros de erodibilidade e a classificação da erodibilidade do solo, por meio de ajustes linear, conforme Bastos (1999), são mostrados na Tabela 3. Desta forma, a erodibilidade do solo varia de média a baixa.

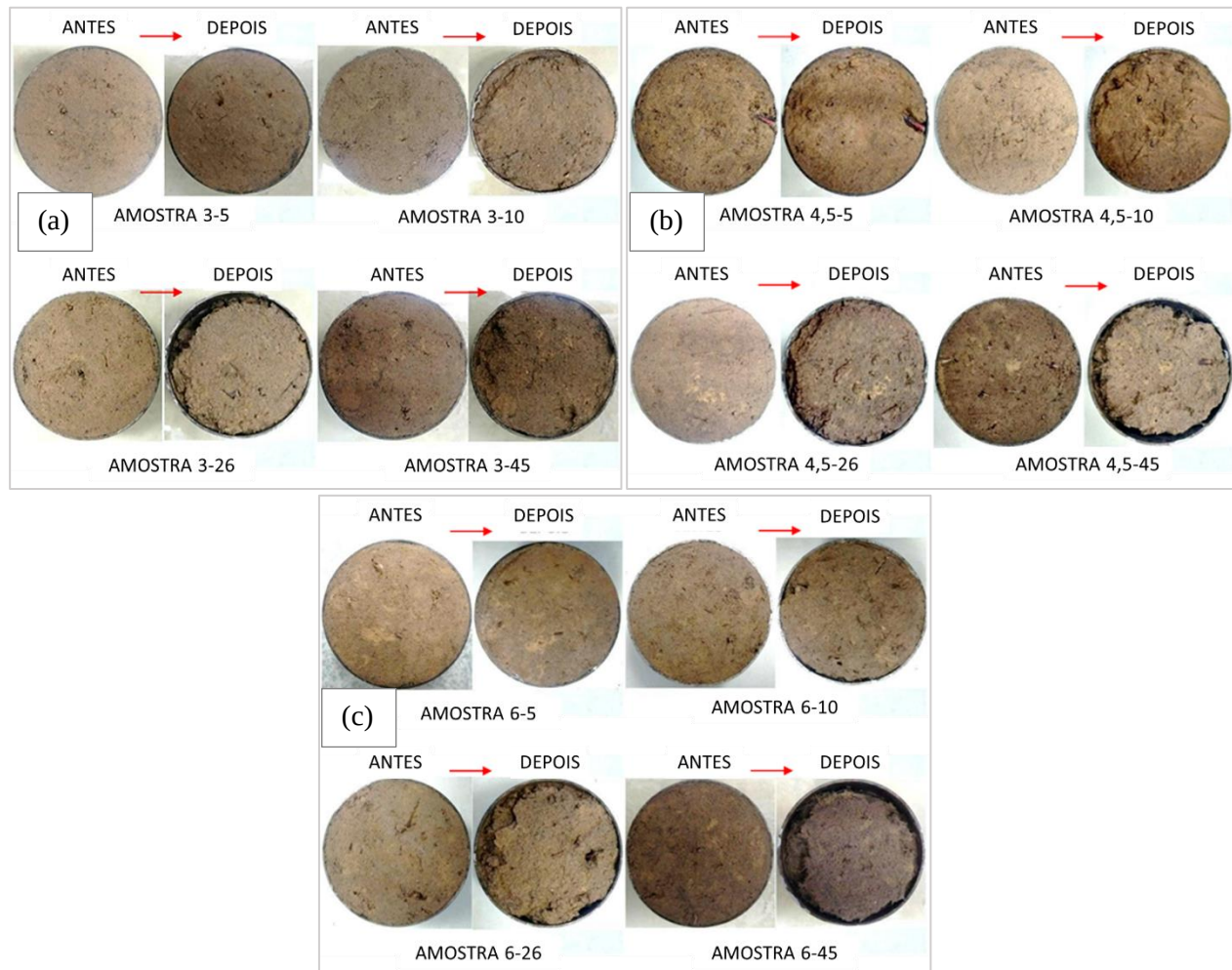


Figura 4. Amostras antes e depois do ensaio de Inderbitzen para a vazão de (a) 3L/min, (b) 4,5L/min e (c) 6L/min.

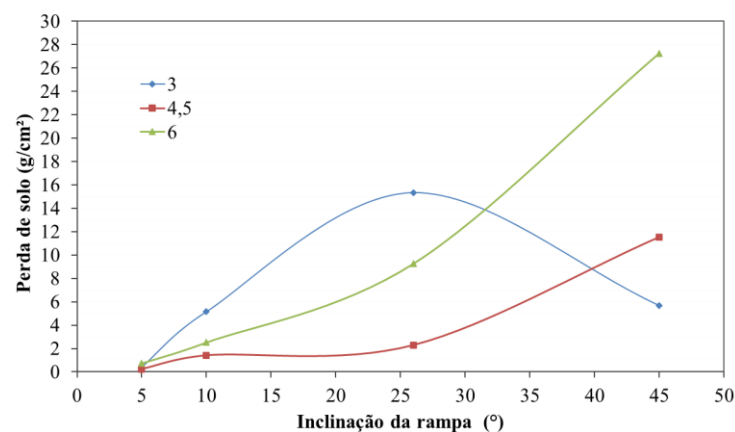


Figura 5. Relação entre a perda de solo (g/cm^2) e inclinação da rampa ($^\circ$) para cada vazão em estudo.

Tabela 3. Parâmetros de erodibilidade do ensaio de Inderbitzen.

Vazão (l/min)	$\tau_{\text{crit}} (\text{Pa})$	$K (\text{g}/\text{cm}^2/\text{min}/\text{Pa})$	R^2	Erodibilidade
3,0	0,774	0,002139	0.9925	Média
4,5	1,825	0,000868	0.9201	Baixa
6,0	2,527	0,001996	0.9799	Média



Nas Figuras 6 (a), (b), (c) e (d) são apresentadas as imagens das amostras submetidas aos ensaios de desagregação por imersão parcial (à esquerda) e imersão total (à direita) nos tempos de 1 min, 15 min, 60 min e 24 horas, respectivamente. Analisando a forma como as amostras se comportaram durante o ensaio, nota-se que pouco solo se desagregou e que não houve nenhum tipo de abatimento ou fraturamento das amostras, indicando que o solo é pouco erodível diante da imersão em água. O solo desagregado com imersão total imediata da amostra foi de 0,81 g, enquanto que a amostra imersa parcialmente desagregou 0,94 g. Os resultados do ensaio de desagregação foram compatíveis com os resultados observados no ensaio de Inderbitzen, que apontou erodibilidade baixa ou média.

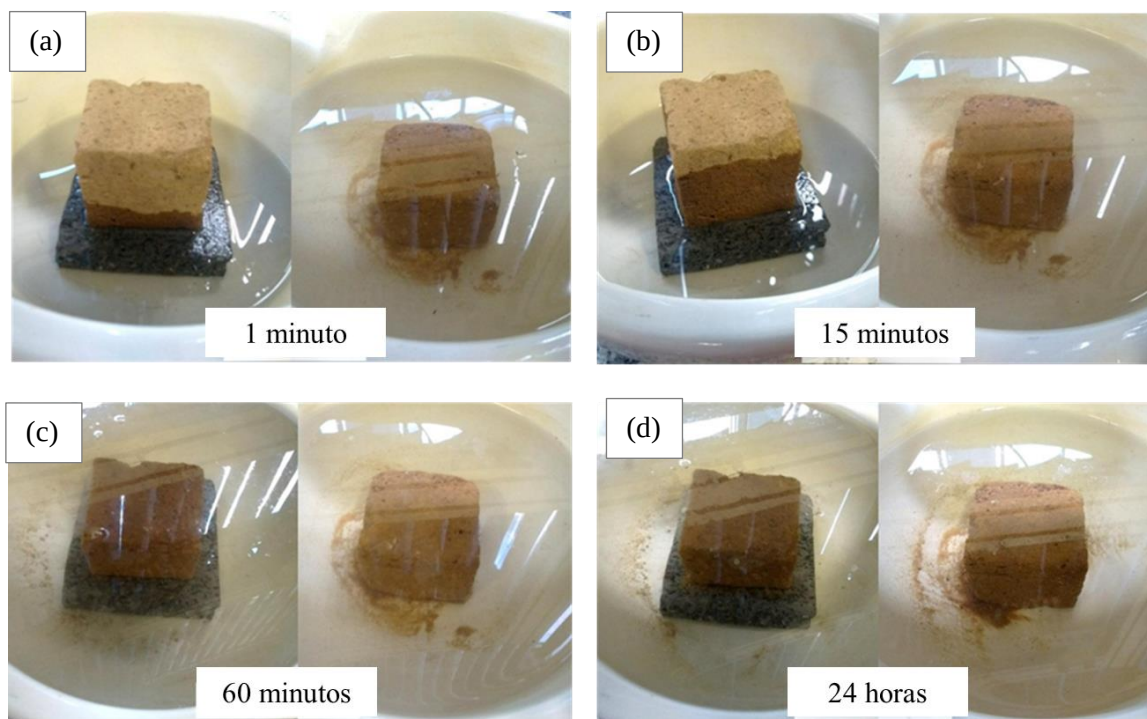


Figura 6. Ensaio de Desagregação em (a) 1 minuto, (b) 15 minutos, (c) 60 minutos e (d) 24 horas.

4 Considerações finais

Pode-se observar que o solo empregado nessa pesquisa é predominantemente arenoso com pequena porcentagem de argila, e características de solo NP- Não Plástico. Os resultados obtidos para o ensaio de Inderbitzen mostrou, através da análise da taxa de erodibilidade K ($\text{g}/\text{cm}^2/\text{min}/\text{Pa}$), por vazão, que trata-se de um solo com erodibilidade de média a baixa. O que pode estar relacionado ao baixo índice de vazios do material.

O aumento da inclinação da rampa favoreceu o processo de erosão, enfatizando o risco de erosão em encostas e taludes de maiores declividades. Nota-se, também, a tendência de aumento da perda de solo quando a velocidade da água é maior. No entanto, foi observado um ressalto hidráulico quando a lâmina d'água está menor para declividades mais acentuadas, que corroborou com aumento da perda de solo pelas laterais do anel. Com o ensaio de desagregação foi possível perceber o quanto o solo resiste quando inundado por 24h, imediatamente e parcialmente. Ambas as amostras se mostraram muito resistentes, não havendo colapso do solo ou quebra do bloco, apenas o desprendimento de uma fração pequena de solo.

É importante ressaltar que, por se tratar de um solo natural superficial, este possuía raízes e vazios que não foram quantificados dentro da amostra, e, por isso, impossibilitando associar a influência direta desses fatores na erosão do solo em estudo.

Para pesquisas futuras, sugere-se a realização de análise da erodibilidade em outros solos da região, de modo a ampliar o conhecimentos destes solos.



AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Federal do Oeste da Bahia pelo suporte dado na execução da pesquisa.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira De Normas Técnicas. (2016a). *NBR 6457: Amostras de solo — Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização*. Rio de Janeiro/RJ.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas. (2016b). *NBR 6459: Solo - Determinação do limite de liquidez*. Rio de Janeiro/RJ.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas. (2016c). *NBR 7180: Solo - Determinação do limite de plasticidade*. Rio de Janeiro/RJ.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas. (2017a). *NBR 6458: Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm - Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água*. Rio de Janeiro/RJ.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas. (2017b). *NBR 7181: Solo - Análise granulométrica*. Rio de Janeiro/RJ.
- Andrade, A. C., Leal, L. R., Guimaraes, R. F., Carvalho Junior, O. A., Martins, E. S., Reatto, A. (2002). *Estudo dos processos erosivos na Bacia do Rio Grande (BA) como subsídio ao planejamento agroecológico*. Embrapa Cerrados, Planaltina/DF, 26p.
- Bastos, C. A. B. (1999). *Estudo geotécnico sobre a erodibilidade de solos residuais não saturados*. Tese de Doutorado em Engenharia Civil – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre/RS, 251p.
- Camapum de Carvalho, J. et al. (2006). *Processos erosivos no centro-oeste brasileiro*. Brasília: Universidade de Brasília: FINATEC, Brasília/DF, 464 p.
- Campos, C. J. M. (2014). *Avaliação da erodibilidade pelo método Inderbitzen em solo não saturado da região de Bauru - SP*. Dissertação de Mestrado na Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru/SP, 153p.
- Fácio, J. A. (1991). *Proposição de uma Metodologia de Estudo da Erodibilidade dos Solos do Distrito Federal*. Dissertação de Mestrado em Geotecnia, UnB, Brasília/DF, 120 p.
- Fistarol, P. H. B.; Santos, J. Y. G.; Nakamura, T. C. (2016). *Estimativa das perdas de solo na bacia do Rio de Ondas, Estado da Bahia*. ABRH - Associação Brasileira de Recursos Hídricos, Barreiras/BA.
- Passo, D. P.; Martins E. S.; Gomes M. P.; Reatto A.; Castro K. B.; Lima L. A. S.; Carvalho Júnior O. A.; Gomes R. A. T. (2010). *Caracterização geomorfológica do município de Barreiras, Oeste Baiano, escala 1:100.000*. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 294. Embrapa Cerrados, Brasília/DF, 31 p.
- Santos, R. M. M. (1997). *Caracterização Geotécnica e Análise do Processo Evolutivo das Erosões no Município de Goiânia*. Dissertação de Mestrado em Geotecnia, UnB, Brasília/DF.
- Stephan, A. M. (2010). *Análise de processos erosivos superficiais por meio de ensaios de Inderbitzen*. Tese de Doutorado em Geotecnia. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa/MG, 165 p.
- Valladares, G. S.; Guimarães, M.; Batistella, M. (2002). *Susceptibilidade à erosão das terras na região Oeste do Estado da Bahia*. Embrapa, Campinas/SP.