

ADRIANA GOMEZ ENRIQUEZ

**ERODIBILIDADE E TENSÃO CRÍTICA DE CISALHAMENTO NO CANAL
DE UMA ESTRADA NÃO PAVIMENTADA SITUADA EM UM LATOSSOLO
VERMELHO-AMARELO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
2012

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

G633e
2012

Gomez Enriquez, Adriana, 1979-

Erodibilidade e tensão crítica de cisalhamento no canal de uma estrada não pavimentada situada em um latossolo vermelho-amarelo / Adriana Gomez Enriquez. – Viçosa, MG, 2012.

xv, 74f. : il. (algumas col.) ; 29cm.

Inclui apêndices.

Orientador: Fernando Falco Pruski.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f. 56-64

1. Estrada de terra. 2. Erosão. 3. Infiltração. 4. Precipitação (Meteorologia) - Modelos matemáticos. 5. Solos - Conservação. 6. Escoamento superficial. I. Universidade Federal de Viçosa. II. Título.

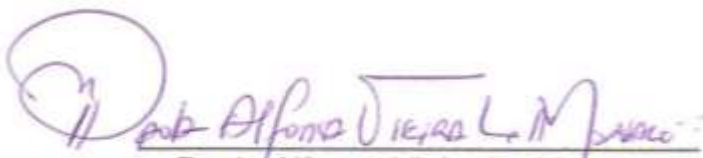
CDD 22. ed. 625.73

ADRIANA GOMEZ ENRIQUEZ


**ERODIBILIDADE E TENSÃO CRÍTICA DE CISALHAMENTO NO CANAL
DE UMA ESTRADA NÃO PAVIMENTADA SITUADA EM UM LATOSSOLO
VERMELHO-AMARELO**


Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 23 de maio de 2012


Paola Alfonsa Vieira Lo Monaco


Sílvio Bueno Pereira


Paulo Roberto Cecon
(Coorientador)


Prof. Fernando Falco Pruski
(Orientador)

Dedico este trabalho

Aos meus pais, Maximiliano e Maria

Aos meus irmãos, Viviana, Duverney e Vanessa.

AGRADECIMENTOS

A DEUS.

Aos meus pais Maximiliano e Maria, luz da minha vida, por estarem sempre do meu lado, me apoiando, me orientando e me brindando seu amor incondicional.

Aos meus irmãos Viviana, Duverney e Ivon Vanessa pelo apoio, a confiança e pelo amor.

Aos meus sobrinhos Santiago e Emmanuel, por aportarem alegria na minha vida, me incentivando para lograr minhas metas.

A minha família, pelas orações, motivação e pelo carinho.

Ao Professor Fernando Falco Pruski, pela oportunidade concedida de fazer parte de seu grupo de pesquisa, pelo ensino, pela orientação e pelo carinho.

Aos Professores Nori Griebeler e Paulo Roberto Cecon pelos valiosos aportes na realização deste trabalho.

Ao Professor Harold Tafur, quem me orientou para estudar na UFV e pela amizade.

À Universidade Federal de Viçosa, especialmente ao departamento de Engenharia agrícola, pela oportunidade de realização do curso.

A Nivia Carla Rodrigues e a família Rodrigues, pela amizade incondicional, o carinho e por fazerem me sentir parte de sua família.

Ao Danilo Paulúcio da Silva, quem considero um segundo orientador, pelo ensino, o apoio e a paciência.

Aos meus colegas e amigos Morgana, Antônio e João Paulo pelo apoio, a amizade e pelos bons momentos no trabalho.

Aos estudantes, Luane, Christina, Luciano, Andressa, Marcell, Rafael e Natalia pela dedicação e apoio na realização deste trabalho.

Aos funcionários do Laboratório de hidráulica, Chicão e Eduardo pela colaboração e os aportes na realização deste trabalho.

A Carla Rodrigues, Andressa Lemes, Carolina Faria e a Rafaelli Vieira, companheiras de república, pela convivência maravilhosa, pela amizade e por compartilhar comigo os bons momentos da minha moradia em Viçosa.

Aos meus amigos Vivian, Irina, Alejandra e Yesid pelos momentos maravilhosos e pela valiosa amizade.

As minhas amigas Rocio e Ana Maria, por estarem sempre ali, compartilhando meus triunfos e fracassos, mesmo estando distantes.

Finalmente, agradeço as pessoas que não foram citadas e que de alguma maneira fizeram parte deste trabalho.

BIOGRAFIA

ADRIANA GOMEZ ENRIQUEZ, filha de Maximiliano Gómez e Maria Licenia Enriquez, nasceu no dia 16 de janeiro de 1979, em Candelaria, Estado Valle del Cauca, na Colômbia.

Em agosto de 1996, ingressou na Universidade Nacional da Colômbia, concluindo o curso de Engenharia Agrícola em setembro de 2003.

Iniciou em Março de 2010 o Mestrado em Engenharia Agrícola, área de Concentração em Recursos Hídricos e Ambientais, na universidade Federal de Viçosa, submetendo-se à defesa da dissertação em maio de 2012.

SUMÁRIO

LISTA DE SIMBOLOS	viii
LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE TABELAS	xi
RESUMO	xii
ABSTRACT	xiv
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1 Estradas não pavimentadas e sua importância socioeconômica	4
2.2 Erosão em estradas não pavimentadas	5
2.3 Erodibilidade (K) e tensão crítica de cisalhamento do solo (τ_c)	8
2.4 Importância na obtenção da erodibilidade e da tensão crítica de cisalhamento	9
2.5 Fatores que afetam a erodibilidade e a tensão crítica de cisalhamento do solo.....	10
2.5.1 Textura	10
2.5.2 Estabilidade estrutural dos agregados do solo.....	12
2.5.3 Umidade do solo	12
2.5.4 Compactação e massa específica do solo	13
2.5.5 Propriedades químicas do solo	14
2.6 Valores de erodibilidade e tensão crítica de cisalhamento estimados em estradas não pavimentadas	15
3. MATERIAIS E MÉTODOS	19
3.1 Descrição geral do local do experimento	19

3.2	Procedimento para a obtenção da erodibilidade e da tensão crítica de cisalhamento do solo.....	22
3.2.1	Descrição do equipamento.....	22
3.2.2	Calibração da vazão.....	27
3.2.3	Realização dos testes	29
3.2.4	Determinação das perdas do solo.....	30
3.2.5	Cálculo da tensão de cisalhamento.....	31
3.2.6	Determinação da erodibilidade.....	32
3.3	Análise estatística	33
3.3.1	Teste de identidade de modelos	33
3.3.2	Determinação do intervalo de confiança para a erodibilidade (K) 38	
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	39
4.1	Erodibilidade e tensão crítica de cisalhamento do horizonte B	39
4.2	Erodibilidade e tensão crítica de cisalhamento do horizonte C	46
4.3	Comparação dos valores de erodibilidade e tensão crítica de cisalhamento determinados para os horizontes B e C	53
5.	CONCLUSÕES	55
6.	BIBLIOGRAFIA	56
	APÊNDICES	65

LISTA DE SIMBOLOS

e_i	=	erro aleatório;
H	=	número de equações determinadas
K	=	Erodibilidade do solo, $\text{g cm}^{-2} \text{ min}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$
L	=	largura da calha (simulador de escoamento), m;
n	=	coeficiente de rugosidade de Manning, $\text{s m}^{-1/3}$;
N	=	total das observações
p	=	número de parâmetros de cada modelo
Ps_i	=	i-ésima observação de perda de solo, $\text{g cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$;
Q	=	vazão, $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$;
r^2	=	coeficiente de determinação;
S	=	declividade da superfície livre da água, m m^{-1} ;
y	=	profundidade de escoamento, m;
$\hat{V}(\hat{K})$	=	estimador da variância do estimador do parâmetro;
α	=	nível de significância
β_0	=	coeficiente linear do modelo de regressão linear simples;
β_1	=	coeficiente angular do modelo de regressão linear simples (representa a erodibilidade);
γ	=	peso específico da água, kgf m^{-3} ;
τ	=	tensão de cisalhamento associada ao escoamento, Pa;
τ_c	=	tensão crítica de cisalhamento do solo, Pa;

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Distribuição porcentual de estradas no Brasil: das estradas pavimentadas, não pavimentadas e planejadas (A); e das estradas não pavimentadas nas diferentes regiões do país (B).....	4
Figura 2 - Localização da estrada no campus universitário da UFV.	19
Figura 3 - Imagem e descrição do perfil do solo do local de estudo.	20
Figura 4 - Adequação do canal da estrada do trecho 1, localizado no horizonte B (A); e do trecho 2, localizado no horizonte C (B). ...	21
Figura 5 - Representação esquemática do simulador de escoamento.	22
Figura 6 - Instalação do simulador de escoamento em campo.....	23
Figura 7 - Sistema de armazenamento e derivação de água.	24
Figura 8 - Sistema de escoamento controlado.....	25
Figura 9 - Desenho da calha do simulador do escoamento.....	26
Figura 10 - Suporte da caixa para o controle de nível.	26
Figura 11 - Sistema de condução e coleta de sedimentos.	27
Figura 12 - Calibração de vazão na caixa de controle de nível.	28
Figura 13 - Função ajustada para determinação da vazão.....	28
Figura 14 - Processo de filtragem.....	31
Figura 15 - Perdas de solo acumuladas associadas às tensões cisalhantes aplicadas nos 10 testes realizados no horizonte B.	39

Figura 16 - Agrupamento dos testes 2 e 4, identificado pelo teste de identidade de modelos, e linha de tendência correspondente a este agrupamento.	42
Figura 17 - Agrupamento dos testes 1 e 3, identificado pelo teste de identidade de modelos, e linha de tendência correspondente a este agrupamento.	43
Figura 18 - Agrupamento do teste 7, identificado pelo teste de identidade de modelos, e linha de tendência correspondente a este agrupamento.	44
Figura 19 - Agrupamento dos testes 5,6,8, 9 e 10, identificado pelo teste de identidade dos modelos, e linha de tendência correspondente a este agrupamento.	45
Figura 20 - Perdas de solo acumuladas associadas às tensões cisalhantes aplicadas nos 10 testes realizados no horizonte C.	47
Figura 21 - Agrupamento do teste 7 identificado pelo teste de identidade de modelos e linha de tendência correspondente a este agrupamento.	49
Figura 22 - Agrupamento do teste 9 identificado pelo teste de identidade de modelos e linha de tendência correspondente a este agrupamento.	50
Figura 23 - Agrupamento do teste 10 identificado pelo teste de identidade de modelos e linha de tendência correspondente a este agrupamento.	50
Figura 24 - Agrupamento do teste 6 identificado pelo teste de identidade de modelos e linha de tendência correspondente a este agrupamento.	51
Figura 25 - Agrupamento dos testes 1, 2, 3, 4, 5, 8, identificado pelo teste de identidade de modelos e linha de tendência correspondente a este agrupamento.	52
Figura 26 - Comparação das equações lineares ajustadas para os horizontes B e C de um Latossolo Vermelho Amarelo.	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Estudos desenvolvidos por diversos pesquisadores para determinação de erodibilidade e tensão crítica de cisalhamento em estradas não pavimentadas	18
Tabela 2 - Características físicas do solo do local do experimento	21
Tabela 3 - Esquema de análise de variância para o teste de identidade de modelos	37
Tabela 4 - Equações ajustadas para os 10 testes realizados no horizonte B.....	40
Tabela 5 - Agrupamento das equações identificadas pelo teste de identidade de modelos no horizonte B.....	41
Tabela 6 - Equações ajustadas para os 10 testes realizados no horizonte C.....	47
Tabela 7 - Agrupamento das equações identificadas pelo teste de identidade de modelos no horizonte C.....	48

RESUMO

GOMEZ, Enriquez Adriana, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, maio de 2012. **Erodibilidade e tensão crítica de cisalhamento no canal de uma estrada não pavimentada situada em um Latossolo Vermelho-Amarelo**
Orientador: Fernando Falco Pruski. Coorientadores: Nori Griebeler e Paulo Roberto Cecon.

A erosão em estradas não pavimentadas associada ao escoamento superficial interfere negativamente no desenvolvimento social, econômico e ambiental de uma região. Por isso é importante a incorporação de técnicas que visem a prevenção e o controle da erosão nestas estradas. As diferentes técnicas desenvolvidas para este fim requerem o conhecimento dos índices de resistência do solo ao processo erosivo, sendo a erodibilidade e a tensão crítica de cisalhamento os índices de maior importância. Neste sentido, objetivou-se com a realização deste trabalho, determinar a erodibilidade e a tensão crítica de cisalhamento no canal de uma estrada não pavimentada implantada nos horizontes B e C de um Latossolo Vermelho-Amarelo. O estudo foi realizado em uma estrada não pavimentada do município de Viçosa- MG, onde os índices foram obtidos utilizando um método de determinação direta com o uso de um simulador de escoamento instalado no canal da estrada, que permitiu estimar as perdas de solo associadas a diferentes tensões cisalhantes. Aos resultados obtidos em cada teste foi ajustado um modelo de regressão linear simples e, posteriormente, se aplicou a técnica de teste de identidade de modelos, a fim de obter um valor representativo destes índices para o local de estudo, além de obter o intervalo de confiança associado à erodibilidade com um

nível de confiança de 95%. O valor de erodibilidade determinado para o horizonte B, foi de $0,0044 \text{ g cm}^{-2} \text{ min}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$, sendo a ele associado um intervalo de confiança com 95% de probabilidade de $0,0035$ a $0,0053 \text{ g cm}^{-2} \text{ min}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$. A tensão crítica de cisalhamento determinada para este horizonte foi de $7,61 \text{ Pa}$. Para o horizonte C o valor de erodibilidade determinado foi de $0,0347 \text{ g cm}^{-2} \text{ min}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$, sendo a ele associado um intervalo de confiança com 95% de probabilidade de $0,0288$ a $0,0406 \text{ g cm}^{-2} \text{ min}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$. A tensão crítica de cisalhamento determinada para este horizonte foi de $8,16 \text{ Pa}$.

ABSTRACT

GOMEZ, Enriquez Adriana, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, May, 2012. **Erodibility and critical shear stress in the channel of unpaved road located in Red-Yellow Latosol.** Adviser: Fernando Falco Pruski. Co-Advisers: Nori Griebeler and Paulo Roberto Cecon.

The erosion in unpaved roads associated with the runoff has negative implication in social, economic and environmental development of a region. Therefore the incorporation of techniques for prevention and control of erosion on these roads is important. The techniques developed for this purpose require knowledge of the indices of soil resistance to erosion, principally the soil erodibility and critical shear stress. In this context, the aim of this study was to determine the erodibility and critical shear stress in the channel of an unpaved road implanted in an Oxisol horizons B and C. Study was conducted on an unpaved road in Viçosa-MG, Brazil, where the indices were obtained using a runoff simulator installed on the channel road, which allows to estimate soil loss associated with different shear stress. The results obtained in each test was adjusted using simple linear regression models and, the models identity test proceeded to obtain a representative value of the indices for the study site, and to obtain the confidence interval associated with the erodibility, considering 95% of probability. The erodibility value determined for the horizon B was $0.0044 \text{ g cm}^{-2} \text{ min}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$, and its associated confidence interval with 95% probability was 0.0035 to $0.0053 \text{ g cm}^{-2} \text{ min}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$. The critical shear stress determined for this horizon was 7.61 Pa . The horizon C erodibility value determined was $0.0347 \text{ g cm}^{-2} \text{ min}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$, and its

associated confidence interval with 95% probability was 0.0288 to 0.0406 g cm⁻² min⁻¹ Pa⁻¹. The critical shear stress value for this horizon was 8.16 Pa.

1. INTRODUÇÃO

Estradas não pavimentadas, também conhecidas como estradas de terra ou estradas vicinais, podem ser definidas como faixas de terreno com características adequadas para permitir o deslocamento de pessoas e veículos, sendo caracterizadas por serem vias construídas com materiais locais (VIDAL, 2005).

Essas estradas são de grande importância, uma vez que permitem a ligação entre localidades, permitindo o deslocamento da população, assim como, o intercâmbio de produtos. As estradas não pavimentadas predominam em relação às estradas pavimentadas, sendo uma realidade em praticamente todos os países, principalmente em países em desenvolvimento, tendo em vista que grande parte de sua economia é baseada na produção e comercialização de produtos primários, os quais são transportados principalmente neste tipo de estrada (GRIEBELER, 2002).

Considerando a importância destas estradas, é indispensável realizar um adequado planejamento, locação e manutenção. Um dos principais problemas associados às estradas não pavimentadas está relacionado ao desencadeamento de processos erosivos, decorrente principalmente da concentração do escoamento superficial. Quando o escoamento se concentra ao longo de um canal de drenagem da estrada e atinge determinada tensão cisalhante com magnitude superior à tensão crítica de cisalhamento do solo, passa desprender partículas desse solo, que por sua vez, são geralmente transportadas até os cursos d'água, ocasionando assoreamento, poluição e interferência na vida aquática (ZIEGLER et al., 2000; ZIEGLER et al., 2001; FOLTZ et al., 2008; ZHANG et al., 2009; CORRÊA; CRUZ, 2010).

Dos diversos fatores que influenciam na erosão, merecem destaque as propriedades que refletem maior ou menor resistência dos solos aos

agentes erosivos. A resistência mecânica do solo à ação erosiva associada ao escoamento superficial é um fator de grande importância para a estimativa das perdas de solo em estradas não pavimentadas. A quantificação e a compreensão destes fatores são fundamentais para que se possam definir estratégias para o controle dos processos erosivos.

De acordo com Knapen et al. (2007) os principais índices que caracterizam a resistência do solo à erosão são a erodibilidade e a tensão crítica de cisalhamento. Em decorrência deste fato, Nogami; Villibor (1995) salientam que o conhecimento desses índices é fundamental para a determinação da capacidade resistiva do solo à erosão.

Foltz et al. (2008) mencionam que a erodibilidade e a tensão crítica de cisalhamento são índices afetados pelas propriedades físicas e químicas do solo, e variam muito de local para local. Esses índices são dados de entrada essenciais para determinar a erosão em modelos baseados em processos (LAFLEN et al., 1991).

O conhecimento da erodibilidade e da tensão crítica de cisalhamento nas estradas não pavimentadas constitui, portanto, uma contribuição importante para diferentes estudos. Porém estes índices são de difícil obtenção, tendo em vista os diversos fatores que interferem nestes e a complexidade para a sua determinação "in situ".

Diversos estudos têm sido desenvolvidos para estimar a erodibilidade dos solos utilizando métodos indiretos, porém estes estudos foram desenvolvidos para condições agrícolas e apresentam grandes discrepâncias quando aplicados em condições edafoclimáticas diferentes daquelas em que foram determinados (SILVA et al., 2000). Igualmente, é importante ressaltar que as condições em estradas e nas suas margens diferem grandemente das condições de áreas agrícolas, tanto nas características dos materiais como no uso.

Considerando a grande variabilidade associada a estes índices e as limitações para a sua estimativa por métodos indiretos é desejável a utilização de métodos diretos que representem as condições reais do local. Neste sentido, Griebeler et al. (2005b) desenvolveu um equipamento que permite aplicar diferentes energias de escoamento diretamente sobre o solo

e obter os sedimentos erodidos, permitindo posteriormente, determinar a erodibilidade e a tensão crítica de cisalhamento. Os autores realizaram um teste para determinar estes índices no canal de uma estrada não pavimentada implantada em um Latossolo Vermelho-Amarelo. Posteriormente, Koetz et al. (2009) determinaram estes índices no mesmo tipo de solo, aumentando o número de testes e comparando duas metodologias, o simulador de escoamento desenvolvido por Griebeler et al. (2005b) e o ensaio Inderbitzen (INDERBITZEN, 1961) e, ressaltaram que equipamento proposto por Griebeler et al. (2005b) refletia melhor os resultados obtidos quando comparado com o ensaio de Inderbitzen, porém, os valores obtidos destes índices apresentavam grande variabilidade entre as repetições realizadas para cada horizonte.

Tendo em vista a importância do conhecimento destes índices e a variabilidade dos dados encontrados na literatura, o desenvolvimento de estudos que permitam obter dados confiáveis para a erodibilidade e para a tensão crítica de cisalhamento constitui uma efetiva contribuição para estudos voltados ao controle do processo erosivo em estradas não pavimentadas, sendo importante a realização de um maior número de testes que permita ter maior informação, além da aplicação de métodos estatísticos que proporcionem maior confiabilidade nos dados. Neste sentido, o objetivo deste trabalho foi determinar a erodibilidade e a tensão crítica de cisalhamento, diretamente no canal de uma estrada não pavimentada implantada em um Latossolo Vermelho Amarelo nos horizontes B e C, aplicando o teste de identidade de modelos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Estradas não pavimentadas e sua importância socioeconômica

Em muitos países, grandes extensões de rede viária são compostas por estradas não pavimentadas. No Brasil, de acordo com o Departamento Nacional de Infra-estrutura e Transportes (2012), a malha viária total é de 1.712.517,3 km (incluindo as estradas planejadas), dos quais aproximadamente 80% são vias não pavimentadas. O Sudeste e o Nordeste são as regiões que apresentam o maior percentual de estradas não pavimentadas no país, com percentagens de 33 e 27%, respectivamente.

É importante ressaltar que no Sudeste, o Estado de Minas Gerais apresenta 90 % de estradas não pavimentadas em relação ao total das vias existentes na região. Na Figura 1 é apresentada a distribuição percentual de estradas no país.

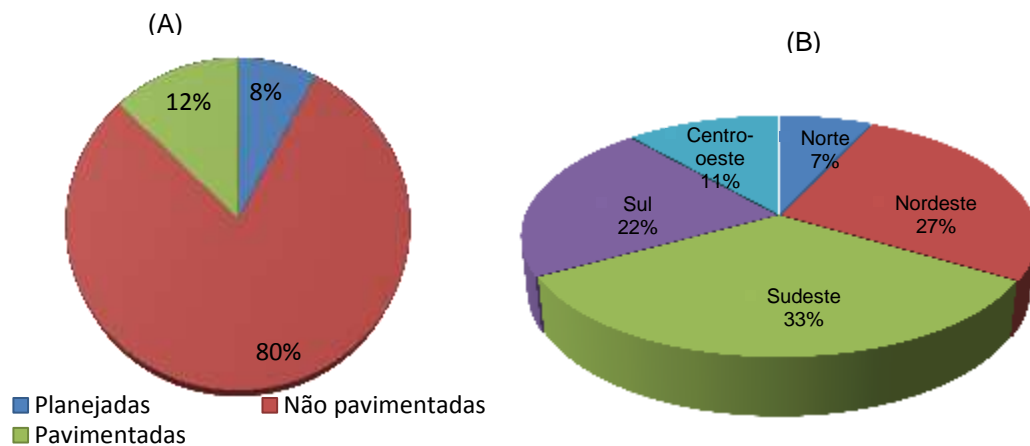


Figura 1 - Distribuição percentual de estradas no Brasil: das estradas pavimentadas, não pavimentadas e planejadas (A); e das estradas não pavimentadas nas diferentes regiões do país (B).

Fonte: Departamento Nacional de Infra-estrutura e Transportes, (2012).

Diversos autores destacam a importância destas estradas do ponto de vista socioeconômico, uma vez que contribuem para a qualidade de vida da população rural. Elas permitem a integração da população com municípios vizinhos, e facilitam o acesso a serviços de saúde, educação, cultura, lazer e emprego, além de serem consideradas importantes agentes indutores do crescimento econômico (GRIEBELER et al., 2005a; LUGO; GUCINSKI; 2000; MACHADO et al., 2003a).

Corrêa et al. (2006) destacam que estas estradas são responsáveis pelo desenvolvimento econômico de uma região, uma vez que intervêm no transporte de produtos, principalmente os oriundos de atividades agropecuárias. Neste sentido, Oliveira et al. (2010) destacam a importância destas vias para o setor florestal, uma vez que permitem o tráfego de mão de obra e insumos necessários para a produção, implantação, proteção, colheita e transporte dos produtos florestais.

Maciel et al. (2009) mencionam que os custos de transporte, incluindo os custos de implantação e manutenção de estradas, interferem expressivamente no valor final da madeira. Estradas em condições inadequadas para o tráfego provocam grandes prejuízos, refletindo em um aumento nos custos operacionais dos veículos e tendem a promover expressivo acréscimo no número de acidentes e prejuízos para o desenvolvimento da região.

As estradas, em virtude de suas características de construção e de falta de homogeneidade do material do leito, estão bastante sujeitas à degradação. O principal fator de deterioração é a erosão provocada pelo escoamento superficial da água sobre seu leito e margens, uma vez que praticamente toda a água precipitada sobre seu leito escoar, devido a sua baixa taxa de infiltração (PRUSKI, 2009).

2.2 Erosão em estradas não pavimentadas

Cao et al. (2009) destacam que as estradas não pavimentadas constituem uma importante fonte de produção de sedimentos quando

comparadas com solos de uso agrícola, uma vez que a superfície altamente compactada das estradas reduz a infiltração e, assim, tende a aumentar a taxa de deposição de sedimentos, principalmente nas áreas para as quais o escoamento é destinado.

A produção de sedimentos oriundos de estradas não pavimentadas tem sido comparada com a de sedimentos advindos de outros tipos de uso de solo, caracterizando aportes importantes de sedimentos em mananciais. No Sul do Brasil, em estudo realizado por Minella et al. (2007) a fim de identificarem a origem de sedimentos em duas bacias hidrográficas, os autores verificaram que as porcentagens de sedimentos advindos das estradas foram de 28 e 37%, os associados à erosão laminar nas lavouras foram de 68,3 e 55,5%, e os decorrentes da erosão na rede fluvial foram de 3,6 e 6,9%. Os autores salientam ainda que estas estradas ocupam uma área 25 vezes menor que as de lavouras e mencionam que as principais causas de produção de sedimentos estão associadas à falta de planejamento da locação das estradas na bacia e a baixa frequência de manutenção.

Diversos estudos têm sido desenvolvidos a fim de quantificar a produção de sedimentos advindos de estradas não pavimentadas em diferentes regiões do mundo. No Sudeste de Idaho, Ketcheson et al. (1999) determinaram a produção de sedimentos em um trecho de 6,6 km por um período de quatro anos, obtendo 1.659 m³ de sedimentos, dos quais 70% foram obtidos no primeiro ano (após a sua construção). Nas Ilhas Virgens dos Estados Unidos da América, Ramos-Scharrón; MacDonal (2005) avaliaram a produção de sedimentos em 21 segmentos de estradas, e obtiveram uma produção média de 74 Mg ha⁻¹ ano⁻¹.

Grayson et al. (1993), em um estudo realizado na Austrália, destacam que estradas florestais não pavimentadas podem gerar sedimentos entre 50 a 90 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ e mencionaram que estes valores podem aumentar em até 40% se não forem realizadas as atividades de manutenção. Já Rummer et al. (2000) ressaltam que as estradas florestais podem ser responsáveis por até 99% das perdas de solo nestas áreas.

De acordo com MacDonal; Coe, citados por Fu et al. (2010), os processos erosivos em estradas não pavimentadas estão associados a fatores como intensidade e duração das chuvas, características do material da estrada, declividade, características construtivas, intensidade de tráfego, condições de manutenção e condições das áreas que contribuem com o escoamento para o leito da estrada.

Os fatores citados têm sido estudados por diferentes pesquisadores. A influência da declividade foi analisada por Oliveira et al. (2010), que determinaram as perdas de solo em uma estrada não pavimentada por um período de oito meses, em faixas de diferentes declividades, em estradas implantadas em Latossolos Vermelho-Amarelos e Cambissolos Háplicos. Os valores médios de perdas de solo encontrados foram de 683 Mg ha⁻¹ para estradas de 0 a 4% de declividade e de 1.420 Mg ha⁻¹ para declividades acima de 12%. Já Ramos-Scharrón; MacDonal (2007) analisaram as perdas de solo em estradas não pavimentadas nas ilhas virgens americanas e constataram perdas de solo da ordem de 57 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ para uma estrada com 2% de declive e de 580 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ em estradas com declividades de 21%.

O volume do tráfego também é citado como agente causador de desprendimento das partículas, uma vez que a abrasão gerada na interface pneu-superfície do solo provoca a fragmentação de partículas grosseiras no leito da estrada e o desprendimento das partículas do solo (DUBÉ et al., 2004). Corrêa; Cruz (2010) destacam que a erosão em estradas florestais está associada à colheita e ao transporte da madeira, uma vez que estas atividades envolvem a ocorrência de tráfego pesado (veículos com capacidade de carga de 30 a 40 toneladas) e extrapesado (veículos acima de 40 toneladas), provocando deformações do leito carroçável e o comprometimento do sistema de drenagem.

Estradas recentemente construídas apresentam, em geral, uma maior taxa de erosão que aquelas já estabelecidas. Este fato está associado a fatores como a vegetação que se desenvolve nos canais da estrada e nos taludes de estradas mais antigas, além de perturbações geradas no solo pelos processos construtivos. Dubé et al. (2010) estimaram a produção de

sedimentos advindos de estradas florestais novas (construídas há menos a dois anos) e de estradas já estabelecidas (construídas há mais de dois anos) e constataram uma produção média de sedimentos de $11,18 \text{ Mg km}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ nas estradas novas e de $1,31 \text{ Mg km}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ em estradas estabelecidas.

A manutenção inadequada das estradas também pode gerar uma alta taxa de sedimentos, uma vez que estas atividades geram distúrbios ao solo, permitindo que suas partículas sejam desprendidas mais facilmente (ZIEGELER et al. 2001). Porém, Fu et al. (2010) destacam que as atividades de manutenção, quando bem planejadas e realizadas, podem constituir em intervenções importantes para o controle do processo erosivo e da melhoria das condições de drenagem.

Schultz (2011) analisou a produção de sedimentos em estradas não pavimentadas com elevadas taxas de erosão e o efeito decorrente de obras de mitigação da erosão realizadas nestas estradas e constataram que os trabalhos de remediação reduziram a erosão nestas estradas em até 48%.

De acordo com Knapen et al. (2007) a estimativa em escala temporal e espacial das perdas de solo geradas pelo escoamento superficial depende não somente das características relativas ao escoamento superficial e aos fatores mencionados, mas também, de uma estimativa confiável dos fatores relacionados à resistência do solo à ação erosiva.

Os principais índices que descrevem a resistência à erosão de um solo são a erodibilidade e a tensão crítica de cisalhamento. A estimativa desses índices é fundamental para a determinação da capacidade resistiva do solo à erosão e, conseqüentemente, para a realização de um projeto mais apropriado para controlar a erosão nas estradas.

2.3 Erodibilidade (K) e tensão crítica de cisalhamento do solo (τ_c)

A erodibilidade pode ser definida como a propriedade do solo que expressa a maior ou menor facilidade com que suas partículas são desprendidas por um agente erosivo (VEIGA, 1988; BASTOS, 1999; LAL, 1994) e a tensão crítica de cisalhamento é definida como a força hidráulica requerida para iniciar o desprendimento das partículas de solo. A taxa de

erosão é considerada zero quando as tensões de cisalhamento aplicadas estão abaixo da tensão crítica de cisalhamento do solo (VAN KLAVEREN; McCOOL, 1998; SOARES et al., 2006; CHARONKO; WYNN, 2010).

Hanson; Simon (2001) observaram uma relação inversamente proporcional entre estes índices e propuseram uma equação para determinar a erodibilidade do solo em função da tensão crítica de cisalhamento. Esta relação inversamente proporcional também é mencionada por Ziegler et al. (2000) e Foltz et al. (2008).

2.4 Importância na obtenção da erodibilidade e da tensão crítica de cisalhamento

A utilização da erodibilidade e da tensão crítica de cisalhamento está ligada principalmente às estimativas das perdas de solo, assim como para o desenvolvimento de metodologias de prevenção e controle da erosão. Modelos como a USLE e RUSLE requerem como dados de entrada o valor de erodibilidade. Fu et al. (2010), elaboraram uma revisão de literatura sobre modelos que estimam a erosão e produção de sedimentos em estradas não pavimentadas e destacaram que modelos como o WEPP e o KINEROS2 requerem estes índices para alimentação dos modelos, e ressaltaram que a principal limitação na entrada dos dados está associada ao acesso a uma base de dados confiáveis.

Estes índices são também importantes no dimensionamento de sistemas de drenagem. No modelo desenvolvido por Griebeler et al. (2005a) um aumento na erodibilidade acarreta um aumento na perda de solo e provoca uma redução no comprimento máximo recomendado para os canais de drenagem, o que traz como consequência um aumento nos custos de implementação de um sistema para controle da erosão hídrica.

Uma das principais limitações para a determinação destes índices é o método utilizado para sua obtenção, uma vez que diversos fatores influenciam em sua determinação e é preciso que o método seja aplicado em condições similares aos que foram desenvolvidos.

A erodibilidade e a tensão crítica de cisalhamento têm sido determinadas utilizando métodos indiretos baseados nas características físico-químicas dos solos e por métodos diretos, a partir da relação entre as perdas de solo e a tensão cisalhante. Em condições de estradas não pavimentadas não existem métodos indiretos específicos para a determinação da erodibilidade do solo, entretanto alguns estudos têm estimado estes índices utilizando modelos como a RUSLE e o WEPP, que foram desenvolvidos para áreas agrícolas (MACHADO et al., 2003b; CORRÊA et al., 2006).

Alguns métodos de determinação direta tem sido propostos para sua estimativa, se destacando principalmente aqueles de tipo canal hidráulico como o ensaio de Inderbitzen (INDERBITZEN, 1961) e o simulador de escoamento (GRIEBELER et al., 2005b).

2.5 Fatores que afetam a erodibilidade e a tensão crítica de cisalhamento do solo

Os fatores que afetam a erodibilidade e a tensão crítica de cisalhamento do solo estão ligados principalmente às suas características físico-químicas. Diversas pesquisas têm sido desenvolvidas para determinar estes índices utilizando as características do solo que mais os afetam (MARQUES et al., 1997; SILVA et al., 2000; GEEVES et al., 2000; BASTOS et al., 2001; SÁ et al., 2004; KNAPEN et al., 2007).

Os fatores que apresentam maior influência nos índices de resistência à erosão em condições de estradas não pavimentadas são descritos a seguir.

2.5.1 Textura

A erodibilidade do solo foi inicialmente considerada como sendo um índice do solo, diretamente associado à textura, sendo que a porcentagem de argila tem sido frequentemente usada como indicador da resistência do solo à erosão (LINE; MEYER, 1989). Um dos primeiros métodos indiretos propostos para a estimativa da erodibilidade foi desenvolvido por

Wischmeier et al. (1971), que propõe a determinação deste índice pela combinação de diferentes propriedades físicas, incluindo as porcentagens de areia e de silte.

A fração de argila é determinante na coesão do solo e, por esse motivo, consiste em um fator de grande importância na estimativa da erodibilidade e da tensão crítica de cisalhamento. Estudos apresentados por Knapen et al. (2007) caracterizaram uma relação inversamente proporcional entre o teor de argila e a erodibilidade do solo, e uma relação diretamente proporcional com a tensão crítica de cisalhamento.

De acordo com Menezes; Pejon (2010) solos de textura fina costumam ser menos erodíveis que os de textura grossa, pois o desprendimento de suas partículas é dificultado pelas forças de coesão. No caso dos solos com texturas mais grossas, as forças coesivas são mais fracas, havendo casos em que existe apenas uma coesão aparente e que não evita o desprendimento das partículas.

A textura exerce também um papel importante na determinação de muitas outras propriedades do solo que podem ser usadas para a obtenção da sua erodibilidade e, ainda, apresenta a vantagem de ser um índice de mais fácil obtenção. Sheridan et al. (2000a, b) sugerem a estimativa da erodibilidade, em áreas de produção agrícola, a partir da textura do solo, tanto para a obtenção da erosão entre sulcos como para aquela gerada a partir da concentração do escoamento superficial em sulcos ou canais de terra. Leonard; Richard (2004) ressaltam que a tensão crítica de cisalhamento também está diretamente relacionada com fatores como o tamanho, a forma e a organização espacial das partículas do solo.

Potter et al. (2002) determinaram a erodibilidade do solo em seis classes de solo diferentes na região central de México utilizando um método direto (jato submerso) e constataram que os conteúdos de silte e argila foram fatores importantes e que afetaram os valores obtidos da erodibilidade. Este fato também tem sido mencionado por outros pesquisadores, que determinaram a erodibilidade para diferentes classes de solo em diferentes regiões da Espanha e constataram a influência dos

conteúdos de areia e silte nos valores obtidos (DUIKER et al., 2001; SEEGER; FREVEL; 1999).

No Brasil, no Estado do Amazonas, Macedo et al. (2010) evidenciaram que para Neossolos, Cambissolos e Gleissolos os valores obtidos de erodibilidade foram altos quando comparados com os outros solos estudados e associaram estes resultados à alta porcentagem de silte e de areia fina presentes nestes solos.

2.5.2 Estabilidade estrutural dos agregados do solo

Knapen et al. (2007) destacam que a estabilidade de agregados (resistência ao rompimento dos agregados contra a ação da água), tem sido usada como o primeiro indicador da resistência do solo à erosão, uma vez que as principais propriedades do solo que influenciam a resistência dos solos à erosão são também àquelas que influenciam a estabilidade dos agregados. Govers et al (1990) mencionam que a erodibilidade do solo depende mais da estabilidade dos agregados do que da composição textural do solo.

Diversas pesquisas tem sido realizadas com o propósito de obter modelos empíricos para a determinação da erodibilidade, relacionando-a com diferentes propriedades físico-químicas do solo, sendo a estabilidade dos agregados uma das propriedades frequentemente utilizada e caracterizada como um bom indicador para esta estimativa. Sá et al. (2004) propuseram quatro modelos para determinar a erodibilidade em solos com horizonte B textural no Brasil e constataram que a estabilidade de agregados foi um fator que permitiu uma adequada representação para a erodibilidade.

2.5.3 Umidade do solo

Coote et al. (1988) identificaram uma grande variação temporal na erodibilidade do solo e relacionaram esta variação ao teor de água no solo.

O teor de água no solo exerce grande influência no processo de construção de estradas não pavimentadas, principalmente do que diz respeito ao processo de compactação, que, por sua vez, é de grande

importância para conferir uma adequada resistência ao solo que compõe estas estradas.

O teor de água que conduz à máxima densidade, tornando o solo mais trabalhável, e que sob o esforço de compactação usado permite que o solo atinja uma maior densidade, de modo a expelir uma maior quantidade de ar, denomina-se umidade ótima de compactação. O aumento da umidade além deste valor passa a funcionar como um amortecedor do esforço de compactação e dificultando a aproximação das partículas, reduzindo a densidade do solo que pode ser obtida para uma mesma energia de compactação. Solos que são compactados com a umidade ótima e, conseqüentemente, apresentam maiores densidades apresentam menores erodibilidades (SHAINBERG et al., 1996)

Knapen; Poesen (2010) salientam que o conteúdo de água no solo, a sua densidade e o conteúdo de matéria orgânica são as três propriedades que mais interferem no valor da erodibilidade. Porém, o conteúdo de matéria orgânica não tem influência expressiva em condições de estradas, uma vez que a superfície que contém mais material orgânico é removida durante o processo de construção. Knapen et al. (2007) evidenciaram que o efeito destas propriedades do solo é muito mais importante no valor da erodibilidade do que na tensão crítica de cisalhamento.

Bastos et al. (2001) estudaram a relação de erodibilidade, da colapsibilidade, e da coesão dos solos com a sua umidade. Os resultados obtidos indicaram que os solos cuja coesão sofre redução expressiva com o umedecimento do são aqueles mais suscetíveis à erosão, entretanto, a colapsibilidade não apresentou relação significativa com a erodibilidade.

2.5.4 Compactação e massa específica do solo

De acordo com Knapen et al. (2007) há um aumento linear da tensão crítica de cisalhamento com o grau de compactação do solo, porém os diferentes tipos de solo podem apresentar um comportamento bastante distinto quanto ao efeito de compactação na tensão crítica de cisalhamento.

Lyle; Smerdon, (1965), mostraram que a taxa de aumento da tensão crítica de cisalhamento pela compactação está relacionada à relação cálcio–

sódio, tamanho médio de partículas e limite de plasticidade. Bennett et al. (2000) evidenciaram que além do aumento da tensão crítica de cisalhamento, o aumento da densidade do solo também provoca uma redução da erodibilidade solo.

Cao et al. (2009) destacam que a massa específica do solo é um dos principais fatores que intervêm no desprendimento do solo em estradas não pavimentadas, indicando uma relação inversamente proporcional entre esta e a perda de solo.

A explicação para a influência da compactação na resistência do solo à erosão está relacionada à maior proximidade das partículas do solo, o que provoca um aumento no número de ligação entre partículas. Para solos argilosos a compactação também influencia na mudança de orientação das partículas, sendo que os solos mais compactados tendem a apresentar uma orientação de partículas mais paralela, sendo, assim, mais resistentes do que solos sem compactação.

2.5.5 Propriedades químicas do solo

Características do solo como o teor de óxidos e hidróxidos de ferro (Fe) e alumínio (Al) e mineralogia das argilas foram relacionados com a erodibilidade do solo por Silva (1994). Os autores constataram que estes fatores interferem na estabilidade do solo, uma vez que atuam como agentes cimentantes entre as partículas minerais e, deste modo, reduzem a vulnerabilidade do solo à erosão decorrente da concentração do escoamento superficial.

Ferreira et al. (1999) estudaram a influência da mineralogia da fração de argila sobre as propriedades físicas do solo, e destacaram que a caulinita e gibbsita foram os constituintes mineralógicos que maior influência exerceram sobre as propriedades físicas dos solos estudados. Constataram que, os solos caulíníticos apresentaram maior densidade do solo, menor estabilidade de agregados em água, menor macroporosidade e menor permeabilidade, quando comparados aos solos gibbsíticos. Silva et al. (1999) destacaram também a influência mineralógica no valor da erodibilidade e associaram a predominância gibbsítica dos solos estudados

e os altos teores de ferro e alumínio, aos baixos valores de erodibilidade obtidos.

Knapen et al. (2007) destacam outras propriedades do solo que interferem na resistência do solo ao escoamento concentrado, tais como: teor de Na, K, Ca e Mg, condutividade elétrica, capacidade de troca de cátions, pH, razão cálcio/sódio, relação de sódio trocável (RST), razão de adsorção de sódio (RAS) e polímeros orgânicos no solo. O efeito do sódio no solo, sob o ponto de vista da resistência do solo à erosão, está no seu efeito na estabilidade estrutural da fração argila em condições de presença de água.

Knapen et al. (2007) citam os trabalhos de Graaff e Patterson para enfatizar a possibilidade de se estimar a erodibilidade do solo em função da dispersividade do solo obtida a partir da condição dos valores de RST e RAS juntamente com outros índices químicos e físicos dos solo.

Em estudo desenvolvido por Marques et al. (1997) propuseram várias equações para determinar a erodibilidade por métodos indiretos; concluindo que é possível determinar este índice satisfatoriamente com os métodos propostos e destacando que características do solo como a estrutura e os teores de carbono orgânico foram de grande importância.

2.6 Valores de erodibilidade e tensão crítica de cisalhamento estimados em estradas não pavimentadas

A erodibilidade e tensão crítica de cisalhamento do solo em condições de estradas têm sido determinadas por diversos métodos e diferentes condições do solo. Os resultados obtidos nas diferentes pesquisas refletem grande variabilidade no valor destes índices em função do método utilizado, uma vez que alguns deles foram desenvolvidos para áreas agrícolas. Cao et al. (2009) determinaram a erodibilidade e a tensão crítica de cisalhamento do solo em superfície de estradas não pavimentadas utilizando um método direto do tipo canal hidráulico e compararam os resultados obtidos com outros trabalhos que utilizaram o mesmo método em

áreas agrícolas, encontrando diferenças expressivas nos resultados obtidos e sugerindo o desenvolvimento de métodos específicos para estradas.

Diferentes autores têm determinado a erodibilidade do solo em estradas, utilizando a USLE e a RUSLE. Neste sentido, Sheridan et al. (2008) argumentaram que a USLE não é um modelo adequado para a determinação deste índice uma vez que este modelo determina a erodibilidade entre sulcos, e não no sulco.

Em estradas florestais, Corrêa; Cruz (2010) estimaram a erodibilidade utilizando a equação proposta por Dissmeyer; Foster (1980), que é baseada na interação de diversas propriedades do solo, a fim de estimar as perdas de solo em estradas implantadas em um Cambissolo e, em um Argissolo Vermelho utilizando a RUSLE.

O WEPP também têm sido utilizada para determinar perdas de solo e a erodibilidade, principalmente em estradas florestais (ELLIOT; TYSDA, 1999 citado por FOLTZ et al. 2009). Porém, este modelo tem apresentado grandes diferenças quando avaliado com perdas de solo obtidas diretamente em campo em condições de estradas (MACHADO et al. 2003a).

Griebeler et al. (2005b) determinaram a erodibilidade e a tensão crítica de cisalhamento no canal de uma estrada não pavimentada implantada em um Latossolo Vermelho Amarelo. A determinação foi feita diretamente em campo utilizando um equipamento desenvolvido pelos autores. A metodologia baseada no uso deste equipamento permite a variação do escoamento superficial e a determinação das perdas de solo diretamente no leito ou no canal da estrada para cada vazão aplicada.

Koetz et al. (2009) compararam dois métodos de determinação direta de erodibilidade e tensão crítica de cisalhamento. O primeiro método foi o ensaio de Inderbizen, que utiliza amostras de solo coletadas em campo para depois serem testadas no equipamento, e o qual permite simular diferentes declividades de superfícies e vazões de escoamento. O segundo método é o simulador de escoamento proposto por Griebeler et al. (2005b) que é utilizado diretamente no canal da estrada. O estudo foi feito em um Latossolo Vermelho-Amarelo e os índices foram determinados para os horizontes A, B, $C_{\text{residual jovem}}$ e $C_{\text{residual maduro}}$. Os autores ressaltaram que o

método de campo proposto por Griebeler et al. (2005b) mostrou-se mais adequado para a obtenção da erodibilidade e da tensão crítica de cisalhamento do solo em todos os horizontes estudados. Os autores constataram ainda que os maiores valores de erodibilidade foram obtidos para o horizonte C_{residual jovem}, enquanto que a tensão crítica de cisalhamento foi a menor em comparação com os outros horizontes. Já Oliveira et al. (2009) determinaram a erodibilidade e a tensão crítica de cisalhamento em solos que apresentavam diferentes texturas, utilizando para tanto, a metodologia proposta por Griebeler et al. (2005b) e encontraram que os maiores índices de erodibilidade foram obtidos em solos com maiores teores de silte e areia.

Foltz et al. (2008) pesquisaram o efeito do escoamento superficial na erodibilidade e na tensão crítica de cisalhamento em superfícies de estradas. Os autores determinaram as perdas de solo para diferentes vazões aplicadas e evidenciaram um comportamento dinâmico da erodibilidade durante a variação escoamento em um mesmo evento. Na Tabela 1 são apresentados valores de erodibilidade e tensão crítica de cisalhamento obtidos por diferentes pesquisadores em diversas condições experimentais.

Tabela 1. Estudos desenvolvidos por diversos pesquisadores para determinação de erodibilidade (K) e tensão crítica de cisalhamento (τ_c) em estradas não pavimentadas

Localização	Autor	Características de determinação	(K)	τ_c
Viçosa (MG)	Griebeler et al. (2005b)	Latossolo Vermelho Amarelo	0,00109 g cm ⁻² min ⁻¹ Pa ⁻¹	7,5 Pa
Idaho (E.U.A)	Foltz et al. (2008)	Escoamento baixo (0,21 L s ⁻¹)	4.32 10 ⁻³ s m ⁻¹	1.03 Pa
		Escoamento meio (0,41 L s ⁻¹)	1.45 10 ⁻³ s m ⁻¹	1.02 Pa
		Escoamento alto (0,83 L s ⁻¹)	1.31 10 ⁻³ s m ⁻¹	1.48 Pa
Viçosa (MG)	Koetz et al. (2009)	Latossolo Vermelho Amarelo- Simulador de escoamento		
		Horizonte A	0,00016 g cm ⁻² min ⁻¹ Pa ⁻¹	1,5 Pa
		Horizonte B	0,00072 g cm ⁻² min ⁻¹ Pa ⁻¹	6,5 Pa
		Horizonte C residual maduro	0,00122 g cm ⁻² min ⁻¹ Pa ⁻¹	6,7 Pa
		Horizonte C residual jovem	0,00831 g cm ⁻² min ⁻¹ Pa ⁻¹	3,0 Pa
		Latossolo Vermelho Amarelo – ensaio de Inderbitzen		
		Horizonte A		
		Horizonte B	0,01099 g cm ⁻² min ⁻¹ Pa ⁻¹	0,32 Pa
		Horizonte C residual maduro	0,00360 g cm ⁻² min ⁻¹ Pa ⁻¹	-
		Horizonte C residual jovem	0,00153 g cm ⁻² min ⁻¹ Pa ⁻¹ 0,00739 g cm ⁻² min ⁻¹ Pa ⁻¹	- -
Goiânia (GO)	Oliveira et al. (2009)	Franco arenoso	0,0036 g cm ⁻² min ⁻¹ Pa ⁻¹	2,03 Pa
Baliza (GO)		Arenoso	0,0098 g cm ⁻² min ⁻¹ Pa ⁻¹	2,08 Pa
Doverlândia (GO)		Franco argiloso	0,0582 g cm ⁻² min ⁻¹ Pa ⁻¹	3,93 Pa
Morrinhos (GO)		Argila arenosa	0,0073 g cm ⁻² min ⁻¹ Pa ⁻¹	3,78 Pa
Morrinhos (GO)		Franco arenoso	0,0039 g cm ⁻² min ⁻¹ Pa ⁻¹	4,87 Pa
Morrinhos (GO)		Franco argilo arenoso	0,0054 g cm ⁻² min ⁻¹ Pa ⁻¹	3,74 Pa
Itáiópolis (SC)	Correa; Cruz (2010)	Cambissolo	0,027 e 0,036 t h MJ ⁻¹ mm ⁻¹	-
		Argissolo Vermelho-Amarelo	0,025 a 0,038 t h MJ ⁻¹ mm ⁻¹	-

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Descrição geral do local do experimento

O experimento foi realizado em uma estrada não pavimentada localizada no campus da Universidade Federal de Viçosa, situado no município de Viçosa - MG. Como coordenadas de referência para o trabalho, apresenta-se $20^{\circ}46'34,76''$ de latitude sul e $42^{\circ}51'59,19''$ de longitude oeste (Figura 2).



Figura 2 - Localização da estrada no campus universitário da UFV.

Fonte: Google Earth, (2012).

A região apresenta uma altitude média de 690 m, precipitação média anual de 1.222 mm e temperatura média anual de 19,4 °C (EMBRAPA, 2003).

O solo do local caracteriza-se como um Latossolo Vermelho-Amarelo; sendo na Figura 3 apresentada uma fotografia do perfil do solo e a sua descrição.



Figura 3 - Imagem e descrição do perfil do solo do local de estudo.

Os trechos 1 e 2 onde foram feitos os testes (Figura 2), correspondem respectivamente, aos horizontes B e C do Latossolo apresentado na Figura 3. A adequação do canal de drenagem foi feita em cada trecho a fim de simular a condição imediatamente após a manutenção do canal e a fim de padronizar as condições de cada local, como apresentado na Figura 4.

Realizou-se a amostragem de solo para a determinação da granulometria e da sua massa específica. Na Tabela 2 é apresentada a porcentagem dos agregados de solo determinados para cada local, assim como a massa específica do solo, a porcentagem de agregados na peneira 0,074 mm (#200) e a classe textural correspondente a cada horizonte

estudado. No Apêndice A é apresentada a curva granulométrica de cada local.



Figura 4 - Adequação do canal da estrada do trecho 1, localizado no horizonte B (A); e do trecho 2, localizado no horizonte C (B).

Tabela 2 - Características físicas do solo do local do experimento

Horizonte	Granulometria				Retido na peneira # 200	Densidade aparente ² (g cm ⁻³)	Classe Textural
	Areia (%)	Silte (%)	Argila ¹ (%)	Pedregulho (%)			
B	25	9	65	1	17,00	1,24	Argiloso
C	41	24	35	0	38,87	1,35	Franco Argiloso

1. Método do densímetro (ABNT, NBR 7181).

2. Método do anel volumétrico (EMBRAPA, 1997).

3.2 Procedimento para a obtenção da erodibilidade e da tensão crítica de cisalhamento do solo

A erodibilidade e a tensão crítica de cisalhamento foram determinadas a partir da análise das perdas de solo acumuladas associadas a diferentes tensões de cisalhamento. A determinação destas variáveis foi feita com um simulador de escoamento desenvolvido por Griebeler et al. (2005b), e no qual foram feitas algumas modificações para tornar o seu desempenho mais eficiente que são detalhadas no apêndice B.

3.2.1 Descrição do equipamento

O equipamento permite simular o escoamento diretamente nos canais das estradas em condição natural e obter os sedimentos advindos da vazão aplicada. Na Figura 5 é apresentado um esquema geral do equipamento e na Figura 6 uma foto do equipamento instalado no campo.

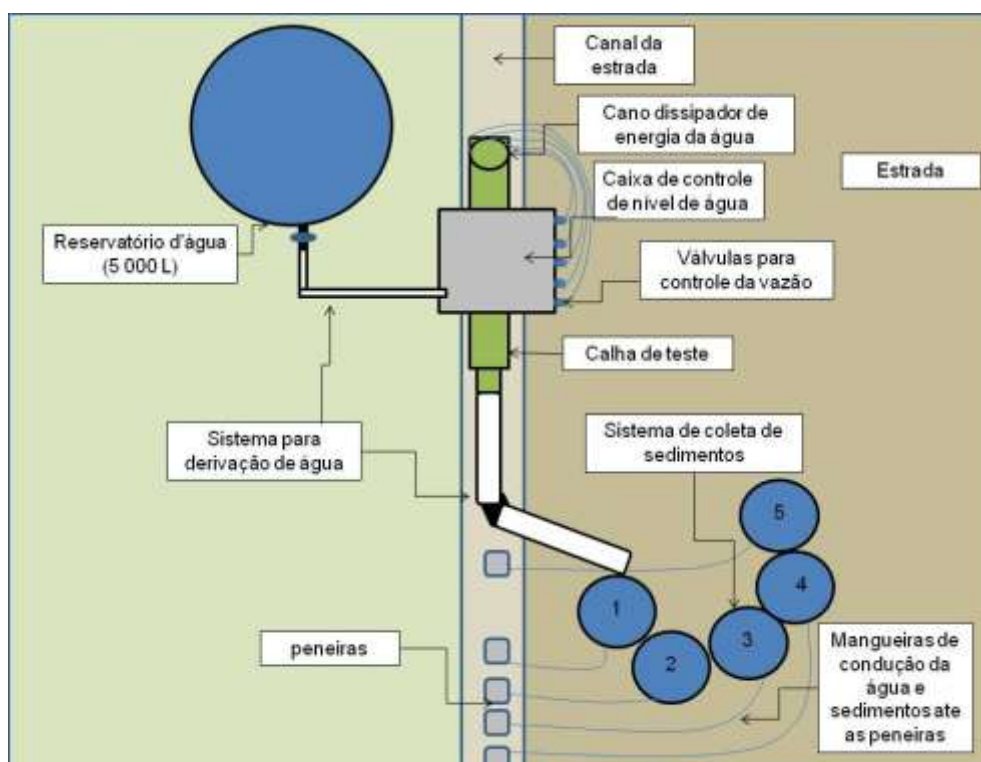


Figura 5 - Representação esquemática do simulador de escoamento.

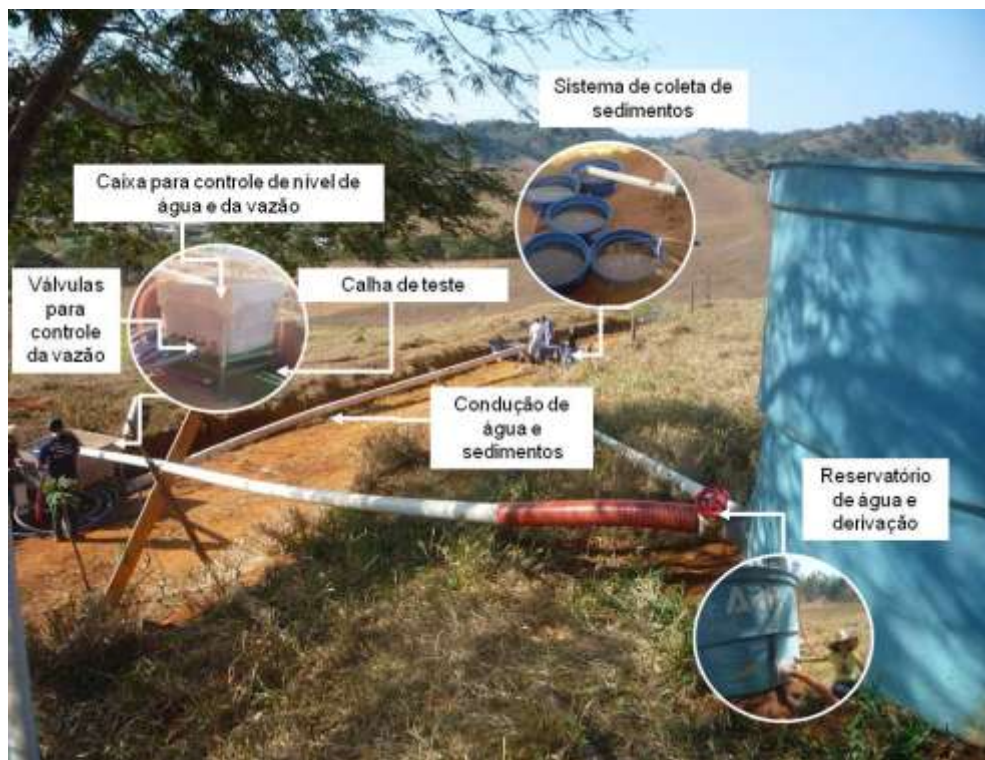


Figura 6 - Instalação do simulador de escoamento em campo.

O equipamento consiste de um sistema para armazenamento e derivação de água, uma calha construída com chapas metálicas, que permitem a delimitação do trecho de canal a ser ensaiado, e de um conjunto para coleta e filtragem da água que passa pelo próprio equipamento (GRIEBELER et al., 2005b).

O sistema para armazenamento e derivação da água consta de uma caixa em fibra de vidro de 5.000 L, que alimenta a caixa de controle durante os testes para manter seu nível constante. Esta caixa dispõe de um registro de gaveta (100 mm) para controle da vazão, conectada com uma tubulação de PVC que direciona a água à caixa de controle (Figura 7).

A caixa para controle de nível da água e da vazão é colocada sob um suporte metálico, instalado acima da calha metálica. Esta caixa é de cimento amianto de 500 L e contém cinco registros de esfera (50 mm) situados na parte inferior para controlar a vazão. O nível da água nesta caixa é mantido constante a fim de sustentar a vazão, sendo controlada por um orifício que permite a saída de água, localizado na parte superior da caixa.



Figura 7 - Sistema de armazenamento e derivação de água.

Cada registro é conectado a um mangote de 50 mm que, por sua vez, está conectado a um tubo de PVC de 200 mm, inserido na calha metálica, atuando como dissipador de energia do escoamento, uma vez que apresenta uma secção perfurada (Figura 8).

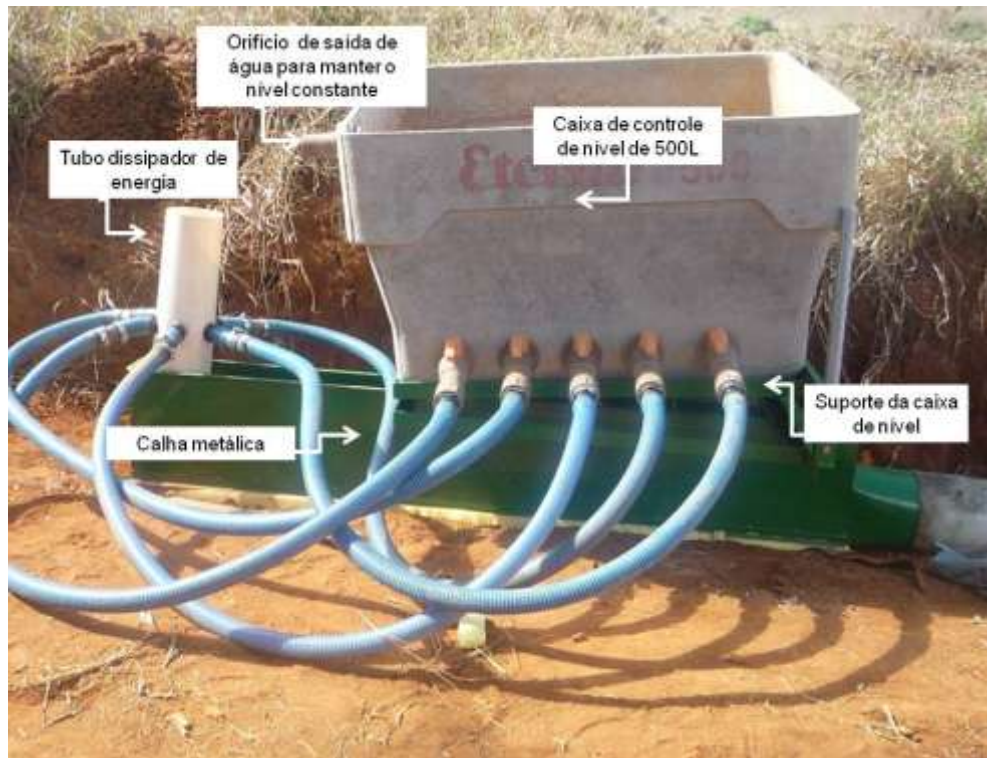


Figura 8 - Sistema de escoamento controlado.

O sistema consta também de uma calha construída com chapas metálicas, que apresenta três trechos. O primeiro para derivação da água da caixa para a calha (área fechada no fundo), o trecho de contato do escoamento com o leito do canal (área aberta no fundo) e o trecho para o direcionamento da água com os sedimentos (área fechada no fundo). Na Figura 9 e 10 apresenta-se a representação esquemática da calha metálica, assim como o suporte para instalação da caixa de controle de nível.

Na saída da calha metálica é conectada uma tubulação de PVC (200 mm) que direciona a água com os sedimentos à área de coleta, composta por cinco caixas de polietileno de 500 L. Em cada caixa é armazenada a água com os sedimentos provenientes de cada vazão. Cada caixa contém dois registros de esfera para facilitar o processo de filtragem (Figura 11).



Figura 9 - Desenho da calha do simulador do escoamento.

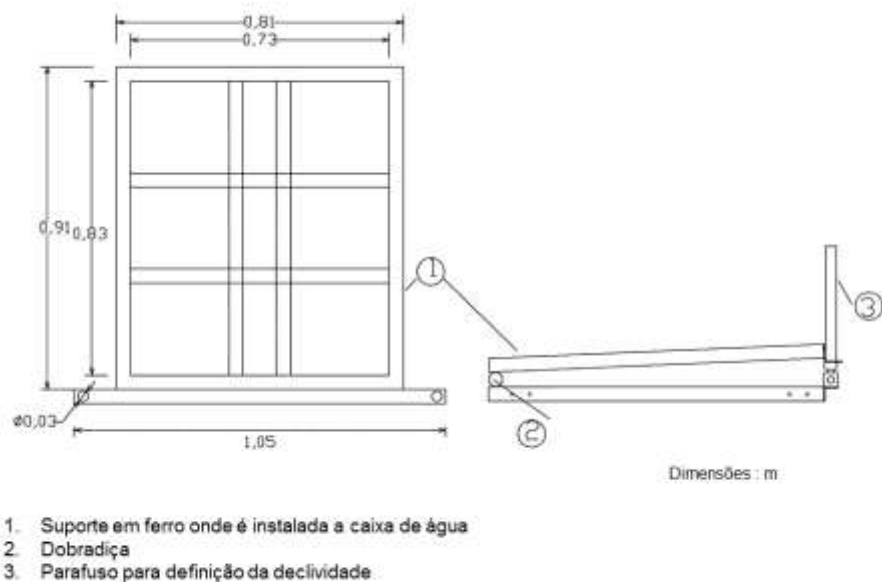


Figura 10 - Suporte da caixa para o controle de nível.



Figura 11 - Sistema de condução e coleta de sedimentos.

3.2.2 Calibração da vazão

Antes de instalar o simulador de escoamento no campo foi necessário calibrar a vazão na caixa de controle de nível, em função da carga hidráulica, a fim de conhecer a tensão de cisalhamento aplicada, para cada variação da vazão.

A calibração foi feita no Laboratório de Hidráulica da UFV, instalando a caixa de controle de nível sobre um canal que permitia a alimentação de água e a manutenção do seu nível constante. A vazão foi determinada pela relação entre o volume e o tempo, sendo o volume determinado em um tanque de área conhecida e a altura do nível de água foi registrada no linígrafo instalado no tanque. Este procedimento foi repetido para diferentes cargas hidráulicas (Figura 12).

Posteriormente foram plotadas em um gráfico as vazões obtidas em função da altura e ajustado ao modelo que melhor representa o comportamento dos dados. Na Figura 13 é apresentada a curva de calibração, assim como a função obtida.



Figura 12 - Calibração de vazão na caixa de controle de nível.

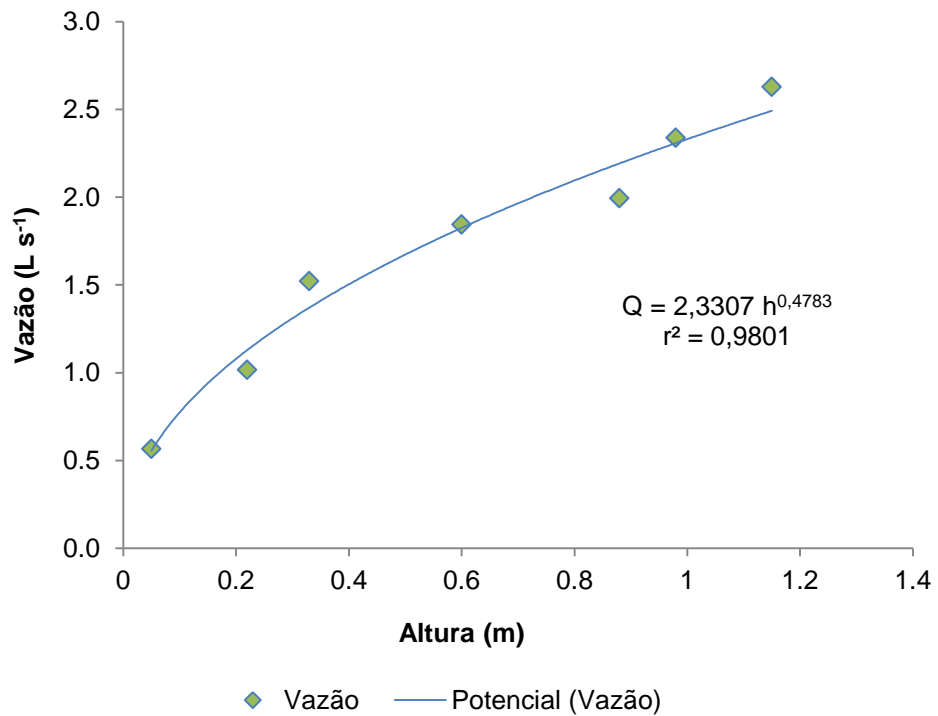


Figura 13 - Função ajustada para determinação da vazão.

Para cada ensaio foi medida a altura (carga hidráulica) e determinada a vazão, em $L s^{-1}$, em função da equação estimada. A vazão determinada corresponde à primeira vazão aplicada; as outras vazões aplicadas foram determinadas pelo produto da vazão obtida e pelo número de registros abertos.

3.2.3 Realização dos testes

Foram feitos 10 testes em cada trecho, sendo que para cada teste foram aplicadas cinco vazões diferentes. Antes de iniciar os testes foi feita uma adequação do canal de drenagem, a fim de simular a condição imediata após a manutenção do canal e para padronizar as condições de cada local.

Os testes iniciavam com a instalação do equipamento, sendo verificadas as condições de nivelamento e seguindo a sequência:

- determinação da carga hidráulica, dada pelo desnível entre o nível de água na caixa de controle e a saída da água no tubo dissipador;
- determinação da declividade do terreno, por meio de um nível manual;
- abertura do registro da caixa do sistema de armazenamento e derivação da água até a caixa para controle de nível. Uma vez alcançado o nível constante na caixa de controle é iniciado o teste com a abertura da primeira válvula;
- direcionamento da água provinda da caixa de controle para a parte inicial da calha, na qual o fundo é fechado, através do tubo dissipador que direciona o escoamento para a área de contato com o solo situado no fundo do canal de drenagem da estrada;
- direcionamento da água e dos sedimentos através de uma tubulação de PVC para o sistema de coleta, localizado em cota inferior;
- aplicação da vazão inicial (abertura de um registro) durante 15 segundos, seguindo a metodologia proposta por Griebeler et al. (2005b), a fim de remover os sedimentos presentes, gerados por agentes diferentes do escoamento aplicado (a água e os sedimentos desta vazão inicial são descartados);

- direcionamento da água com os sedimentos para a caixa de coleta da primeira vazão, registrando o tempo que demora para encher cada caixa. Uma vez cheia a primeira caixa, aumentava-se a vazão pela abertura do segundo registro, e iniciava-se a coleta da segunda vazão e, assim, sequencialmente, até obter os sedimentos para a última vazão aplicada (cinco registros abertos);
- armazenamento dos sedimentos em cada caixa coletora relativos a cada vazão aplicada, sendo a mudança entre as caixas feita manualmente. O momento da mudança foi estabelecido por meio do lançamento de um flutuador na calha de escoamento, em momento imediatamente anterior a mudança de vazão. Com a chegada do flutuador na caixa coletora era realizada a mudança para a caixa coletora seguinte;
- filtragem da água com os sedimentos em peneira de malha 0,074 mm (#200), a fim de obter o material erodido (Figura 14), sendo feito este procedimento para cada caixa de coleta; e
- armazenamento em recipientes individuais do sedimento obtido com dimensões superiores a 0,074 mm, incluindo agregados, para ser posteriormente conduzido ao laboratório e ser determinadas as perdas de solo.

3.2.4 Determinação das perdas do solo

O material coletado nas peneiras para cada vazão foi levado ao laboratório e seco ao ar, para a determinação da porcentagem de areia. Esta porcentagem foi obtida pela dispersão mecânica e química das frações do solo, utilizando o peneiramento para a obtenção das partículas de areia fina (RUIZ, 2004).

O total de solo erodido foi determinado fazendo-se uma relação direta entre a porcentagem de areia retida nas peneiras e o percentual que este representa no total obtido pela curva granulométrica.



Figura 14 - Processo de filtragem.

3.2.5 Cálculo da tensão de cisalhamento

A tensão de cisalhamento aplicada foi obtida aplicando a equação 1:

$$\tau = \frac{\gamma y S}{0,102} \quad (1)$$

em que:

τ = tensão de cisalhamento associada ao escoamento, Pa;

γ = peso específico da água, kgf m^{-3} ;

y = profundidade de escoamento, m; e

S = declividade da superfície livre da água, m m^{-1} .

O valor de declividade do terreno foi determinado em campo pela diferença de nível na área delimitada pelo equipamento, sendo a profundidade de escoamento estimada utilizando a equação de Manning, expressa pela equação 2.

$$\frac{y^{5/3}}{(L+2y)^{2/3}} = \frac{Q n}{S^{1/2} L^{5/3}} \quad (2)$$

em que:

Q = vazão, m³ s⁻¹

n = coeficiente de rugosidade de Manning, s m^{-1/3}

L = largura da calha, m.

Considerando que a equação 2 é indeterminada, utilizou-se um método numérico para sua solução, sendo utilizado o método de tentativa e erro partindo de 0, determinado com uma precisão de 0,000001.

A vazão foi determinada previamente, em função da carga hidráulica e do número de válvulas abertas. O coeficiente de rugosidade foi adotado pela literatura para a condição que mais se aproximou das condições do canal, sendo o valor assumido de 0,018 s m^{-1/3} (CHOW, 1986). A largura da calha foi determinada por medição direta no equipamento (15 cm). Desta maneira, foram obtidas cinco tensões de cisalhamento para cada teste.

3.2.6 Determinação da erodibilidade

Os valores obtidos em cada teste de perda de solo associados a cada tensão de cisalhamento aplicada foram plotados em um gráfico, ajustando-se uma equação linear simples ao conjunto dos cinco pontos correspondentes às vazões aplicadas. A erodibilidade corresponde ao coeficiente angular da equação ajustada e, a tensão crítica de cisalhamento equivale ao valor máximo de tensão aplicada para o qual a perda de solo ainda é nula.

Para cada horizonte foram obtidas 10 equações, sendo estas analisadas estatisticamente para determinar um valor representativo da erodibilidade e da tensão crítica de cisalhamento de cada local.

3.3 Análise estatística

As 10 equações obtidas para cada local foram analisadas utilizando o teste de identidade de modelos (REGAZZI, 1999) com o propósito de avaliar a possibilidade destas equações serem representadas por uma única equação e, desta maneira, determinar valores únicos de erodibilidade e de tensão crítica de cisalhamento representativos de cada local de estudo.

3.3.1 Teste de identidade de modelos

O teste de identidade de modelos tem sido utilizado para testar diferentes hipóteses, destacando principalmente a verificação de que um conjunto de equações seja idêntico ou tenham uma constante de regressão comum, ou um e/ou mais coeficientes de regressão iguais (REGAZZI, 1999).

Neste sentido o teste de identidade de modelos foi aplicado para testar a hipótese de que as 10 equações são idênticas e podem ser representadas por um modelo comum. A sequência para a aplicação do teste foi descrita por Regazzi (1999) utilizando os seguintes passos:

Considera-se as 10 equações obtidas para cada teste expressas como:

$$\begin{aligned} Ps_{1i} &= \beta_{01} + \beta_{11}\tau_{1i} + e_{1i} & i = 1, 2, \dots, 5 \\ Ps_{2i} &= \beta_{02} + \beta_{12}\tau_{2i} + e_{2i} & i = 1, 2, \dots, 5 \\ \vdots & & \vdots \\ Ps_{10i} &= \beta_{010} + \beta_{110}\tau_{10i} + e_{10i} & i = 1, 2, \dots, 5 \end{aligned} \quad (3)$$

em que:

- Ps_i = i-ésima observação de perda de solo para cada modelo, $g\ cm^{-2}\ min^{-1}$;
- β_0 e β_1 = parâmetros de cada modelo, sendo que β_1 representa a erodibilidade (K), $g\ cm^{-2}\ min^{-1}\ Pa^{-1}$ e β_0 um valor constante;
- τ_i = i-ésimo valor da tensão de cisalhamento aplicada, Pa; e

e_i = erro aleatório, associado a i -ésima observação de cada modelo.

O valor da tensão crítica de cisalhamento em cada modelo é obtido quando $Ps = 0$:

$$\tau_c = \frac{\beta_0}{k} \quad (4)$$

O h -ésimo modelo em (3) pode ser escrito como:

$$Ps_h = \beta_h \tau_h + \varepsilon_h \quad (5)$$

em que:

$$Ps_h = \begin{bmatrix} Ps_{h1} \\ Ps_{h2} \\ \vdots \\ Ps_{h5} \end{bmatrix}_1, \quad \beta_h = \begin{bmatrix} \beta_{0h} \\ \beta_{1h} \end{bmatrix}_2, \quad \tau_h = \begin{bmatrix} 1 & \tau_{h1} \\ 1 & \tau_{h2} \\ \vdots & \vdots \\ 1 & \tau_{h5} \end{bmatrix}_5, \quad (6)$$

$$\varepsilon_h = \begin{bmatrix} e_{h1} \\ e_{h2} \\ \vdots \\ e_{h5} \end{bmatrix}_1$$

1. Obteve-se a estimativa dos parâmetros de cada modelo pelo método dos mínimos quadrados, dado pela expressão:

$$\hat{\beta} = (\tau' \tau)^{-1} \tau' Ps \quad (7)$$

2. Obteve-se a soma de quadrados dos parâmetros, relativa ao modelo completo ($SQ_{PAR(C)}$) com $H * p$ graus de liberdade, sendo H o número de equações e p o número de parâmetros, dada por:

$$\underset{\sim}{SQ}_{PAR(c)} = \underset{\sim}{\hat{\beta}}' \underset{\sim}{\tau}' \underset{\sim}{Ps} = \sum_{h=1}^H \underset{\sim}{\hat{\beta}}_h' \underset{\sim}{\tau}_h' \underset{\sim}{Ps}_h \quad (8)$$

em que $\underset{\sim}{\hat{\beta}}$ é a estimativa dos parâmetros do modelo completo.

Utilizando a notação matricial, os modelos reduzidos podem ser escritos como:

$$\underset{\sim}{Ps} = Z \underset{\sim}{\theta} + \underset{\sim}{\varepsilon} \quad (9)$$

em que:

$\underset{\sim}{Ps}$ = vetor dos valores observados de perda de solo do modelo comum, de dimensões 50 * 1;

$\underset{\sim}{\varepsilon}$ = vetor de erros aleatórios de dimensões 50 * 1; e

Z e $\underset{\sim}{\theta}$ são dados por:

$$Z = \underset{50}{\begin{bmatrix} 1 & \tau_1 \\ 1 & \tau_2 \\ \vdots & \vdots \\ 1 & \tau_{10} \end{bmatrix}} \underset{2}{\quad} \quad (10)$$

$$\underset{\sim}{\theta} = \underset{2}{\begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \end{bmatrix}} \underset{1}{\quad} \quad (11)$$

em que:

τ_i são os valores da tensão de cisalhamento e é estimado pela equação (6); e

$\underset{\sim}{\theta}$ = vetor dos parâmetros comuns.

- Determinou-se a estimativa do vetor dos parâmetros comuns dado pela expressão:

$$\hat{\theta}_{\sim} = (Z'Z)^{-1}Z'Ps_{\sim} \quad (12)$$

Sendo a matriz $Z'Z$ composta pela soma das matrizes $\tau_h'\tau_h$ de cada modelo, bem como a matriz $Z'Ps_{\sim}$, o estimador dos parâmetros comuns pôde ser escrito por meio da equação 13.

$$\hat{\theta}_{\sim} = \left(\sum_{h=1}^H \tau_h' \tau_h \right)^{-1} * \sum_{h=1}^H \tau_h' Ps_{\sim} \quad (13)$$

4. Determinou-se a soma de quadrados dos parâmetros do modelo reduzido, dada pela equação 14.

$$SQ_{PAR(R)} = \hat{\theta}_{\sim}' Z' Ps_{\sim} \quad (14)$$

5. Determinou-se a soma de quadrados total não corrigida, dada pela equação 15.

$$SQ_{TOTAL} = Ps_{\sim}' Ps_{\sim} = \sum_{h=1}^H Ps_h' Ps_h \quad (15)$$

Com N graus de liberdade, sendo N o total das observações.

6. A soma de quadrados do resíduo da regressão relativa ao modelo reduzido foi obtida pela diferença entre as equações (15) e (14), resultando na equação 16,

$$SQ_{RR(R)} = Ps_{\sim}' Ps_{\sim} - \hat{\theta}_{\sim}' Z' Ps_{\sim} \quad (16)$$

Com N – p graus de liberdade.

7. Calculou-se a soma de quadrados da redução como a diferença da soma de quadrados dos parâmetros do modelo completo e a soma dos parâmetros do modelo reduzido, descrita pela equação 17.

$$SQ_{\text{redução}} = \left(\begin{matrix} \hat{\beta}' \\ \hat{\tau}' \\ \hat{\theta}' \end{matrix} \begin{matrix} \tau' \\ P_s \\ Z' \end{matrix} \begin{matrix} P_s \\ \tilde{P}_s \end{matrix} \right) - \left(\begin{matrix} \hat{\theta}' \\ \tilde{Z}' \\ \tilde{P}_s \end{matrix} \right) \quad (17)$$

Com $(H - 1) p$, graus de liberdade.

8. Determinou-se o valor da estatística F ($F_{\text{calculado}}$) de acordo com a expressão apresentada na Tabela 3. Após, o $F_{\text{calculado}}$ é comparado com o F_{tabulado} (α ; $(H - 1) p$; $N - Hp$).

A hipótese nula é rejeitada se $F_{\text{calc}} \geq F_{\text{tab}}$. A não rejeição implica que as equações não diferem estatisticamente a uma significância de 1% e eles podem ser representados por uma única equação.

Na Tabela 3 apresenta-se a análise de variância relativa à hipótese a ser testada.

Tabela 3 - Esquema de análise de variância para o teste de identidade de modelos

Fontes de Variação	Graus de Liberdade	Soma de Quadrado	Quadrado Médio	Teste F
Parâmetros (β)	$(H * p)$	$Q_1 = \begin{matrix} \hat{\beta}' \\ \tilde{\tau}' \\ \tilde{P}_s \end{matrix} P_s$		
Parâmetros (θ)	p	$Q_2 = \begin{matrix} \hat{\theta}' \\ \tilde{Z}' \\ \tilde{P}_s \end{matrix} P_s$		
Redução (H_0)	$(H-1)p$	$Q_3 = Q_1 - Q_2$	$V_1 = \frac{Q_3}{(H-1) * p}$	V_1/V_2
Resíduo da Regressão	$N - (H * p)$	$Q_4 = Q_5 - Q_1$	$V_2 = \frac{Q_4}{N - (H * p)}$	
TOTAL	N	$Q_5 = \tilde{P}_s' \tilde{P}_s$		

3.3.2 Determinação do intervalo de confiança para a erodibilidade (K)

Uma vez obtida a equação comum e determinada a erodibilidade foi determinado o intervalo de confiança para este parâmetro com um nível de confiança de 95%, determinado pela expressão:

$$\hat{K} - t_{\alpha/2} \sqrt{\hat{V}(\hat{K})} \leq K \leq \hat{K} + t_{\alpha/2} \sqrt{\hat{V}(\hat{K})} \quad (18)$$

em que:

\hat{K} = valor estimado de erodibilidade;

$\hat{V}(\hat{K})$ = estimador da variância do estimador do parâmetro;

t = valor tabelado da estatística t; e

α = nível de significância

A análise estatística foi realizada utilizando a planilha eletrônica *Microsoft Excel 2010*.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Erodibilidade e tensão crítica de cisalhamento do horizonte B

Na Figura 15 são apresentadas as perdas de solo acumuladas associadas às tensões aplicadas nos 10 testes realizados, sendo nesta evidenciada uma grande variação das perdas de solo acumuladas para tensões cisalhantes equivalentes nos diversos testes realizados.

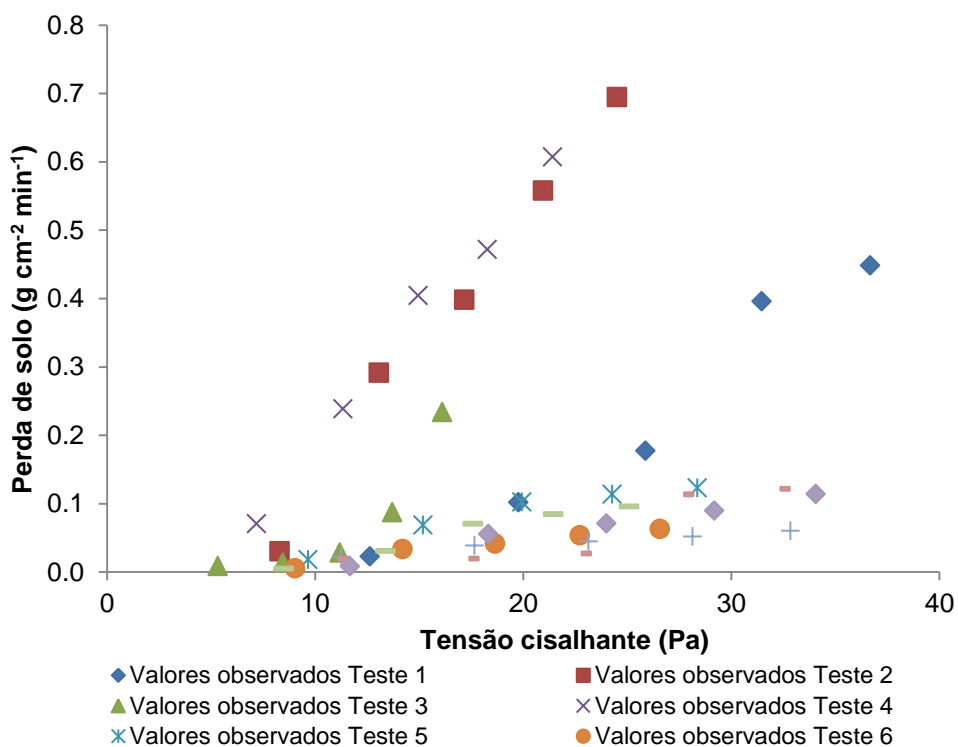


Figura 15 - Perdas de solo acumuladas associadas às tensões cisalhantes aplicadas nos 10 testes realizados no horizonte B.

Na Tabela 4 são apresentadas as equações ajustadas para a perda de solo em função da tensão cisalhante, bem como os coeficientes de determinação relativos a cada equação e os valores de erodibilidade e de

tensão crítica de cisalhamento correspondentes a cada teste. Na Tabela 1C do Apêndice C são apresentados os dados das perdas de solo acumuladas associadas às tensões de cisalhamento e as vazões aplicadas em cada um dos testes realizados.

Tabela 4 - Equações ajustadas para os 10 testes realizados no horizonte B

Teste	Equação ajustada	r^2	K^1 (g cm ⁻² min ⁻¹ Pa ⁻¹)	τ_c^2 (Pa)
T1	$\widehat{P}_{s_1} = - 0,250 + 0,0190 \tau$	0,941	0,0190	13,19
T2	$\widehat{P}_{s_2} = - 0,276 + 0,0357\tau$	0,989	0,0357	7,73
T3	$\widehat{P}_{s_3} = - 0,135 + 0,0156 \tau$	0,725	0,0156	8,64
T4	$\widehat{P}_{s_4} = - 0,186 + 0,0324 \tau$	0,990	0,0324	5,75
T5	$\widehat{P}_{s_5} = - 0,024 + 0,0051 \tau$	0,924	0,0051	4,72
T6	$\widehat{P}_{s_6} = - 0,017+ 0,0028 \tau$	0,960	0,0028	6,23
T7	$\widehat{P}_{s_7} = 0,006 + 0,0016\tau$	0,978	0,0016	-3,75
T8	$\widehat{P}_{s_8} = - 0,063 + 0,0055 \tau$	0,773	0,0055	11,38
T9	$\widehat{P}_{s_9} = - 0,042 + 0,0052 \tau$	0,965	0,0052	8,08
T10	$\widehat{P}_{s_{10}} = - 0,037 + 0,0042\tau$	0,971	0,0041	8,81

¹ Erodibilidade obtida pela equação (3).

² Tensão crítica de cisalhamento obtida pela equação (4).

Conforme se evidencia na Tabela 4 há uma grande variação dos valores de erodibilidade (K), que oscilam de 0,0016 g cm⁻² min⁻¹ Pa⁻¹ a 0,0357 g cm⁻² min⁻¹ Pa⁻¹, sendo o maior valor de erodibilidade, portanto, 22,3 vezes superior ao menor valor. Esta variabilidade foi evidenciada também para a tensão crítica cisalhante, sendo obtido até um valor negativo para esta variável (teste 7), o que não apresenta explicação física. O maior valor obtido para a tensão crítica de cisalhamento foi igual a 13,19 Pa.

Uma análise geral das equações ajustadas permite evidenciar que a dispersão dos dados em relação dos modelos ajustados é pequena, o que é indicado pelos coeficientes de determinação obtidos, que foram, em geral, superiores a 92%. Em apenas dois testes, os valores foram inferiores a este valor, sendo de 72,5% para o teste 3 e de 77,3% para o teste 8.

O teste de identidade de modelos foi aplicado para as 10 equações obtidas. A aplicação deste permitiu identificar o agrupamento das equações em quatro grupos distintos, apresentados na Tabela 5, assim como as equações comuns. No apêndice D (Tabelas 1D a 4D) são apresentadas as análises de variância destes agrupamentos de equações.

Tabela 5 - Agrupamento das equações identificadas pelo teste de identidade de modelos no horizonte B

Agrupamento	Testes	Equação ajustada	r^2	K ($\text{g cm}^{-2} \text{ min}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$)	τ_c (Pa)
1	2 e 4	$\widehat{P}_{\text{scmum}} = -0,225 + 0,0338 \tau$	0,981	0,0338	6,66
2	1 e 3	$\widehat{P}_{\text{scmum}} = -0,157 + 0,0160 \tau$	0,890	0,0160	10,07
3	7	$\widehat{P}_{\text{scmum}} = 0,006 + 0,0016 \tau$	0,977	0,0016	-3,75
4	5, 6, 8, 9 e 10	$\widehat{P}_{\text{scmum}} = -0,034 + 0,0044 \tau$	0,743	0,0044	7,61

Na Figura 16 é apresentada a linha de tendência correspondente ao primeiro agrupamento obtido, e correspondente aos testes 2 e 4.

Os testes 2 e 4 foram os que apresentaram os maiores valores de erodibilidade, sendo a estes ajustado a linha de tendência representada que caracteriza uma erodibilidade de $0,0338 \text{ g cm}^{-2} \text{ min}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$ e uma tensão crítica de cisalhamento de 6,66 Pa.

Evidencia-se para este agrupamento que, embora a tensão de cisalhamento tenha sido superada pelos valores obtidos nos agrupamentos 2 e 4, o valor da erodibilidade do solo foi muito superior ao dos demais agrupamentos. Assim sendo, a erodibilidade para o primeiro agrupamento de 2,1 vezes o valor correspondente ao segundo agrupamento, 21,13 vezes o valor relativo ao terceiro agrupamento e 7,68 vezes o valor da erodibilidade do quarto agrupamento. Esta variabilidade pode se inferir às características do solo, uma vez que este apresenta grande variabilidade espácio-temporal mesmo em pequenas áreas, e cada teste foi realizado em diferentes locais do trecho estudado.

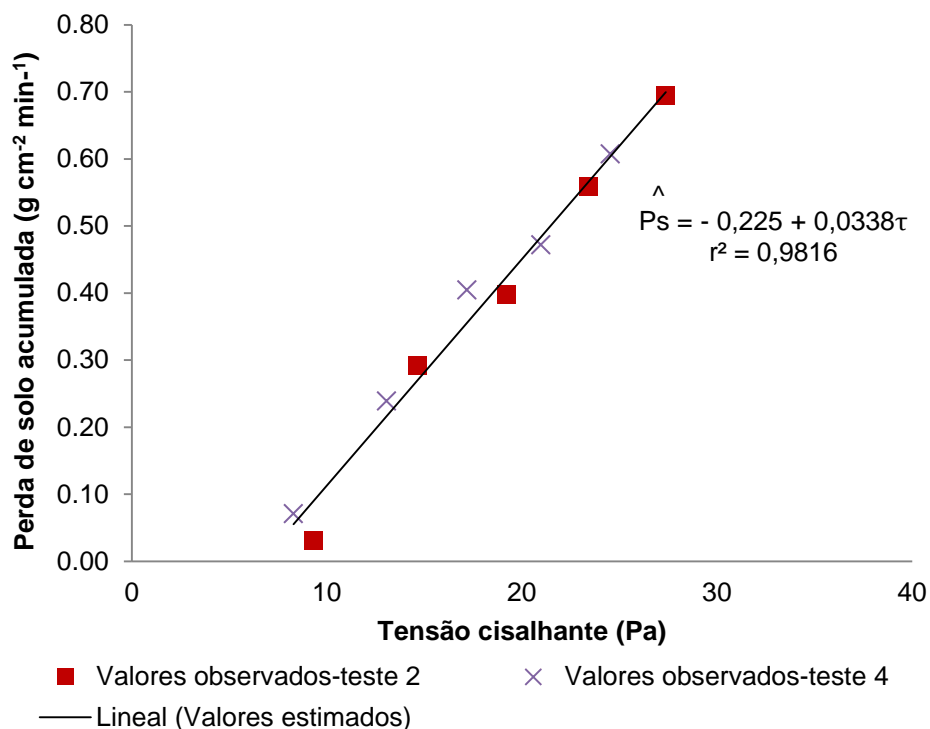


Figura 16 - Agrupamento dos testes 2 e 4, identificado pelo teste de identidade de modelos, e linha de tendência correspondente a este agrupamento.

Na Figura 17 é apresentada a linha de tendência ajustada para o segundo agrupamento, correspondente aos testes 1 e 3. A equação comum determinada caracterizou valores de erodibilidade de $0,016 \text{ g cm}^{-2} \text{ min}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$ e de tensão crítica de cisalhamento de $10,07 \text{ Pa}$.

Este agrupamento foi o que apresentou o maior valor de tensão crítica de cisalhamento dentre todos os agrupamentos obtidos, sendo este valor 1,51 vezes maior que o valor obtido para o primeiro agrupamento e 1,32 vezes maior que o valor obtido para o quarto agrupamento. Quanto ao valor de erodibilidade, embora este tenha sido cerca da metade do relativo ao agrupamento dos testes 2 e 4, este foi bastante superior ao valor correspondente aos outros dois agrupamentos considerados.

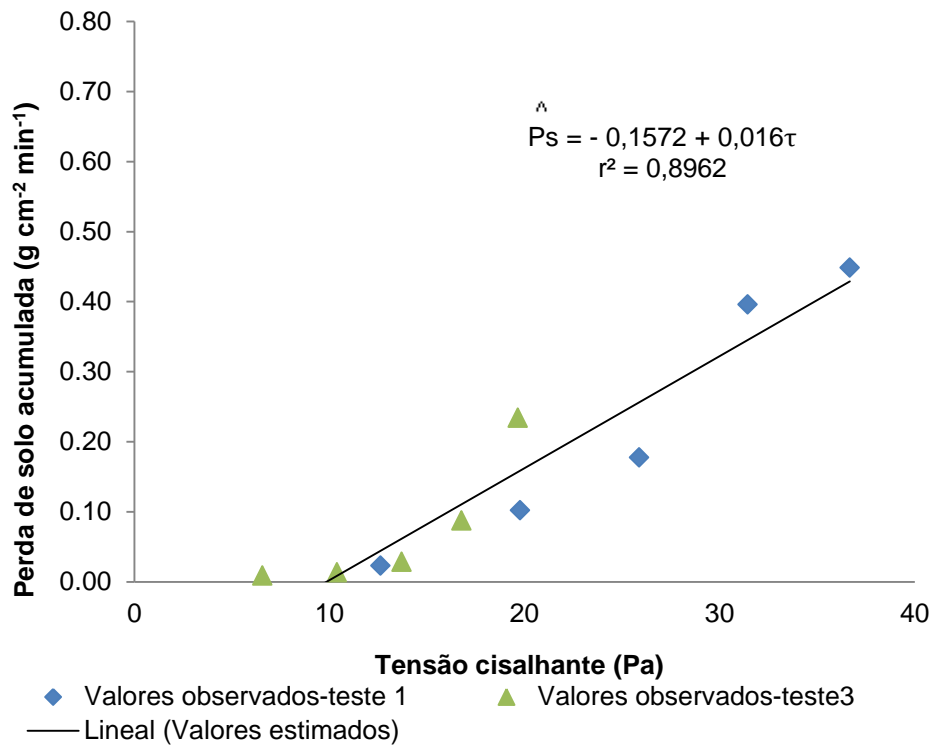


Figura 17 - Agrupamento dos testes 1 e 3, identificado pelo teste de identidade de modelos, e linha de tendência correspondente a este agrupamento.

Na Figura 18 é apresentada a linha de tendência ajustada para o terceiro agrupamento. Conforme se evidencia, neste agrupamento foi considerada apenas uma equação (teste 7), a qual, inclusive, apresenta um valor de tensão de cisalhamento crítica inconsistente do ponto de vista físico, uma vez que o seu valor é negativo. Com relação à erodibilidade, este agrupamento foi o que apresentou o valor mais próximo do obtido por Griebeler et al. (2005a), que obtiveram um valor de erodibilidade igual a $0,001 \text{ g cm}^{-2} \text{min}^{-1} \text{Pa}^{-1}$ para um solo similar ao que foi estudado neste trabalho.

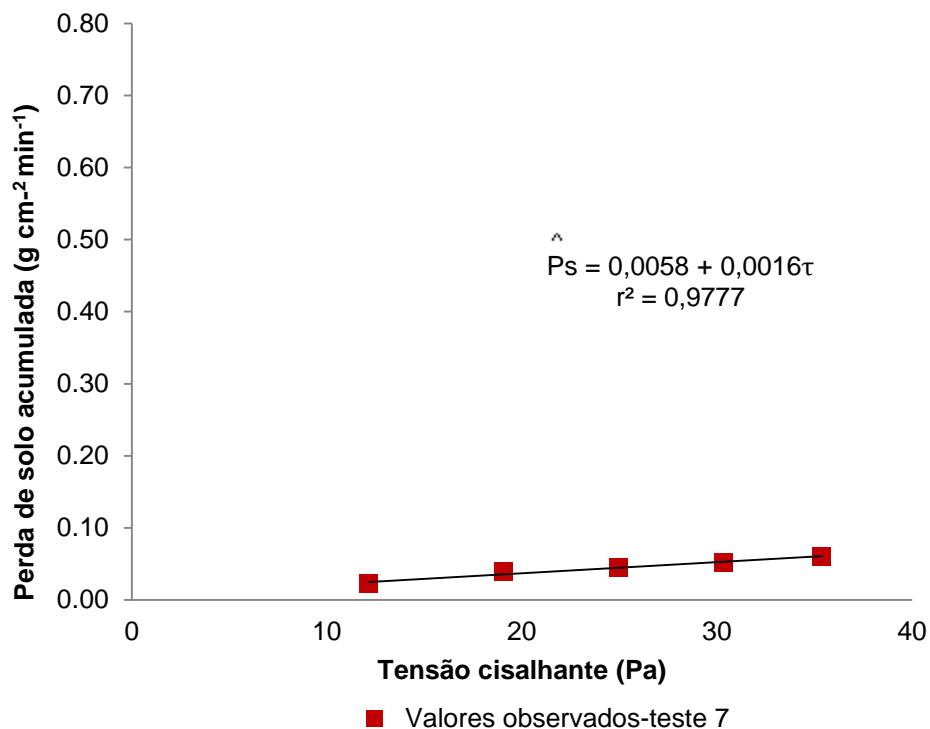


Figura 18 - Agrupamento do teste 7, identificado pelo teste de identidade de modelos, e linha de tendência correspondente a este agrupamento.

Na Figura 19 é apresentada a linha de tendência para o quarto agrupamento. O modelo ajustado para este agrupamento apresentou valores de erodibilidade de $0,0044 \text{ g cm}^{-2} \text{ min}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$ e de tensão crítica de cisalhamento de $7,61 \text{ Pa}$. Este agrupamento foi o que permitiu o ajuste de um número maior de equações e, embora tenha apresentado o menor coeficiente de determinação entre todos os agrupamentos (igual a $0,74$), ainda caracterizou um bom ajuste dos dados.

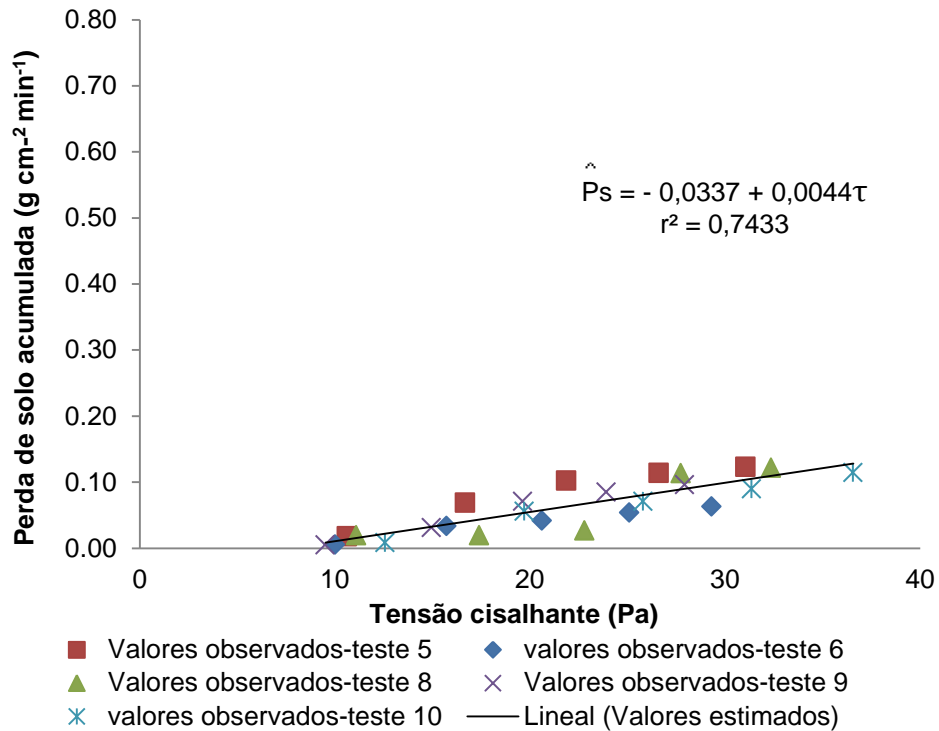


Figura 19 - Agrupamento dos testes 5,6,8, 9 e 10, identificado pelo teste de identidade dos modelos, e linha de tendência correspondente a este agrupamento.

A erodibilidade obtida, igual a $0,0044 \text{ g cm}^{-2} \text{min}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$, foi a que apresentou o menor valor dentre todos os agrupamentos que envolveram mais de uma equação, sendo este igual a 27,5% da erodibilidade do agrupamento das equações 1 e 3 e 13,0% da erodibilidade do agrupamento das equações 2 e 4, mostrando, portanto, uma grande discrepância em relação aos demais agrupamentos. Embora o valor de erodibilidade tenha sido bem inferior aos demais agrupamentos, este foi ainda bem superior aos obtidos por Griebeler et al. (2005) e Koetz et al. (2009), que encontraram valores de erodibilidade em estradas não pavimentadas para um Latossolo Vermelho Amarelo no horizonte B, de $0,001 \text{ g cm}^{-2} \text{ min}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$ e $0,00072 \text{ g cm}^{-2} \text{ min}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$, respectivamente. Já Oliveira et al. (2009), encontraram valores de erodibilidade em solos de estradas não pavimentadas de textura franco argilosa de $0,05 \text{ g cm}^{-2} \text{ min}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$, sendo mais alta pelo maior porcentagem de areia e silte presente neste solo.

Com relação à tensão crítica de cisalhamento, o valor obtido para este agrupamento foi intermediário entre os obtidos para os agrupamentos dos testes 1 e 3 e dos testes 2 e 4, sendo obtido um valor de 7,3 Pa. Este valor apresenta uma magnitude próxima a do valor obtido por Griebeler et al. (2005b), que obteve um valor de tensão crítica de cisalhamento de 7,5 Pa para um solo com características similares ao estudado. Já Koetz (2009) obteve um valor de 6,5 Pa para um Latossolo Vermelho Amarelo de textura argilosa, valor que ainda pode ser considerado neste estudo.

Com base no fato de que este agrupamento foi o que apresentou o maior número de equações e uma maior compatibilidade com os valores encontrados por outros pesquisadores, considerou-se os valores de erodibilidade e de tensão crítica de cisalhamento como os mais representativos para o solo estudado. Com base neste fato e na variabilidade dos valores de erodibilidade obtidos para este agrupamento foi estimado o intervalo de confiança associado à erodibilidade com 95% de confiança, o qual foi de 0,0035 a 0,0053g cm⁻² min⁻¹ Pa⁻¹.

4.2 Erodibilidade e tensão crítica de cisalhamento do horizonte C

Na Figura 20 são apresentadas as perdas de solo acumulada associadas às tensões aplicadas nos 10 testes realizados, sendo nesta também evidenciada, assim como para o horizonte B, uma grande variação das perdas de solo acumuladas para tensões cisalhantes equivalentes nos diversos testes realizados.

Na Tabela 6 são apresentadas as equações ajustadas para a perda de solo em função da tensão cisalhante, bem como os coeficientes de determinação relativos a cada equação e os valores de erodibilidade e da tensão crítica de cisalhamento correspondente a cada teste. Na Tabela 2C do Apêndice C são apresentados os dados das perdas de solo acumuladas associadas às tensões de cisalhamento aplicadas em cada um dos testes realizados.

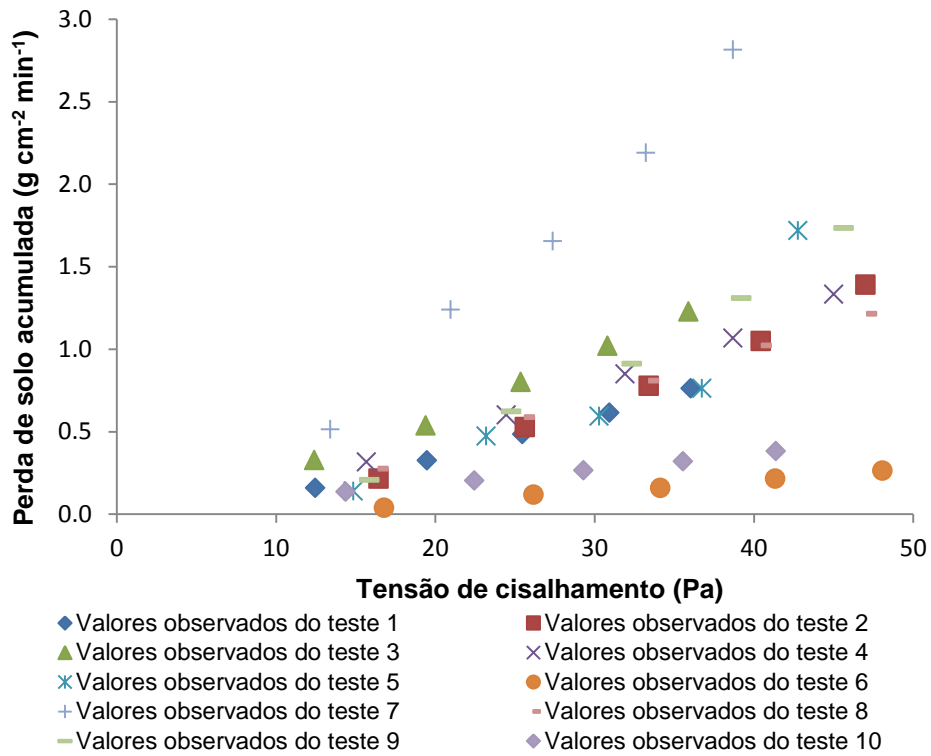


Figura 20 - Perdas de solo acumuladas associadas às tensões cisalhantes aplicadas nos 10 testes realizados no horizonte C.

Tabela 6 - Equações ajustadas para os 10 testes realizados no horizonte C

Teste	Equação ajustada	r^2	K ($\text{g cm}^{-2} \text{ min}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$)	T_c (Pa)
T1	$\widehat{P}_{S_1} = -0,164 + 0,0255\tau$	0,999	0,0255	6,46
T2	$\widehat{P}_{S_2} = -0,435 + 0,0376\tau$	0,991	0,0376	11,55
T3	$\widehat{P}_{S_3} = -0,183 + 0,0390\tau$	0,996	0,0390	4,70
T4	$\widehat{P}_{S_4} = -0,232 + 0,0342 \tau$	0,998	0,0342	6,79
T5	$\widehat{P}_{S_5} = -0,702 + 0,0487 \tau$	0,810	0,0487	14,42
T6	$\widehat{P}_{S_6} = -0,076 + 0,0070 \tau$	0,995	0,0070	10,76
T7	$\widehat{P}_{S_7} = -0,675 + 0,0882 \tau$	0,993	0,0882	7,65
T8	$\widehat{P}_{S_8} = -0,210 + 0,0304 \tau$	0,999	0,0304	6,92
T9	$\widehat{P}_{S_9} = -0,630 + 0,0503 \tau$	0,990	0,0503	12,53
T10	$\widehat{P}_{S_{10}} = 0,0005 + 0,0091 \tau$	0,999	0,0091	-0,06

Conforme se evidencia na Tabela 6 há uma grande variação dos valores de erodibilidade (K), que oscilam de 0,0070 a 0,0882 g cm⁻² min⁻¹ Pa⁻¹, sendo o maior valor de erodibilidade, portanto, 12,6 vezes superior ao menor valor. Esta variabilidade foi evidenciada também para a tensão cisalhante, sendo obtido até um valor negativo para esta variável (teste 10), o que não apresenta explicação física. O valor máximo obtido para a tensão crítica de cisalhamento foi de 14,42 (teste 5).

O coeficiente de determinação obtido para as diferentes equações ajustadas permite evidenciar que, em nove dos 10 testes, 99% da variação total está sendo explicada pela regressão. Apenas no teste 5 o coeficiente de determinação foi menor que 0,99, sendo, neste teste, o valor de r² igual a 0,810.

O teste de identidade de modelos foi aplicado às 10 equações obtidas e permitiu identificar o agrupamento das equações em cinco grupos distintos, apresentados na Tabela 7, assim como as equações comuns, determinadas pelo teste de identidade de modelos. O Apêndice E (Tabela 1 e 2E) apresenta a análise de variância destes agrupamentos de equações.

Tabela 7 - Agrupamento das equações identificadas pelo teste de identidade de modelos no horizonte C

Agrupamento	Testes	Equação ajustada	r ²	K (g cm ⁻² min ⁻¹ Pa ⁻¹)	τ _c (Pa)
1	7	$\widehat{P}_{scomum} = - 0,675 + 0,088\tau$	0,993	0,0882	7,65
2	9	$\widehat{P}_{scomum} = - 0,630 + 0,050\tau$	0,989	0,0503	12,53
3	10	$\widehat{P}_{scomum} = - 0,0005 + 0,009\tau$	0,998	0,0091	-0,06
4	6	$\widehat{P}_{scomum} = - 0,076 + 0,007\tau$	0,995	0,0070	10,76
5	1,2,3,4,5,8	$\widehat{P}_{scomum} = - 0,288 + 0,035\tau$	0,837	0,0347	8,16

Na Figura 21 é apresentada a linha de tendência correspondente ao primeiro agrupamento obtido, e correspondente ao teste 7.

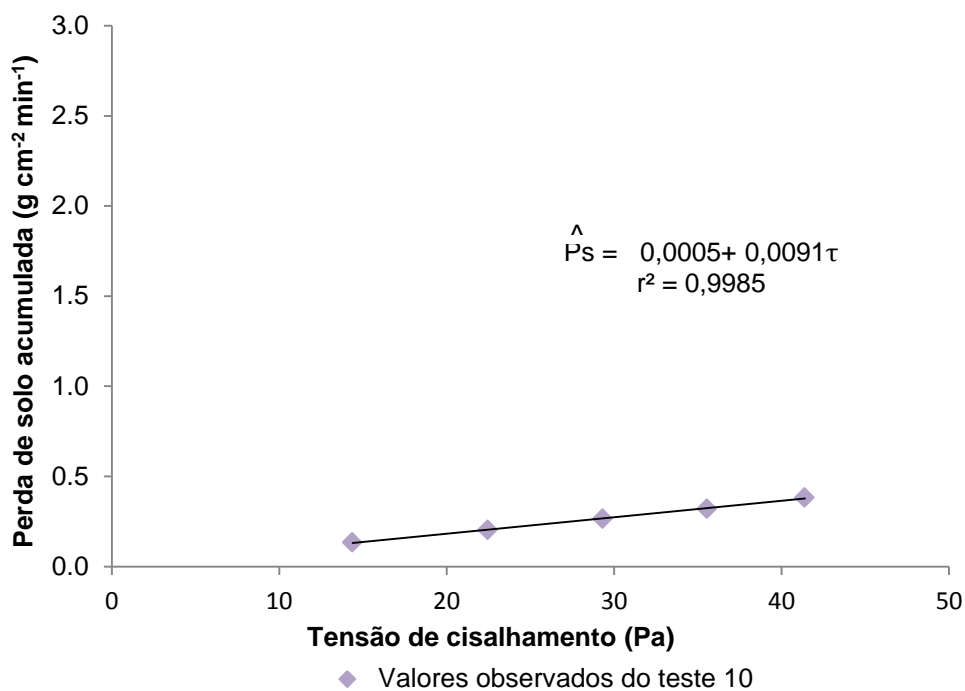


Figura 21 - Agrupamento do teste 7 identificado pelo teste de identidade de modelos e linha de tendência correspondente a este agrupamento.

A linha de tendência ajustada para o teste 7 caracterizou um valor de erodibilidade de $0,0882 \text{ g cm}^{-2} \text{ min}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$ e uma tensão crítica de cisalhamento de $7,65 \text{ Pa}$, sendo este o maior valor de erodibilidade de entre os cinco agrupamentos, e 1,75 vezes maior ao do agrupamento com o segundo maior valor de erodibilidade, 9,69 vezes superior ao terceiro, 12,6 vezes ao quarto e 2,54 vezes ao quinto agrupamento.

O valor da tensão crítica de cisalhamento obtido neste agrupamento, de $7,65 \text{ Pa}$, corresponde ao segundo valor mais baixo obtido entre os diferentes agrupamentos, uma vez que o valor mais baixo de tensão crítica de cisalhamento foi um valor negativo.

Nas Figuras 22, 23 e 24 são apresentadas as linhas de tendência ajustadas para o segundo, terceiro e quarto agrupamento, respectivamente. Todos, assim como o primeiro agrupamento, correspondentes a apenas um teste e que apresenta valores de erodibilidade e de tensão crítica de cisalhamento com grandes variações entre si, e em relação aos valores evidenciados nos agrupamentos 1 e 5, como evidenciados na Tabela 7.

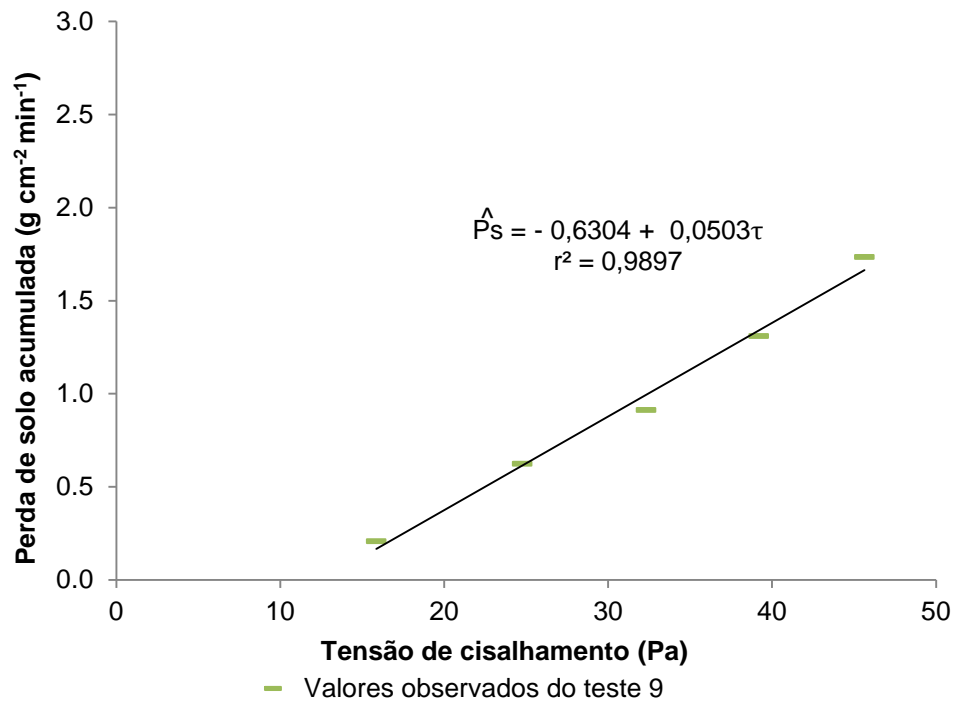


Figura 22 - Agrupamento do teste 9 identificado pelo teste de identidade de modelos e linha de tendência correspondente a este agrupamento.

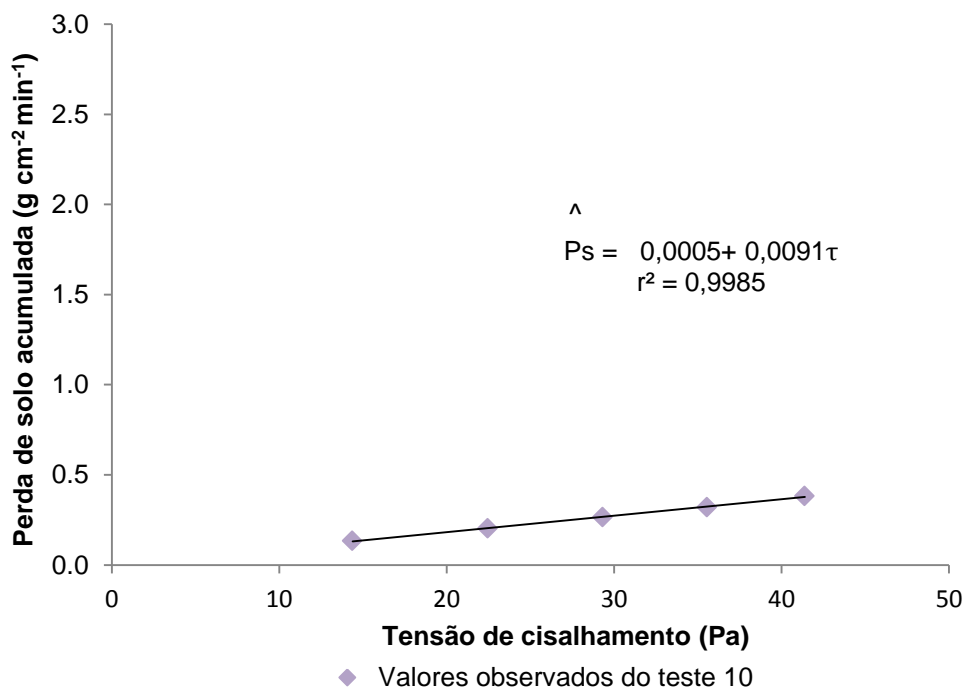


Figura 23 - Agrupamento do teste 10 identificado pelo teste de identidade de modelos e linha de tendência correspondente a este agrupamento.

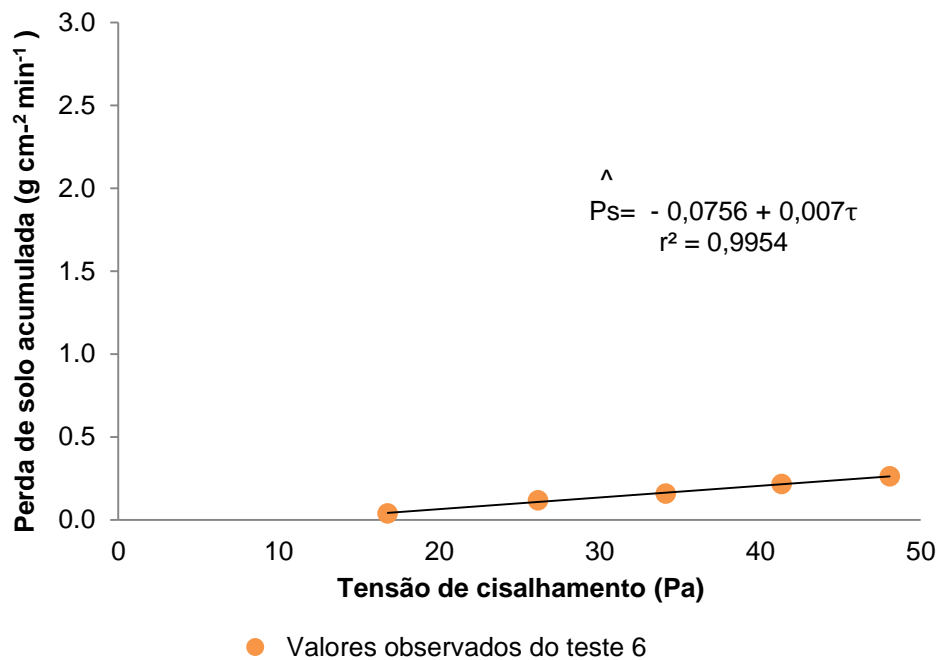


Figura 24 - Agrupamento do teste 6 identificado pelo teste de identidade de modelos e linha de tendência correspondente a este agrupamento.

Na Figura 25 é apresentada a linha de tendência para o quinto agrupamento. O modelo ajustado para este agrupamento apresentou valores de erodibilidade de $0,0347 \text{ g cm}^{-2} \text{ min}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$ e de tensão crítica de cisalhamento de $8,16 \text{ Pa}$. Este agrupamento, dado pelos testes 1, 2, 3, 4, 5 e 8, foi o que permitiu, portanto, o ajuste do maior número de equações. O coeficiente de determinação obtido para este agrupamento permitiu evidenciar que $83,78\%$ da variação das perdas de solo é explicada pela variação da tensão cisalhante.

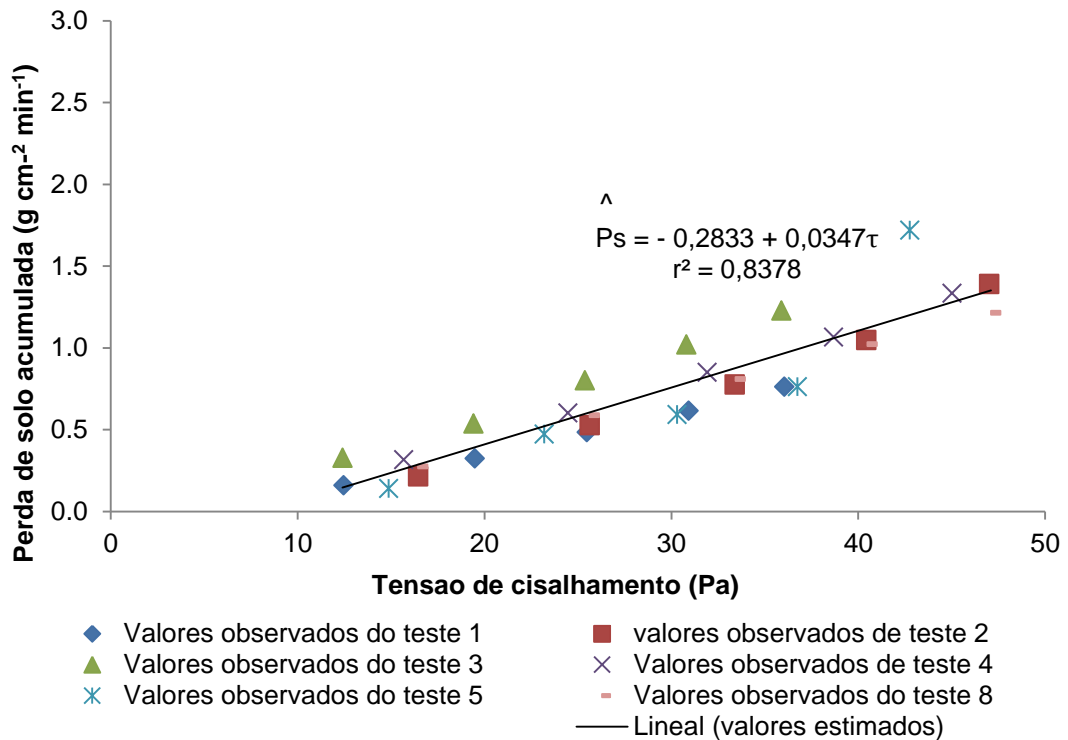


Figura 25 - Agrupamento dos testes 1, 2, 3, 4, 5, 8, identificado pelo teste de identidade de modelos e linha de tendência correspondente a este agrupamento.

O valor obtido é inferior ao obtido por Oliveira et al. (2009), que determinaram uma erodibilidade de $0,0582 \text{ g cm}^{-2} \text{ min}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$ para solos de textura franco argilosas, porém muito mais alto que o obtido por Koetz et al. (2009) em experimento realizado no horizonte C de um Latossolo Vermelho Amarelo e de textura franco argilo-arenoso, que obtiveram um valor médio de $0,00831 \text{ g cm}^{-2} \text{ min}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$, sendo este sete vezes inferior ao obtido neste estudo. Não entanto, é importante destacar a grande variabilidade entre repetições apresentada no estudo desenvolvido por Koetz et al. (2009) o que explica uma erodibilidade menor quando comparada com os valores obtidos por Oliveira et al. (2009), sendo que solos de textura arenosa tendam a ser mais suscetíveis à erosão. O alto valor de erodibilidade obtido neste horizonte pode ser atribuído à alta porcentagem de areia e de silte e, por conseguinte, à baixa coesão das partículas, sendo mais suscetível ao desprendimento.

Com relação à tensão crítica de cisalhamento o valor apresentou-se alto quando comparado, tanto com os valores obtidos por Oliveira et al. (2009) como os obtidos por Koetz (2009), que obtiveram tensões críticas de cisalhamento de 3,93 e 3,0 Pa respectivamente.

Com base no fato de que este agrupamento foi o que apresentou o maior número de equações, considerou-se os valores de erodibilidade e de tensão crítica de cisalhamento como os mais representativos para o solo estudado. Com base neste fato e na variabilidade dos valores de erodibilidade obtidos para este agrupamento foi estimado o intervalo de confiança associado à erodibilidade com 95% de confiança, o qual foi de 0,0288 e 0,0406 g cm⁻² min⁻¹ Pa⁻¹.

4.3 Comparação dos valores de erodibilidade e tensão crítica de cisalhamento determinados para os horizontes B e C

Na Figura 26 são apresentadas as retas ajustadas para os horizontes B e C e as suas respectivas equações de ajuste. Como evidenciado nesta figura, existe uma grande diferença dos valores de erodibilidade obtidos em cada horizonte, sendo a erodibilidade do horizonte C ($K= 0,0347 \text{ g cm}^{-2} \text{ min}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$) 7,87 vezes superior ao valor obtido para o horizonte B ($K= 0,0044 \text{ g cm}^{-2} \text{ min}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$). Uma justificativa para este comportamento está associada à textura do solo, uma vez que o horizonte C apresenta uma textura franco argilosa, com maior conteúdo de silte + areia (65%) que a existente no horizonte B (34%), que apresenta uma textura argilosa. Como a fração argila é a principal responsável pela resistência do solo ao cisalhamento, conseqüentemente, o horizonte B, mais argiloso, apresenta uma menor erodibilidade que o horizonte C.

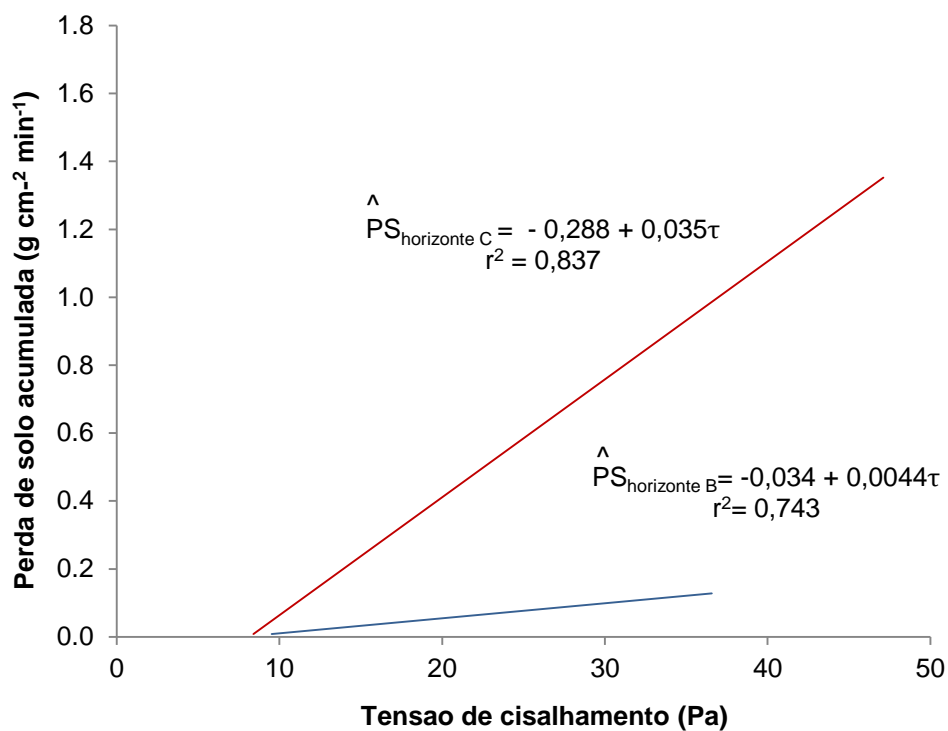


Figura 26 - Comparação das equações lineares ajustadas para os horizontes B e C de um Latossolo Vermelho Amarelo.

Quanto à tensão crítica de cisalhamento as diferenças evidenciadas entre os dois horizontes não foram expressivas, sendo inclusive a tensão associada ao horizonte B (7,61 Pa) ligeiramente inferior à do horizonte C (8,16 Pa).

5. CONCLUSÕES

- O valor de erodibilidade determinado para o horizonte B foi de $0,0044 \text{ g cm}^{-2} \text{ min}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$, sendo a ele associado um intervalo de confiança com 95 % de probabilidade de $0,0035$ a $0,0053 \text{ g cm}^{-2} \text{ min}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$. A tensão crítica de cisalhamento determinada para este horizonte foi de $7,61 \text{ Pa}$.
- O valor de erodibilidade determinado para o horizonte C foi $0,0347 \text{ g cm}^{-2} \text{ min}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$, sendo a ele associado um intervalo de confiança com 95 % de probabilidade de $0,0288$ a $0,0406 \text{ g cm}^{-2} \text{ min}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$. A tensão crítica de cisalhamento determinada para este horizonte foi de $8,16 \text{ Pa}$.
- O índice de erodibilidade apresenta grande variabilidade entre horizontes, refletindo valores maiores, no solo com porcentagens mais altos de areia e silte. Enquanto, a tensão crítica de cisalhamento apresenta pouca variabilidade entre horizontes.
- O teste de identidade de modelos permitiu obter valores únicos de erodibilidade e tensão crítica de cisalhamento com um nível de significância de 1%.

6. BIBLIOGRAFIA

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Solo: análise granulométrica**. NBR 7181/84. Rio de Janeiro, 1984. 13 p.
- BASTOS, C. A. B. **Estudo geotécnico sobre a erodibilidade de solos residuais não saturados**. 1999. 336 p. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS.
- BASTOS, C. A.; GEHLING W. Y.; MILITITSKY J. Estudo sobre a erodibilidade de solos residuais não saturados a partir de propriedades geomecânicas. **Teoria e Prática na Engenharia Civil**. v. 2., p. 9-18. 2001.
- BENNETT, S. J.; CASALI. J.; ROBINSON, K. M.; KADAVY. K. C. Characteristics of actively eroding ephemeral gullies in an experimental channel. **Transactions of the ASAE**. v.43, p. 461-449. 2000.
- CAO, L.; ZHANG. K.; ZHANG. W. Detachment of road surface soil by flowing water. **Catena**. v. 76, p. 155 -162. 2009.
- CHARONKO, C.; WYNN, T. evaluation of an in situ measurement technique for streambank critical shear stress and soil erodibility. 2nd Joint Federal Interagency Conference. Las Vegas, NV. 8 p. 2010. disponível em : http://acwi.gov/sos/pubs/2ndJFIC/Contents/SP14_Charonko_03_01_10_paper.pdf
- CHOW, V. T. **Open channel hydraulics**.USA: McGraw- Hill. 1986. 680p.
- COOTE, D. R.; McGOVERN, M. C.; WALL, G. J.; DICKINSON, W. T.; RUDRA, R.P. Seasonal variations of erodibility indices based on shear

- strength and aggregate stability in some Ontario soils. **Canadian Journal of soil Science**. v. 68, p. 405-416, 1988.
- CORRÊA, C. M. C.; CRUZ, J. Erosão real e estimada através de RUSLE em estradas florestais, em relevo ondulado a fortemente ondulado : **Revista Árvore**. v. 34, n. 4, p. 587 – 595, 2010.
- CORRÊA, C. M. C.; MALINOVSKI. J. R.; ROLOFF. G. Bases para planejamento de rede viária em reflorestamento no sul do Brasil. **Floresta**, v. 36, n. 2, p. 277-286. 2006.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTE- DNIT. **Plano Nacional de Viação** 2012. Disponível em: <<http://www.dnit.gov.br/plano-nacional-de-viacao/snv-versao-para-impressao-pdf>>. Acesso em: 10 de março de 2012.
- DISSMEYER,G.E.; FOSTER, G. R. **A guide for predicting sheet and rill erosion on forest land**. Asheville Southeastern Forest Experiment Station and Southeastern Area, State & Private Forestry Atlanta, 1980. (Technical Publication SA-TP-11).
- DUBÉ, K.; MEGAHAN, W.; MCCALMON, M. **Washington Road Surface Erosion Model (WARSEM) Manual**. Department of Natural Resources, State of Washington. 2004. Disponível em: <http://www.dnr.wa.gov/Publications/fp_data_warsem_manual.pdf>. Acesso em: 12 fevereiro de 2012.
- DUBÉ, K.; SHELLY, A.; BLACK, J.; KUZIS, K. Washington Road Sub-Basin Scale Effectiveness Monitoring First Sampling Event (2006-2008) Report. Department of Natural Resources, State of Washington. 2010. Disponível em <http://www.dnr.wa.gov/publications/fp_cmer_08_801.pdf> Acesso em: 12 fevereiro de 2012.
- DUIKER, S. W.; FLANAGAN, D. C.; LAL, R. Erodibility and infiltration characteristics of five major soils of southwest Spain. **Catena**. v. 45, p. 103-121, 2001.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solo. **Manual de método e análise de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro, 1997. 212 p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Banco de Monitoramento por satellite. Banco de dados climáticos do**

- Brasi/Resultados 2003.** Disponível em: <<http://www.bdclima.cnpm.embrapa.br/resultados/index.php>>. Acesso em: 12 outubro 2011.
- FERREIRA, M. M.; FERNANDES, B.; CURI, N. Influência da mineralogia da fração argila nas propriedades físicas de Latossolos da Região Sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do solo.** v. 23, p. 215 - 224, 1999.
- FOLTZ, R. B.; COPELAND, N. S.; ELLIOT, W. J. Reopening abandoned forest roads in Northern Idaho, USA: Quantification of runoff, sediment concentration, infiltration, and interrill erosion parameters. **Journal environmental Management.** v. 90, p. 2542 -2550, 2009.
- FOLTZ, R. B.; RHEE, H.; ELLIOT, W. J. Modeling changes in rill erodibility and critical shear stress on native surface roads. **Hydrological Processes.** v. 22, p. 4783 - 4788, 2008.
- FU, B.; NEWHAM, L. T.; RAMOS, F. E. A review of surface erosion and sediment delivery models for unsealed roads. **Environmental Modelling & Software.** v. 25, p. 1-14, 2010.
- GEVES, G. W.; LEYS, J. F.; MCTAINSH, G. H. Soil erodibility In: Charman, P.E.V., Murphy, B. W. (Eds.), **Soils: their properties and Management.** New York: Oxford University Press, 2000, p 205-220.
- GOVERS, G.; EVERAERT, W.; POESEN, J.; RAUWS, G.; De PLOEY, J.; LAUTRIDOU, J. P. A long-flume study of the dynamic factors affecting the resistance of a loamy soil to concentrated flow erosion. **Earth Surface Processes and Landforms.** v. 15, p. 313-328, 1990.
- GRAYSON, R. B.; HAYDON, S. R.; JAYASURIYA, M. D. A.; FINLAYSON, B. L. Water quality in the mountain ash forest: separating the impacts of roads from those of logging operations. **Journal of Hydrology.** v. 150, p. 459-480, 1993.
- GRIEBELER N. P. **Modelo para o dimensionamento de redes de drenagem e de bacias de acumulação de água em estradas não pavimentadas.** Viçosa, MG. UFV, 2002. 121p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Viçosa, 2002.
- GRIEBELER, N. P.; PRUSKI, F. F.; SILVA, J. M. A.; RAMOS, M. M.; SILVA, D. D. Modelo para a determinação do espaçamento entre

- desaguadouros em estradas não pavimentadas. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**. v. 29, p. 397- 405, 2005a.
- GRIEBELER, N. P.; PRUSKI, F. F.; SILVA, J. M. A.; RAMOS, M. M.; SILVA, D. D. Equipamento para a determinação des 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, 2005b.
- HANSON, G. J.; SIMON, A. Erodibility of cohesive streambeds in the loess area of the Midwestern USA. **Hydrological Processes**. v. 15, n.1, p. 23 - 38, 2001.
- INDERBITZEN, A. L. An erosion tests for soils. **Material Reseach and Standarts**. v. 1, n.7, p. 553-554, 1961.
- KETCHESON, G. L.; MEGAHAN, W. F.; KING, J. G. “R1 –R4” and “Boised” sediment prediction model tests using forest roads in granitics. **Journal of the Americam Water Resources Association**. v.35, n.1, p.83-98, 1999.
- KNAPEN, A.; POESEN, J.; GOVERS, G.; GYASSELS, G.; NACHTERGAELE, J. Resistance of soils to concentrated flow erosion: A review. **Earth Science Reviews**. v. 80, p. 75-109, 2007.
- KNAPEN, A.; POESEN J. Soil erosion resistance effects on rill and gully initiation points and dimensions. **Earth surface Processes and Landforms**. v. 35, p. 217-228, 2010.
- KOETZ M.: PRUSKI, F.; MEHL, H. U.; DA SILVA, D.; MARQUES, E. A. Métodos para determinação da erodibilidade e da tensão crítica de cisalhamento em solos de estradas não pavimentadas. **Revista Engenharia na Agricultura**. v. 17, n. 2, P. 110-119, 2009.
- LAFLEN, J. M.; ELLIOT, W. J.; SIMANTON, J. R, HOLZHEY, C. S, KOHL, K. D. WEPP: Soil erodibility experiments for rangeland and cropland soils. **Journal of Soil and Water Conservation**. v. 46, n. 1, p. 39-44, 1991.
- LAL, R. **Soil erosion research methods**. Florida, 2 ed, 1994.340p.
- LEONAL, J.; RICHARD, G. Estimation of runoff critical shear stress for soil erosion from soil shear strength. **Catena**. v. 57, pag 233-249, 2004.

- LINE, D.; MEYER, L. D. Evaluating interrill and rill erodibilities for soils of different textures. **Transactions of the ASAE**. v. 32, n.6, p. 1995-1999, 1989.
- LUGO, A. E.; GUCINSKI, L. H. Function, effects, and management of forest roads. **Forest Ecology and Management**. v. 133, p. 249 - 262, 2000.
- LYLE, W. M.; SMERDON, E.T. Relation of compaction and other soil properties to erosion resistance of soils. **Trans. ASAE**. V.8, n.3, p. 419-422, 1965.
- MACEDO R. S.; TEIXEIRA, W.; ENCINAS, O. C.; SOUZA. A. C, MARTINS, G. C, ROSS, L. M. Determinação do fator erodibilidade de diferentes classes de solo do estado do Amazonas (métodos indiretos) e de um Cambissolo Háplico (método direto) na Província Petrolífera de Urucu, Coari - AM. In: III Reunião Científica da Rede CTPetro Amazônia. Manaus, 2010.
- MACHADO, C. C.; GARCIA, A. R.; SILVA, E.; FONTES, A. M. Comparação de taxas de erosão em estradas florestais estimadas pelo modelo WEPP (Water Erosion Prediction Project) modificado em relação a medições experimentais. **Revista Árvore**. v 27, p. 295 - 303, 2003a.
- MACHADO, C. C.; PEREIRA, R.S.; SANT'ANNA, G. L. Estradas florestais: o fator determinante do transporte rodoviário florestal. **Revista da Madeira**. n. 73. 2003b. Disponível em: <<http://www.remade.com.br>>. Acesso em: 31 de janeiro de 2012.
- MACIEL, C.B; GRANDO, A; MACCARIN, M; KOBAYAMA, M.; HIGASHI, R. A. Caracterização de solos utilizados em estradas não pavimentadas: Avaliação de solos melhorados com vista na redução de processos erosivos in: XVII SIMPOSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 2009. Campo Grande, MS. **Resumos**. Campo Grande, Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2009.
- MARQUES, J. J.; CURI, N.; LIMA, J. M.; FERREIRA, M. M.; SILVA, M. L.; FERREIRA, D. F. Estimativa da erodibilidade a partir de atributos de solo com horizonte b textural no Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 21, p. 457 - 465, 1997.

- MENEZE, M. B. M.; PEJON, O. J. Análise da influência do teor de umidade na absorção d'água e sucção dos solos em estudos de erodibilidade **Geociências**, v. 29, n. 2, p. 211 - 228. 2010.
- MINELLA J.P.; MERTEG, H N.; REICHERT, J. M.; SANTOS, D. R. Identificação e implicações para a conservação do solo das fontes de sedimentos em bacias hidrográficas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, p.1637-1646, 2007.
- NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. **Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos**. São Paulo - SP : 1995. 240p.
- OLIVEIRA F. P.; SILVA, M. L; AVANZI, J. C.; CURI, N.; LEITE, F. P. Avaliação de perdas de solo em estradas florestais não pavimentadas no Vale do Rio Doce, Minas Gerais: **Scientia Forestalis**. v. 38, n. 87, p. 331 - 339, 2010.
- OLIVEIRA, J.F.; GRIEBELER, N. P.; CORRECHEL, V.; SILVA, V. C. Erodibilidade e tensão crítica de cisalhamento em solos de estradas não pavimentadas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v.13, p. 955-960, 2009.
- POTTER, K.N.; VELÁZQUEZ-GARCIA, J. J.; TORBERT. H. A. Use of a submerged jet device to determine channel erodibility coefficients of selected soils of México. **Journal Of Soil And Water Conservation**. v.57, n.5, p. 272-277, 2002.
- PRUSKI F. F. **Conservação de solo e água**: Controle da erosão em estradas não pavimentadas. 2 ed. Viçosa: editora UFV, 2009.
- RAMOS-SCHARRÓN, C. E.; MACDONALD, L. H. Measurement and prediction of sediment production from unpaved roads, St John, US Virgin Island. **Earth Surface Processes and Landforms**. v.30, p.1283 - 1304, 2005.
- RAMOS-SCHARRÓN, C. E.; MACDONALD, L. H. Measurement and prediction of natural and anthropogenic sediment sources, St John, US Virgin Island. **Catena**. v.71, p.250 - 266, 2007.
- REGAZZI, J. A. Teste para verificar a identidade de modelos de regressão e igualdade de parâmetros no caso de dados de delineamentos experimentais. **Revista Ceres**. v. 46. p. 383 - 409. 1999.

- RUIZ, H. **Métodos de análises físicas de solos: curso sol 640.**, 2004, p. 22. Notas de aula.
- RUMMER, B.; STOKES, B.; LOCKABY, G. Sedimentation associated with forest road surfacing in a bottomland hardwood ecosystem. **Forest Ecology And Management**. v. 90, p. 195 - 200, 2000.
- SÁ, M. A.; LIMA, J. M.; CURI, N.; MASSAROTO, J. A; SÁ, J. J.; MARQUES, M. Estimativa da erodibilidade pela degradação por ultra-som e atributos de solos com horizontes B. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**. v. 39. n.7, p. 691 - 699, 2004.
- SCHULTZ, K. M. Modeling road erosion in upper Torreon wash, New México. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**. v. 2203, p. 27-35, 2011.
- SEEGER, M.; FREVEL, C. Factores hídricos y erosionabilidad en el gradiente edafoclimático depresión del Ebro/ Pirineo central. **Cuadernos de Investigación Geográfica**. v. 25. p. 85-110, 1999.
- SHAINBERG, I., GOLDSTEIN, D.; LEVY, G. J. Rill erosion dependence on soil water content, aging, and temperature. **Soil Science Society of America journal**. v. 60. n. 3, p. 916 - 922, 1996.
- SHERIDAN, G. J.; SO, H. B.; LOCH, R. J.; POCKNEE, C; WALKER, C. M. Use of laboratory scale rill and interrill erodibility measurements for the prediction of hillslope scale erosion on rehabilitated coal mine soils and overburdens. **Australian Journal of Soil Research**. v. 38, p. 287-297, 2000a.
- SHERIDAN, G. J.; SO, H. B.; LOCH, R. J.; WALKER, C. M. Estimation of erosion model erodibility parameters from media properties. **Australian Journal of Soil Research**. v. 38, n. 2, p. 256-284, 2000b.
- SHERIDAN, G. J.; LANE, P. N.; SHERWIN, C. B. Using rainfall simulation and site measurements to predict annual interrill erodibility and phosphorus generations rates from unsealed forest roads: validation against in-situ erosion measurements. **Catena**. v. 73, p. 49 - 62, 2008.
- SILVA, M. L. N.; CURI, N.; FERREIRA, M. M.; DE LIMA, J. M.; FERREIRA, D. F. Proposição de modelos para estimativa da erodibilidade de

- Latossolos Brasileiros. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**. v. 34, p. 2287-2298, 1999.
- SILVA, M. L. N. **Erodibilidade e impacto das gotas de chuva simulada sobre a superfície de Latossolos do Cerrado**. Lavras, MG: UFLA, 1994. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Lavras, Escola Superior de Agricultura. 1994.
- SILVA M. L.; CURI, N.; LIMA, J. M.; FERREIRA, M. M. Avaliação de métodos indiretos de determinação da erodibilidade de latossolos brasileiros. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. v. 35, n. 6, p. 1207-1220, 2000.
- SOARES, J. M.; PINHEIRO, R. J. B.; TAVARES, I. S. **Notas de aula: Mecânica dos solos**. Universidade Federal de Santa Maria. Departamento de Transportes, 2006. Disponível em: <http://www.ufsm.br/engcivil/Material_Didactico/TPR1003_mecanica_do_s_solos/capa_sumario.pdf>. Acesso em: 10 out. 2010.
- VAN KLAVEREN, R. W.; McCOOL, D. K. Erodibility and critical shear of a previously frozen soil. **Transactionsof the ASAE**. v. 41, n. 5, p. 1315-1321. 1998.
- VEIGA, M. **Erodibilidade em Entressulcos e Algumas Propriedades Físicas, Químicas e Mineralógicas de Solos do Rio Grande do Sul, em Laboratório**. Porto Alegre, RS: UFRG, 1988. 116 p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1988.
- VIDAL, A. D. **Estradas vivinais: Abordagem pedologica, geotecnica, geométrica e de serventia de dois trechos rodoviaros não pavimentados no campo da UFV - MG**. Viçosa, MG: UFV, 2005. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Viçosa , 2005.
- WISCHMEIER, W. H.; JOHNSON, C.B.;CROSS, B.V. A soil erodibility nomograph for farmland and construction sites. **Journal of Soil and Water Conservation**. V.26, p. 189-193, 1971.
- ZHANG, Z.; LIU, S.; DONG, S.; FU, W.; CUI, B. spatio temporal analysis of different levels of road expansion on soil erosion distribution: a case study of Fengqing county, Southwest China. **Frontiers of Earth Science in china**. v. 3, n. 4, p. 389 - 396, 2009.

- ZIEGLER, A. D.; GIAMBELLUCA, T. W.; SUTHERLAND, R. A. Erosion prediction on unpaved mountain roads in northern Thailand: validation of dynamic erodibility modelling using KINEROS2. **Hydrological processes**. v. 15, p. 337-358, 2001.
- ZIEGLER, A. D.; SUTHERLAND, R. A. W, GIAMBELLUCA, T. Partitioning total erosion on paved roads into splash and hydraulic components: The roles of interstorm surface preparation and dynamic erodibility. **Water Resources Research**. v. 36, n. 9, p. 2787 - 2791, 2000.

APÊNDICES

APÊNDICE A

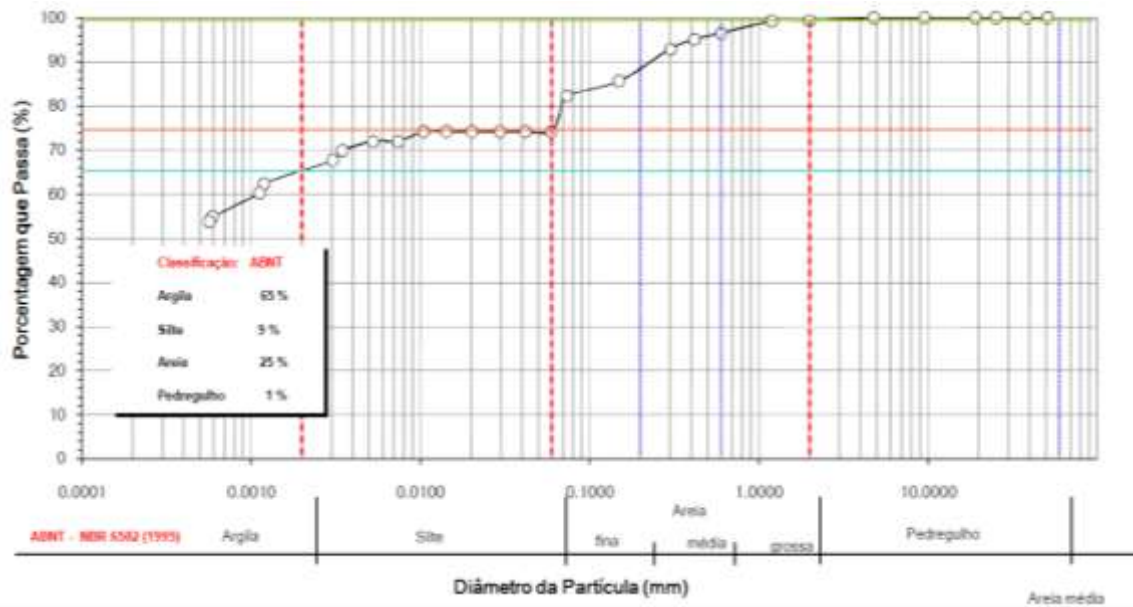


Figura 1A - Curva granulométrica do solo do horizonte B.

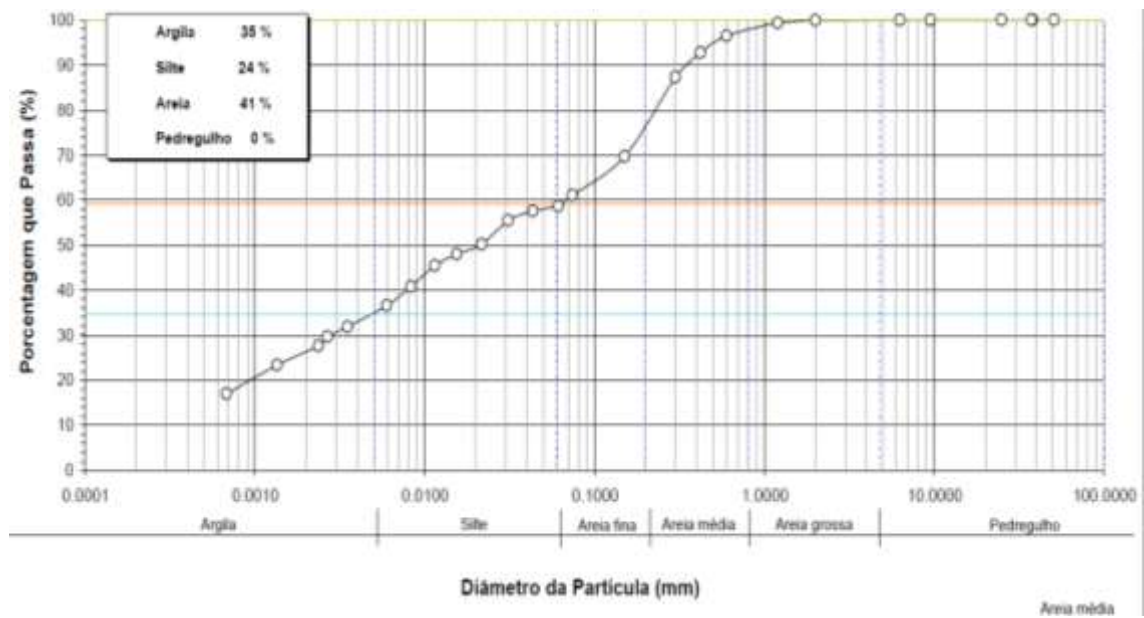


Figura 2A - Curva granulométrica do solo do horizonte C.

APÊNDICE B

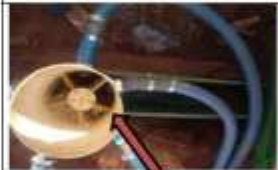
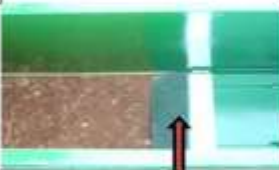

Calha Metálica			
	Lâmina cortante para cravar no chão foi retirada e utilizou-se uma espuma para vedar.	As aletas utilizadas para dissipar a energia foram retiradas.	Um tubo de PVC perfurado foi utilizado como dissipador de energia.
			
	O tubo de PVC inserido na calha permitia o direcionamento da vazão assim como a dissipação da energia.	Uma lâmina metálica foi instalada no tramo que conecta a água com os sedimentos, para evitar perdas e acumulação.	Um suporte metálico foi construído para suportar a caixa de nível para facilitar a instalação e permitir uma adequada nivelção
Sistema de armazenamento		Foram instalados registros de gaveta na parte inferior da caixa para facilitar o processo de peneiramento.	

Figura 1B – Descrição das modificações realizados no simulador de escoamento desenvolvido por Griebeler et al. (2005b).

APÊNDICE C

Tabela 1C - Perdas de solo obtidas nos 10 testes, para cada vazão e tensão de cisalhamento aplicada a ela associada, no horizonte B

Teste	Vazão aplicada (L s ⁻¹)	Tensão de cisalhamento (Pa)	Perda de solo para a vazão aplicada (g cm ⁻² min ⁻¹)	Perda de solo acumulada (g cm ⁻² min ⁻¹)
1	1,984	13,748	0,023	0,023
	3,967	21,588	0,079	0,102
	5,951	28,317	0,075	0,177
	7,935	34,470	0,218	0,396
	9,918	40,258	0,052	0,448
2	1,913	8,991	0,031	0,031
	3,825	14,197	0,261	0,292
	5,738	18,703	0,107	0,398
	7,651	22,848	0,160	0,558
	9,564	26,767	0,137	0,695
3	1,970	5,799	0,009	0,009
	3,939	9,243	0,005	0,014
	5,909	12,262	0,015	0,029
	7,878	15,067	0,059	0,088
	9,848	17,740	0,146	0,234
4	1,984	7,830	0,071	0,071
	3,967	12,411	0,168	0,239
	5,951	16,396	0,166	0,404
	7,935	20,077	0,067	0,472
	9,918	23,569	0,135	0,607
5	1,939	10,491	0,018	0,018
	3,878	16,532	0,051	0,069
	5,817	21,742	0,034	0,102
	7,756	26,526	0,012	0,114
	9,695	31,040	0,009	0,123

Continuação da Tabela 1C.

Teste	Vazão aplicada (L s ⁻¹)	Tensão de cisalhamento (Pa)	Perda de solo para a vazão aplicada (g cm ⁻² min ⁻¹)	Perda de solo acumulada (g cm ⁻² min ⁻¹)
5	1,939	10,491	0,018	0,018
	3,878	16,532	0,051	0,069
	5,817	21,742	0,034	0,102
	7,756	26,526	0,012	0,114
	9,695	31,040	0,009	0,123
6	1,913	9,785	0,006	0,006
	3,825	15,430	0,028	0,034
	5,738	20,304	0,008	0,042
	7,651	24,782	0,012	0,054
	9,564	29,010	0,009	0,063
7	1,972	12,247	0,022	0,022
	3,944	19,263	0,016	0,039
	5,916	25,297	0,006	0,045
	7,888	30,825	0,007	0,052
	9,860	36,033	0,009	0,060
8	1,922	12,034	0,019	0,019
	3,845	18,917	0,000	0,019
	5,767	24,833	0,008	0,027
	7,689	30,250	0,087	0,114
	9,611	35,350	0,008	0,122
9	1,937	9,226	0,005	0,005
	3,873	14,569	0,026	0,031
	5,810	19,191	0,040	0,071
	7,746	23,444	0,014	0,085
	9,683	27,465	0,011	0,096
10	1,984	12,726	0,008	0,008
	3,967	20,007	0,048	0,056
	5,951	26,266	0,015	0,071
	7,935	31,997	0,019	0,090
	9,918	37,395	0,025	0,114

Tabela 2C - Perdas de solo obtidas nos 10 testes, para cada vazão e tensão de cisalhamento aplicada a ela associada, no horizonte C

Teste	Vazão aplicada (L s ⁻¹)	Tensão de cisalhamento (Pa)	Perda de solo para a vazão aplicada (g cm ⁻² min ⁻¹)	Perda de solo acumulada (g cm ⁻² min ⁻¹)
1	1,631	12,457	0,1593	0,1593
	3,262	19,483	0,1654	0,3247
	4,893	25,476	0,1590	0,4837
	6,523	30,928	0,1312	0,6149
	8,154	36,038	0,1464	0,7613
2	1,589	16,448	0,2143	0,2143
	3,178	25,622	0,3132	0,5275
	4,767	33,396	0,2492	0,7766
	6,356	40,438	0,2719	1,0485
	7,946	47,009	0,3421	1,3906
3	1,632	12,405	0,3275	0,3275
	3,265	19,403	0,2090	0,5364
	4,897	25,372	0,2648	0,8013
	6,530	30,805	0,2188	1,0200
	8,162	35,896	0,2069	1,2270
4	1,654	15,681	0,3160	0,3160
	3,307	24,461	0,2850	0,6010
	4,961	31,921	0,2487	0,8497
	6,615	38,690	0,2164	1,0661
	8,269	45,017	0,2672	1,3333
5	1,657	14,864	0,1399	0,1399
	3,314	23,206	0,3332	0,4731
	4,971	30,299	0,1195	0,5926
	6,628	36,740	0,1701	0,7626
	8,285	42,765	0,9560	1,7186
6	1,657	16,783	0,0383	0,0383
	3,314	26,161	0,0793	0,1176
	4,971	34,120	0,0408	0,1583
	6,628	41,333	0,0566	0,2150
	8,285	48,071	0,0475	0,2625

Continuação da Tabela 2C.

Teste	Vazão aplicada (L s ⁻¹)	Tensão de cisalhamento (Pa)	Perda de solo para a vazão aplicada (g cm ⁻² min ⁻¹)	Perda de solo acumulada (g cm ⁻² min ⁻¹)
7	1,632	13,413	0,5136	0,5136
	3,265	20,959	0,7262	1,2397
	4,897	27,385	0,4157	1,6554
	6,530	33,226	0,5345	2,1899
	8,162	38,696	0,6256	2,8155
8	1,646	16,443	0,2756	0,2756
	3,291	25,634	0,3118	0,5874
	4,937	33,434	0,2210	0,8084
	6,582	40,504	0,2140	1,0224
	8,228	47,109	0,1922	1,2146
9	1,713	15,863	0,2065	0,2065
	3,425	24,764	0,4164	0,6229
	5,138	32,335	0,2890	0,9118
	6,850	39,208	0,3976	1,3095
	8,563	45,639	0,4250	1,7344
10	1,641	14,377	0,1343	0,1343
	3,281	22,449	0,0688	0,2031
	4,922	29,314	0,0625	0,2657
	6,563	35,550	0,0543	0,3200
	8,203	41,383	0,0621	0,3821

APÊNDICE D

Tabela 1D - Análise de variância do teste de identidade de modelos aplicado às 10 equações obtidas para o horizonte B

Fontes de Variação	Graus de liberdade	Soma de quadrados	Quadrado médio	F
Parâmetros(β)	20	2,438		
Parâmetros(θ)	2	1,124		
Redução (H ₀)	18	1,313	0,073	
Resíduo da regressão	30	0,026	0,001	73,00**
Total	50	2,464		

(**) Significativo ao nível de 1% de probabilidade

Tabela 2D - Análise de variância do teste de identidade de modelos aplicado ao agrupamento 1 para o horizonte B

Fontes de Variação	Graus de liberdade	Soma de quadrados	Quadrado médio	F
Parâmetros (β)	4	1,851		
Parâmetros (θ)	2	1,845		
Redução (H ₀)	2	0,006	0,003	
Resíduo da regressão	6	0,005	0,001	3,00 ^{NS}
Total	10	1,856		

(^{NS}) Não significativo ao nível de 1% de probabilidade

Tabela 3D - Análise de variância do teste de identidade de modelos aplicado ao agrupamento 2 para o horizonte B

Fontes de Variação	Graus de liberdade	Soma de quadrados	Soma de quadrados	F
Parâmetros (β)	4	0,446		
Parâmetros (θ)	2	0,430		
Redução (H_0)	2	0,016		
Resíduo da regressão	6	0,018	0,008 0,003	2,667 ^{NS}
Total	10	0,464		

(^{NS}) Não significativo ao nível de 1% de probabilidade

Tabela 4D - Análise de variância do teste de identidade de modelos aplicado ao agrupamento 4 para o horizonte B

Fontes de Variação	Graus de liberdade	Soma de quadrados	Soma de quadrados	F
Parâmetros (β)	10	0,131		
Parâmetros (θ)	2	0,124		
Redução (H_0)	8	0,007		
Resíduo da regressão	15	0,003	0,00087 0,00023	3,782 ^{NS}
Total	25	0,134		

(^{NS}) Não significativo ao nível de 1% de probabilidade

APÊNDICE E

Tabela 1E - Análise de variância do teste de identidade de modelos aplicado para as 10 equações do horizonte C

Fontes de Variação	Graus de liberdade	Soma de quadrados	Soma de quadrados	F
Parâmetros (β)	20	44,153		
Parâmetros (θ)	2	32,710		
Redução (H0)	18	11,443	0,635	
Resíduo da regressão	30	0,317	0,0105	60,476**
Total	50	44,47		

(**) Significativo ao nível de 1% de probabilidade

Tabela 2E - Análise de variância do teste de identidade de modelos aplicado ao agrupamento 5 para o horizonte C

Fontes de Variação	Graus de liberdade	Soma de quadrados	Soma de quadrados	F
Parâmetros (β)	12	20,407		
Parâmetros (θ)	2	19,943		
Redução (H0)	10	0,464	0,046	
Resíduo da regressão	18	0,280	0,016	2,87 ^{NS}
Total	30	20,687		

(^{NS}) Não significativo ao nível de 1% de probabilidade