

Artigo Técnico

Erodibilidade de Neossolo Litólico pelo ensaio de Inderbitzen modificado e eficiência de blocos de solo-cimento para controle da erosão hídrica

Erodibility of a Lithic Ustorthents by the modified Inderbitzen test and efficiency of soil-cement blocks to control water erosion

Andréa Cristina Thoma¹ , Diego Tassinari^{1*} , Bernat Vinolas Prat¹ ,
José Sebastião Cunha Fernandes¹ , Alexandre Christofaro Silva¹ 

RESUMO

A erosão é a principal forma de degradação do solo em todo o mundo. No enfoque geotécnico, a erodibilidade do solo é importante na avaliação da estabilidade de taludes e encostas, sendo bastante comum sua avaliação por ensaios de laboratório. Este estudo objetivou avaliar a erodibilidade de um Neossolo Litólico Distrófico típico, arenoso, empregando o ensaio de Inderbitzen modificado, bem como verificar o efeito de blocos de contenção nas perdas de solo por erosão hídrica. Os ensaios de Inderbitzen modificados foram realizados em amostras de solo indeformadas, coletadas em formas metálicas com dimensões de 0,4 x 0,2, 0,15 m. Essas amostras receberam aplicação simultânea de água como precipitação simulada (300 mm.h⁻¹) e como escoamento superficial (6 L.min⁻¹). Foram avaliados os efeitos de cobertura vegetal (presença x ausência), declividade (5%, 17,5% e 35%), presença e modelo dos blocos de contenção e espaçamento entre os blocos (0,1 m, 0,2 m e 0,4 m) em ensaios inteiramente casualizados. As perdas de solo médias ficaram entre 0,03 e 2,1 g.cm⁻², com erodibilidade estimada de 0,0034 g.cm⁻².min⁻¹.Pa⁻¹. A cobertura vegetal e a declividade foram os fatores experimentais mais importantes que afetaram as perdas de solo. A utilização de linha de blocos de contenção reduziu significativamente as perdas de solo nos ensaios com cobertura vegetal e na maior declividade avaliada (35%). Nos ensaios sem cobertura vegetal as diferenças observadas com o uso de blocos de contenção não foram estatisticamente significativas.

Palavras-chave: erosão em sulcos; erosômetro; tensão de cisalhamento hidráulico.

ABSTRACT

Soil erosion is the main cause of soil degradation throughout the world. From a geotechnic perspective, soil erodibility is important for assessing slope stability, commonly being determined in laboratory tests. The aim of this study was to estimate the erodibility of a sandy Lithic Ustorthents using a modified Inderbitzen test, as well as to evaluate the effect of buffer blocks in reducing soil losses by water erosion. The modified Inderbitzen tests were performed on undisturbed soil samples, collected within metallic frames measuring 0,4 x 0,2, 0,15 m. These samples were subjected to simultaneous applications of water in the form of simulated rain (300 mm.h⁻¹) and surface runoff (6 L.min⁻¹). The effects of soil cover (absent x present), slope (5%, 17,5% e 35%), buffer blocks and their spacing (0,1 m, 0,2 m e 0,4 m) were evaluated in a completely randomized design. Average soil losses for the Lithic Ustorthents ranged from 0,03 to 2,1 g.cm⁻² and the estimated erodibility was 0,0034 g.cm⁻².min⁻¹.Pa⁻¹. Soil cover and slope were the most important experimental factors affecting soil loss. The buffer blocks significantly reduced soil losses only when soil cover was present and in the highest slope tests (35%). In the tests without soil cover, the buffer blocks resulted in non-significant differences.

Keywords: rill erosion; erosometer; hydraulic shear stress.

INTRODUÇÃO

O solo, além de ser o principal substrato para o crescimento da vegetação, promove a recarga hídrica de mananciais e tem importante função no ciclo global do carbono. Porém, é suscetível a processos erosivos, um dos mais importantes problemas ambientais da atualidade (Morais, 2017). Apesar da erosão ser um

processo natural, ela pode ser intensificada pela ação humana. Estima-se que 30% dos solos da Terra estão degradados (FAO, 2016). A erosão provoca grande perda de solo agrícola, diminuindo a capacidade produtiva de alimentos (Carvalho *et al.*, 2012). Também diminui a recarga hídrica dos mananciais, provoca o assoreamento dos cursos d'água e intensifica o aporte de carbono para a atmosfera.

¹Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri - Diamantina (MG), Brasil

*Autor correspondente: diego.tassinari@yahoo.com.br

Conflitos de interesse: os autores declaram não haver conflitos de interesse

Financiamento: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

Recebido: 14/04/2021 - Aceito: 25/08/2021 - Reg. Abes: 20210099

Em taludes, técnicas de custo elevado, como os gabhões, as mantas vegetais e os geotêxteis são frequentemente utilizados (Passos, 2018). Todas essas técnicas objetivam interceptar a água e diminuir a velocidade do fluxo, minimizando, assim, sua energia. Outra opção é a instalação de blocos de concreto ou solo-cimento na superfície do solo ou do talude. A água, ao impactar esses blocos, perde energia, diminuindo sua capacidade de erodir o solo ou o talude.

Para a contenção de taludes, podem ser utilizados blocos de solo-cimento (Sampaio; Nunes, 2015). Muitas das aplicações do solo-cimento para contenção de taludes são feitas mediante o uso do solo-cimento ensacado, permitindo arrimos do tipo de gravidade (SILVA *et al.*, 2019). Segundo Ramos (2019), a utilização de solo-cimento ensacado para construção de muros de arrimo é uma ótima opção, pois ele pode ser implantado em diversos locais e construído pela própria comunidade. Riva (2014) utilizou tijolos de adobe na contenção de taludes como recipiente para o desenvolvimento da vegetação, protegendo, assim, a superfície do talude contra o impacto da gota de chuva, reduzindo o escoamento superficial da água e promovendo o aumento da estabilidade do talude após o desenvolvimento do sistema radicular.

Blocos de solo-cimento em formato circular foram projetados por Thoma *et al.* (2020a) para a contenção de taludes. Esse formato resulta numa maior eficiência no uso do material do concreto e/ou solo-cimento, pois permite que o material trabalhe a compressão e diminua ao máximo os esforços de tração (ROLIM *et al.*, 1999). Esse tipo de bloco já foi testado para avaliar a sua resistência estrutural, com resultados satisfatórios (THOMA *et al.*, 2020a). Porém, ensaios ainda se fazem necessários para avaliar sua eficiência na diminuição da erosão.

O processo de erosão do solo depende de vários fatores climáticos (duração, intensidade e frequência da precipitação), pedológicos (profundidade, granulometria, permeabilidade, estrutura, dentre outros), topográficos (declividade, comprimento de rampa, coeficiente de rugosidade) e vegetacionais (tipo e densidade da cobertura vegetal) (SOARES, 2019). O controle dos efeitos de todos esses fatores em experimentos de campo é extremamente difícil, porém, em laboratório, esse controle pode ser otimizado. Além disso, experimentos de controle de erosão no campo demandam recursos financeiros e tempo bem maiores do que ensaios em laboratório (BASTOS, 1999; JacintHo *et al.*, 2006).

Experimentos de laboratório permitem avaliar a susceptibilidade à erosão de cada classe de solo em função de diferentes parâmetros, como intensidade e duração da precipitação, densidade de cobertura vegetal e declividade. Os resultados contribuem para diversas finalidades, como avaliação da estabilidade geotécnica de taludes (BASTOS *et al.*, 2000; Morais *et al.*, 2004; Soares *et al.*, 2018) e elaboração de mapas de susceptibilidade de solos à erosão hídrica (HEIDEMANN, 2014).

Existem vários equipamentos para avaliação de erosão hídrica em laboratório. Um equipamento eficiente para avaliar o efeito de blocos circulares no controle da erosão hídrica deve possuir mecanismos que permitam controlar a

intensidade e duração da precipitação e a declividade, além de permitir a colocação de blocos em amostras indeformadas, coletadas no campo (THOMA *et al.*, 2020b).

Várias alterações no equipamento de Inderbitzen foram projetadas e executadas para melhorar sua eficiência na avaliação da erodibilidade do solo (THOMA *et al.*, 2020a, 2020b). O objetivo deste trabalho foi avaliar, em condições de laboratório, a erodibilidade de um Neossolo Litólico Distrófico típico e verificar a eficiência do uso de blocos de contenção de solo-cimento na diminuição das perdas de solo, comparando também os efeitos de declividade, existência ou não de cobertura vegetal, modelo e espaçamento entre blocos.

MATERIAL E MÉTODOS

Caracterização do solo e amostragem

O trabalho foi realizado no Laboratório de Construções Sustentáveis do Campus JK da Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM) em Diamantina, Minas Gerais. A altitude do local é de 1.387 m e as coordenadas são 18°12'10" S; 43°34'30.7" W.

O solo utilizado no experimento foi classificado como Neossolo Litólico Distrófico típico, coletado no Campus JK da UFVJM. Esse solo é um dos mais representativos da Serra do Espinhaço Meridional (SILVA, 2005) e seus atributos, como pequena profundidade, textura arenosa ou muito arenosa e fraco desenvolvimento ou ausência de estrutura (SANTOS *et al.*, 2018), o que conferem a ele elevada erodibilidade, intensificada pela diminuição da densidade de cobertura vegetal e aumento da declividade. Para caracterização física do solo, foram determinadas a distribuição granulométrica, a densidade de partículas, a densidade do solo e a porosidade total (Tabela 1), de acordo com os métodos preconizados por Teixeira *et al.* (2017).

O solo foi coletado em formas metálicas com dimensões de 400 mm de comprimento x 200 mm de largura x 150 mm de profundidade (Figura 1). Essas formas foram projetadas para coletar amostras de solo indeformadas, mantendo sua estrutura original. As formas, construídas em chapas metálicas de aço, possuem fechamento apenas nas duas laterais mais compridas. O fechamento das outras laterais (da frente e dos fundos) é feito com outras chapas removíveis, fixadas uma à outra por hastes roscadas e porcas. Para coleta, inicialmente o solo foi escavado, originando uma abertura com dimensões ligeiramente superiores às da forma. A partir dessa abertura, a forma foi descida até a profundidade de coleta (15 cm) e cuidadosamente cravada na lateral dessa escavação, permitindo a retirada de uma amostra de solo sem perturbação. O procedimento foi sendo repetido para a coleta das demais amostras. Depois de cravada, a forma com solo foi removida e as laterais foram fechadas com as chapas de fixação.

Tabela 1 - Caracterização física do Neossolo Litólico Distrófico típico utilizado nos ensaios.

pr	pg	n	Granulometria (mm)					
			> 2,0	2,0 - 1,0	1,0 - 0,5	0,5 - 0,25	0,25 - 0,106	< 0,106
--- kg.m ⁻³ ---		m ³ .m ⁻³	----- g.k ⁻¹ -----					
2450	1460	0,40	14,2	48,1	222,1	656,8	48,7	10,1

pr: massa específica real ou densidade de partículas. pg: massa específica aparente ou densidade do solo. n: coeficiente de vazios ou porosidade total.

Fonte: Elaborado pelos autores, 2022.

Ensaios de erodibilidade

Os ensaios de erodibilidade em laboratório foram realizados em equipamento de Inderbitzen modificado (INDERBITZEN, 1961; Thoma *et al.*, 2020b), ilustrado na Figura 1. Esse equipamento permite avaliar a erodibilidade do solo em diferentes inclinações (simulando diferentes declividades), variando a intensidade e a duração da precipitação e do escoamento superficial (THOMA *et al.*, 2020b). Enquanto o equipamento tradicional avalia o efeito apenas do escoamento (a amostra indeformada é colocada em uma rampa, por onde a água escoar), o equipamento modificado empregado neste estudo simula também o efeito da precipitação. Essa modificação é importante por permitir a simulação do desprendimento de partículas pelo impacto das gotas de chuva, além do efeito cisalhante do escoamento superficial.

A vazão para a precipitação empregada nos ensaios foi de 0,4 L.min⁻¹, resultando em uma intensidade de precipitação de 300 mm.h⁻¹. Além dessa precipitação, as amostras foram submetidas simultaneamente a escoamento superficial com vazão de 6 L.min⁻¹. As amostras de solo indeformadas foram submetidas à precipitação por 30 minutos e o material erodido foi coletado a cada 1, 5, 10, 15, 20 e 30 minutos. De acordo com Silva (2016), em uma síntese de vários trabalhos relacionados à avaliação da erodibilidade com o ensaio de Inderbitzen, as vazões utilizadas situam-se entre 3 e 18,8 L.min⁻¹, sendo o valor médio de 6 L.min⁻¹, adotado também no presente estudo. Considerando a intensidade de precipitação empregada (300 mm.h⁻¹), a aplicação do método racional (equação 1) para um coeficiente de escoamento de 0,1 indica que o escoamento aplicado (6 L.min⁻¹ = 0,0001 m³.s⁻¹) seria formado a partir de uma área de contribuição de apenas 12 m², o que seria realístico, considerando-se a aplicação da tecnologia avaliada (blocos de contenção) em taludes de solo descoberto, por exemplo.

$$Q = \frac{C I A}{360} \quad (1)$$

Em que:

Q = vazão do escoamento superficial (m³.s⁻¹);

C = coeficiente de escoamento (adotado como 0,1, ou seja, 10% da precipitação origina escoamento);

I = intensidade de precipitação (mm.h⁻¹);

A = área de contribuição (ha).

Quanto à intensidade de precipitação, os parâmetros de ajuste da equação de chuvas intensas para o município de Diamantina (equação 2) foram estimados por Caminha *et al.* (2020), sendo apresentadas as intensidade médias máximas para diversos tempos de duração da precipitação e tempos de recorrência (Tabela 2). Para as condições dos ensaios, as intensidades de precipitação foram mais elevadas que as obtidas pela equação de chuvas intensas, principalmente para os maiores tempos de duração.

$$I = \frac{915,3 T^{0,176}}{(t + 9,74)^{0,723}} \quad (2)$$

Em que:

I = intensidade média máxima da precipitação (mm.h⁻¹);

T = tempo de recorrência (anos);

t = tempo de duração da precipitação (min).

Como o escoamento superficial é rapidamente formado na condição de alta intensidade de precipitação empregada, a erodibilidade foi determinada pela taxa de perda de solo (g.cm⁻².min⁻¹) em relação à tensão de cisalhamento

Tabela 2 - Intensidades médias máximas da precipitação (mm.h⁻¹) obtidas pela equação de chuvas intensas para o município de Diamantina, de acordo com os parâmetros estimados por Caminha *et al.* (2020).

Tempo de duração (min)	Tempo de recorrência (anos)		
	5	10	100
5	174	196	294
10	141	159	238
15	119	135	202
20	104	118	177
30	85	96	143

Fonte: Elaborado pelos autores, 2022.

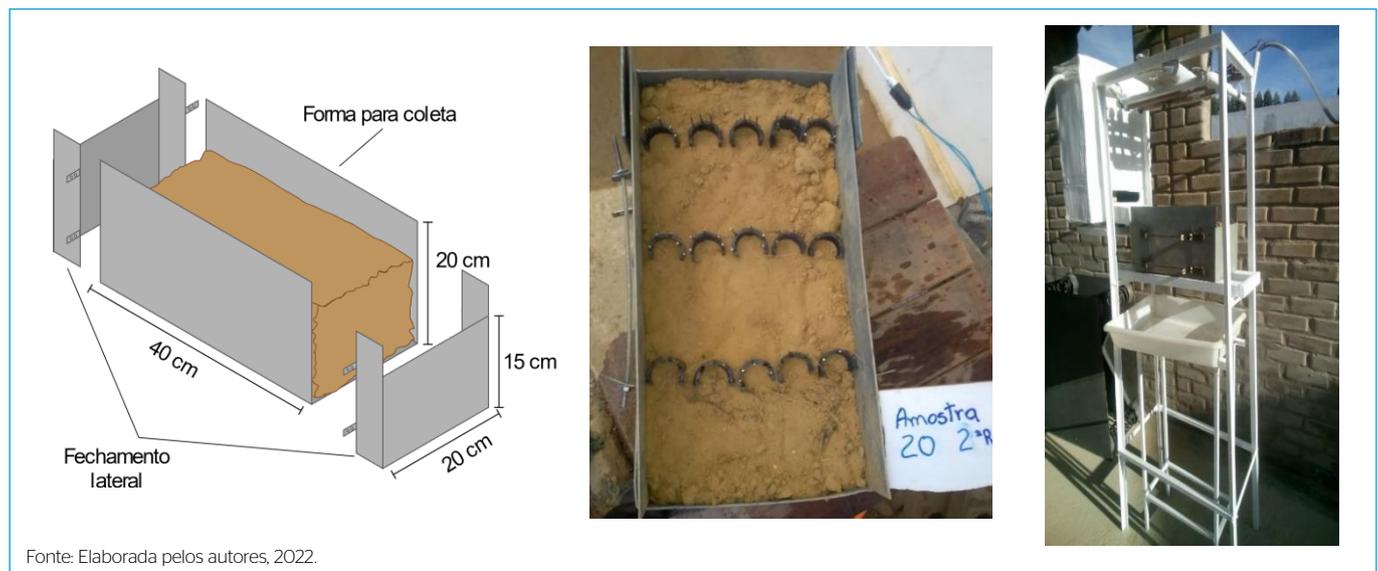


Figura 1 - Representação esquemática da forma para coleta de amostras indeformadas de solo (esquerda); amostra de solo indeformada coletada antes de ser submetida ao ensaio no simulador de chuva (centro) e equipamento utilizado no experimento de erodibilidade do solo (direita).

do escoamento (Tabela 3). Para tanto, foi aplicada a metodologia, empregada por diversos pesquisadores (ENRIQUEZ *et al.*, 2015; LAFAYETTE *et al.*, 2011; Griebeler *et al.*, 2005), que se baseia na equação 3 para determinação da tensão de cisalhamento e na equação de Manning de escoamentos em superfícies livres (equação 4) para determinação da profundidade do escoamento (utilizando a ferramenta Solver do Microsoft Excel®). A erodibilidade foi determinada apenas para a condição de ensaios sem blocos de contenção e sem cobertura vegetal, já que esta é uma característica associada ao solo.

$$\tau = \gamma \cdot R_h \cdot S \quad (3)$$

$$\frac{n \cdot Q}{\sqrt{S}} = A \cdot R_h^{2/3} \rightarrow \frac{n \cdot Q}{S^{1/2}} = \frac{(p \cdot L)^{5/3}}{(2p + L)^{2/3}} \quad (4)$$

Em que:

τ = tensão de cisalhamento hidráulico (Pa);

γ = peso específico da água (9.810 N.m⁻³);

Rh = raio hidráulico da seção do escoamento, sendo dado pela relação entre a área da amostra ($A = p \times L$) e o perímetro molhado ($pm = 2p + L$);

A = área da seção do escoamento (m²), sendo dada pelo produto da profundidade do escoamento e da largura da amostra ($A = p \times L$);

L = largura do escoamento, sendo considerada igual à largura da própria amostra (0,15 m);

p = profundidade do escoamento (m);

S = declividade da superfície, sendo considerada igual à declividade da amostra no ensaio (0,05, 0,175 e 0,35 m.m⁻¹);

Q = vazão do escoamento, determinado a partir da intensidade de precipitação constante (300 mm.h⁻¹) e aplicando-se o método racional de estimativa do escoamento superficial (equação 1), adotando-se coeficiente de escoamento de 0,1, equivalente a uma infiltrabilidade de 270 mm.h (Q = 6 x 10⁻⁶ m³.s⁻¹);

n = coeficiente de rugosidade de Manning (valor para canais de terra em más condições = 0,025 s.m^{-1/3}).

O equipamento de Inderbitzen considera apenas o efeito cisalhante do escoamento superficial para determinação da erodibilidade, sendo bem descrito, portanto, pelas equações anteriores, que regem a hidrodinâmica do escoamento. No presente estudo, o equipamento de Inderbitzen modificado aplica a água na forma de precipitação simulada, acrescentando o efeito da erosividade da precipitação à tensão de cisalhamento do escoamento superficial. Contudo, apesar da alta intensidade de precipitação (300 m/h por 30 min), considerou-se que a rápida formação de escoamento superficial associada à aplicação de vazões adicionais como escoamento superficial (6 L min⁻¹) seriam melhor representadas pela hidráulica de canais. Os parâmetros hidráulicos

do escoamento superficial para as condições experimentais encontram-se na Tabela 3. O escoamento foi classificado como rápido (número de Froude > 1,0) e em regime de transição (número de Reynolds entre 500 e 1.000), de acordo com Morgan (2005).

Fontes de variação consideradas no estudo

Com o objetivo de verificar o efeito de blocos de solo-cimento na redução das perdas de solo por erosão, foram realizados diversos ensaios em esquema fatorial, considerando os fatores cobertura vegetal, declividade, bloco de solo-cimento e espaçamento dos blocos.

O fator cobertura vegetal foi avaliado em dois níveis, com cobertura vegetal (CC) e sem cobertura vegetal (SC). A cobertura vegetal consistia em vegetação herbácea espontânea que naturalmente ocorria na superfície do solo no momento da coleta.

O fator declividade foi avaliado em três níveis a partir de diferentes inclinações das amostras de solo no equipamento de Inderbitzen modificado. Foram empregadas inclinações correspondentes a declividades de 5%, 17,5% e 35%.

O fator efeito dos blocos de solo-cimento foi comparado à condição sem bloco (SB). Esses experimentos foram implementados considerando a escala de redução de 1:25. Os blocos foram levemente pressionados contra a superfície do solo para fixação. Foram avaliados dois modelos de bloco (B1 e B2) com formato de semicírculo. O bloco 1 (B1) possui 2 cm de altura total (dimensão real seria de 50 cm), sendo que a metade inferior (1 cm de altura) é compacta e a metade superior é preenchida com barras, deixando espaço entre elas para passagem do fluxo de água. O bloco 2 (B2) também tem 2 cm de altura total, sendo totalmente maciço.

Os ensaios com blocos também incluíram a avaliação do fator espaçamento. Foram avaliados três níveis desse fator, com disposição dos blocos em espaçamentos de 10, 20 e 40 cm na escala 1:25, correspondendo a espaçamentos reais de 2,5, 5,0 e 10 m.

Cada unidade experimental foi aplicada em três repetições diferentes, de acordo com um delineamento inteiramente casualizado, perfazendo um total de 126 amostras e ensaios (2 coberturas x 3 declividades x 3 repetições para SB + 2 coberturas x 3 declividades x 2 blocos x 3 espaçamentos x 3 repetições = 18 + 108 = 126 ensaios).

Os sedimentos em suspensão no escoamento superficial resultante do ensaio de erodibilidade foram coletados nos tempos de 1, 5, 10, 15, 20 e 30 minutos. O material erodido foi seco em estufa e separado por tamisação, empregando-se peneiras com malhas de 2, 1, 0,5, 0,25 e 0,106 mm, resultando em seis frações granulométricas (> 2 mm, 2 – 1 mm, 1 – 0,5 mm, 0,5 – 0,25 mm, 0,25 – 0,106 mm e < 0,106 mm). As frações > 2 mm, 2 – 1 mm, 1 – 0,5 mm e 0,5 – 0,25 mm

Tabela 3 – Profundidade do escoamento estimada pela equação 4 e tensão de cisalhamento hidráulico estimado pela equação 3 para as declividades empregadas nos ensaios de erosão simulada pelo equipamento de Inderbitzen modificado.

Declividade	Vazão (L.min ⁻¹)	Profundidade do escoamento (mm)	Velocidade do escoamento (m.s ⁻¹)	Número de Reynolds	Número de Froude	Tensão de cisalhamento (Pa)
5%	6,36	2,41	0,240	761,5	1,44	1,4
17,5%		1,65	0,351	770,6	2,53	3,4
35%		1,34	0,433	774,5	3,46	5,5

Fonte: Elaborado pelos autores, 2022.

foram analisadas conjuntamente, denominadas fração grossa, enquanto as frações 0,25 – 0,106 mm e < 0,106 mm constituíram a fração fina.

Análises estatísticas

Os dados foram submetidos à análise de variância e teste de Tukey (5% de significância) para comparação entre médias quando efeito significativo ($p < 0,05$) de algum fator foi identificado. Todas as análises estatísticas foram realizadas no software R (R Core Team, 2020), sendo utilizados os pacotes car (Fox; Weisberg, 2019) para as análises de variância e emmeans (Lenth, 2021) para os testes de Tukey.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Efeito da declividade e cobertura

Os ensaios realizados sem os blocos de solo-cimento foram tomados como referência da resistência do solo e do funcionamento do equipamento de Inderbitzen modificado. Os resultados de perdas de solo ao longo dos ensaios e de perdas acumuladas encontram-se nas figuras 2 e 3. As perdas de solo foram pequenas na primeira coleta, realizada 1 minuto após o início do ensaio. Nessa condição, a superfície da amostra encontrava-se mais seca e com maior capacidade de infiltração. Como a intensidade de precipitação empregada no experimento

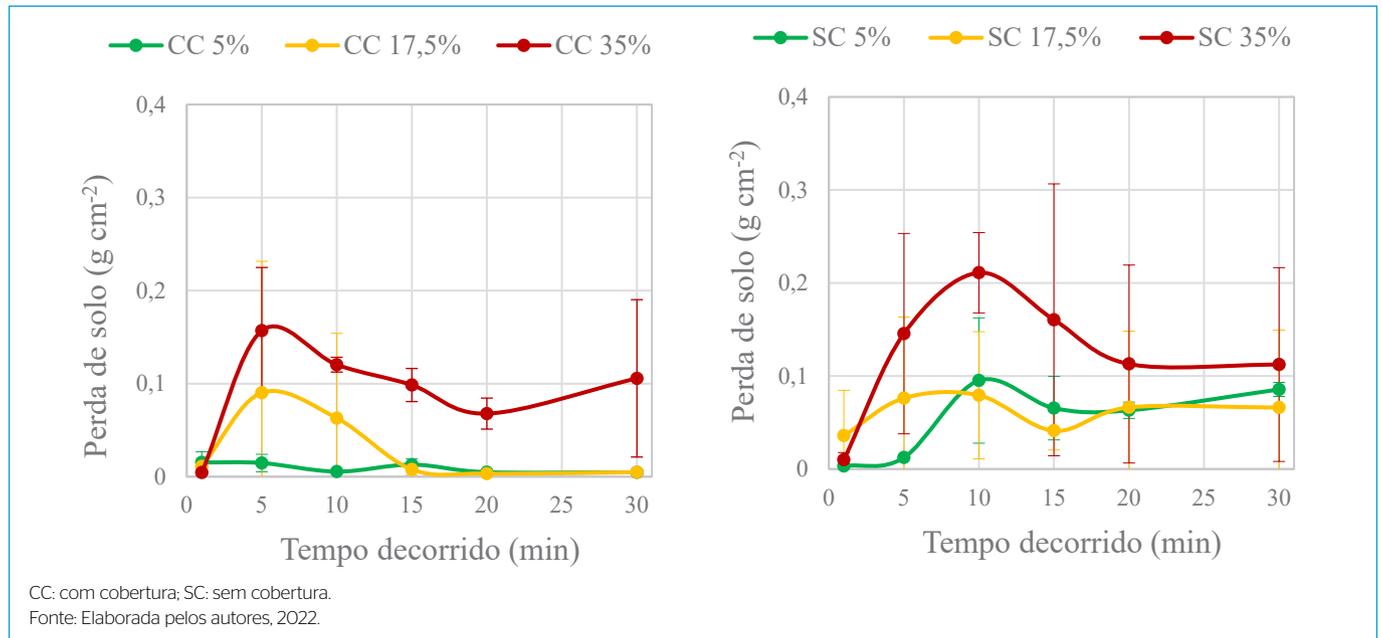


Figura 2 - Perdas de solo observadas (médias e barras de desvio padrão) durante os ensaios de erodibilidade no equipamento de Interbitzen modificado para diferentes declividades (5%, 17,5% e 35%) e condições de superfície (com cobertura; sem cobertura).

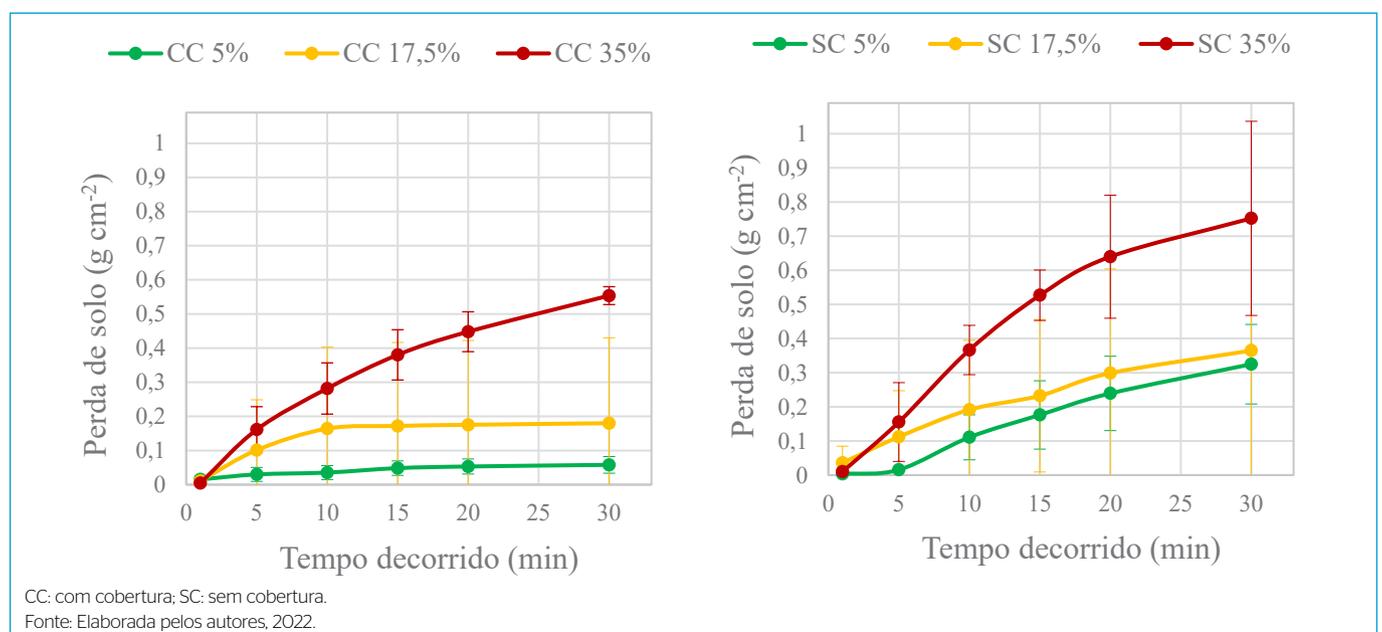


Figura 3 - Perdas de solo acumuladas (médias e barras de desvio padrão) durante os ensaios de erodibilidade no equipamento de Interbitzen modificado para diferentes declividades (5%, 17,5% e 35%) e condições de superfície (com cobertura; sem cobertura).

foi bastante elevada (300 mm.h^{-1}), rapidamente a superfície da amostra atingiu a saturação, originando escoamento superficial. Dessa forma, elevadas perdas foram registradas já a partir de 5 minutos. Nos ensaios com cobertura vegetal na superfície das amostras, as maiores perdas foram observadas nesse tempo, atingindo $0,157 \text{ g.cm}^{-2}$ ($15,7 \text{ t.ha}^{-1}$) na declividade de 35%, o que corresponde a uma taxa de perda de $0,03 \text{ g.cm}^{-2}.\text{min}^{-1}$. Nos ensaios sem cobertura vegetal, a quantidade de solo perdida continuou a aumentar de 5 para 10 minutos, quando a quantidade de solo coletada foi máxima (Figura 2).

A evolução das perdas ao longo do tempo foi afetada pela cobertura vegetal e pela declividade. Ao final do experimento, as declividades de 5% e 17,5% apresentaram perdas semelhantes. Durante as primeiras coletas, porém, o comportamento diferiu dependendo da cobertura. Enquanto nos ensaios com cobertura as perdas na declividade de 5% permaneceram baixas ao longo de todo o procedimento, nos ensaios sem cobertura nessa declividade as perdas aumentam a partir de 5 minutos e praticamente igualam-se às perdas de 17,5% nas demais coletas. Para a declividade de 35%, a estabilização das perdas ao final do ensaio ocorreu em um patamar mais elevado, atingindo perdas médias de $0,106$ e $0,112 \text{ g.cm}^{-2}$ nas condições com e sem cobertura, respectivamente. Para as declividades de 5% e 17,5% sob cobertura vegetal, as perdas de solo estabilizam-se em valores bem pequenos ($< 0,005 \text{ g.cm}^{-2}$), indicando que a cobertura vegetal foi bastante eficiente na redução das perdas de solo por erosão no Neossolo Litólico, nessas condições de menor declividade. A declividade de 17,5% apresentou um comportamento intermediário, com maior perda no início e estabilização a níveis próximos da declividade de 5% ao final do ensaio.

Durante o início do ensaio, como as amostras encontravam-se mais secas, a capacidade de absorção de água era maior, devido à alta capacidade de infiltração e ao preenchimento das irregularidades da superfície com água (Pruski, 2009; Morgan, 2005). Apesar da pequena perda verificada, o desprendimento do solo, primeira etapa do processo erosivo, já atua nesse momento inicial, principalmente na condição de solo sem cobertura. Esse desprendimento decorre do impacto direto das gotas com alta energia cinética na superfície do solo e da ruptura dos agregados. Uma vez que as amostras estavam secas, o rápido umedecimento pela precipitação simulada provocou redução das forças de coesão e causou a ruptura dos agregados pela rápida expulsão do ar do seu interior, fenômeno conhecido como *slacking*.

As partículas de solo desprendidas pelo impacto das gotas e pelo *slacking* dos agregados, bem como o solo desprendido por influência do processo de amostragem, contribuíram para o aumento acentuado das perdas durante os primeiros minutos do ensaio. Contudo, uma vez que esse material desprendido é esgotado, as perdas de solo decaem, com tendência de estabilizarem-se até o final do ensaio. Essa tendência de estabilização foi em geral observada já a partir de 15 minutos na maioria das condições, enquanto, nos ensaios sem cobertura vegetal, na declividade de 35%, essa estabilização ocorreu a partir de 20 minutos. Isso indica que o tempo de 30 minutos para os ensaios foi suficiente, ainda que Soares et al. (2018) recomendem a realização desses ensaios por tempos bem superiores, com duração de até duas horas.

As curvas de perda acumulada ao longo do tempo (Figura 3) exibiram o comportamento característico verificado nesse tipo de ensaio (BASTOS, 1999). Para ambas as condições de superfície (com e sem cobertura), as perdas acumuladas foram maiores na declividade de 35%. As declividades de 5% e 17,5% apresentaram comportamento semelhante de perdas acumuladas ao longo do tempo na condição sem cobertura, ainda que a tensão de cisalhamento

hidráulico fosse bem maior na segunda (Tabela 3). Nos ensaios sem cobertura, o efeito da declividade nas perdas médias foi menos pronunciado ao final dos 30 minutos (Figura 2), com as perdas estabilizando-se em valores mais próximos entre as declividades testadas, mas as perdas totais acumuladas diferiram bastante (Figura 3).

Essas diferenças observadas na evolução das perdas acumuladas (Figura 3) foram consideradas estatisticamente significativas (Figura 4). A análise de variância indicou efeito significativo da condição de superfície (presença ou ausência da cobertura vegetal) e da declividade nas perdas médias totais (perdas acumuladas durante toda a duração do ensaio), porém a interação não foi significativa. As perdas foram significativamente maiores na condição sem cobertura vegetal e na declividade de 35%, enquanto as declividades de 5% e 17,5% não diferiram entre si. A maior parte do material desprendido durante os ensaios consistia em partículas com diâmetro entre $0,5$ e $0,106 \text{ mm}$. O efeito da cobertura vegetal geralmente não é verificado nos ensaios de Inderbitzen. Como a finalidade do ensaio é principalmente geotécnica, comumente as amostras empregadas são coletadas em horizontes ou camadas mais profundas (e.g. Bastos et al., 2000; Fonseca et al., 2016; Morais et al., 2004; Soares et al., 2018). O efeito da declividade, por sua vez, é facilmente avaliado, já que os equipamentos são construídos de modo que possibilitem alterar a inclinação da rampa ou das amostras, simulando diferentes condições nos ensaios (THOMA et al., 2020b). A declividade afeta o tempo de oportunidade de infiltração da água ao reduzir a capacidade de armazenamento superficial (Onstad, 1984) e afeta a velocidade do escoamento superficial e seu potencial erosivo (equação 3).

Em ensaios Inderbitzen com amostras de horizontes B e C de Cambissolo, Fonseca et al. (2016) observaram perdas médias de $0,03$ e $0,088 \text{ g.cm}^{-2}$ empregando vazão de 1 L.min^{-1} durante 30 min e declividade de 17,6%. Soares et al. (2018) observaram perdas de solo de $0,034$ e $0,045 \text{ g.cm}^{-2}$ nos horizontes B e

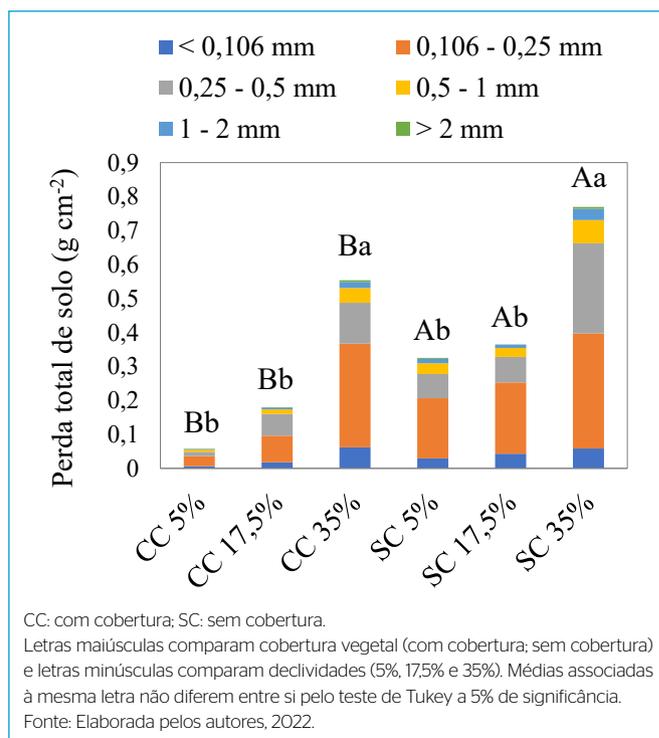


Figura 4 - Perdas de solo totais médias nos ensaios realizados sem blocos de solo-cimento.

C de Latossolo (declividade de 19%) e 0,039 e 0,051 g.cm⁻² em horizonte B e C de Argissolo (declividade de 36%) em ensaios de Inderbitzen modificados. Esses valores são, em geral, bem menores do que os encontrados no presente estudo, com perdas médias de 0,32 a 0,75 g.cm⁻² na condição sem cobertura e de 0,06 a 0,55 g.cm⁻² na condição com cobertura (Tabela 5). Essas diferenças devem-se tanto à maior erodibilidade do Neossolo Litólico em decorrência da textura muito arenosa, e, portanto, com baixa coesão, quanto à alta intensidade do escoamento superficial empregada nos ensaios (precipitação de 300 mm.h⁻¹ somada a escoamento superficial de 6 L.min⁻¹ durante 30 min).

Na condição sem cobertura vegetal, as taxas de perda de solo médias observadas foram de 0,011, 0,012 e 0,025 g.cm⁻².min⁻¹ para as declividades de 5%, 17,5% e 35%, respectivamente. Considerando as tensões de cisalhamento estimadas de 11,6, 27,8 e 45,1 Pa, a erodibilidade estimada para esse Neossolo Litólico Distrófico típico nessas condições experimentais foi de 0,0034 g.cm⁻².min⁻¹.Pa⁻¹ (Figura 5).

De acordo com a classificação proposta por Bastos (1999), esse solo se enquadraria na classe de erodibilidade mediana (valor de K entre 0,001 e 0,01 g.cm⁻².min⁻¹.Pa⁻¹). Em ensaios com simulador de escoamento em estrada rural não pavimentada (horizonte B de Latossolo Vermelho-Amarelo argiloso), Enriquez *et al.*

Tabela 4 - Proporção da soma de quadrados (%) retida em cada fonte de variação na análise de variância para perdas de solo total e nas frações finas e grosseiras.

Fontes de variação	Perda total	Frações finas (< 0,25 mm)	Frações grosseiras (> 0,25 mm)
Cobertura	20,5**	24,7**	14,9**
Declividade	20,6**	18,7**	21,3**
Bloco	0,4ns	0,2ns	0,6ns
Cobertura*Declividade	19,0**	17,5**	19,5**
Cobertura*Bloco	1,4ns	1,5ns	1,2ns
Declividade*Bloco	1,2ns	0,7ns	2,1ns
Cobertura*Declividade*Bloco	4,4*	5,3*	3,5*
Resíduo	32,5	31,3	36,8

*significativo a 5%; **significativo a 1%; ns: não significativo.
Fonte: Elaborado pelos autores, 2022.

Tabela 5 - Perdas de solo médias em função da presença ou ausência de cobertura vegetal, da declividade e da condição experimental.

Condição	Declividade	Perda de solo total (g.cm ⁻²)		Frações finas (g.cm ⁻²)		Frações grosseiras (g.cm ⁻²)	
		Sem cobertura	Com cobertura	Sem cobertura	Com cobertura	Sem cobertura	Com cobertura
SB	5,0%	0,32	0,06	0,21	0,04	0,12	0,02
	17,5%	0,37	0,18	0,25	0,10	0,11	0,08
	35,0%	0,75 β	0,55 α	0,40 β	0,37 α	0,35 β	0,19
B1	5,0%	0,24 b	0,12	0,16 b	0,07	0,08	0,05
	17,5%	0,37 b	0,20	0,24 b	0,10	0,13	0,10
	35,0%	1,15 Aaβ	0,11 Bβ	0,68 aβ	0,05 β	0,48 Aaβ	0,05 B
B2	5,0%	0,29 b	0,17	0,19 b	0,11	0,09 b	0,06
	17,5%	0,28 b	0,15	0,19 b	0,08	0,09 b	0,07

SB: sem bloco; B1: bloco 1; B2: bloco 2.

Letras maiúsculas comparam cobertura dentro de bloco e declividade.

Letras minúsculas comparam declividade dentro de cobertura e bloco.

Letras gregas comparam bloco dentro de cobertura e declividade.

*São mostradas letras apenas onde diferenças significativas foram observadas no teste de Tukey a 5% de significância.

Fonte: Elaborado pelos autores, 2022.

(2015) observaram valores de erodibilidade variando de 0,0016 a 0,357 g.cm⁻².min⁻¹.Pa⁻¹. Apesar da grande variabilidade observada em alguns dos ensaios realizados, os autores concluíram que a erodibilidade determinada desse solo é de 0,0044 g.cm⁻².min⁻¹.Pa⁻¹, com tensão crítica de cisalhamento de 7,6 Pa. Em horizontes B e C de Argissolos desenvolvidos de arenitos, Bastos (1999) observou valores de erodibilidade bastante elevados, variando de 0,036 a 0,33 g.cm⁻².min⁻¹.Pa⁻¹ em ensaios de Inderbitzen, tendo aplicado vazões de 3 e 6 L.min⁻¹. Ainda que o valor de erodibilidade obtido no presente estudo seja inferior a esses reportados na literatura, deve-se ressaltar que a raiz da equação de erodibilidade obtida (perda de solo = 0,0034τ + 0,0041) resulta em um valor negativo de tensão de cisalhamento. Apesar de ser uma inadequação física, esse resultado indica que a tensão crítica de cisalhamento já seria atingida tão logo houvesse escoamento superficial, reforçando a noção de elevada suscetibilidade desses solos à erosão, ainda que o valor de erodibilidade obtido indique um pequeno aumento da quantidade de solo perdido a cada incremento unitário de tensão de cisalhamento.

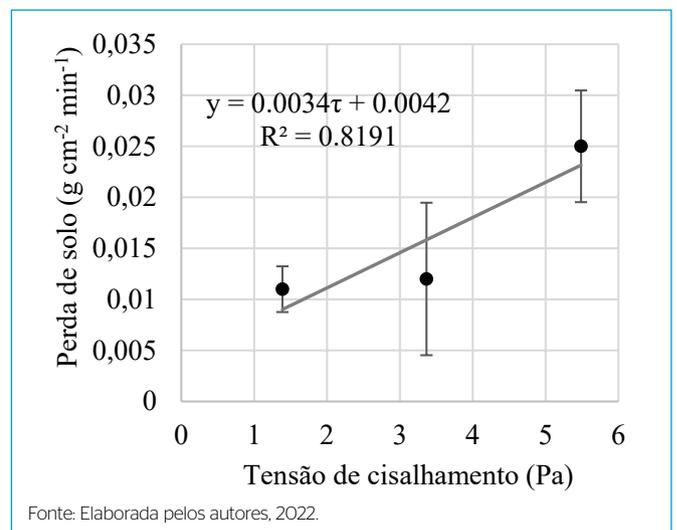


Figura 5 - Relação entre taxas de perda de solo observadas (barras indicam erro padrão da média) e tensões de cisalhamento hidráulico estimadas para o Neossolo Litólico Distrófico típico nos ensaios de Inderbitzen modificados do presente estudo. A erodibilidade é igual ao coeficiente angular da equação linear ajustada.

Efeitos dos blocos de contenção

A análise de variância indicou efeito significativo da cobertura vegetal, da declividade e da presença ou não dos blocos de contenção (Tabela 4). As fontes de variação explicaram cerca de dois terços da variância dos dados, enquanto o resíduo reteve o terço restante da soma de quadrados. Cobertura e declividade explicaram cerca de 60% da variabilidade dos dados, enquanto o efeito de bloco só foi significativo quando considerado em conjunto com a cobertura e a declividade na interação tripla, que reteve apenas 3,5 – 5,3% da soma de quadrados.

Os blocos de contenção alteraram a dinâmica do escoamento superficial durante os ensaios de erosão simulada, porém nem sempre resultando em redução das perdas de solo (Tabela 5). Nos ensaios com cobertura vegetal, os blocos tiveram efeito de redução das perdas de solo apenas na declividade de 35%, sendo observado esse efeito em todas as frações granulométricas. Já nos ensaios sem cobertura vegetal, os blocos não apresentaram efeito benéfico, algumas vezes resultando em valores de perdas superiores à condição sem bloco, como o bloco 2 na declividade de 35%.

A proposta dos blocos de contenção para redução da erosão hídrica se baseia em diferentes efeitos esperados. Inicialmente, os blocos aumentariam a capacidade de armazenamento de água da superfície, favorecendo a infiltração e retardando a formação de escoamento superficial. No longo prazo, esse acúmulo de água pode favorecer o crescimento da vegetação, uma vez que o solo se manteria com água disponível para as plantas por mais tempo e a cobertura vegetal também minimizaria a erosão (BELLINASSO *et al.*, 2019). Posteriormente, os blocos interceptariam o fluxo do escoamento superficial e reduziriam o comprimento de rampa do fluxo, reduzindo a sua velocidade e o esforço de cisalhamento hidráulico atuante na superfície do solo. Por fim, com a redução da velocidade do escoamento, os blocos favoreceriam a deposição dos sedimentos transportados, efeito que seria provavelmente mais pronunciado para as frações mais grosseiras.

Para avaliar o efeito do espaçamento entre os blocos, as análises de variância e os testes foram realizados com um subconjunto dos dados contendo apenas as repetições em que houve uso dos blocos, já que o fator espaçamento foi aplicado apenas nessa condição experimental. Nessa condição,

Tabela 6 – Proporção da soma de quadrados (%) retida em cada fonte de variação na análise de variância para perdas de solo total e nas frações finas e grosseiras.

Fontes de variação	Perda total	Frações finas (< 0,25 mm)	Frações grosseiras (> 0,25 mm)
Cobertura	21,9**	27,0**	15,6**
Bloco	0,4ns	0,2ns	0,5ns
Declividade	19,5**	17,5**	20,5**
Espaçamento	0,8ns	0,8ns	0,8ns
Cobertura*Bloco	0,4ns	0,2ns	0,6ns
Cobertura*Declividade	23,5**	23,3**	22,1**
Cobertura*espaçamento	0,8ns	0,9ns	0,7ns
Bloco*declividade	1,2ns	0,6ns	2,0ns
Bloco*espaçamento	0,2ns	0,3ns	0,1ns
Declividade*espaçamento	3,0*	3,3*	2,6*
Resíduo	28,4	26,0	34,4

*significativo a 5%; **significativo a 1%; ns: não significativo.
Fonte: Elaborado pelos autores, 2022.

a análise de variância (Tabela 6), considerando apenas as interações duplas, foi significativamente mais informativa que os modelos sem interação ou com interações triplas e quádruplas. Para perda total, fração fina e fração grosseira, houve interação significativa entre declividade e espaçamento de blocos e entre cobertura e declividade, não sendo observado efeito significativo de bloco (B1 x B2).

O espaçamento entre os blocos só teve efeitos significativos na declividade de 35% (Tabela 7). Nessa condição, o espaçamento entre blocos de 10 cm resultou em perdas de solo significativamente maiores que nos espaçamentos 20 cm e 40 cm, que não diferiram entre si. Para as perdas totais e as perdas de frações grosseiras (> 0,25 mm), novamente apenas a declividade de 35% exibiu diferença significativa entre o solo descoberto e com cobertura vegetal. Já para a fração fina, a declividade de 17,5% também apresentou perdas significativamente maiores na condição sem cobertura vegetal.

O efeito dos blocos e dos espaçamentos apresentou certa erraticidade ao longo dos ensaios (Figura 6 e 7). A falta de uma resposta mais congruente em função de blocos e espaçamentos contribuiu para que fossem observados poucos efeitos significativos (Tabela 7), nem sempre sendo observada redução nas perdas pelo uso dos blocos de contenção (Tabela 5).

Na condição com cobertura vegetal, quando foi observada redução significativa das perdas de solo com o uso de blocos na declividade de 35%, as perdas com o uso dos blocos de contenção mantiveram-se baixas ao longo de todo o ensaio (Figura 6). Na declividade de 5%, as perdas de solo nos ensaios com blocos de contenção frequentemente mantiveram-se acima das perdas sem bloco. Ainda que essas diferenças não sejam significativas (Tabela 7), o processo de instalação dos blocos, por mais cuidadoso que tenha sido, pode ter contribuído para a perturbação do solo na superfície, favorecendo o seu desprendimento. Além disso, a alta intensidade de precipitação (300 mm.h⁻¹) e sua prolongada duração (30 min) podem ter contribuído para que os blocos favorecessem as perdas de solo em vez de reduzi-las. Esse talvez seja o caso das curvas observadas na declividade de 35% e sem cobertura vegetal (Figura 7), em que as perdas com os blocos (principalmente o bloco 2, que resultou em perdas significativamente maiores, conforme Tabela 5) foram maiores ao longo de praticamente todo o ensaio. Nesse caso, o efeito combinado de perturbação da superfície e concentração do escoamento superficial à jusante dos blocos (observada durante a realização dos ensaios) podem ter contribuído para as maiores perdas.

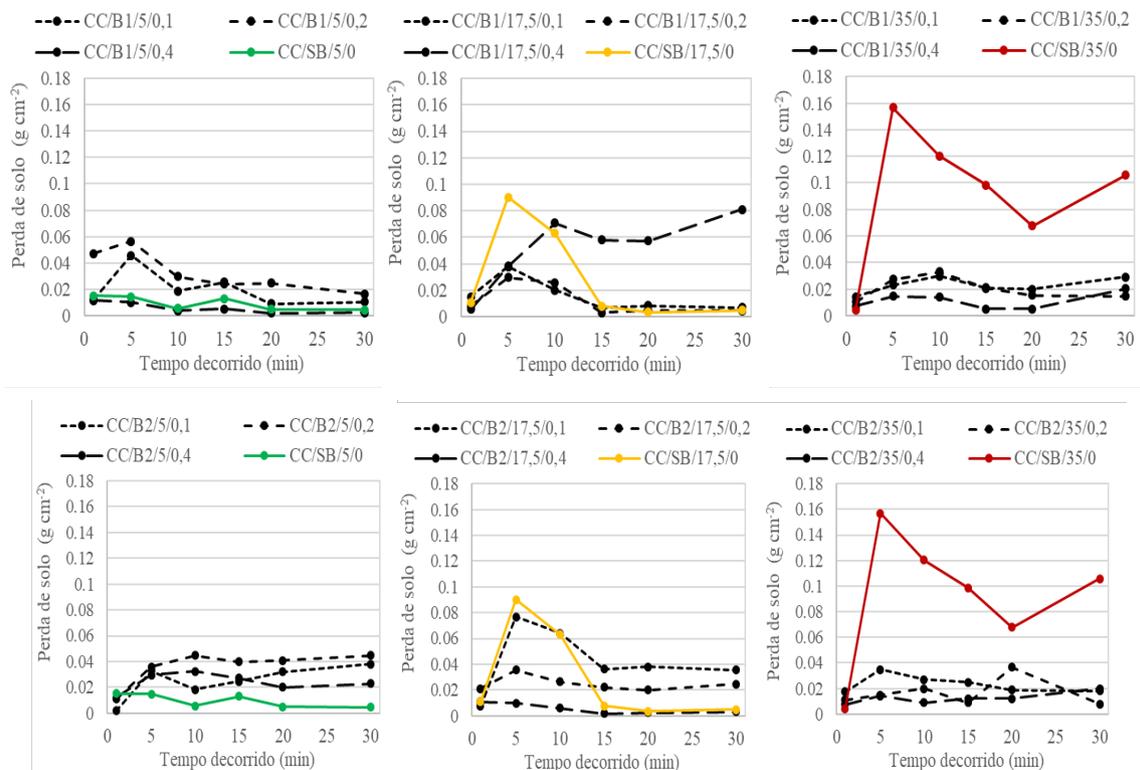
CONCLUSÃO

O ensaio de Inderbitzen modificado resultou em perda de solo média de 0,03 a 2,1 g.cm⁻². A erodibilidade estimada para o Neossolo Litólico Distrófico típico foi de 0,0034 g.cm⁻².min⁻¹.Pa⁻¹.

A cobertura vegetal e a declividade foram os fatores experimentais mais importantes nos ensaios de erosão simulada do presente estudo.

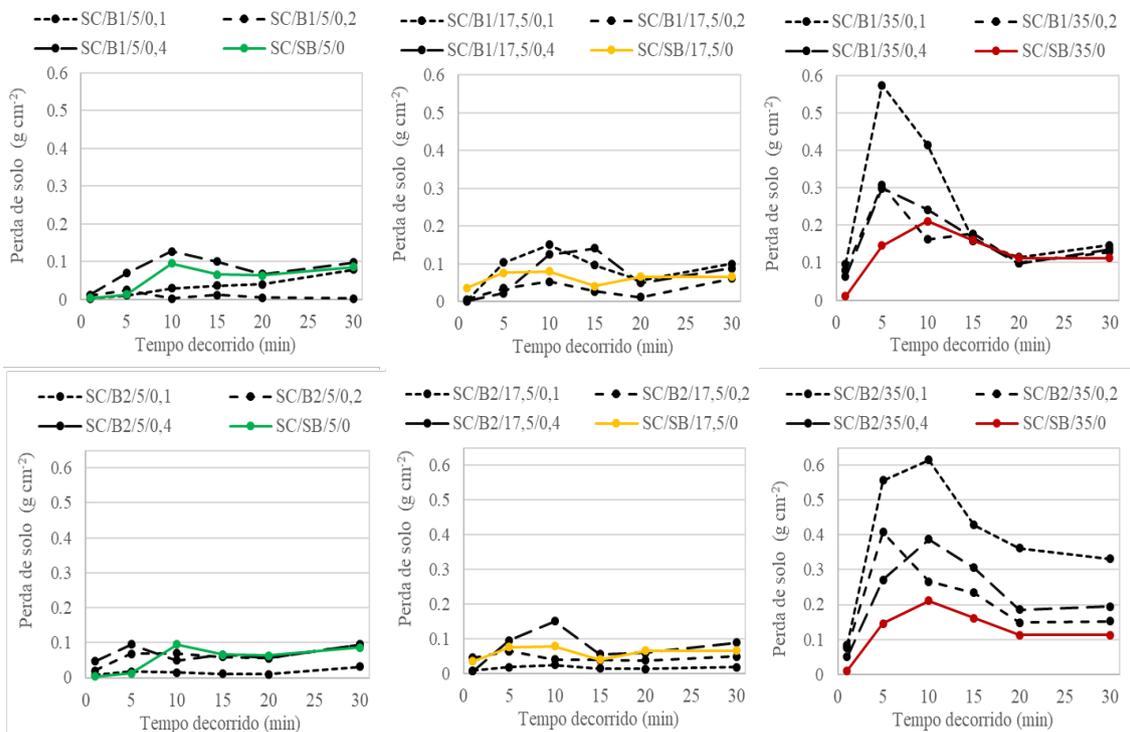
A utilização de linha de blocos de contenção promoveu redução da erosão hídrica na condição dos ensaios com cobertura vegetal e na maior declividade avaliada (35%). Nos ensaios sem cobertura vegetal, as diferenças observadas não foram estatisticamente significativas.

Os diferentes espaçamentos entre blocos tiveram pequena influência nas perdas de solo.



CC: com cobertura vegetal; B1: bloco 1; B2: bloco 2; SB: sem bloco.
Fonte: Elaborado pelos autores, 2022.

Figura 6 - Perdas de solo ao longo dos ensaios de Inderbitzen modificado para a condição com cobertura vegetal em diferentes declividades (5%, 17,5% e 35%) e em diferentes espaçamentos dos blocos 1 e 2 (0,1, 0,2 e 0,4 m) ou sem bloco de contenção.



SC: sem cobertura vegetal; B1: bloco 1; B2: bloco 2; SB: sem bloco.
Fonte: Elaborado pelos autores, 2022.

Figura 7 - Perdas de solo ao longo dos ensaios de Inderbitzen modificados para a condição sem cobertura vegetal em diferentes declividades (5%, 17,5% e 35%) e em diferentes espaçamentos dos blocos 1 e 2 (0,1, 0,2 e 0,4 m) ou sem bloco de contenção.

Tabela 7 - Perda de solo nos ensaios realizados com blocos de solo-cimento.

Perda de solo total (g.cm ⁻²)							
Condição	Declividade	Sem cobertura vegetal			Com cobertura vegetal		
		10 cm	20 cm	40 cm	10 cm	20 cm	40 cm
Sem bloco	5,0%	----- 0,325 -----			----- 0,058 -----		
	17,5%	----- 0,365 -----			----- 0,180 -----		
	35,0%	----- 0,753 -----			----- 0,554 -----		
B1	5,0%	0,196	0,056	0,472	0,122	0,200	0,035
	17,5%	0,507	0,191	0,425	0,094	0,076	0,417
	35,0%	1,506 Aa	0,956 Ab	1,002 Ab	0,137 Ba	0,122 Bb	0,066 Bb
B2	5,0%	0,091	0,367	0,409	0,147	0,216	0,144
	17,5%	0,102	0,280	0,461	0,258	0,150	0,034
	35,0%	2,131 Aa	1,284 Ab	1,393 Ab	0,141 Ba	0,100 Bb	0,074 Bb
Perda de solo das frações finas < 0,25 mm (g.cm ⁻²)							
Condição	Declividade	Sem cobertura vegetal			Com cobertura vegetal		
		10 cm	20 cm	40 cm	10 cm	20 cm	40 cm
Sem bloco	5,0%	----- 0,206 -----			----- 0,036 -----		
	17,5%	----- 0,253 -----			----- 0,096 -----		
	35,0%	----- 0,398 -----			----- 0,367 -----		
B1	5,0%	0,127	0,040	0,303	0,078	0,118	0,021
	17,5%	0,337 A	0,135 A	0,252 A	0,056 B	0,039 B	0,205 B
	35,0%	0,841 Aa	0,564 Ab	0,623 Ab	0,070 Ba	0,060 Bb	0,032 Bb
B2	5,0%	0,061	0,245	0,276	0,100	0,138	0,091
	17,5%	0,069 A	0,188 A	0,316 A	0,136	0,085	0,019
	35,0%	1,172 Aa	0,692 Ab	0,672 Ab	0,053 Ba	0,044 Bb	0,039 Bb
Perda de solo das frações grosseiras > 0,25 mm (g.cm ⁻²)							
Condição	Declividade	Sem cobertura vegetal			Com cobertura vegetal		
		10 cm	20 cm	40 cm	10 cm	20 cm	40 cm
Sem bloco	5,0%	----- 0,119 -----			----- 0,022 -----		
	17,5%	----- 0,112 -----			----- 0,084 -----		
	35,0%	----- 0,355 -----			----- 0,187 -----		
B1	5,0%	0,069	0,015	0,169	0,044	0,081	0,015
	17,5%	0,171	0,055	0,173	0,038	0,037	0,211
	35,0%	0,665 Aa	0,393 Ab	0,379 Ab	0,067 Ba	0,062 Bb	0,034 Bb
B2	5,0%	0,030	0,122	0,133	0,047	0,078	0,053
	17,5%	0,033	0,092	0,145	0,121	0,066	0,016
	35,0%	0,959 Aa	0,592 Ab	0,721 Ab	0,088 Ba	0,056 Bb	0,035 Bb

SB: sem bloco; B1: bloco 1; B2: bloco 2.

Letras maiúsculas comparam cobertura dentro de bloco e declividade.

Letras minúsculas comparam espaçamento dentro de cobertura e bloco.

São mostradas letras apenas onde diferenças significativas foram observadas no teste de Tukey a 5% de significância.

Fonte: Elaborado pelos autores, 2022.

CONTRIBUIÇÃO DOS AUTORES

PRAT, B.V.: Conceituação, Curadoria de Dados, Análise Formal, Obtenção de Financiamento, Investigação, Metodologia, Administração do Projeto, Recursos, Supervisão, Validação, Visualização, Escrita – Primeira Redação, Escrita – Revisão e Edição. SILVA, A.C.: Conceituação, Obtenção de Financiamento, Metodologia, Administração do Projeto,

Recursos, Supervisão, Escrita – Revisão e Edição. THOMA, A.C.: Curadoria de Dados, Investigação, Metodologia, Escrita – Primeira Redação, Escrita – Revisão e Edição. FERNANDES, J.S.C.: Análise Formal, Software, Validação, Escrita – Primeira Redação. TASSINARI, D.: Análise Formal, Software, Validação, Visualização, Primeira Redação, Escrita – Revisão e Edição.

REFERÊNCIAS

- BASTOS, C.A.B. *Estudo geotécnico sobre a erodibilidade de solos residuais não saturados*. 1999. 251f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1999.
- BASTOS, B.A.; MILITITSKY, J.; GEHLING, W. A avaliação da erodibilidade dos solos sob o enfoque geotécnico – pesquisas e tendências. *Teoria e Prática na Engenharia Civil*, v. 1, p. 17-25, 2000. Disponível em: <http://repositorio.furg.br/handle/1/1471>. Acesso em: 09 jun. 2022.
- BELLINASSO, T.B.; SCHNEIDER, V.E. Perdas de solo para condição da parcela de Wischmeier: estimativa para diferentes tipos de solo do estado do Rio Grande do Sul. *Brazilian Journal of Development*, v. 5, n. 11, p. 22709-22717, 2019. <https://doi.org/10.34117/bjdv5n11-005>
- CAMINHA, A.R.; SOUZA, G.R.; OLIVEIRA, L.F.C. Desempenho do método de desagregação de chuvas para determinação das relações intensidade-duração-frequência das precipitações em algumas localidades de Minas Gerais. *Sustentare*, v. 4, n. 2, p. 114, 2020. <http://doi.org/10.5892/st.v4i2.6233>
- CARVALHO, M.A.R.; MIRANDA, J.H.; DUARTE, S.N.; CARVALHO, L.C.C. Escoamento superficial na interação: cobertura vegetal e práticas de controle de erosão. *Engenharia Agrícola*, v. 32, n. 6, p. 1116-1125, 2012. <https://doi.org/10.1590/S0100-69162012000600013>
- ENRIQUEZ, A.G.; SILVA, D.P.; PRUSKI, F.F.; GRIEBELER, N.P.; CECON, P.R. Erodibilidade e tensão crítica de cisalhamento no canal de drenagem de estrada rural não pavimentada. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 19, n. 2, p. 160-165, 2015. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambiv19n2p160-165>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. *The state of food and agriculture: climate change, agriculture and food security*. Rome: FAO, 2016. 190p.
- FONSECA, L.D.M.; LANI, J.J.; FERNANDES FILHO, E.J.; MARQUES, E.A.G.; FERREIRA, W.P.M. Avaliação da erodibilidade de um Cambissolo em Juiz de Fora, Minas Gerais. *Geotecnica*, v. 136, p. 143-156, 2016. Disponível em: <https://spgeotecnica.pt/uploads/jgeot201613609.pdf>. Acesso em: 09 jun. 2022.
- FOX, J.; WEISBERG, S. *An R companion to applied regression*. 3. ed. Thousand Oaks, CA: Sage, 2019.
- GRIEBELER, N.P.; PRUSKI, F.F.; MEHL, H.U.; SILVA, D.D.; OLIVEIRA, L.F.C. Equipamento para determinação da erodibilidade e tensão crítica de cisalhamento do solo em canais de estradas. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 9, n. 2, p. 166-170, 2005. <https://doi.org/10.1590/s1415-43662005000200003>
- HEIDEMANN, M. Mapa geotécnico de potencial erosivo de uma área de expansão urbana de Tubarão - SC. *Revista de Engenharia Civil IMED*, v. 1, n. 1, p. 3-10, 2014. <https://doi.org/10.18256/2358-6508/rec-imed.v1n1p3-10>
- INDERBITZEN, A.L. An erosion test for soils. *Materials Research & Standards*, v. 1, n. 7, p. 553-554, 1961.
- JACINTHO, E.C.; CARVALHO, J.C.; CARDOSO, F.B.F.; SANTOS, R.M.M.; GUIMARÃES, R.C.; LIMA, M.C.G. Solos tropicais e o processo erosivo. In: CARVALHO, J.C.; SALES, M.M.; SOUZA, N.M.; MELO, M.T.S. (org.). *Processos erosivos no Centro-Oeste brasileiro*. Brasília: UnB/ FINATEC, 2006. p. 93-156.
- LAFAYETTE, K.P.V.; CANTALICE, J.R.B.; COUTINHO, R.Q. Resistência à erosão em ravinas, em latossolo argiloarenoso. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 35, n. 6, p. 2167-2174, 2011. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832011000600031>
- LENTH, R.V. *Estimated marginal means*. Least-Squares Means. R package version 1.5.5-1, 2021.
- MORAIS, F.; BACELLAR, L.A.P.; SOBREIRA, F.G. Análise da erodibilidade de saprolitos de gnaise. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 28, n. 6, p. 1055-1062, 2004. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832004000600014>
- MORAIS, R.C.; SALES, M.C.L. Estimativa do potencial natural de erosão dos solos da bacia hidrográfica do Alto Gurguéia, Piauí - Brasil, com uso de Sistema de Informação Geográfica. *Caderno de Geografia*, v. 27, n. 1, p. 84-105, 2017. <https://doi.org/10.5752/p.2318-2962.2017v27nesp1p84>
- MORGAN, R.P.C. *Soil erosion and conservation*. Oxford: Blackwell Science, 2005.
- ONSTAD, C.A. Depressional storage on tilled soil surfaces. *Transactions of the ASAE*, v. 27, n. 3, p. 729-732, 1984. <https://doi.org/10.13031/2013.32861>
- PASSOS, D.D. *Alternativas de baixo custo para estabilização de taludes em áreas de risco e estudo de caso na Comunidade do Roger, em João Pessoa-PB*. João Pessoa: Universidade Federal da Paraíba, 2018.
- PRUSKI, F.F. *Conservação de solo e água: práticas mecânicas para o controle da erosão hídrica*. 2. ed. Rev. Amp. Viçosa: Editora UFV, 2009.
- RAMOS, G.M.P.D.; FREIRE, G.J.M.; FERREIRA, J.R.; RAMOS, R.M.C. Contenção de talude com uso de solo-cimento ensacado: projeto em área de interesse social. *RETEC-Revista de Tecnologias*, v. 12, n. 2, p. 26-42, 2019. Disponível em: <https://www.fatecourinhos.edu.br/retec/index.php/retec/article/view/344>. Acesso em: 09 jun. 2022.
- RIVA, N.G.; DINIZ, I.S.; FENGLER, F.H.; FREDERICCI, G.; SOLERA, M.L.; PECHE FILHO, A.; MEDEIROS, A.; RIBEIRO, A. Simulação da capacidade de carga de tijolos adobe como estruturas de bioengenharia na contenção de taludes. *Anais...* Congresso Nacional de Meio Ambiente, XI, Poços de Caldas, 2014.
- R CORE TEAM. R. A language and environment for statistical computing. *R Foundation for Statistical Computing*, Vienna, 2020. Available at: <https://www.R-project.org/>. Accessed at: 10 apr. 2022.
- ROLIM, M.M.; FREIRE, W.J.; BERALDO, A.L. Análise comparativa da resistência à compressão simples de corpos de prova, tijolos e painéis de solo-cimento. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 1, p. 93-98, 1999. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambiv3n1p93-98>
- SAMPAIO, G.S.; NUNES, I.E.S. Estudo interdisciplinar da viabilidade de aplicação do tijolo de solo-cimento na construção civil: economia aliada à sustentabilidade. *Janus*, v. 12, n. 22, p. 33-46, 2015. Disponível em: <http://unifatea.com.br/seer3/index.php/Janus/article/view/362>. Acesso em: 09 jun. 2022.
- SANTOS, H.G.; JACOMINE, P.K.T.; ANJOS, L.H.C.; OLIVEIRA, V.A.; LUMBRERAS, J.F.; COELHO, M.R.; ALMEIDA, J.A.; ARAUJO FILHO, J.C.; OLIVEIRA, J.B.; CUNHA, T.J.F. *Sistema brasileiro de classificação de solos*. Brasília, DF: Embrapa, 2018.

SILVA, A.B.D.; ORLANDINI, L.S.; SARDINHA, I.J.M.; RANKIN, D.S. *Muros de arrimo: estudo comparativo entre alvenaria estrutural e concreto moldado in loco*. Atibaia: Centro Universitário UNIFAAT, 2019.

SILVA, A.C. Solos. In: SILVA, A.C.; PEDREIRA, L.C.V.S.F.; ABREU, P.A.A. *Serra do Espinhaço Meridional: paisagens e ambientes*. Belo Horizonte: O Lutador, 2005, p. 50-78.

SILVA, A.P.N.; MELO, M.T.S. Análise do histórico de desenvolvimento de modelos de aparelho de Inderbitzen para a confecção de tabelas comparativas. In: NEVES, A.F.; PAULA, M.H.; ANJOS, P.H.R.; SILVA, A.G. *Estudos Interdisciplinares em Ciências Biológicas, Saúde, Engenharias e Gestão*. São Paulo: Blucher, 2016, p. 51-64. <https://doi.org/10.5151/9788580391619-03>

SOARES, D.L.; POLIVANOV, H.; BARROSO, E.V.; MARIA, L.; Souza, C.C. Erodibilidade de solos em taludes de corte de estrada não pavimentada. *Anuário do Instituto de Geociências*, v. 41, n. 1, p. 179-193, 2018. https://doi.org/10.11137/2018_1_179_193

TEIXEIRA, P.C.; DONAGEMMA, G.K.; FONTANA, A.; Teixeira, W.G. *Manual de métodos de análise de solo*. Brasília, DF: Embrapa, 2017.

THOMA, A.C.; FERNANDES, E.P.; RODRIGUES, E.F.; SANTOS, L.L.D.; SILVA, A.C.; PRAT, B.V. Blocos de solo-cimento para contenção de erosão hídrica. *Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade*, v. 7, n. 16, p. 1057-1070, 2020a. [https://doi.org/10.21438/rbgas\(2020\)071638](https://doi.org/10.21438/rbgas(2020)071638)

THOMA, A.C.; SANTA, P.S.; OLIVEIRA, V.L.; OLIVEIRA, W.L.; PRAT, B.V.; SILVA, A.C. Avanços no desenvolvimento de equipamento para avaliação da erosão hídrica em laboratório. *Brazilian Journal of Development*, v. 6, n. 8, p. 61290-61300, 2020b. <https://doi.org/10.34117/bjdv6n8-519>

TOMASI, L.F. *Ensaio de Inderbitzen para avaliação da erodibilidade dos solos e rochas: aplicação nas regiões de Santa Maria, São Francisco de Assis e Porto Alegre/RS*. Universidade Federal de Santa Maria, 2015. 83p.

