

MARCIO KOETZ

**MÉTODOS PARA A DETERMINAÇÃO DA ERODIBILIDADE E DA
TENSÃO CRÍTICA DE CISALHAMENTO DO SOLO EM
ESTRADAS NÃO PAVIMENTADAS**

Tese 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
2003

MARCIO KOETZ

**MÉTODOS PARA A DETERMINAÇÃO DA ERODIBILIDADE E DA
TENSÃO CRÍTICA DE CISALHAMENTO DO SOLO EM ESTRADAS NÃO
PAVIMENTADAS**

Tese 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: 27 de fevereiro de 2003

Prof. Demetrius David da Silva
(Conselheiro)

Prof. Eduardo Antônio G. Marques
(Conselheiro)

Prof. Cláudio Henrique de C. Silva

Prof. Edvaldo Fialho dos Reis

Prof. Fernando Falco Pruski
(Orientador)

Dedico este trabalho

A Deus.

A meus pais, Almiro Arlindo Koetz e Inoilsa Gross Koetz.

Aos meus irmãos Gilberto Koetz e Simone Koetz.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela vida e por mais esta oportunidade.

À minha Família, que sempre esteve ao meu lado.

À Agda, pelo carinho e compreensão em todos os momentos.

À Universidade Federal de Viçosa e ao Departamento de Engenharia Agrícola, pela oportunidade de realizar este curso.

Ao professor Fernando Falco Pruski pela orientação valiosa, pelo incentivo, pela amizade, confiança e dedicação demonstrados ao longo da condução deste trabalho.

Aos professores Demetrius David da Silva e Eduardo Antônio Gomes Marques pelas sugestões e críticas oportunas durante a realização desta pesquisa, pela amizade e pelo imenso apoio nos momentos mais difíceis deste trabalho.

Ao professor Dario Cardoso de Lima, ao qual sempre pude recorrer.

Aos funcionários do Laboratório de Engenharia Civil e do Laboratório de Hidráulica da Engenharia Agrícola, que certamente contribuíram para a realização deste trabalho.

Aos amigos Herony Ulisses Mehl, Luciano Farias de Novaes, Marlene Maria de Sousa, Renata Del Giudice Rodriguez, Roberto Avelino Cecílio,

Sidney Sára Zanetti e Wendy Fonseca Ataíde pelo valioso apoio e dedicação na realização dos experimentos.

Aos colegas de república, Alisson, Francisco Solon, Luís Camboim, Marcos, Nori, Paulo, Ricardo e Salomão.

Aos colegas, pela amizade e pela convivência fraterna em todos os momentos.

À todos os amigos e colaboradores que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

BIOGRAFIA

MARCIO KOETZ, filho de Almiro Arlindo Koetz e Inoilsa Gross Koetz, nasceu em Osório, Rio Grande do Sul, em 13 de março de 1975.

Concluiu o segundo grau em 1993 na Escola Estadual de 1^o e 2^o Graus Ildefonso Simões Lopes, em Osório – RS.

No primeiro semestre de 1996, ingressou na Universidade Federal de Pelotas, tendo concluído o Curso de Engenharia Agrícola no segundo semestre de 2000.

Em abril de 2001, iniciou o curso de mestrado em Engenharia Agrícola, área de concentração Irrigação e Drenagem, na Universidade Federal de Viçosa.

ÍNDICE

	Página
RESUMO	viii
ABSTRACT	x
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1. Importância econômica e social das estradas não pavimentadas	3
2.2. Aspectos relacionados à construção de estradas não pavimentadas	4
2.3. Erosão em estradas não pavimentadas	7
2.4. Controle da erosão em estradas não pavimentadas	9
2.5. Erodibilidade e tensão de cisalhamento dos solos	12
2.6. Ensaio para a obtenção da erodibilidade e da tensão crítica de cisalhamento do solo	13
2.6.1. Ensaio de Inderbitzen	13
2.6.2. Ensaio para a obtenção da erodibilidade e tensão crítica de cisalhamento do solo em condições de campo	15
3. MATERIAL E MÉTODOS	16
3.1. Descrição geral do experimento	16
3.2. Características do solo estudado	16
3.3. Experimentos de campo	19
3.3.1. Descrição do equipamento	19
3.3.2. Realização dos testes com o simulador de escoamento	21
3.3.3. Análise dos dados	27

3.4. Experimentos de laboratório	28
3.4.1. Descrição do equipamento	28
3.4.2. Preparo das amostras de solo	30
3.4.2.1. Amostras de solo indeformadas	30
3.4.2.2. Amostras de solo deformadas	31
3.4.3. Realização dos testes	32
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	35
4.1. Testes de campo	35
4.2. Testes de Inderbitzen	40
4.2.1. Amostras indeformadas	40
4.2.2. Amostras deformadas	45
4.3. Análise comparativa dos resultados obtidos pelos diferentes testes em cada horizonte	50
5. RESUMO E CONCLUSÕES	55
6. RECOMENDAÇÕES	57
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	58
APÊNDICES	63
APÊNDICE A	64
APÊNDICE B	65
APÊNDICE C	66
APÊNDICE D	68
APÊNDICE E	70

RESUMO

KOETZ, Marcio, M.S., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2003.
Métodos para a determinação da erodibilidade e da tensão crítica de cisalhamento do solo em estradas não pavimentadas. Orientador: Fernando Falco Pruski. Conselheiros: Demetrius David da Silva e Eduardo Antônio Gomes Marques

As estradas não pavimentadas são de fundamental importância para a economia brasileira, em grande parte baseada na produção e comercialização de produtos primários. A erosão provocada pela água no leito e nas margens de estradas não pavimentadas é um dos principais fatores para sua degradação, sendo responsável por aproximadamente metade das perdas de solo devidas à erosão no Estado de São Paulo. Dados obtidos na literatura mostram que mais de 90 % dos sedimentos produzidos em áreas florestais provém das estradas, sendo a drenagem inadequada um dos principais fatores responsáveis por essas perdas. Desta forma, este trabalho teve por objetivo a determinação e a comparação dos valores da erodibilidade e da tensão crítica de cisalhamento do solo em um canal de estrada não pavimentada, tanto pela metodologia desenvolvida por GRIEBELER (2002) como pelo ensaio de Inderbitzen. Os testes de campo foram realizados no canal desta estrada, sendo feitos para os horizontes A, B, $C_{(\text{residual maduro})}$ e $C_{(\text{residual jovem})}$ de um Latossolo Vermelho-Amarelo com a utilização do equipamento desenvolvido por GRIEBELER (2002). Foi também retirado solo dos horizontes citados anteriormente para a determinação das características físicas de cada horizonte e para a

obtenção das amostras deformadas por meio da compactação do solo nos amostradores. Os resultados obtidos permitiram concluir que: a) o horizonte $C_{(\text{residual jovem})}$ foi o que apresentou as maiores erodibilidades e as menores tensões críticas de cisalhamento; b) as erodibilidades determinadas nos testes de campo foram menores e as tensões críticas de cisalhamento maiores do que as obtidas nos testes com o Inderbitzen e c) nos ensaios de Inderbitzen com amostras indeformadas tanto as erodibilidades, como as tensões críticas de cisalhamento foram, em geral, menores que as obtidas nos ensaios com amostras deformadas.

ABSTRACT

KOETZ, Marcio, M.S., Universidade Federal de Viçosa, February 2003.
Methodology to estimate the erodibility and the critical shear stress on unpaved roads. Adviser: Fernando Falco Pruski. Committee Members: Demetrius David da Silva and Eduardo Antônio Gomes Marques

The unpaved roads are essential for the Brazilian economy which is based in the production and commercialization of primary products. The water erosion on the bed and on the channel of unpaved roads is one of the more significant factors for the soil degradation. More than 50% of the soil loss in the São Paulo State is associated with the earth roads and more than 90% of the sediments produced in forest areas come from the roads. The inadequate drainage is one of the main factors for these losses. The objective of this research was to determinate the erodibility and the critical shear stress of the soil of an unpaved road by the method developed by Griebeler, in 2002, and by the Inderbitzen's test. The tests were carried out in the horizons A, B, $C_{(mature\ waste)}$ e $C_{(young\ waste)}$ of one Red-Yellow Latosol. The results obtained allowed to conclude that: a) the horizon $C_{(young\ waste)}$ had the highest erodibility and the smallest critical shear stress; b) the erodibilities obtained using the Griebeler's equipment were smaller and the critical shear stress higher than those obtained in the Inderbitzen's tests; and c).the Inderbitzen's tests made with the samples with the original structure had smaller erodibility and critical shear stress than those made with the samples compacted in the laboratory.

1. INTRODUÇÃO

A importância das estradas não pavimentadas é notória em todos os segmentos da sociedade, uma vez que o primeiro caminho percorrido para o transporte e comercialização da produção agrícola é o da propriedade rural ao sistema coletor (THOMAZ, 1984). A ligação entre comunidades rurais é feita principalmente pelas estradas não pavimentadas, as quais integram as localidades mais afastadas dos centros urbanos.

O Brasil apresenta aproximadamente 1.725.000 km de estradas distribuídos nas diferentes regiões do país, sendo que as estradas de terra correspondem a mais de 90 % desta extensão (DNER, 2000).

O grande problema das estradas não pavimentadas está relacionado às expressivas taxas de desprendimento e arraste de partículas de solo. As perdas de solo associadas às estradas não pavimentadas no Estado de São Paulo são responsáveis por danos ao meio ambiente, poluindo e assoreando mananciais hídricos (ANJOS FILHO, 1998). MARTINS et al. (1997) ressaltam que as estradas não pavimentadas não permitem boas condições de tráfego quando não dispõem de drenagem adequada.

Poucas são as metodologias disponíveis para o dimensionamento de sistemas de drenagem em estradas não pavimentadas. Uma destas, desenvolvida por GRIEBELER (2002), requer para a sua utilização o conhecimento da erodibilidade e da tensão crítica de cisalhamento do solo. A erodibilidade caracteriza a maior ou menor facilidade com que as partículas de solo são desprendidas pelo escoamento superficial, enquanto a tensão crítica de cisalhamento representa a máxima tensão que poderá ser aplicada ao solo sem que ocorra o seu desprendimento.

Uma das principais metodologias para a determinação da erodibilidade e da tensão crítica de cisalhamento do solo é o ensaio de Inderbitzen (INDERBITZEN, 1961), que possibilita a variação dos principais fatores que interferem no processo erosivo.

Outra metodologia disponível para a obtenção da erodibilidade e da tensão crítica de cisalhamento do solo é a desenvolvida por GRIEBELER (2002), que constitui na realização de ensaios “in situ”. Embora esta metodologia seja mais representativa das condições reais, apresenta restrições quanto à sua operacionalização devido principalmente à necessidade de grande quantidade de mão-de-obra, de elevado volume de água e de requerer para a sua realização locais com grande declividade da estrada.

Tendo em vista a importância que representa a determinação da erodibilidade e da tensão crítica de cisalhamento do solo desenvolveu-se o presente trabalho, que teve como objetivo a determinação e comparação dos valores da erodibilidade e da tensão crítica de cisalhamento do solo em um canal de estrada não pavimentada com base na metodologia desenvolvida por GRIEBELER (2002) e no ensaio de Inderbitzen.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Importância econômica e social das estradas não pavimentadas

Uma estrada pode ser conceituada como uma faixa do terreno com características geométricas especiais, devendo esta ser sistematizada e seu leito adequadamente preparado para garantir a circulação de veículos automotores.

A construção de estradas não pavimentadas em áreas rurais de maneira não integrada ao sistema de conservação de solos acarreta diversos problemas, como o aumento da erosão nas áreas de exploração agropecuária, dificultando a sua manutenção e provocando a rápida degradação desta.

Em 2000, segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), o custo de manutenção das estradas não pavimentadas no Brasil foi de R\$ 538 milhões. Estudos realizados no Estado do Paraná mostraram que o custo de manutenção de estradas não pavimentadas, que antes da implantação do programa Paraná Rural era de US\$ 850,00 km⁻¹ano⁻¹, foi reduzido em cerca de 50 % com a adoção de práticas de conservação de solo.

Com a implantação do projeto de recuperação, conservação e manejo dos recursos naturais em microbacias hidrográficas no Estado de Santa Catarina o custo de manutenção das estradas não pavimentadas passou de US\$ 945,00 km⁻¹ano⁻¹ para US\$ 151,00 km⁻¹ano⁻¹. Foi verificada também uma melhoria expressiva na qualidade da água nos rios, a redução

da degradação do solo, o aumento da produtividade das culturas e, conseqüentemente, o aumento da renda obtida nas propriedades rurais.

A economia da maioria dos municípios do interior do Brasil está voltada à produção agropecuária e à agroindústria. Portanto, dentre as principais funções das estradas não pavimentadas estão o intercâmbio de comunidades visando o desenvolvimento de atividades culturais, sociais e políticas, bem como a coleta e distribuição de produtos e o acesso à educação e à assistência médica. A estrada deve, portanto, possibilitar o deslocamento de pessoas e animais com segurança, rapidez e conforto.

Dessa forma, o planejamento, a implantação e a adequação de estradas e carregadores de modo integrado às demais práticas de manejo e conservação de solo e água propicia um maior controle da erosão hídrica, reduzindo os custos de manutenção e os prejuízos decorrentes da sua indisponibilização para o tráfego.

2.2. Aspectos relacionados à construção de estradas não pavimentadas

O custo da manutenção de uma estrada depende do seu padrão construtivo, do peso dos veículos que nela trafegam, da densidade de tráfego e das condições climáticas. Em regiões montanhosas o custo de manutenção anual, até que ela esteja estabilizada, pode representar 10 % do custo de construção da estrada (FAO, 1977). Os custos de construção de estradas são difíceis de serem estimados devido à sua grande variação em função das condições de topografia, solos, máquinas utilizadas, características de desenho, bem como de outros fatores (LAYTON et al., 1992).

DUARTE e BERGER (1988) analisaram estradas florestais de diferentes padrões construtivos e concluíram que quanto melhor o estado de conservação do leito das estradas, menor será o custo operacional dos veículos que nela trafegam, sendo estes custos muito altos em estradas de má qualidade.

As estradas não pavimentadas são constituídas por duas partes: subgreide e pavimento (FAO, 1977). O subgreide é formado pelo solo que ocorre naturalmente na estrada ou próximo dela. O termo pavimento é usado para designar a camada de concreto ou asfalto da estrada, entretanto pode-se considerar pavimento qualquer material colocado na estrada acima do subgreide.

Uma estrada consiste basicamente de três camadas: a superfície, a base e a sub-base. A superfície é a camada que recebe diretamente a ação do tráfego, sendo destinada a melhorar as condições de conforto e segurança, devendo ser suficientemente resistente ao desgaste a fim de garantir uma boa durabilidade da estrutura. A base é a camada destinada a resistir os esforços verticais oriundos do tráfego e de transmiti-los à sub-base. A sub-base é a camada complementar à base, sendo que o material da base deverá ser de melhor qualidade que o material da sub-base. De uma forma geral, quanto maiores forem as espessuras destas camadas, maior será a capacidade de suporte da estrada, porém em muitas estradas não pavimentadas somente uma camada de cascalho é colocada, fazendo esta o papel das três camadas necessárias.

O aumento da proteção de uma estrada pode ser obtido pelo abaulamento do seu leito e pela implantação de drenos e bueiros para remover a água provinda do escoamento superficial para fora da estrada (MORRIS, 1995).

Abaulamento é o nome dado à forma convexa que se dá à seção transversal da estrada para que a água da chuva não permaneça sobre a mesma, o que ocasionaria transtornos ao trânsito e infiltrações no leito, provocando a saturação e rebaixamento do terreno e a destruição da estrada. O abaulamento deve permitir a rápida remoção do escoamento superficial, permitindo que a superfície não retenha água por muito tempo, facilitando o trânsito e reduzindo o risco de ocorrência de acidentes devido a pistas escorregadias, bem como evitando que a água escoie longitudinalmente sobre a estrada, se avolumando e adquirindo energia suficiente para erodí-la (GUTIERREZ, 1972).

DER (1988) recomenda como procedimentos técnicos a serem utilizados para a melhoria das condições de rolamento e aderência dos

veículos nas estradas não pavimentadas o revestimento primário, o agulhamento e a mistura de areia e argila.

O revestimento primário constitui em uma camada colocada sobre o reforço do subleito ou diretamente sobre o subleito. O reforço do subleito pode ser considerado como uma camada complementar da sub-base e o subleito como o terreno de fundação do pavimento.

Segundo DER (1988), o revestimento primário é obtido pela compactação de uma mistura (natural ou preparada) de material argiloso com material granular. A espessura desta camada deve levar em conta a quantidade e tipo de tráfego do local e as condições de suporte do subleito, variando, geralmente, entre 10 e 20 cm. O objetivo da adição de argila no material granular é o de atuar como ligante e regularizar a superfície de rolamento, enquanto o objetivo do uso do material granular é aumentar o atrito da pista com as rodas dos veículos, sendo a dimensão máxima considerada ideal para o material granular de 2,5 cm.

Na mesma citação recomenda-se que para a realização do revestimento primário sejam adotados os seguintes passos:

- a) regularização e compactação do subleito ou da camada de reforço;
- b) escarificação do leito;
- c) lançamento e espalhamento do material;
- d) umedecimento, ou secagem, se necessário;
- e) verificação da umidade do solo com base em um controle visual (o solo não deve estar nem seco nem encharcado); e
- f) compactação (passar o rolo no mínimo oito vezes por faixa, da borda da estrada para o seu centro).

O agulhamento consiste na operação de cravação, por compactação, de material granular grosseiro diretamente no subleito, se este for argiloso, ou sobre uma camada argilosa colocada sobre o subleito. O agulhamento propicia menor durabilidade da estrada do que o revestimento primário, sendo indicado, portanto, para situações em que a execução do revestimento primário seja problemática ou muito cara, ou, ainda, em estradas não pavimentadas de menor porte e baixo volume de tráfego (DER, 1988).

Para a execução do agulhamento o processo é semelhante, seguindo-se somente os passos a, b, c, d e f. O agulhamento tem uma vida útil de aproximadamente três anos, sendo que esta varia de acordo com a qualidade do cascalho, velocidade e intensidade de tráfego, carga por eixo dos veículos e declividade da estrada (PASTORE, 1997).

Em canais de solo arenoso laterítico deve-se ter cuidado na implantação e manutenção do sistema de drenagem, sendo que em canais com solos lateríticos de basalto não é recomendado o agulhamento, devido à falta de coesão do solo, havendo a necessidade do solo ser inicialmente revestido com a colocação de uma camada de reforço do sub-leito de aproximadamente 15 cm de espessura de solo laterítico, sobre a qual deverá ser aplicado o revestimento primário (PASTORE, 1997).

2.3. Erosão em estradas não pavimentadas

A erosão que provoca a maior degradação das terras em climas tropicais é a causada pela chuva. A erosão hídrica (BERTONI e LOMBARDI, 1985), isto é, o desprendimento e transporte do solo em decorrência do impacto das gotas das chuvas e do escoamento superficial, é um processo que afeta expressivamente as condições das estradas não pavimentadas.

Nas situações em que a intensidade de chuva é superior à capacidade de infiltração do solo ocorre a produção de escoamento superficial, que além de arrastar os materiais desagregados pelo impacto das gotas, promove também o desprendimento de partículas de solo. Esta capacidade de desprendimento pelo escoamento superficial aumenta com o aumento da profundidade de escoamento e da inclinação da encosta (LENCASTRE e FRANCO, 1992).

Segundo PRUSKI (1998), solos ricos em silte e areia e pobres em matéria orgânica são muitos propensos ao processo erosivo, em razão da pequena resistência que oferecem ao desprendimento de partículas durante a precipitação.

REID e DUNNE (1984) comentam que o tipo e a intensidade de trânsito a que as estradas estão sujeitas são de grande importância no

processo de produção de sedimentos. Relatam ainda que em observações realizadas em estradas florestais a produção de sedimentos durante períodos de tráfego intenso foi 7,5 vezes superior à evidenciada em estradas que não estavam sendo utilizadas.

Em uma área situada no Kenya ocupada com atividades agrícolas, foi estimado que as estradas e caminhos rurais compreendiam aproximadamente 2% da área da bacia hidrográfica considerada, contribuindo, entretanto, expressivamente na produção de sedimentos na bacia hidrográfica (DUNNE e DIETRICH, 1982). RIJSDIJK e BRUIJNZEEL (1991) obtiveram resultados semelhantes em estudo realizado no Leste de Java, na Indonésia.

ZIEGLER et al. (2000) mostraram que os impactos ambientais das estradas não pavimentadas excederam aqueles das atividades agrícolas desenvolvidas em algumas bacias hidrográficas situadas no Norte da Tailândia.

Estima-se que mais de 90 % da produção de sedimentos em áreas florestais seja proveniente de estradas (GRACE III et al., 1996; NEARY e HORNBECK, 1994; DUARTE e BERGER, 1998).

LUCE e BLACK (1999) comentam que segmentos de estradas onde a vegetação foi retirada dos canais de drenagem e dos cortes da encosta produziram aproximadamente sete vezes mais sedimentos do que os segmentos onde a vegetação foi mantida, mostrando o potencial que a revegetação após a construção da estrada tem para a redução do processo erosivo e o impacto que a limpeza dos canais de drenagem durante sua manutenção provoca no aumento das perdas de solo.

A produção de sedimentos durante o primeiro ano após a construção da estrada é muito alta, já que o material não está consolidado, decrescendo rapidamente com o tempo (BURROUGHS e KING, 1989; KIDD e MEGAHAN, 1972). MACHADO e SOUZA (1990) confirmam que os maiores danos em áreas florestais ocorrem durante ou logo após o preparo do solo em locais onde antes havia mata e durante a construção de estradas, quando os solos ficam mais expostos à erosão.

Experiências realizadas por Tuchy, em 1982, citado por MACHADO e SOUZA (1990), mostraram que a taxa de ocorrência de erosão antes da

abertura de uma estrada florestal era de $30 \text{ kg ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$, aumentando para $3.000 \text{ kg ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$ durante a sua abertura. Algum tempo após o término da construção da estrada a taxa de erosão baixou para $120 \text{ kg ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$. Dessa forma, a taxa erosiva durante a construção da estrada aumentou 100 vezes em relação a fase anterior à construção, indicando a necessidade de um rigoroso controle do processo erosivo durante e após a construção de estradas florestais.

Um dos principais problemas que ocorre em estradas de terra, e que normalmente causa sua destruição ou a necessidade de sua recuperação, é a drenagem deficiente, que pode ser devida a falhas no dimensionamento ou à utilização de dados hidrológicos ou do solo não condizentes com a realidade local.

Segundo GRACE III et al. (1996) a construção de estradas pode aumentar, durante o primeiro ano, a produção de sedimentos de 2 a 150 vezes, em relação à produção de sedimentos na condição não perturbada. KIDD e MEGAHAN (1972) obtiveram um aumento de cerca de 220 vezes na produção de sedimentos após a construção de estradas em solos declivosos altamente erodíveis em Idaho Batholith, área localizada no Oeste dos Estados Unidos. GONSOIR e GARDNER (1971) também conduziram um estudo em Idaho Batholith no qual a produção de sedimentos após a construção da estrada foi até 1000 vezes maior do que as taxas de erosão evidenciadas em áreas não perturbadas.

2.4. Controle da erosão em estradas não pavimentadas

BURROGHS e KING (1989) salientam que práticas para o controle da erosão devem ser empregadas tanto no leito da estrada como nos aterros de encosta, nos cortes e nos canais laterais. Os mesmos autores verificaram que do total de sedimentos produzidos nas estradas, 60 % advém dos aterros de encosta, 25 % do leito da estrada e 15 % dos cortes e canais laterais.

OLIVEIRA (1997) e FAO (1989) afirmam que para minimizar os impactos ambientais decorrentes da construção de estradas deve-se reduzir

a densidade destas ao mínimo indispensável, considerar as características naturais do terreno no seu projeto e construção, como os divisores de águas e o uso de declividades baixas para minimizar a área perturbada e evitar a passagem da estrada em locais com solos úmidos e propensos à erosão. Além disso, é necessário revestir com gramíneas ou arbustos as áreas situadas lateralmente às estradas, manter as vias em áreas planas, evitar taludes longos, declivosos e instáveis, que ocasionam maior taxa de erosão e elevam os custos de manutenção, e local as estradas em solos bem drenados e longe dos cursos d'água.

Segundo MARTINS et al. (1997), as estradas não pavimentadas não permitem que o tráfego ocorra normalmente quando são desprovidas de drenagem adequada.

De acordo com MACHADO e SOUZA (1990), o principal objetivo de uma rede de drenagem é a interceptação, coleta e remoção do escoamento superficial e subsuperficial da estrada, sendo que a maioria dos problemas de drenagem pode ser controlada se forem evitadas as áreas com problemas quanto à sua topografia e geologia, como: construção da estrada sobre solo siltoso, uso de curvas verticais côncavas, presença de locais de infiltração natural de água e de nascentes próximas à estrada. Além de evitar áreas com estes problemas deve-se também garantir que o sistema de drenagem mantido sem obstruções (FAO, 1989).

A água escoada sobre a estrada deve ser coletada nas suas laterais e conduzida, de modo a não provocar erosão, para canais escoadouros naturais, artificiais, bacias de acumulação ou para outro sistema de retenção localizado no terreno marginal.

Uma das alternativas para a destinação das águas coletadas em estradas é a sua condução a bacias de acumulação. Esta técnica consiste na escavação de bacias nas áreas marginais às estradas para permitir a captação e o armazenamento da água escoada nestas e possibilitar a posterior infiltração. Assim, a bacia deve ser dimensionada para receber o volume escoado e possuir solo permeável para permitir que a água acumulada possa infiltrar (BERTOLINI et al. 1993).

NOGAMI e VILLIBOR (1995) ressaltam que erosões muito intensas podem ocorrer quando não se protege adequadamente as bordas do pavimento. A drenagem superficial, o plantio de grama imediatamente após a construção de cada trecho e o corte a 45⁰ da borda da base são medidas recomendadas para a minimização desses defeitos.

A manutenção de uma estrada consiste normalmente em remover irregularidades da superfície da estrada, além de outras operações que devem ser realizadas em intervalos regulares, como limpeza dos canais de drenagem, reaplicação de cascalho e limpeza das faixas laterais à estrada para melhorar a visibilidade (FAO, 1977).

A manutenção das estradas é essencial para preservar as suas condições construtivas; proteger os recursos adjacentes e assegurar condições seguras e eficientes para o tráfego. Infelizmente, entretanto, a manutenção normalmente é negligenciada ou realizada inapropriadamente, resultando em uma rápida deterioração da estrada (FAO, 1989).

O material com o qual as estradas são construídas é geralmente bem compactado durante a construção, o que reduz a sua erodibilidade. As práticas de construção e manutenção de estradas, entretanto, perturbam o solo situado na estrada, no canal e no talude, que é a origem do material erodido mais facilmente (MEGAHAN, 1974).

KLABIN AGROFLORESTAL-SETOR...(1985) salienta que na construção de uma estrada é muito importante a existência de um projeto de proteção contra a erosão, que deve conter as seguintes medidas:

a) coleta e destinação da água da chuva: feitas a fim de minimizar os efeitos da erosão através da abertura de valas, sarjetas, canais, correção das curvas e taludes da estrada, revestimento vegetal, etc.;

b) trabalhos corretivos, trilhas de animais, caminhos velhos, e outros fatores que possam contribuir para a ocorrência da erosão;

c) controle das voçorocas: deve-se prevenir a formação das voçorocas por meio de restauração da superfície do solo e reconstituição da cobertura vegetal;

d) revestimento dos taludes de corte e aterro: geralmente feita com gramíneas ou mesmo vegetação de maior porte.

A locação de estradas deve ser realizada com o máximo cuidado, conforme os seguintes passos:

a) em primeiro lugar, deve-se determinar as áreas que devem ser servidas em primeiro lugar;

b) checar as especificações requeridas: raio mínimo de curvatura, greides máximos, tipo de equipamento de transporte, velocidade dos veículos, etc.;

c) escolher o alinhamento mais apropriado usando fotografias aéreas e mapas topográficos e geológicos, mapas com a classificação de uso da terra e demais dados do solo que estiverem disponíveis;

d) checar greides e curvas, condições do solo e de drenagem, e disponibilidade de cascalho e de outros materiais (FAO, 1977).

2.5. Erodibilidade e tensão de cisalhamento dos solos

A erodibilidade do solo, sob condições de escoamento superficial, corresponde à quantidade de solo desprendido por unidade de área, tempo e tensão aplicada. Entende-se como erodibilidade do solo a maior ou menor susceptibilidade dos solos erodirem, sendo esta devida exclusivamente às suas propriedades (VEIGA, 1988).

De acordo com LIMA et al. (1992), erodibilidade não é sinônimo de erosão. Conforme citam WISCHMEIER E SMITH (1978), enquanto a erosão depende de fatores como a declividade do solo, características das chuvas, cobertura vegetal, entre outras, a erodibilidade é um fator intrínseco de cada solo.

A resistência à erosão não depende só de características intrínsecas do solo mas, também, de outros fatores, como dos ciclos de secagem e umedecimento do solo e da composição química da água presente neste.

A erodibilidade é dependente de características como a granulometria e constituição mineralógica e química do solo, da estrutura, permeabilidade, capacidade de infiltração e coesão entre as partículas (NOGAMI e VILLIBOR, 1995).

Vários autores, como VARGAS (1977), FÁCIO (1991) e SANTOS (1997), afirmam serem os solos mais erodíveis aqueles que apresentam uma composição granular com predominância de areia fina ou silte e pequena quantidade de argila.

A erodibilidade para os solos arenosos é tanto maior quanto mais uniforme for sua granulometria (VARGAS, 1977). O mesmo autor também afirma que, para os solos argilosos, o fenômeno é mais complexo, uma vez que também interferem neste a estrutura, o teor de umidade, o grau de saturação e a expansibilidade do solo. É ainda citado por VARGAS (1977) que a resistência à erosão dos solos argilosos decresce com a redução da umidade.

Em condições de estradas não pavimentadas a erodibilidade é variável, sendo o material solto inicialmente removido em taxas de erosão mais elevadas (ZIEGLER et al., 2000). A erodibilidade da estrada é, portanto, variável, alterando-se durante o escoamento, sendo a erodibilidade real da superfície da estrada aquela obtida depois que o material solto é removido. ZIEGLER et al. (2001) tem demonstrado em experimentos que simulam o comportamento do processo erosivo em estradas e no campo que a erodibilidade da superfície da estrada é dinâmica. Segundo o mesmo autor, durante uma chuva a superfície da estrada não pavimentada passa por dois ou mais estados de erodibilidade.

A tensão crítica para cisalhamento dos solos pode ser entendida como a máxima tensão que pode ser aplicada ao solo sem que sejam liberadas as suas partículas (GRIEBELER, 2002).

2.6. Ensaio para a obtenção da erodibilidade e da tensão crítica de cisalhamento do solo

2.6.1. Ensaio de Inderbitzen

INDERBITZEN (1961) propôs um ensaio para determinar em laboratório a quantidade de solo erodido em uma amostra com 152 mm de

diâmetro, colocada em uma rampa com inclinação conhecida, quando sua superfície é exposta a uma determinada vazão.

FÁCIO (1991) projetou e construiu uma versão modificada do aparelho proposto por Inderbitzen que permite variações da declividade, da vazão e no posicionamento da amostra, tornando o aparelho mais versátil. O equipamento teve alterações na largura da rampa, que passou de 1,00 m para 0,33 m; comprimento da rampa, que passou de 1,00 m para 1,30 m; e na redução do diâmetro das amostras, de 152 mm para 100 mm. O mesmo autor descreve detalhadamente todo o aparelho e a metodologia do ensaio de Inderbitzen. A partir de uma série de ensaios com variações nos valores de vazão, da declividade da rampa, do tempo de ensaio e de saturação da amostra, este autor propôs a realização do ensaio sob condições normatizadas, a seguir apresentadas:

tempo de umedecimento = 15 min;

vazão = 50 mL s^{-1} ;

declividade da rampa = 10^0 ; e

tempo de ensaio = 20 min.

O umedecimento das amostras é realizado para minimizar as forças associadas à sucção presente na amostra em seu estado natural. O autor propõe ainda que os resultados dos ensaios sejam apresentados na forma de gráficos de perda acumulada de solo (g mm^{-2}) versus tempo (min), o que facilita a análise dos resultados obtidos.

SANTOS (1997) utilizou o equipamento desenvolvido por FÁCIO em 1991 para determinar os resultados de erodibilidade no município de Goiânia. Visando melhorar a qualidade dos resultados obtidos foram feitas algumas modificações no aparelho utilizado por FÁCIO (1991). A rampa na qual ocorre o escoamento teve a sua largura reduzida para 100 mm, assegurando que todo o escoamento se processasse sobre a amostra e não ao seu lado.

O tempo de ensaio foi aumentado para 30 min, visando melhor caracterizar o comportamento da perda de solo com o tempo. O material carregado pelo escoamento superficial é coletado em peneiras com 0,074 mm de abertura (#200 da ABNT), sendo depois seco em estufa e pesado. O

material que passa na peneira 200 é ponderado pela porção que fica na peneira 200, utilizando-se as curvas granulométricas

FRAGASSI (2001) realizou o estudo da erodibilidade de solos residuais de gnaiss da Serra de São Geraldo e de Viçosa, Minas Gerais, utilizando o ensaio de Inderbitzen. O mesmo autor cita que a principal mudança no aparelho de Inderbitzen utilizado em relação ao de SANTOS (1997) está no diâmetro da amostra, que foi aumentada para 152 mm.

2.6.2. Ensaio para a obtenção da erodibilidade e tensão crítica de cisalhamento do solo em condições de campo

GRIEBELER (2002) desenvolveu equipamento que permite simular o escoamento diretamente nos canais de drenagem das estradas. O equipamento visa a simulação do escoamento de maneira próxima à condição real, provocando pequena interferência na condição original do terreno. O mesmo consiste em uma calha construída com chapas metálicas que permitem a delimitação do trecho de canal a ser ensaiado, um sistema para armazenamento e derivação de água e um conjunto para coleta e filtragem da água que passa pelo próprio equipamento.

Após a obtenção das informações da quantidade de solo perdido para diferentes vazões obtém-se a erodibilidade e a tensão crítica de cisalhamento do solo a partir de uma análise de regressão.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Descrição geral do experimento

A coleta de amostras para a realização dos testes de Inderbitzen, bem como para a execução dos testes de campo foram feitas em uma estrada não pavimentada situada nas proximidades da pedreira da Universidade Federal de Viçosa.

Os testes de campo foram realizados no canal desta estrada, sendo feitos para os horizontes A, B, $C_{\text{residual jovem}}$ e $C_{\text{residual maduro}}$ de um Latossolo Vermelho-Amarelo, com a utilização do equipamento desenvolvido por GRIEBELER (2002).

Para a realização dos testes no Laboratório de Hidráulica do Departamento de Engenharia Agrícola foram retiradas amostras indeformadas dos horizontes A, B, $C_{\text{(residual jovem)}}$ e $C_{\text{(residual maduro)}}$ do canal da estrada. As amostras deformadas de solo foram compactadas no amostrador quadrado com a umidade ótima para os mesmos horizontes citados anteriormente. Na execução destes ensaios foi utilizado o aparelho de Inderbitzen no qual foram usadas amostras com formato quadrado.

3.2. Características do solo estudado

O solo estudado classifica-se como Latossolo Vermelho-Amarelo (Figuras 1 a 4). No Quadro 1 são apresentadas as características físicas dos horizontes A, B, $C_{\text{(residual maduro)}}$ e $C_{\text{(residual jovem)}}$ e nos Apêndices A e B são



Figura 1. Condição do horizonte A do solo antes da realização dos testes.



Figura 2. Condição do horizonte B do solo antes da realização dos testes.



Figura 3. Condição do horizonte $C_{(\text{residual maduro})}$ do solo antes da realização dos testes.



Figura 4. Condição do horizonte $C_{(\text{residual jovem})}$ do solo antes da realização dos testes.

representadas as curvas granulométricas correspondentes aos respectivos horizontes .

Quadro1. Características físicas dos horizontes do Latossolo Vermelho-Amarelo no qual foram realizados os experimentos

Horizonte	Granulometria			ρ^2	ρ_r^3	LL ⁴	LP ⁵	IP ⁶	Retido na peneira 200	Classe textural
	Areia (%)	Silte (%)	Argila ¹ (%)	g cm ⁻³	g cm ⁻³	%	%	%		
A	47	4	49	1,45	3,10	43,60	23,77	19,83	55,18	Argila Arenosa
B	42	7	51	1,40	3,03	60,0	27,82	32,18	39,88	Argiloso
C residual jovem	55	28	17	1,58	2,85	34,30	20,08	15,66	58,59	Franco Argilo Arenosa
C residual maduro	61	11	28	1,42	3,14	36,55	20,89	14,22	50,83	Franco Arenosa

- 1) Método do densímetro (ABNT, NBR 7181).
- 2) Massa específica do solo determinada pelo método do anel volumétrico (EMBRAPA, 1997).
- 3) Massa específica das partículas (método do balão volumétrico, pela norma ABNT, NBR 6508).
- 4) Limite de Liquidez (Ensaio de determinação dos limites de Atterberg, ABNT NBR 6459).
- 5) Limite de Plasticidade (Ensaio de determinação dos limites de Atterberg, ABNT NBR 7180).
- 6) Índice de Plasticidade (Ensaio de determinação dos limites de Atterberg, ABNT NBR 7180).

3.3. Experimentos de campo

3.3.1. Descrição do equipamento

O equipamento utilizado nos experimentos de campo (GRIEBELER, 2002) permite a realização dos testes diretamente nos canais de drenagem das estradas, possibilitando, portanto, a obtenção da tensão crítica de cisalhamento e da erodibilidade do solo em condições de campo (Figura 5). O equipamento é constituído de uma calha construída com chapas metálicas, que permitem a delimitação do trecho de canal a ser ensaiado, de um sistema para armazenamento e derivação de água e de um conjunto para coleta e filtragem da água que passa pelo próprio equipamento.

A água oriunda de um reservatório d'água é conduzida, por meio de uma tubulação de alimentação, para uma caixa de controle do nível d'água.

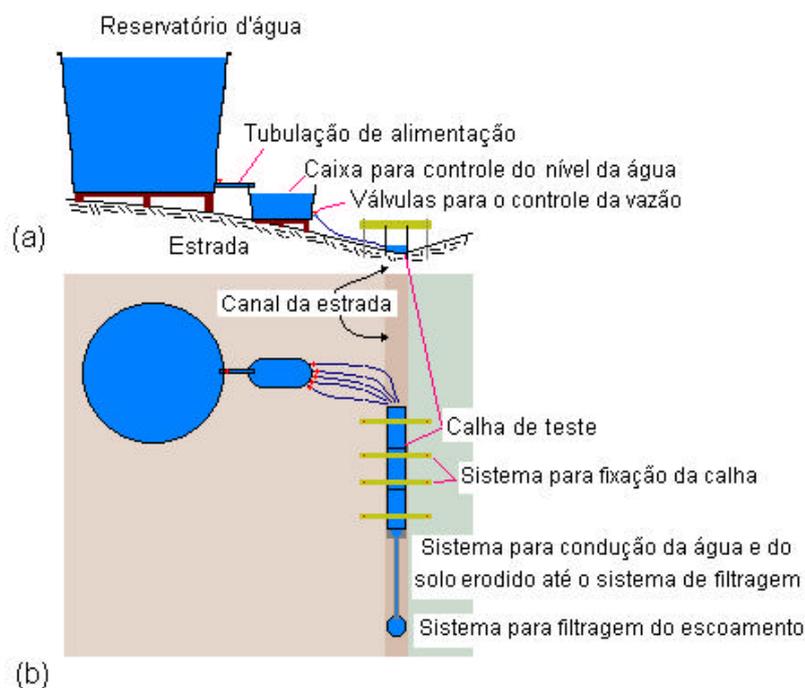


Figura 5. Representação esquemática do equipamento desenvolvido por GRIEBELER (2002) para a determinação da erodibilidade e da tensão crítica de cisalhamento do solo em estradas não pavimentadas: a) vista lateral; e b) vista superior.

Associados a esta caixa estão cinco válvulas de gaveta para o controle da vazão. A vazão liberada pelas válvulas de gaveta é conduzida, por meio de mangotes, a uma calha com fundo fechado em seu trecho inicial, escoando em seguida para o trecho em que ocorre o contato do escoamento com o leito do canal. Tendo percorrido este trecho, a água é novamente direcionada para um trecho da calha com fundo fechado. Após a passagem pela calha a água é conduzida, por meio de uma tubulação (sistema de condução), a caixas que permitem o seu armazenamento. A água destas caixas passa por filtragem, a qual é feita em peneira com malha de 0,074 mm.

A turbulência causada pelo escoamento foi reduzida pelo uso de aletas perpendiculares ao escoamento na área fechada da calha na qual o escoamento é lançado. Na interface da área de aplicação de água para a área na qual a calha permite o contato do escoamento com o solo utilizou-se um pedaço de borracha que teve a função de conduzir a água sem que houvesse um sobressalto.

3.3.2. Realização dos testes com o simulador de escoamento

Foram realizados três testes no canal da estrada para cada um dos horizontes estudados (A, B, $C_{\text{residual jovem}}$ e $C_{\text{residual maduro}}$), sendo que para a execução de cada teste o equipamento foi deslocado de maneira que cada repetição fosse feita sobre um trecho de canal da estrada não perturbado.

A instalação do equipamento desenvolvido por GRIEBELER (2002) e a realização de cada um dos testes deu-se delimitando-se, primeiramente um trecho do canal da estrada representativo das condições relativas à declividade e forma do canal. A calha foi colocada sobre o canal, sendo demarcado, no solo, o trecho para a derivação da água da caixa para a calha, o trecho de contato do escoamento com o leito do canal e o trecho para o direcionamento da água lançada no canal para o sistema de armazenamento. A calha foi retirada e foram realizados ajustes na superfície do canal onde é assentado o trecho responsável pelo direcionamento do escoamento para o sistema de armazenamento, de modo a permitir o correto assentamento da calha sobre o leito do canal. Os trechos do canal em que a superfície do solo foi ajustada não entram em contato com o escoamento, ficando restritos à área fechada da calha, não interferindo, desta forma, nas perdas de solo. Após ajustado o canal para o encaixe da calha esta foi colocada novamente sobre o canal, sendo então fixada por meio da estrutura cortante localizada na região de contato da calha com o solo. Nas laterais da estrutura cortante foram fixadas espumas (Figura 6) de modo a evitar que, com o escoamento, o solo perturbado pela fixação da calha entrasse em contato direto com este e favorecesse a perda de solo, prejudicando os resultados. Estando a calha posicionada procedeu-se a sua cravação com o auxílio de uma marreta, tomando-se cuidado para que não ocorresse a perturbação do leito do canal ou trincas na área exposta ao escoamento.

A declividade do canal foi obtida pela diferença de nível entre o início e o final da área exposta ao escoamento no interior da calha. A região onde ocorreu o escoamento apresentou seção retangular, uma vez que o fundo do canal apresentou-se praticamente plano no sentido transversal à calha em todos os testes.

Para evitar que a derivação da água provocasse a vibração da calha utilizou-se fixadores, os quais foram encaixados na parte superior e presos a pinos cravados no solo (Figura 6).

Foi instalado um suporte de madeira sobre a calha para a colocação de uma caixa d'água de 500 L, a qual serviu, além do controle de nível para manutenção da vazão constante durante o teste, de contrapeso para reduzir o risco de vazamento sob a calha. Na Figura 7 apresenta-se foto com a calha instalada e a caixa para controle do nível d'água.

Estando instaladas a calha e a caixa d'água para controle de nível foi conectada a esta caixa a tubulação de PVC (100 mm) vinda da caixa de fornecimento d'água, localizada em cota superior, conforme representado na Figura 8.

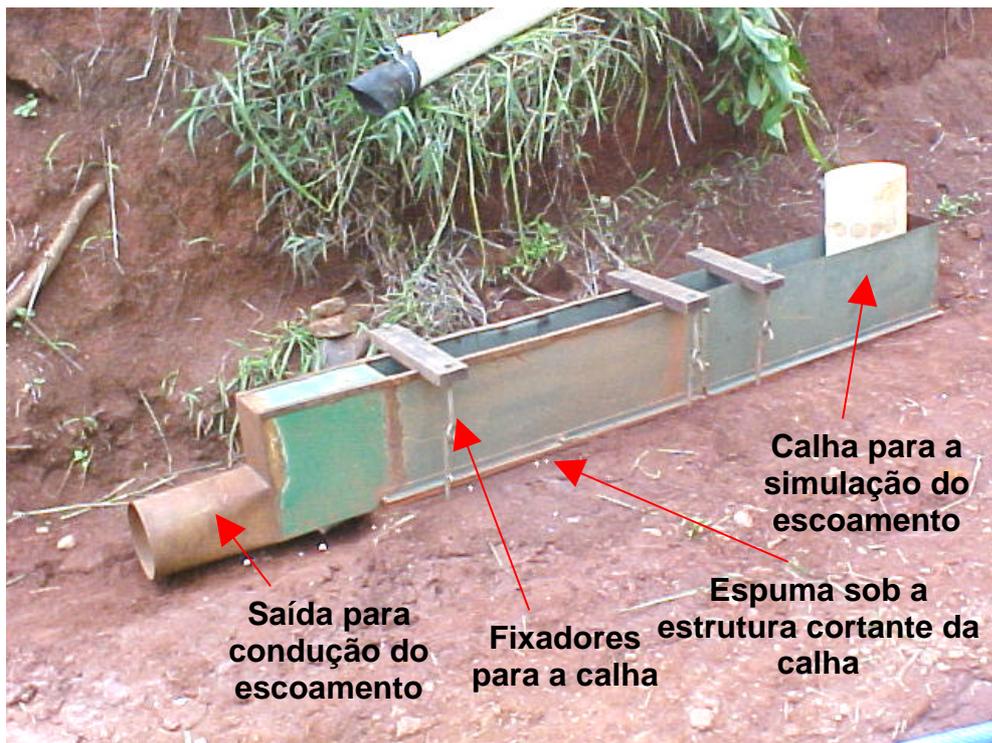


Figura 6. Calha para simulação do escoamento.

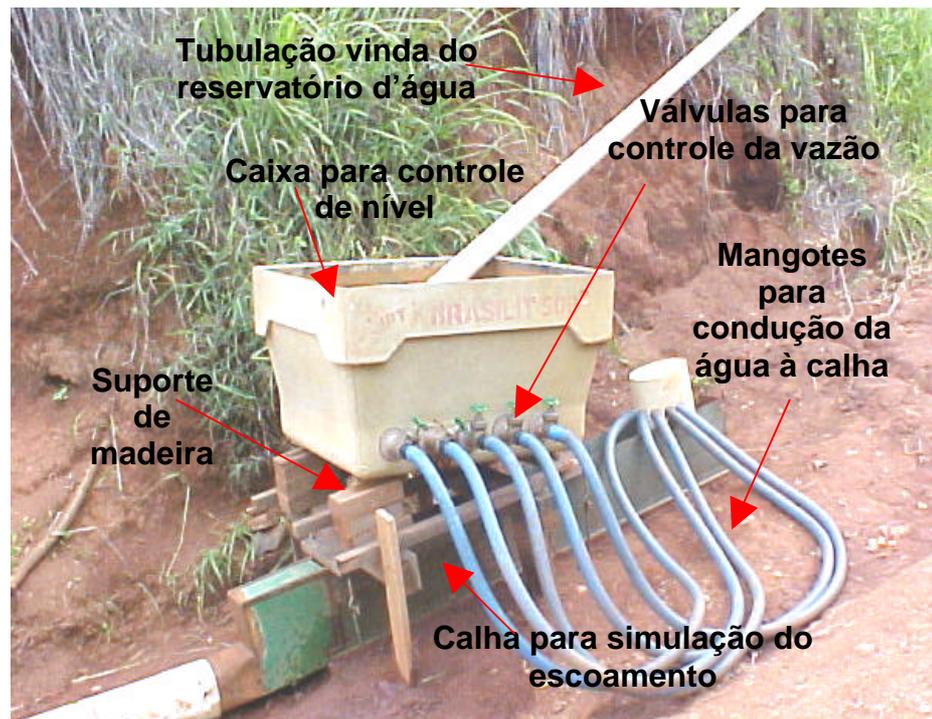


Figura 7. Instalação da calha ilustrando a caixa para controle de nível e o sistema de válvulas para mudança de vazão.



Figura 8. Caixa d'água para o fornecimento de água para a realização dos testes e tubulação de ligação à caixa para controle de nível.

Na saída da calha foram conectados tubos de PVC com diâmetro de 200 mm, os quais conduziram o escoamento coletado no canal, juntamente com os sedimentos, até um sistema de armazenamento, o qual foi recoberto com lona plástica, a qual, ao final de cada teste, foi lavada para retirada de qualquer sedimento que possa ter sido depositado (Figura 9). Os testes foram realizados de modo a simular o ramo ascendente do hidrograma de escoamento, sendo aplicadas cinco vazões crescentes, em seqüência, de $0,53 \text{ L s}^{-1}$, $1,07 \text{ L s}^{-1}$, $1,61 \text{ L s}^{-1}$, $2,15 \text{ L s}^{-1}$ e $2,69 \text{ L s}^{-1}$, as quais foram conduzidas para cinco diferentes reservatórios de coleta (Figura 10).

Em cada reservatório coletor foi armazenado o sedimento relativo a uma vazão, sendo a mudança do direcionamento da vazão provinda da tubulação para condução do escoamento. O momento da mudança de reservatório foi estabelecido por meio do lançamento de um flutuador na calha de escoamento em momento imediatamente anterior à mudança de vazão. Com a chegada do flutuador no sistema de armazenamento ocorria a mudança de direcionamento do escoamento para um novo reservatório de acumulação.

A água com os sedimentos foi conduzida do sistema de armazenamento por meio de sifões, para ser peneirada em peneira de malha de 0,074 mm (#200). Após ter sido coletado todo o sedimento com dimensões superiores a 0,074 mm, incluindo os agregados, os sedimentos foram separados de acordo com a vazão aplicada, sendo analisados de forma independente. O sedimento coletado na peneira de 0,074 mm foi armazenado em recipiente próprio para ser posteriormente conduzido ao laboratório para que pudesse ser desagregado e novamente filtrado na mesma peneira. Isto se fez necessário para eliminar os agregados, deixando apenas o material desagregado com dimensões superiores a 0,074 mm. Após o sedimento ser desagregado e filtrado novamente, o mesmo foi conduzido à estufa para ser secado. Na estufa, o sedimento permaneceu durante um período mínimo de 24 h à temperatura de 105° C , sendo posteriormente pesado em balança com precisão de 0,0001 g. Esta precisão foi necessária devido à pequena quantidade de material obtida em cada teste.



Figura 9. Sistema de condução da água da calha até o local para armazenamento do escoamento.

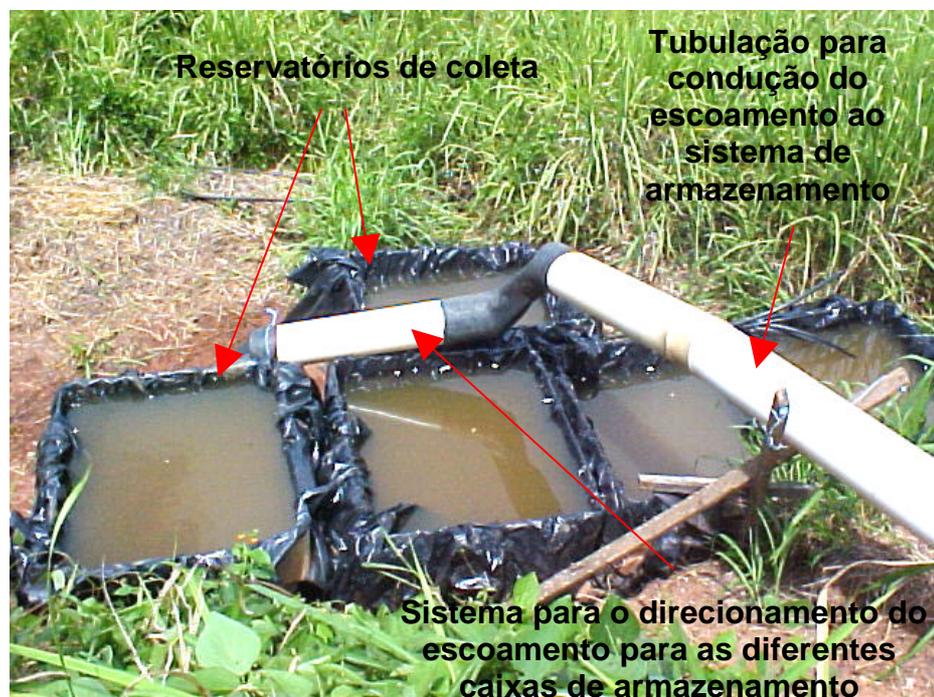


Figura 10. Sistema de armazenamento da água provinda da tubulação para a condução do escoamento.

Para cada horizonte do solo do canal de drenagem da estrada foi obtida a curva granulométrica, a partir da qual obteve-se o percentual de material retido na peneira 0,074 mm (Quadro 1). Com este valor procedeu-se, a partir da quantificação do solo erodido para cada vazão e retido na peneira 0,074 mm, à estimativa do total de solo erodido fazendo-se uma relação direta (regra de três) entre o total retido nesta peneira com o percentual que este representa no total obtido pela curva granulométrica.

Conhecendo-se a declividade, a vazão de entrada e a seção do canal, obteve-se a profundidade de escoamento utilizando a equação de Manning:

$$y = \left(\frac{Q n}{\sqrt{I} B} \right)^{\frac{3}{5}} \quad (1)$$

em que

y = profundidade de escoamento, m;

n = coeficiente de rugosidade do canal, $s \text{ m}^{-1/3}$;

Q = vazão, m^3s^{-1} ;

I = declividade, m m^{-1} ; e

B = base do canal, m.

A tensão cisalhante associada ao escoamento foi determinada pela equação

$$\tau_E = \frac{\gamma R_h S}{0,102} \quad (2)$$

em que

τ_E = tensão cisalhante associada ao escoamento, Pa;

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

R_h = raio hidráulico, m; e

S = declividade do canal, m m^{-1} .

O valor do R_h foi substituído, na equação 2, pela profundidade de escoamento (y), em m.

3.3.3. Análise dos dados

Os dados de perda de solo obtidos nos testes de campo foram plotados em gráficos relacionando a perda de solo ($\text{g cm}^{-2} \text{min}^{-1}$) versus tensão aplicada (Pa), sendo feito o ajuste de uma equação a este conjunto de pontos. A tensão crítica de cisalhamento do solo foi aquela para a qual a perda de solo foi nula. A erodibilidade do solo foi obtida pela inclinação da linha de tendência. Para a determinação da erodibilidade e da tensão crítica de cisalhamento do solo as perdas de solo pertinentes a uma dada tensão foram acumuladas com as perdas obtidas nas tensões anteriores.

Na Figura 11 estão representados de forma esquemática, a tensão crítica de cisalhamento do solo e a sua erodibilidade.

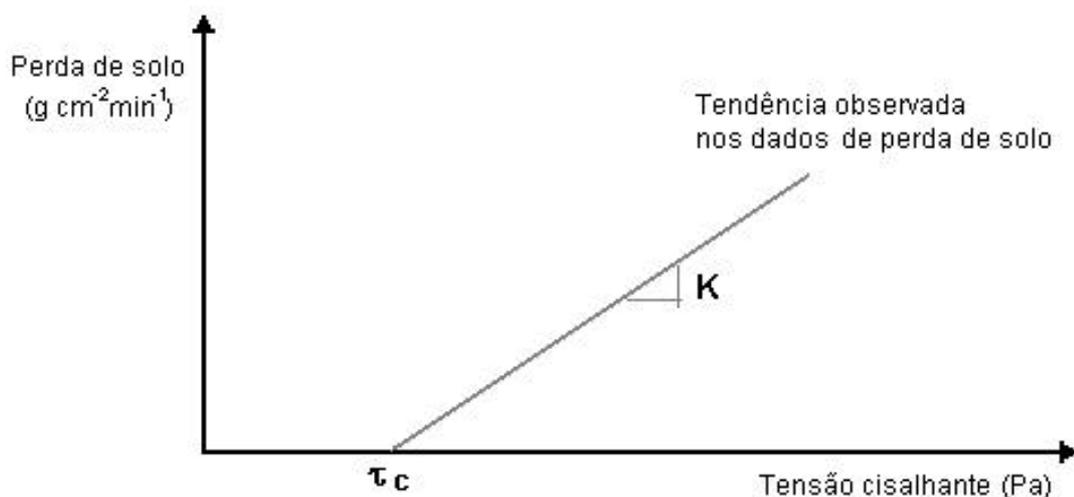


Figura 11. Representação esquemática da forma de obtenção da tensão crítica de cisalhamento e da erodibilidade do solo com base nos testes realizados.

3.4. Experimentos de laboratório

3.4.1. Descrição do equipamento

O aparelho utilizado nos experimentos de laboratório (Figura 12) foi uma adaptação do aparelho de Inderbitzen, sendo que foram construídos quatro amostradores quadrados (Figura 13) com diâmetro interno de 137 mm e altura de 49 mm. A versão original do aparelho de Inderbitzen apresenta amostradores cilíndricos, sendo que teste preliminares realizados com estas amostras evidenciaram perda de solo entre a borda do amostrador e o solo quando ensaiadas no Inderbitzen (FRAGASSI, 2001). Dessa forma, utilizou-se nesse projeto amostradores em substituição aos amostradores circulares.

Para o encaixe do amostrador quadrado foi necessária a construção de uma nova rampa (Figura 14). O equipamento possui um sistema articulado que permite variar a inclinação da rampa entre 0° e 60° (Figura 15), sendo que para o nivelamento da superfície da amostra com a superfície da rampa existem quatro parafusos para o ajuste do amostrador (Figura 14).



Figura 12. Aparelho de Inderbitzen modificado.

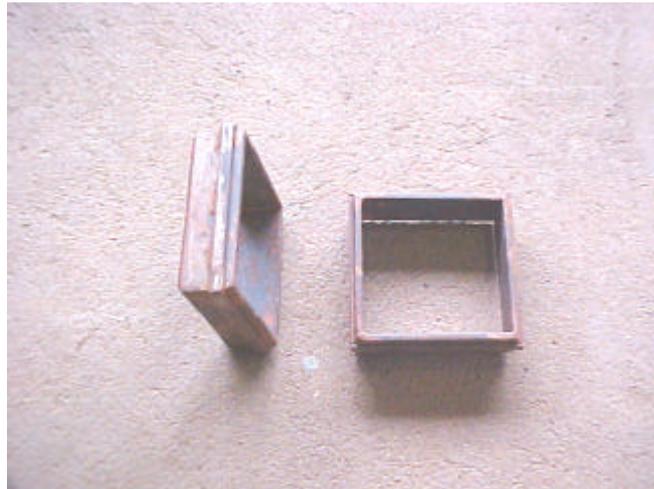


Figura 13. Amostrador quadrado utilizado nos testes.

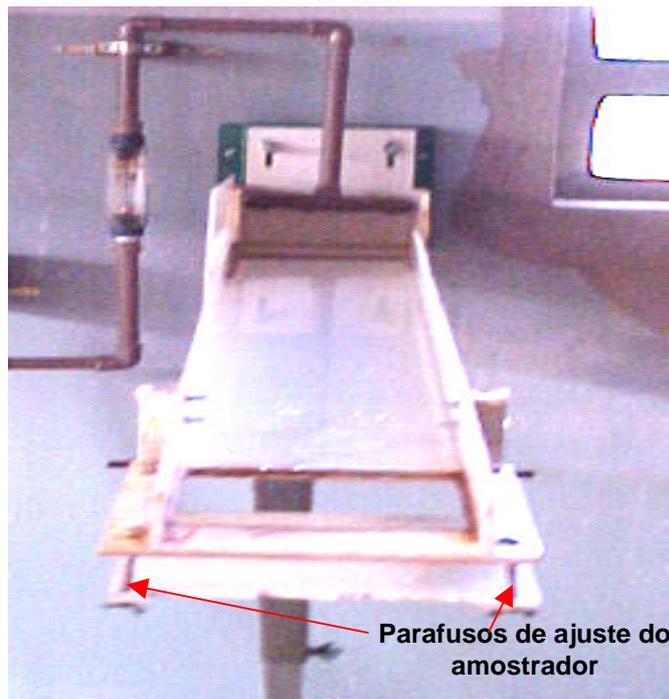


Figura 14. Adaptação feita na rampa para o encaixe do amostrador quadrado e os respectivos parafusos de ajuste.



Figura 15. Ilustração do sistema articulado para ajuste da inclinação da rampa.

O controle da vazão foi feito por intermédio de uma válvula, sendo a vazão mensurada por meio de um rotâmetro.

O reservatório de água que alimenta o equipamento foi projetado de tal forma que variações do nível d'água não interfiram na vazão do ensaio. O reservatório é constituído de um ladrão d'água e de duas válvulas, uma de entrada e a outra de saída d'água que, quando ajustadas, asseguram uma constância na vazão.

3.4.2. Preparo das amostras de solo

3.4.2.1. Amostras de solo indeformadas

Inicialmente foi obtida a densidade do solo no canal da estrada no momento em que foram retiradas as amostras de solo nos amostradores quadrados, cujos valores foram de $1,45 \text{ g cm}^{-3}$ para o horizonte A, de $1,40 \text{ g}$

cm^{-3} para o horizonte B, de $1,42 \text{ g cm}^{-3}$ para o horizonte $C_{(\text{residual maduro})}$ e $1,58 \text{ g cm}^{-3}$ para o horizonte $C_{(\text{residual jovem})}$.

Para a obtenção das amostras foram utilizados canivete e estilete para a retirada do solo ao redor do amostrador quadrado para, dessa forma, possibilitar a inserção do solo no amostrador com maior facilidade. Após a retirada das amostras estas foram levadas para o laboratório e embaladas em saco plástico a fim de reduzir a perda de umidade que dispunham no campo, o que alteraria as propriedades físicas da amostra.

Para uniformizar as condições de umidade do solo ensaiado todos os testes foram realizados após as amostras atingirem umidade próxima à saturação.

Na fase de umedecimento das amostras o procedimento adotado foi o de raspar a superfície e, em seguida, protegê-la com papel filtro, de forma a não desagregá-la ou desestruturá-la. Em seguida acoplou-se o amostrador quadrado à base da rampa do Inderbitzen e umedeceu-se a amostra com a aplicação lenta e gradual de água durante 15 min.

3.4.2.2. Amostras de solo deformadas

As amostras de solo deformadas retiradas foram secas ao ar, destorroadas e passadas em peneira com malha de 2 mm, obtendo-se a dita terra fina seca ao ar (TFSA). Com o propósito de obtenção de amostras compactadas com a mesma densidade do solo do campo, calculou-se a massa de solo a ser adicionada no amostrador quadrado para cada horizonte a partir do volume do amostrador e dos valores de densidade do solo citados anteriormente.

A determinação do volume de água a ser acrescentado nas amostras de solo foi feita de forma que o solo atingisse a umidade ótima de compactação correspondente ao Ensaio de Proctor (ABNT).

As umidades ótimas de compactação obtidas foram de 19,4 % para o horizonte A, 21,5 % para o horizonte B, 16,3 % para o horizonte $C_{(\text{residual maduro})}$ e 17,6 % para o horizonte $C_{(\text{residual jovem})}$. A partir desses valores de

umidade calculou-se o volume de água a ser acrescentado nas amostras de solo compactadas no amostrador quadrado.

Com a massa adequada de solo de cada horizonte colocada no amostrador, realizou-se a compactação das amostras por meio de uma prensa representada na Figura 16. O processo de compactação foi finalizado no momento em que a placa de aço acoplada ao pistão encontrou a superfície do amostrador quadrado.



Figura 16. Prensa utilizada para a compactação do solo no amostrador quadrado.

3.4.3. Realização dos testes

Foram retiradas 10 amostras de solo indeformadas no campo para cada horizonte, totalizando 40 amostras estudadas. Para as amostras deformadas utilizou-se o mesmo número de amostras, totalizando 80 ensaios realizados no Inderbitzen.

A vazão utilizada em todos os testes realizados foi de 155 mL s^{-1} ($9,3 \text{ L min}^{-1}$) sendo as declividades usadas de 2, 5, 7, 10 e 15 %. Para cada declividade foi utilizada uma amostra diferente, totalizando cinco amostras utilizadas para cada horizonte. Como foram realizadas duas repetições, 10 amostras diferentes foram utilizadas para cada horizonte. Portanto, tendo-se 10 amostras diferentes para cada um dos quatro horizontes, foram necessárias, para a realização do experimento, 40 amostras de solo indeformadas e 40 amostras de solo deformadas.

Antes de iniciar o ensaio limpou-se com álcool a rampa do equipamento a fim de diminuir a interferência de substâncias gordurosas no escoamento. Ajustou-se também a vazão e a declividade, assim como uma proteção de plástico colocada sobre a amostra. Preparada a peneira para a coleta do material carregado pelo escoamento superficial, retirou-se a proteção de plástico e iniciou-se o ensaio.

O material foi coletado pela peneira com 0,074 mm de abertura, nos intervalos pré-definidos de 5, 10, 15 e 30 minutos. Após o término do ensaio, os agregados foram quebrados e o material foi lavado de forma que restasse apenas areia, a qual foi pesada. Em seguida foi levado à estufa e depois de seco foi pesado. Com o peso da areia estimou-se a perda de solo a partir da curva granulométrica por meio do percentual retido na peneira n^o 200, utilizando regra de três.

Na Figuras 17 e 18 apresentam-se as condições da amostra de solo indeformada do horizonte A durante e após o ensaio de Inderbitzen, respectivamente.

O material que passa na peneira 200 representa uma fração expressiva dos solos analisados. Deste modo, os resultados foram plotados sob a forma de perda de solo ponderada pela fração maior que 0,074 mm. Estas frações são provenientes das curvas granulométricas obtidas.



Figura 17. Condições da amostra de solo durante o ensaio de Inderbitzen.



Figura 18. Condições da amostra após o ensaio de Inderbitzen.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Testes de campo

Nas Figuras 19 a 22 são apresentadas, para os horizontes A, B, $C_{(\text{residual maduro})}$ e $C_{(\text{residual jovem})}$, respectivamente, as curvas e equações ajustadas referentes aos valores de perda de solo acumulada em função das tensões aplicadas com o simulador de escoamento. A análise destas figuras permite evidenciar um aumento linear da perda de solo acumulada com o incremento da tensão cisalhante. Os dados obtidos nos testes de campo estão apresentados no Apêndice C.

Na Figura 19 (horizonte A) evidencia-se, para as três repetições realizadas, valores de erodibilidade de $K_{1 \text{ rep.}} = 0,00021 \text{ g cm}^{-2} \text{ min}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$, $K_{2 \text{ rep.}} = 0,00014 \text{ g cm}^{-2} \text{ min}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$ e $K_{3 \text{ rep.}} = 0,00013 \text{ g cm}^{-2} \text{ min}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$, sendo a erodibilidade obtida a partir da reta ajustada com os valores médios das três repetições realizadas para o horizonte A igual a $0,00016 \text{ g cm}^{-2} \text{ min}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$.

A tensão crítica de cisalhamento foi obtida pela intersecção do prolongamento das retas ajustadas com o eixo das abcissas sendo, para o primeiro e o terceiro testes os valores obtidos de 2,7 e 5,4 Pa, respectivamente. A tensão crítica pertinente à reta ajustada com os valores médios das três repetições foi igual a 1,5 Pa. A tensão crítica de cisalhamento do solo para o segundo teste foi considerada indeterminada, tendo em vista o fato de que a intersecção do prolongamento da reta ajustada com o eixo das abcissas implicou em um valor de tensão crítica de cisalhamento negativa, condição inaceitável do ponto de vista físico e motivo pelo qual considerou-se esta indeterminada. Os coeficientes de determinação obtidos para as equações ajustadas foram todos iguais ou su-

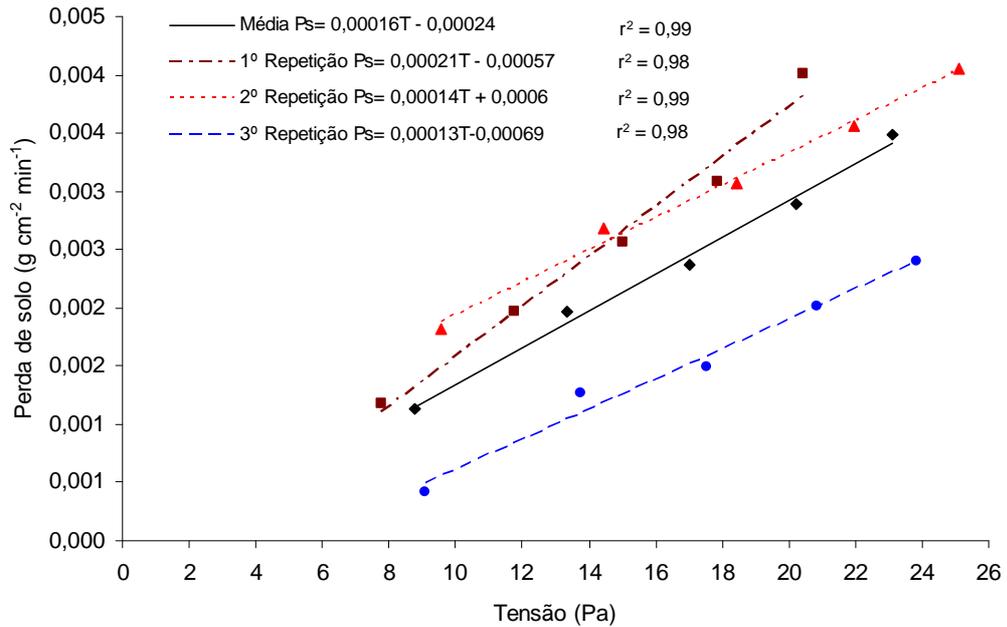


Figura 19. Perdas de solo acumuladas para diferentes tensões aplicadas com o simulador de escoamento para o horizonte A, correspondentes aos três ensaios realizados e à condição média.

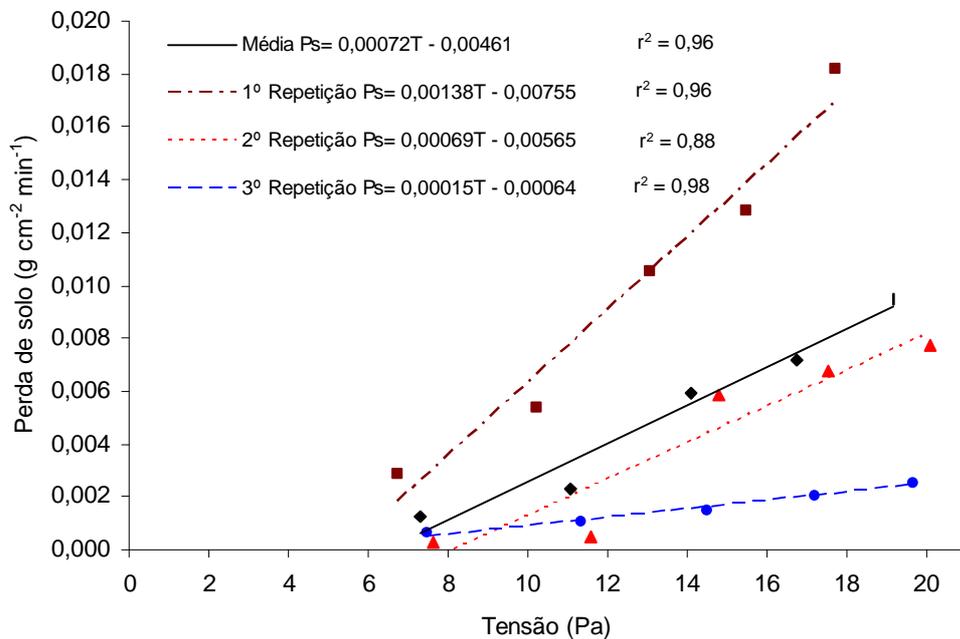


Figura 20. Perdas de solo acumuladas para diferentes tensões aplicadas com o simulador de escoamento para o horizonte B, correspondentes aos três ensaios realizados e à condição média.

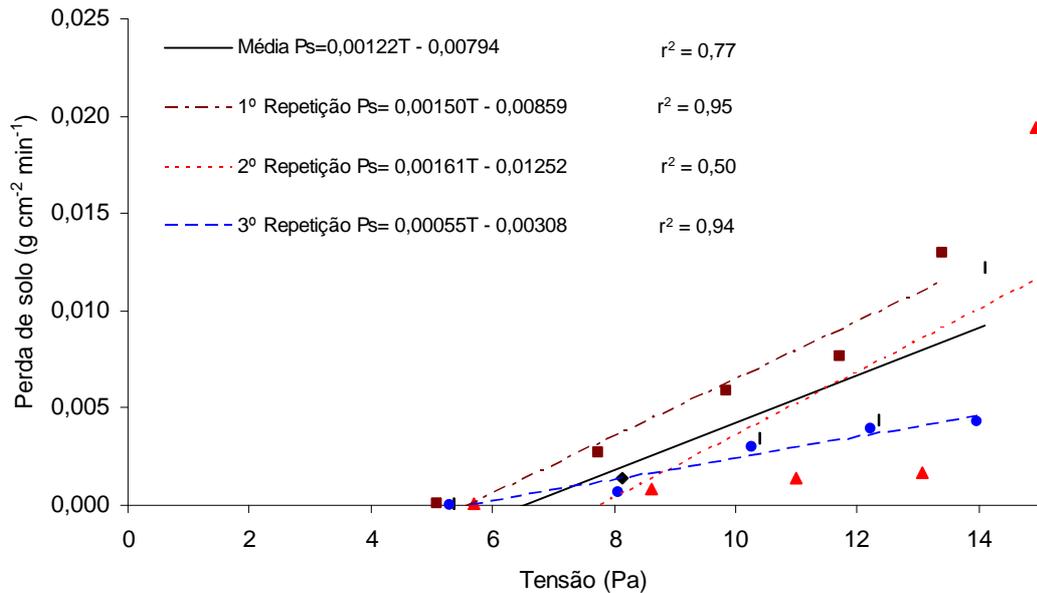


Figura 21. Perdas de solo acumuladas para diferentes tensões aplicadas com o simulador de escoamento para o horizonte C_(residual maduro) correspondentes aos três ensaios realizados e à condição média.

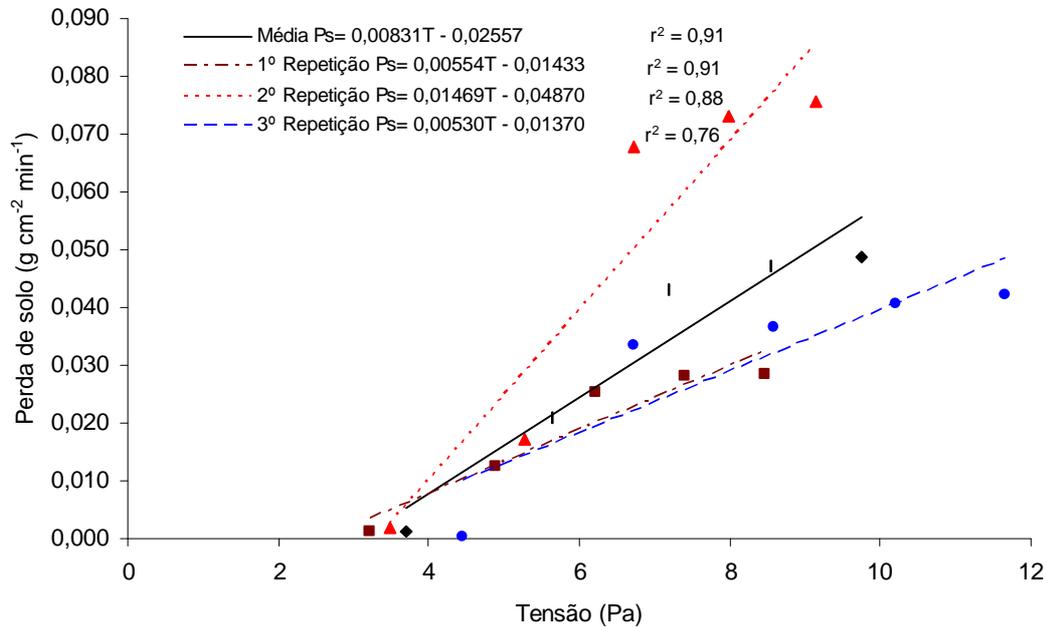


Figura 22. Perdas de solo acumuladas para diferentes tensões aplicadas com o simulador de escoamento para o horizonte C_(residual jovem) correspondentes aos três ensaios realizados e à condição média.

periores a 0,98.

Na Figura 20 observa-se, para o horizonte B, uma variabilidade maior da erodibilidade do que a observada para o horizonte A, sendo os valores de erodibilidade obtidos iguais a: $K_{1 \text{ rep.}} = 0,00138 \text{ g cm}^{-2} \text{ min}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$, $K_{2 \text{ rep.}} = 0,00069 \text{ g cm}^{-2} \text{ min}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$ e $K_{3 \text{ rep.}} = 0,00015 \text{ g cm}^{-2} \text{ min}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$. A erodibilidade média obtida para o horizonte B foi igual a $0,00072 \text{ g cm}^{-2} \text{ min}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$, ou seja, 4,5 vezes maior que a do horizonte A. A tensão crítica de cisalhamento para o horizonte B variou de 4,5 a 8,3 Pa (média de 6,5 Pa). Os coeficientes de determinação foram iguais ou superiores a 0,96, exceto para o segundo teste (igual a 0,88).

A análise comparativa do comportamento dos horizontes A e B permite evidenciar que o horizonte B apresenta menor resistência ao desprendimento de partículas provocado pelo escoamento do que o horizonte A, possivelmente pela presença de uma maior coesão entre as partículas, o que lhe atribui uma maior resistência ao processo erosivo, sendo que o horizonte B apresenta agregados que se desprendem mais facilmente com a aplicação das tensões cisalhantes decorrentes do escoamento superficial.

Na Figura 21, referente ao horizonte $C_{(\text{residual maduro})}$, verificou-se também uma elevada variabilidade dos valores de erodibilidade nas três repetições realizadas ($K_{1 \text{ rep.}} = 0,00150 \text{ g cm}^{-2} \text{ min}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$, $K_{2 \text{ rep.}} = 0,00161 \text{ g cm}^{-2} \text{ min}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$ e $K_{3 \text{ rep.}} = 0,00055 \text{ g cm}^{-2} \text{ min}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$), sendo a erodibilidade correspondente à reta ajustada às médias das três repetições igual a $0,00122 \text{ g cm}^{-2} \text{ min}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$. A tensão crítica de cisalhamento variou de 5,6 a 7,8 Pa (média de 6,7 Pa). Os coeficientes de determinação foram, em geral, inferiores aos testes realizados para os horizontes A e B, sendo o coeficiente de determinação para a segunda repetição, igual a 0,50 o que fez com que, para os dados médios, o coeficiente de determinação fosse igual a 0,77.

A análise comparativa dos valores de erodibilidade média entre os horizontes A, B e $C_{(\text{residual maduro})}$ permite verificar um aumento de 7,6 vezes da erodibilidade média do horizonte $C_{(\text{residual maduro})}$ em relação ao horizonte A referente aos testes de campo e de 1,7 vezes em relação ao horizonte B. A elevada porcentagem de areia existente no horizonte $C_{(\text{residual maduro})}$ é um dos fatores que favorecem à maior erodibilidade observada neste horizonte em

relação aos horizontes A e B, uma vez que os solos arenosos apresentam menor coesão, o que acarreta, conseqüentemente, uma menor resistência ao processo erosivo.

A erodibilidade média obtida para o horizonte $C_{(residual\ jovem)}$ foi de $0,00831\text{ g cm}^{-2}\text{ min}^{-1}\text{ Pa}^{-1}$ (Figura 22), sendo que houve também para esse horizonte uma expressiva variação dos valores de erodibilidade entre as três repetições realizados ($K_{1\ rep.} = 0,00554\text{ g cm}^{-2}\text{ min}^{-1}\text{ Pa}^{-1}$, $K_{2\ rep.} = 0,01469\text{ g cm}^{-2}\text{ min}^{-1}\text{ Pa}^{-1}$ e $K_{3\ rep.} = 0,00530\text{ g cm}^{-2}\text{ min}^{-1}\text{ Pa}^{-1}$). A tensão crítica de cisalhamento do solo variou de 2,6 a 3,4 Pa (média de 3,0 Pa). O coeficiente de determinação correspondente à reta ajustada as médias foi de 0,91, embora na terceira repetição este tenha sido de apenas 0,76. O horizonte $C_{(residual\ jovem)}$ apresenta uma elevada taxa de desprendimento de partículas de solo devido às elevadas porcentagens de areia e silte que possui, e que lhe atribuem uma baixa coesão entre as partículas e, conseqüentemente, uma menor resistência ao desprendimento das partículas de solo.

Na Figura 23 são apresentadas, para os horizontes A, B, $C_{(residual\ maduro)}$ e $C_{(residual\ jovem)}$, as curvas e equações ajustadas referentes aos valores médios de perda de solo acumulada em função das tensões aplicadas nos testes de campo.

A análise dos resultados destes testes indica que o horizonte $C_{(residual\ jovem)}$ foi aquele com menor resistência ao processo erosivo, seguido pelos horizontes $C_{(residual\ maduro)}$, B e A. O horizonte $C_{(residual\ jovem)}$ teve erodibilidade 51,9 vezes maior que o horizonte A; 11,6 vezes maior que o B e 6,9 vezes maior que o $C_{(residual\ maduro)}$. As diferenças entre as tensões críticas de cisalhamento, entretanto, foram bem inferiores àquelas observadas entre os valores de erodibilidade, oscilando entre 1,5 Pa (horizonte A) e 6,8 Pa (horizonte $C_{(residual\ maduro)}$).

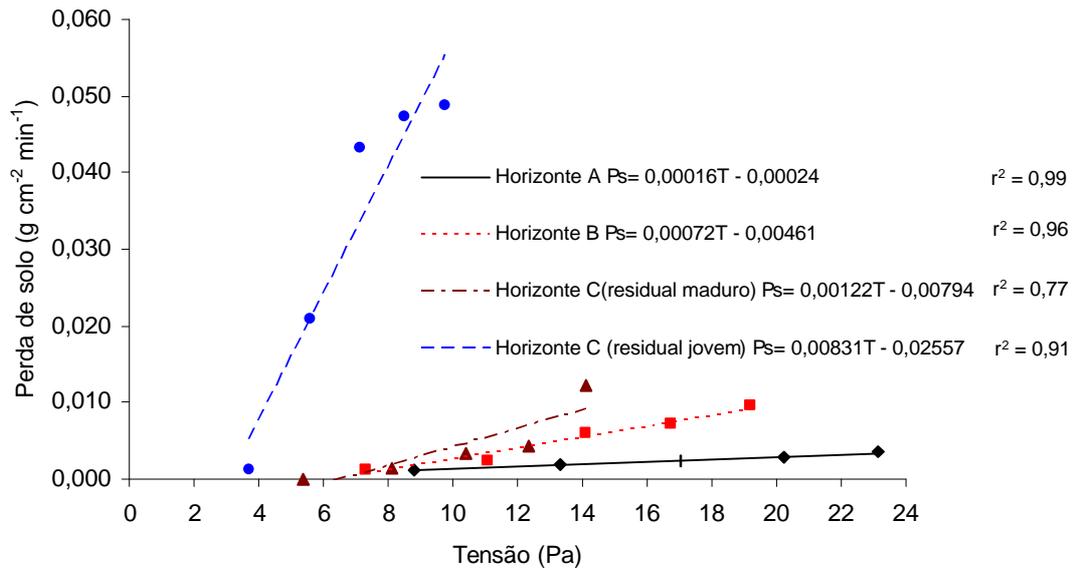


Figura 23. Perdas de solo médias para diferentes tensões aplicadas com o simulador de escoamento (horizontes A, B, C_(residual maduro) e C_(residual jovem)).

4.2. Testes de Inderbitzen

4.2.1. Amostras indeformadas

Nas Figuras 24 a 27 são apresentadas, para os horizontes A, B, C_(residual maduro) e C_(residual jovem), respectivamente, as curvas e equações ajustadas referentes aos valores de perda de solo em função das tensões aplicadas com o equipamento de Inderbitzen usando amostras indeformadas. Analisando estas figuras pode-se verificar, tal como nos ensaios de campo, um aumento linear da perda de solo com o aumento da tensão cisalhante. Os dados relativos aos ensaios de Inderbitzen feitos com as amostras indeformadas estão apresentados no Apêndice D.

Na Figura 24 observa-se, para o horizonte A, valores de erodibilidade correspondentes a $K_{1rep.} = 0,00873 \text{ g cm}^{-2} \text{ min}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$ e $K_{2rep.} = 0,01325 \text{ g cm}^{-2} \text{ min}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$. A erodibilidade média obtida foi igual a $0,01099 \text{ g cm}^{-2} \text{ min}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$, sendo esta 68,7 vezes maior que a erodibilidade média encontrada nos testes de campo para o mesmo horizonte. A tensão crítica

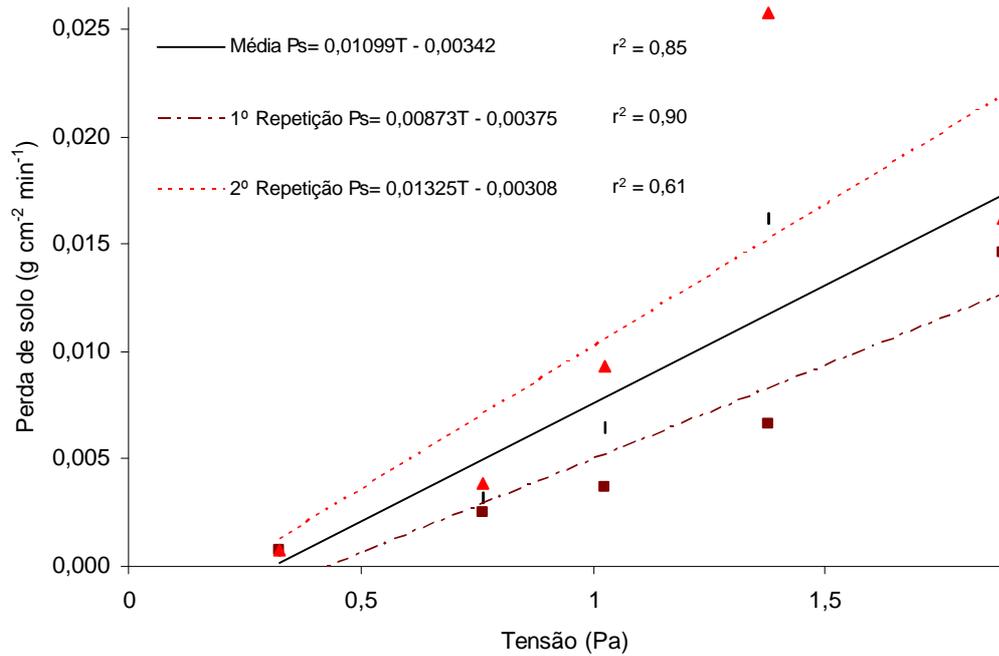


Figura 24. Perdas de solo para diferentes tensões aplicadas nos testes realizados com o uso do Inderbitzen e com amostras indeformadas para o horizonte A nos dois ensaios realizados e para a condição média.

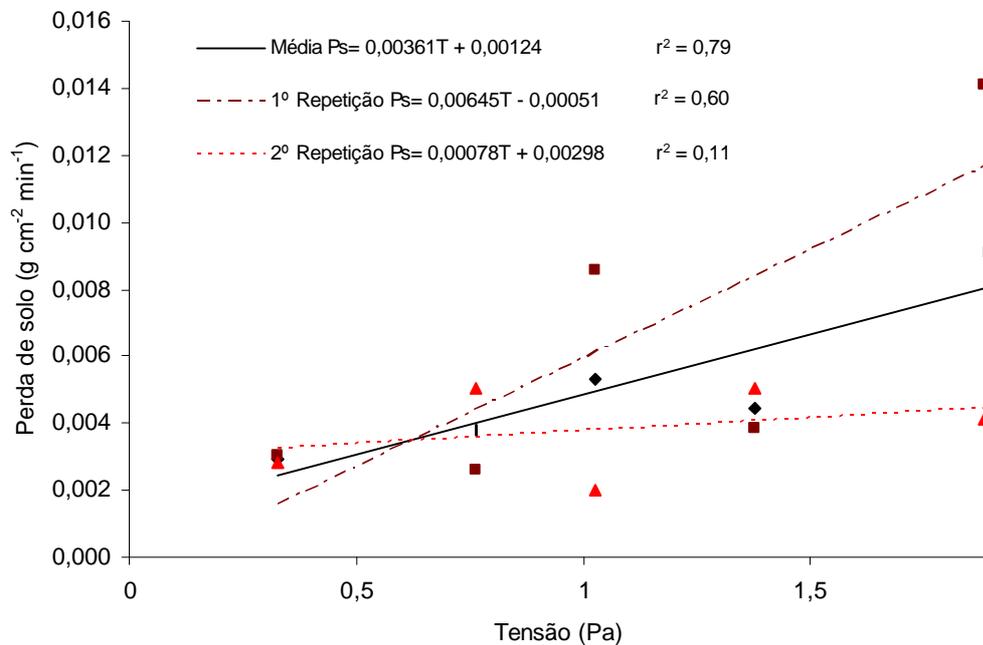


Figura 25. Perdas de solo para diferentes tensões aplicadas nos testes realizados com o uso do Inderbitzen e com amostras indeformadas para o horizonte B nos dois ensaios realizados e para a condição média.

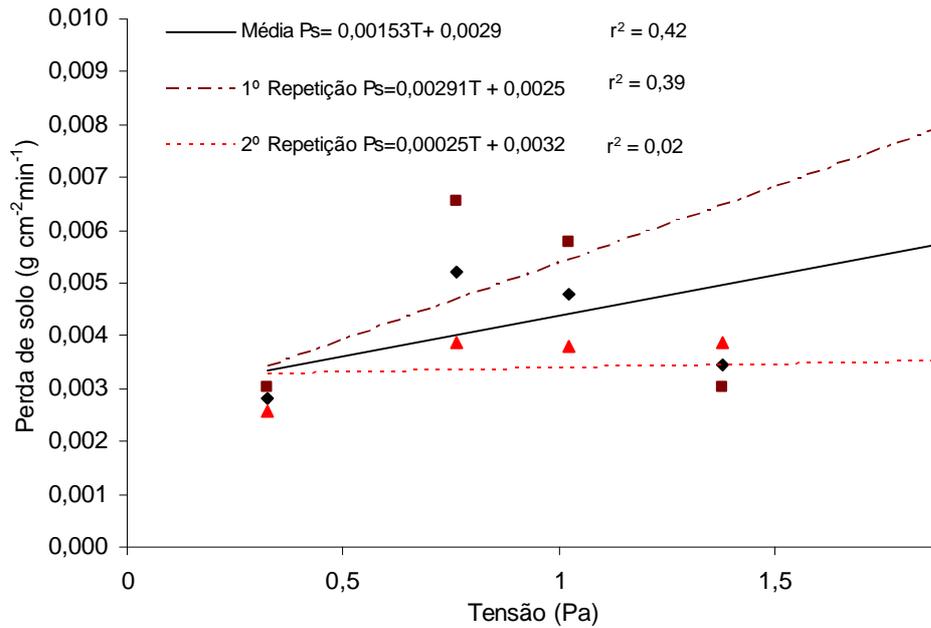


Figura 26. Perdas de solo para diferentes tensões aplicadas nos testes realizados com o uso do Inderbitzen e com amostras indeformadas para o horizonte C_(residual maduro) nos dois ensaios realizados e para a condição média.

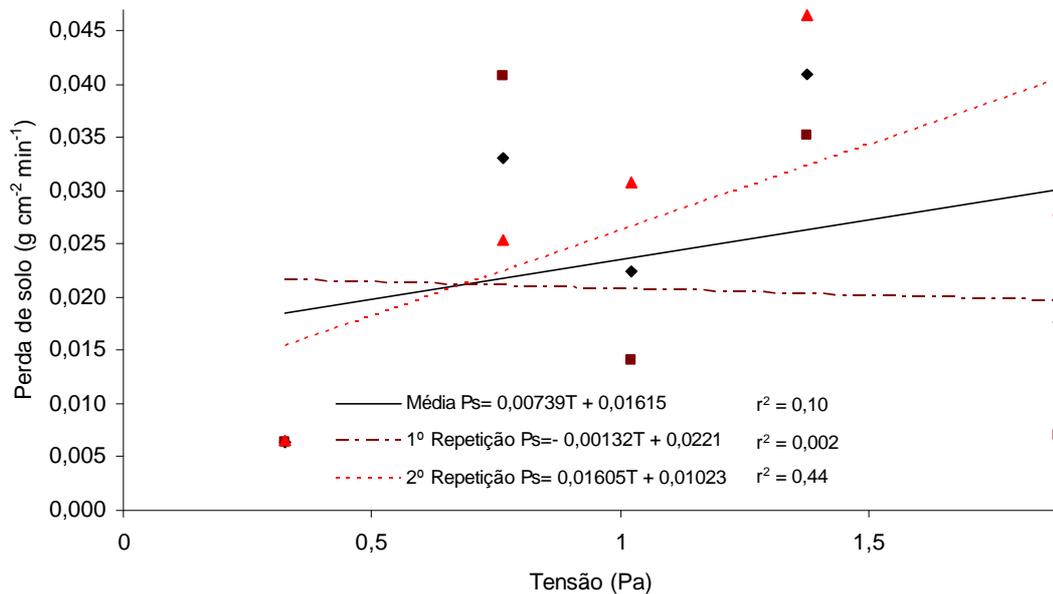


Figura 27. Perdas de solo para diferentes tensões aplicadas nos testes realizados com o uso do Inderbitzen e com amostras indeformadas para o horizonte C_(residual jovem) nos dois ensaios realizados e para a condição média.

de cisalhamento do solo para as duas repetições realizadas foi de 0,24 e 0,44 Pa (média de 0,32 Pa) e os coeficientes de determinação foram superiores a 0,60. Evidencia-se, portanto, uma diferença expressiva entre o valor de erodibilidade encontrado no teste de campo e o obtido no teste de Inderbitzen realizado com a amostra indeformada, o que decorre principalmente do nivelamento da superfície da amostra realizado no teste feito com a amostra indeformada, o qual acarreta uma quebra dos planos de resistência da superfície da amostra.

Na Figura 25 verifica-se, para o horizonte B, uma grande variação entre os valores de erodibilidade, iguais a $K_{1 \text{ rep.}} = 0,00645 \text{ g cm}^{-2} \text{ min}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$ e $K_{2 \text{ rep.}} = 0,00078 \text{ g cm}^{-2} \text{ min}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$, sendo a erodibilidade média obtida igual a $0,00361 \text{ g cm}^{-2} \text{ min}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$. A erodibilidade média para o horizonte A nos testes de Inderbitzen realizados com amostras indeformadas foi 3,0 vezes maior em relação ao horizonte B, enquanto nos testes de campo esta foi 4,5 vezes menor. As tensões críticas de cisalhamento do solo obtidas a partir da reta ajustada com os valores médios e para a segunda repetição foram indeterminadas, enquanto que para a primeira repetição foi de 0,08 Pa. O coeficiente de determinação obtido para a reta ajustada aos dados da primeira repetição foi de 0,60, da segunda repetição foi de 0,11 e da média de 0,79, sendo que os baixos valores dos coeficientes de determinação obtidos, assim como os valores de tensão crítica de cisalhamento indeterminados, que foram estimados para o segundo teste e para a média, estão relacionados ao comportamento evidenciado em certas repetições em que, para as maiores tensões cisalhantes, as perdas de solo obtidas foram menores do que nas menores tensões, fato decorrente da grande variação evidenciada entre as amostras ensaiadas e a qual está associada à grande variabilidade espacial que existe para o solo no campo. Assim sendo, mudanças no procedimento experimental são recomendadas a fim de evitar a obtenção de tensões críticas de cisalhamento negativas e visando a melhoria dos coeficientes de determinação das retas ajustadas aos dados experimentais.

Na Figura 26 observa-se, para o horizonte C_(residual maduro), valores de erodibilidade iguais a $K_{1 \text{ rep.}} = 0,00291 \text{ g cm}^{-2} \text{ min}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$ e $K_{2 \text{ rep.}} = 0,00025 \text{ g cm}^{-2} \text{ min}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$, sendo a erodibilidade média obtida para este horizonte igual

a $0,00153 \text{ g cm}^{-2} \text{ min}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$, que é 2,3 vezes menor que a erodibilidade média do horizonte B e 7,1 vezes menor que a do horizonte A, tendo havido um aumento da erodibilidade para este horizonte de 1,3 vezes em relação aos testes de campo.

As tensões críticas de cisalhamento do solo para as duas repetições realizadas e, conseqüentemente para a média, foram indeterminadas. Os coeficientes de determinação foram de 0,02 para a primeira repetição, de 0,39 para a segunda repetição e de 0,42 para os dados médios. Os valores de tensões de cisalhamento indeterminados encontrados e os baixos coeficientes de regressão obtidos reiteram a necessidade de ajustes experimentais já descrita anteriormente.

Os problemas experimentais descritos nos ensaios realizados nos horizontes B e $C_{(\text{residual maduro})}$ tornam-se mais evidentes ainda no horizonte $C_{(\text{residual jovem})}$ (Figura 27) na qual evidencia além de valores indeterminados para a tensão crítica de cisalhamento tanto para a primeira repetição como para a segunda repetição e a média e dos baixos valores dos coeficientes de determinação em todas as repetições, também valor de erodibilidade negativo para a primeira repetição, comportamento inexplicável do ponto de vista físico.

Na Figura 28 são apresentadas, para os horizontes A, B, $C_{(\text{residual maduro})}$ e $C_{(\text{residual jovem})}$, as curvas e equações ajustadas referentes aos valores médios de perda de solo em função das tensões aplicadas obtidas nos testes de Inderbitzen com amostras indeformadas. Evidencia-se, nesta figura, que o horizonte A apresentou o maior valor de erodibilidade média entre os horizontes estudados, sendo este 3,0 vezes maior que a erodibilidade média encontrada para o horizonte B, de 1,5 vezes maior que o evidenciado para o $C_{(\text{residual jovem})}$ e de 7,2 vezes maior que a do $C_{(\text{residual maduro})}$.

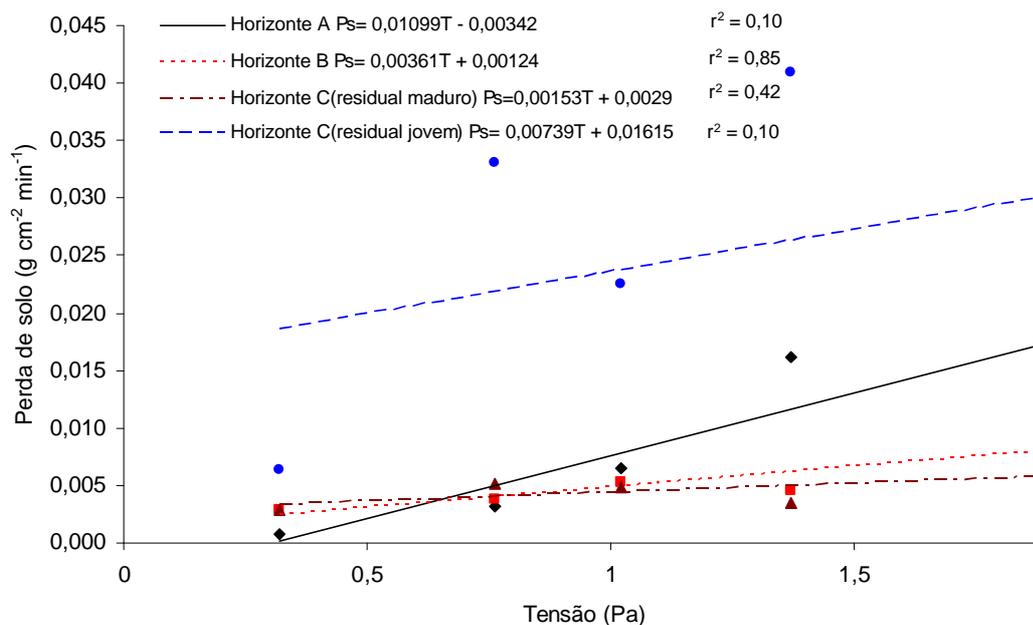


Figura 28. Perdas de solo médias para diferentes tensões aplicadas nos testes realizados com o uso do Inderbitzen e com amostras indeformadas para os horizontes A, B, C_(residual maduro) e C_(residual jovem).

4.2.2. Amostras deformadas

Nas Figuras 29 a 32 são apresentadas, para os horizontes A, B, C_(residual maduro) e C_(residual jovem), as curvas e equações ajustadas referentes aos valores de perda de solo em função das tensões aplicadas com o equipamento de Inderbitzen usando amostras compactadas no laboratório com umidade ótima até que fosse obtida a densidade do solo igual à encontrada no canal da estrada. Analisando estas figuras observa-se, tal como nos testes de campo e nos ensaios de Inderbitzen com amostras indeformadas, um aumento linear da perda de solo com o aumento da tensão cisalhante. Os dados relativos aos ensaios de Inderbitzen feitos com as amostras deformadas estão apresentados no Apêndice E.

Na Figura 29 constata-se, para o horizonte A, uma variabilidade entre os valores de erodibilidade para as duas repetições que pode ser considerada pequena ($K_{1\text{ rep.}} = 0,17957 \text{ g cm}^{-2} \text{ min}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$ e $K_{2\text{ rep.}} = 0,14601 \text{ g}$

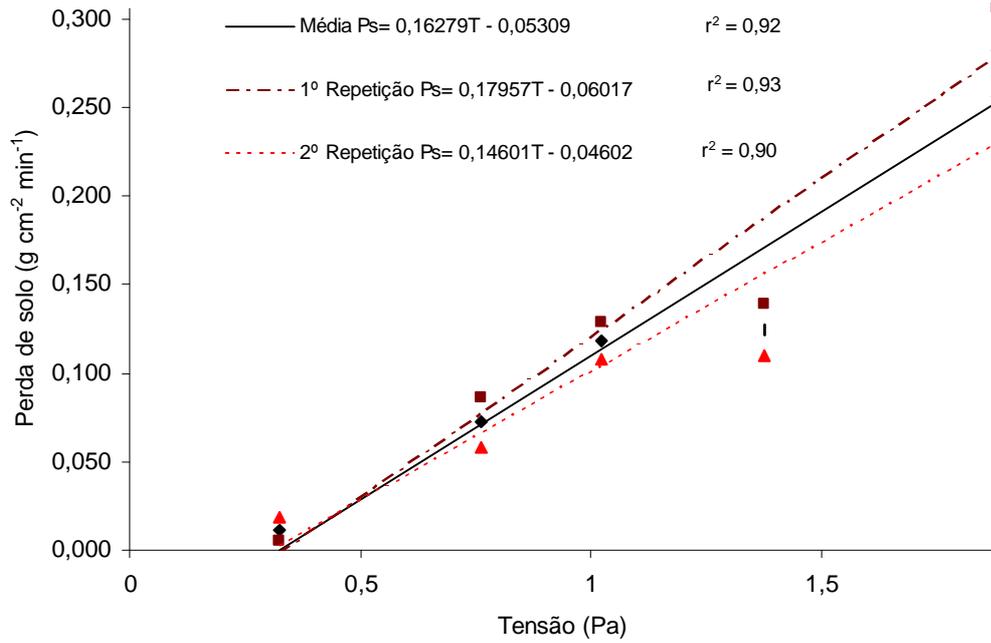


Figura 29. Perdas de solo para diferentes tensões aplicadas nos testes realizados com o uso do Inderbitzen e com amostras deformadas para o horizonte A nos dois ensaios realizados e para a condição média.

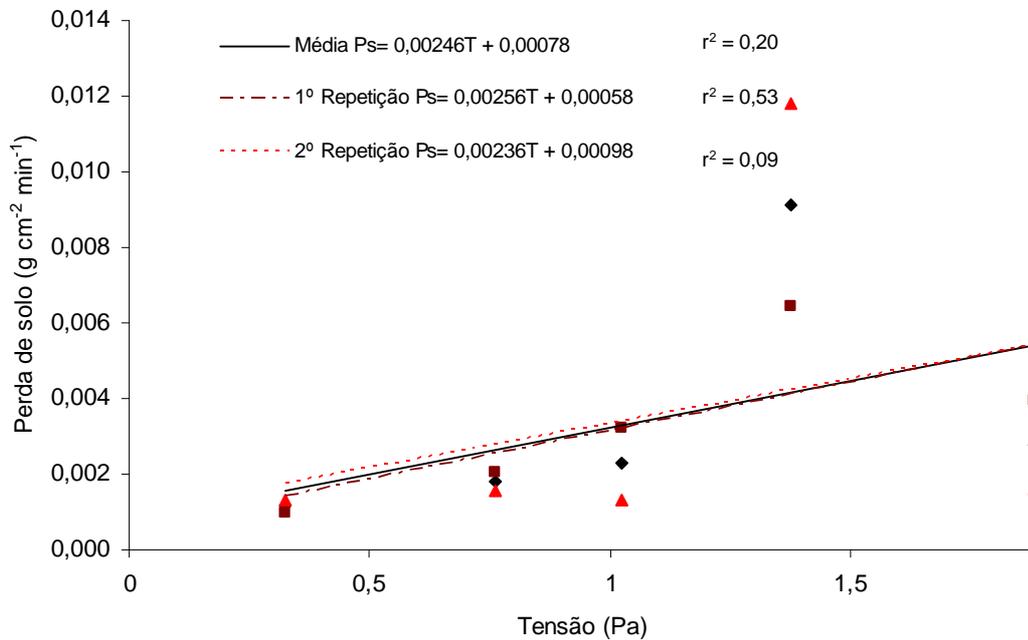


Figura 30. Perdas de solo para diferentes tensões aplicadas nos testes realizados com o uso do Inderbitzen e com amostras deformadas para o horizonte B nos dois ensaios realizados e para a condição média.

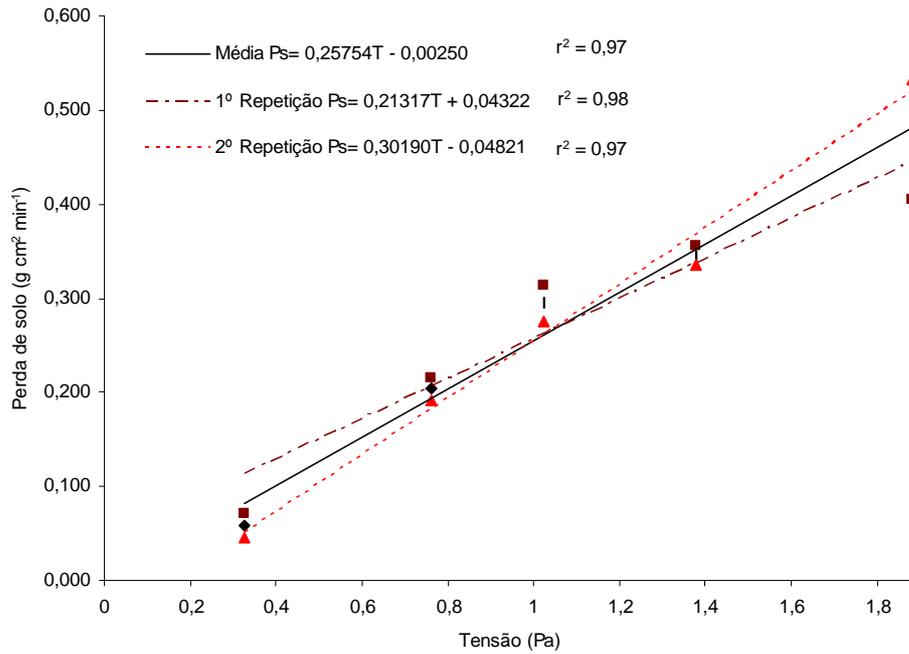


Figura 31. Perdas de solo para diferentes tensões aplicadas nos testes realizados com o uso do Inderbitzen e com amostras deformadas para o horizonte C_(residual maduro) nos dois ensaios realizados e para a condição média.

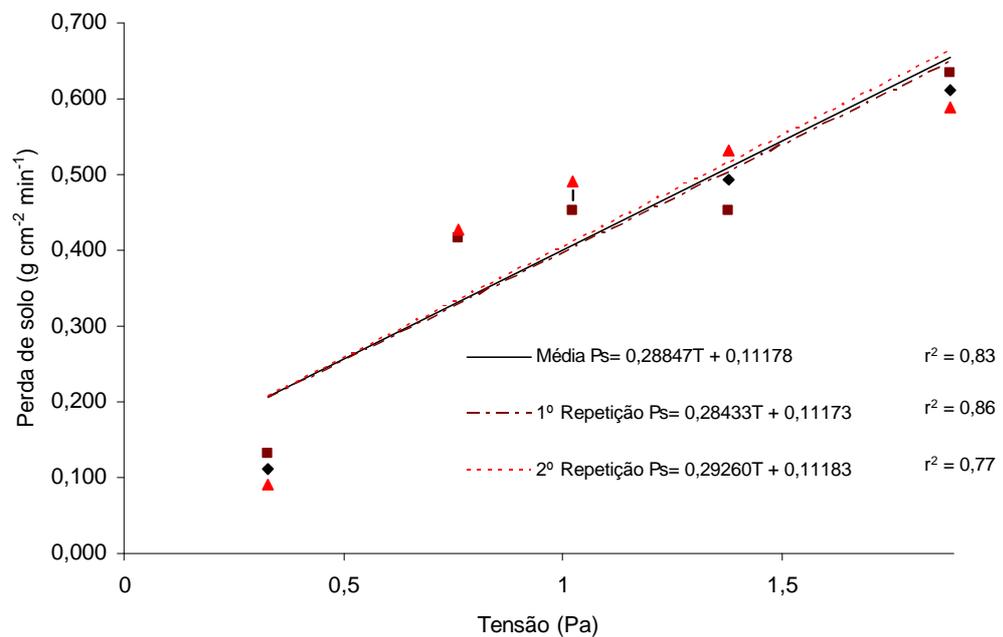


Figura 32. Perdas de solo para diferentes tensões aplicadas nos testes realizados com o uso do Inderbitzen e com amostras deformadas para o horizonte C_(residual jovem) nos dois ensaios realizados e para a condição média.

$\text{cm}^{-2} \text{min}^{-1} \text{Pa}^{-1}$), sendo a erodibilidade média obtida igual a $0,16279 \text{ g cm}^{-2} \text{min}^{-1} \text{Pa}^{-1}$. As tensões críticas de cisalhamento do solo para as duas repetições realizadas foram de $0,34 \text{ Pa}$ (média de $0,34 \text{ Pa}$) e os coeficientes de determinação obtidos para o horizonte A foram iguais ou superiores a $0,90$.

Na Figura 30, referente ao horizonte B, verificou-se uma pequena variabilidade dos valores de erodibilidade obtidos nas duas repetições ($K_{1 \text{ rep.}} = 0,00256 \text{ g cm}^{-2} \text{min}^{-1} \text{Pa}^{-1}$ e $K_{2 \text{ rep.}} = 0,00236 \text{ g cm}^{-2} \text{min}^{-1} \text{Pa}^{-1}$), sendo a erodibilidade média obtida igual a $0,00246 \text{ g cm}^{-2} \text{min}^{-1} \text{Pa}^{-1}$.

As tensões críticas de cisalhamento do solo, para as duas repetições realizadas foram indeterminadas e, conseqüentemente, a própria tensão crítica de cisalhamento média. Os coeficientes de determinação das equações ajustadas encontram-se entre $0,09$ e $0,53$, mostrando, mais uma vez, os problemas decorrentes do procedimento experimental utilizado e já descritos no item 4.2.1.

Na Figura 31 (horizonte $C_{(\text{residual maduro})}$), os valores de erodibilidade nas duas repetições realizadas foram de $K_{1 \text{ rep.}} = 0,21317 \text{ g cm}^{-2} \text{min}^{-1} \text{Pa}^{-1}$ e $K_{2 \text{ rep.}} = 0,30190 \text{ g cm}^{-2} \text{min}^{-1} \text{Pa}^{-1}$, sendo a erodibilidade média igual a $0,25754 \text{ g cm}^{-2} \text{min}^{-1} \text{Pa}^{-1}$. A tensão crítica de cisalhamento média do solo foi de $0,01 \text{ Pa}$ e os coeficientes de determinação das equações ajustadas foram iguais ou superiores a $0,90$. Evidencia-se, entretanto que, embora os valores de r^2 sejam muito bons, o valor de tensão crítica de cisalhamento para a primeira repetição foi indeterminado.

Na Figura 32 evidencia-se que para o horizonte $C_{(\text{residual jovem})}$ houve uma pequena variação dos valores de erodibilidade entre as duas repetições realizadas ($K_{1 \text{ rep.}} = 0,28433 \text{ g cm}^{-2} \text{min}^{-1} \text{Pa}^{-1}$ e $K_{2 \text{ rep.}} = 0,29260 \text{ g cm}^{-2} \text{min}^{-1} \text{Pa}^{-1}$), sendo a erodibilidade média igual a $0,28847 \text{ g cm}^{-2} \text{min}^{-1} \text{Pa}^{-1}$. Os coeficientes de determinação das equações ajustadas foram iguais ou superiores a $0,77$. Embora se tenha valores de erodibilidade próximos e coeficientes de determinação razoáveis, as tensões críticas de cisalhamento do solo para as duas repetições foram indeterminados.

Pela análise dos resultados pertinentes aos ensaios de Inderbitzen realizados com amostras preparadas com a umidade ótima de compactação evidenciou-se uma elevada taxa de desprendimento das partículas de solo,

superestimando, conseqüentemente, os valores de erodibilidade obtidos nos testes realizados com as amostras deformadas. O preparo das amostras com a umidade ótica de compactação acarretou, exceto para o horizonte B, uma capacidade de resistência ao cisalhamento inferior à dos ensaios de campo e dos ensaios realizados com amostras indeformadas.

Na Figura 33 são apresentadas, para os horizontes A, B, C_(residual maduro) e C_(residual jovem), as curvas e equações ajustadas referentes aos valores médios de perda de solo em função das tensões aplicadas nos ensaios de Inderbitzen realizados com amostras deformadas, podendo-se evidenciar que para os testes realizados com amostras deformadas houve uma maior variabilidade entre os valores de erodibilidade obtidos entre os diferentes horizontes do que aquela evidenciada nos ensaios de campo e com amostras indeformadas.

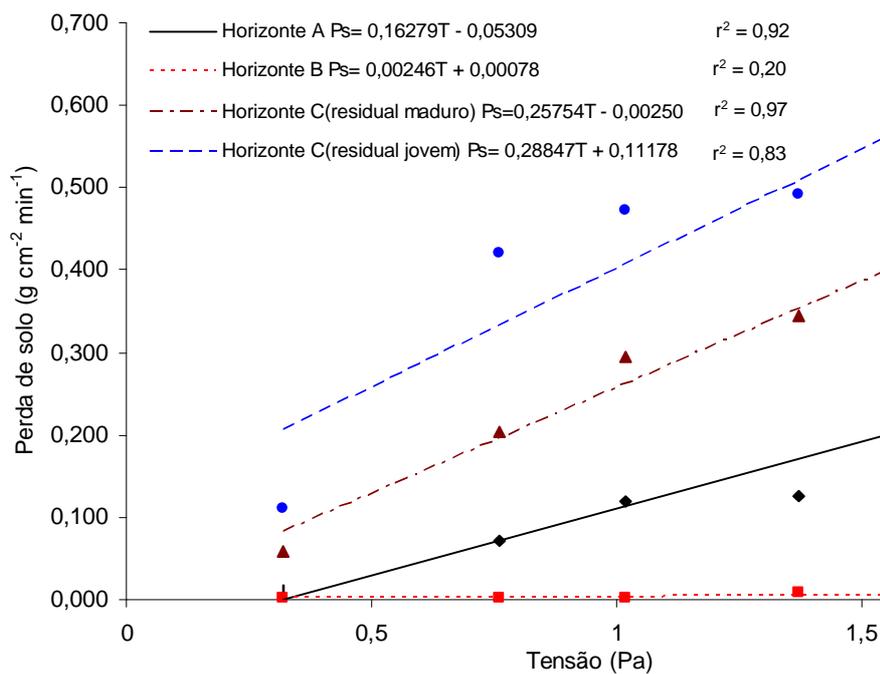


Figura 33. Perdas de solo médias para diferentes tensões aplicadas nos testes realizados com o uso do Inderbitzen e amostras deformadas (horizontes A, B, C_(residual maduro) e C_(residual jovem)).

4.3. Análise comparativa dos resultados obtidos pelos diferentes testes em cada horizonte

Na Figura 34 são apresentadas, para o horizonte A, as curvas e equações ajustadas referentes aos valores médios de perda de solo em função das tensões aplicadas para os testes de campo e de Inderbitzen. Observa-se, nesta figura, que nos ensaios de Inderbitzen com amostras deformadas o valor de erodibilidade média foi maior do que para as amostras indeformadas e para os testes de campo, sendo este 14,8 vezes maior que a erodibilidade média encontrada nos ensaios com amostras indeformadas e de 1.017 vezes maior que o obtido para os testes de campo.

Observa-se, portanto, uma grande diferença entre o valor de erodibilidade encontrado no teste de campo e os obtidos nos testes de Inderbitzen realizados com amostra indeformada e, principalmente, com aqueles encontrados com amostra deformada. A superestimativa da erodibilidade média evidenciada nos testes de Inderbitzen em relação ao teste de campo decorre das perturbações introduzidas nas amostras quando da sua retirada e manipulação. No caso da amostra deformada o resultado de erodibilidade obtido caracteriza que a compactação feita para o solo do horizonte A na umidade ótima de compactação, mesmo tendo permitido a reprodução da massa específica existente no campo, não atribuiu-lhe a resistência ao cisalhamento existente na condição de campo.

O valor médio de tensão crítica de cisalhamento para os testes de campo foi sempre superior ao dos testes de Inderbitzen. Nesta figura observa-se também que a máxima tensão cisalhante obtida para os testes de Inderbitzen não atingiu nem mesmo o valor da tensão crítica de cisalhamento obtida nos testes de campo.

Na Figura 35 são apresentadas, para o horizonte B, as curvas e equações ajustadas referentes aos valores médios de perda de solo em função das tensões aplicadas obtidas nos testes de campo e de Inderbitzen. Verifica-se nesta figura uma menor variabilidade entre os valores de erodibilidade obtidos pelos diferentes procedimentos experimentais utilizados do que aquela constatada para o horizonte A, sendo evidenciada

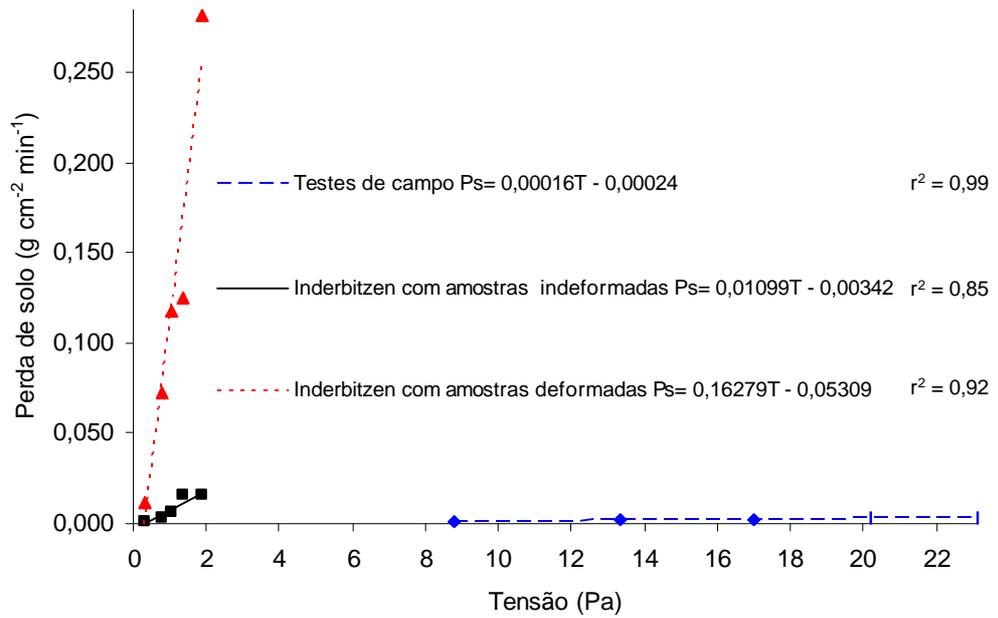


Figura 34. Perdas de solo para diferentes tensões aplicadas nos testes de campo e de Inderbitzen (horizonte A).

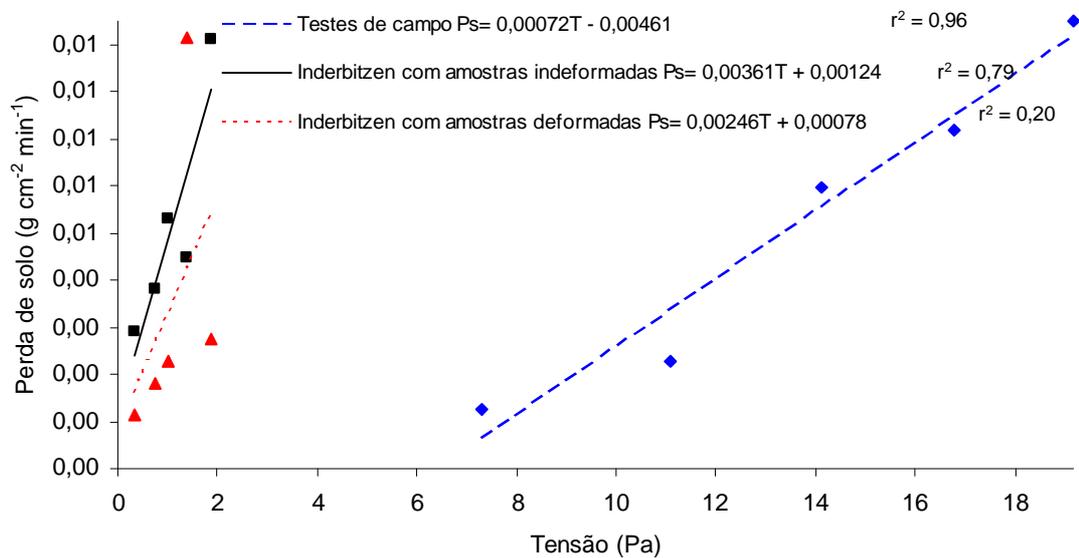


Figura 35. Perdas de solo para diferentes tensões aplicadas nos testes de campo e de Inderbitzen (horizonte B).

Para as amostras submetidas ao ensaio de Inderbitzen, uma maior resistência ao cisalhamento para os testes com amostras deformadas do que para aqueles realizados com amostras indeformadas.

Pela comparação dos resultados obtidos nos testes de campo com os dos testes de Inderbitzen realizados com as amostras indeformadas verificou-se que a erodibilidade média relativa ao horizonte B para os testes de Inderbitzen foi 5,0 vezes maior que a dos testes de campo, o que caracteriza a maior desagregação das partículas de solo no ensaio de Inderbitzen em relação ao teste de campo, superestimando também neste horizonte o valor de erodibilidade, embora não de forma tão acentuada quanto para o horizonte A. A erodibilidade média do horizonte B obtida para as amostras deformadas foi 1,4 vezes menor que a das amostras indeformadas e 3,4 vezes maior que a obtida nos testes de campo. A tensão crítica de cisalhamento relativa aos ensaios de Inderbitzen foram indeterminados, sendo que para o teste de campo a tensão crítica de cisalhamento foi de 6,4 Pa.

Na Figura 36 são apresentadas, para o horizonte $C_{(\text{residual maduro})}$, as curvas e equações ajustadas referentes aos valores médios de perda de solo em função das tensões aplicadas obtidas nos testes de campo e de Inderbitzen. Observa-se nesta figura que a erodibilidade média para as amostras deformadas foi 212 vezes maior em relação aos testes de campo e 168 vezes maior do que para as amostras indeformadas, sendo que a compactação do solo com a umidade ótima não conferiu ao solo resistência existente na condição natural. Foi verificado também, assim como nos testes de Inderbitzen realizados para o horizonte B, que os valores de tensão crítica de cisalhamento foram indeterminados.

Na Figura 37 são apresentadas, para o horizonte $C_{(\text{residual jovem})}$, as curvas e equações ajustadas referentes aos valores médios de perda de solo em função das tensões aplicadas obtidas nos testes de campo e de Inderbitzen. Verifica-se nesta figura que nas amostras deformadas o valor de erodibilidade média foi maior do que para as amostras indeformadas e para os testes de campo, sendo 34,7 vezes maior que a encontrada para os testes de campo e de 39,1 vezes maior em relação às amostras indeformadas.

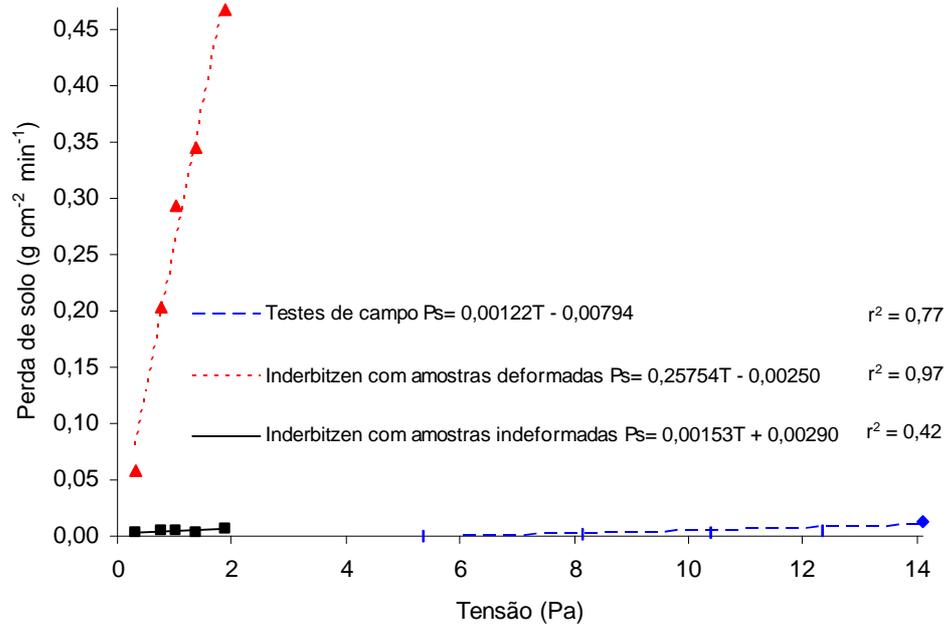


Figura 36. Perdas de solo para diferentes tensões aplicadas nos testes de campo e de Inderbitzen (horizonte $C_{(\text{residual maduro})}$).

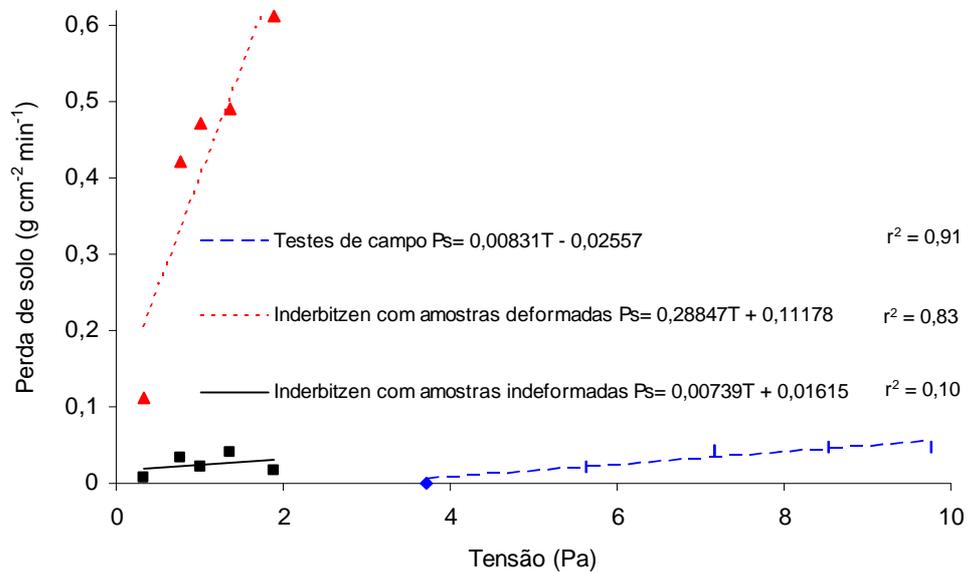


Figura 37. Perdas de solo para diferentes tensões aplicadas nos testes de campo e de Inderbitzen (horizonte $C_{(\text{residual jovem})}$).

O valor médio da tensão crítica de cisalhamento para os testes de campo foi de 6,7 Pa enquanto que para os testes de Inderbitzen foram indeterminados, motivos pelas quais foi discutido anteriormente.

5. RESUMO E CONCLUSÕES

O presente trabalho foi conduzido em um canal de estrada não pavimentada localizada próxima à pedreira da Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa, MG, tendo como objetivo a determinação da erodibilidade e da tensão crítica de cisalhamento do solo, tanto pela metodologia desenvolvida por Griebeler, em 2002 como pelo ensaio de Inderbitzen com o uso de amostras deformadas e indeformadas.

O equipamento utilizado nos experimentos de campo desenvolvido por Griebeler, em 2002, é constituído por um reservatório d'água, por uma caixa de controle do nível d'água, por uma calha de aço e por cinco caixas para armazenamento da água. Foram realizadas três repetições para cada horizonte do solo, sendo aplicadas à mesma amostra vazões de $0,53 \text{ L s}^{-1}$, $1,07 \text{ L s}^{-1}$, $1,61 \text{ L s}^{-1}$, $2,15 \text{ L s}^{-1}$ e $2,69 \text{ L s}^{-1}$.

Nos testes de laboratório foi utilizado o aparelho de Inderbitzen e amostras com formato quadrado. Foram retiradas amostras de solo tanto indeformadas como deformadas para os horizontes A, B, $C_{(\text{residual maduro})}$ e $C_{(\text{residual jovem})}$. A vazão utilizada foi de 155 mL s^{-1} , sendo as declividades adotadas de 2, 5, 7, 10 e 15 % tendo-se como tempo de cada ensaio 30 min. Foram realizadas duas repetições para cada horizonte do solo.

Os dados de perda de solo obtidos nos testes foram plotados em gráficos relacionando a perda de solo ($\text{g cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$) versus tensão aplicada (Pa), sendo feito o ajuste de uma reta a este conjunto de pontos. A tensão crítica de cisalhamento do solo foi a maior tensão para a qual a perda de solo ainda se manteve nula e a erodibilidade do solo foi obtida pela inclinação da linha de tendência ajustada aos dados experimentais.

Os resultados obtidos permitiram concluir que:

- o horizonte $C_{(\text{residual jovem})}$ foi o que apresentou as maiores erodibilidades e as menores tensões críticas de cisalhamento;
- as erodibilidades determinadas nos testes de campo foram menores e as tensões críticas de cisalhamento maiores do que as obtidas nos testes com o Inderbitzen;
- nos ensaios de Inderbitzen com amostras indeformadas tanto as erodibilidades, como as tensões críticas de cisalhamento foram, em geral, menores que as obtidas nos ensaios com amostras deformadas.

6. RECOMENDAÇÕES

Diante dos diversos comentários apresentados no texto, considera-se recomendável que:

- sejam realizados ajustes no equipamento desenvolvido por GRIEBELER (2002) a fim de aumentar a sua praticidade;

- avaliar o comportamento de amostras de solo deformadas quando preparadas com umidade diferente daquela correspondente à umidade ótima de compactação;

- adaptar o aparelho de Inderbitzen de modo a permitir o aumento da vazão aplicada, o que permitirá a obtenção de maiores tensões cisalhantes associadas ao escoamento;

- realizar os testes de Inderbitzen pertinentes às maiores tensões cisalhantes utilizando as amostras já submetidas às menores tensões, o que permitirá que as perdas de solo sejam consideradas de forma acumulada, com o que, conseqüentemente, não ocorrerão comportamentos como os evidenciados em diversos ensaios, em que, para as maiores tensões cisalhantes as perdas de solo obtidas foram menores do que nas menores tensões.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANJOS FILHO, O. Estradas de terra. **O Estado de São Paulo**, São Paulo, 29 abr. 1998. Suplemento agrícola.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Solo** – análise granulométrica – NBR7181. Rio de Janeiro, 1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Solo** – determinação do limite de liquidez – NBR6459. Rio de Janeiro, 1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Solo** – determinação do limite de plasticidade e índice de plasticidade – NBR7180. Rio de Janeiro, 1982.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Solo** – determinação da massa específica – NBR6508. Rio de Janeiro, 1984.

BERTOLINI, D.; DRUGOWICH, M. I.; LOMBARDI NETO, F. BELINAZZI JÚNIOR, R. **Controle de erosão em estradas rurais**. Campinas: CATI, 1993, 37 p. (CATI. Boletim Técnico ; 207).

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. Piracicaba, SP: Livroceres, 1985. 392 p.

BUBLITZ, U.; CAMPOS, L. C. **Adequação de estradas rurais em microbacias hidrográficas – especificações de projetos e serviços**. Curitiba, PR: EMATER-PR, 1992. 70 p. (informação técnica 18).

BURROUGS, E. R.; KING, J. G. Reduction of Soil Erosion on Forest Roads. **USDA Forest Service INT General Technical Report**, Washington, n. 264, p. 1-21, July 1989.

DNER. Anuário estatístico dos Transportes: **GEIPOT**, 2000. www.dner.gov.br.

DUARTE, J.; BERGER, R. Investimentos em Estradas Florestais: uma Análise de sua Economicidade. In: ENCONTRO BRASILEIRO DE ECONOMIA FLORESTAL, 1., 1988, Curitiba. **Anais...** Curitiba: EMBRAPA/CNPF, 1988. v. 2, p. 99-114.

DUNNE, T.; DIETRICH, W. Sediment sources in tropical drainage basins. In:----- **Soil erosion and conservation in the tropics**. Madison: American Society of Agronomy/Soil Science Society of America, 1982. (ASA Special Publication ; n. 43).

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.

FÁCIO, J. A. **Proposição de uma metodologia de estudo da erodibilidade dos solos do Distrito Federal**. 1991. Dissertação (Mestrado) - Universidade de Brasília, Brasília, DF.

FAO. **Watershed management field manual: road design and construction in sensitive watersheds**. Roma: FAO, 1989. 218 p.

FAO. **Planning forest roads and harvesting systems**. Roma: FAO, 1977. v. 2, 158 p.

FRAGASSI, P. F. M. **Estudo da erodibilidade dos solos residuais de gnaise da Serra de São Geraldo e de Viçosa (MG)**. 2001. 119 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

GONSOIR, M. J.; GARDNER, R. B. Investigation of Slope Failures in the Idaho Batholith. **USDA Forest Service INT Research Paper**, Washington, n. 97, p. 1-34, 1971.

GRACE III, J. M.; WILHOIT, J.; RUMMER, R.; STOKES, B. **Surface erosion control techniques on newly constructed forest roads**. In: ASAE ANNUAL INTERNATIONAL MEETING, Phoenix, 1996. 14 p.

GRIEBELER, N. P. **Modelo para o dimensionamento de redes de drenagem e de bacias de acumulação de água em estradas não pavimentadas**. 2002. 122 p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

GUTIERREZ, R. C. **Manual de caminos vecinales**. Mexico: Representaciones y Servicios de Ingenieria, 1972. 390 p.

INDERBITZEN, A. L. An erosion tests for soils. **Material Reseach and Standarts**, Philadelphia, v. 1, n. 7, p. 553-554, 1July 1961.

KIDD, W. J.; MEGAHAN, W. F. Effect of Logging Roads on Sediment Production Rates in the Idaho Batholith. **USDA Forest int Research Paper**, Washington, n. 123, p. 1-14, 1972.

LAYTON, D. A.; LEDOUX, C. B.; HASSLER, C. C. Cost Estimators for Construction of Forest Roads in Central Appaçlachsians. **USDA Forest Service NE Research Paper**, Washington, n. 665, p. 1-4, July 1992.

LENCASTRE, A.; FRANCO, F. M. **Lições de hidrologia**. Lisboa: Universidade Nova de Lisboa, 1992. 451 p.

LIMA, P. M. P.; BAHIA, V. G.; CURI, N. et al. Princípios de erodibilidade do solo. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 16, n.176, p. 38-43, 1992.

LUCE, C. C.; BLACK, T. A. Sediment production from forest roads in western Oregon. **Water Resources Research**, Washington, v. 35, n. 8, p. 2561-2570, Aug. 1999.

MACHADO, C. C.; SOUZA, A. P. de. Impacto Ambiental das Estradas Florestais no Ecosistema: Causas e Controle. **Boletim Técnico Sociedade de Investigações Florestais**, Viçosa, n. 1, p. 1-12, maio 1990.

MANUAL DE EXECUÇÃO DE SERVIÇOS DE ADEQUAÇÃO DE ESTRADAS RURAIS. **Projeto Paraná 12 meses**, subcomponente manejo e conservação de recursos naturais. Paraná: DER. 1988. (Informe Técnico).

MARTINS, M. C.; SILVA, RODRIGUES, J. K.; FELEX, FERNANDEZ, J.; MELO, A. R.; ODA, S. Urbanização, drenagem e pavimentos. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE PAVIMENTAÇÃO DE RODOVIAS DE BAIXO VOLUME DE TRÁFEGO (SINBATRA), 1., 1997, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: ABPv, 1997. p. 137-149.

MEGAHAN, W. F. Erosion over time: a model. **USDA- Forest Service Research Paper Report INT- 156**. Intermountain Research Station: Ogden UT. 1974.

MORRIS, J. **Earth roads**: practical manual for the provision of access for agricultural and forestry projects in developing countries. Sussex, England: Cambridge University press, 1995.

NEARY, D. G.; HORNBECK, J. W. Impacts of harvesting and Associated Practices on Off-site Environmental Quality. In: **Impacts of forest harvesting on long-term site productivity**. Londres: Chapman and Hall, 1994. cap. 4, p. 81-119.

NOGAMI, J. S, VILLIBOR, D. F. **Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos**. São Paulo: Villibor, 1995. 240 p.

OLIVEIRA, L. C. Influência do Percentual de Inclinação das Estradas Florestais na Erosão do Solo. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE CAPACITACION EM INVESTIGACION SOBRE APROVECHAMIENTO FORESTAL DE IMPACTO REDUCIDO Y MANEJO DE BOSQUES NATURALES: RESULTADOS, 1997, Santa Cruz de la Sierra: BOLFOR/CIFOR/FAO/USAID, 1997. p. 37-41.

PASTORE, E. Estudos para planejamento da conservação de estradas de terra do município e de estradas de terra do município e de usinas de açúcar e álcool de São Joaquim da Barra – Estado de São Paulo. In: SIMPÓSIO

INTERNACIONAL DE PAVIMENTAÇÃO DE RODOVIAS DE BAIXO VOLUME DE TRÁFEGO (SINBATRA), 1., 1997, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: ABPv, 1997. p. 1-11.

PRUSKI, F. F. **Conservação de água e solos**. Brasília, DF: ABEAS; Viçosa, MG: UFV/DEA, 1998. 88 p. (Curso por Tutoria a Distância. Curso de Gestão de Recursos Hídricos para o Desenvolvimento Sustentado de Projetos Hidroagrícolas. Módulo, 7).

REID, L. M.; DUNNE, T. Sediment production from forest road surfaces. **Water Resources Research**, Washington, v. 20, n. 11, p. 1753-1761, Nov. 1984.

RIJSDIJK, A.; BRUIJNZEEL, L. A. **Erosion, sediment yield and land-use patterns in the upper Konto watershed, East Java, Indonesia, part III: Results of the 1989-1990 measuring campaign**. Project Communication 18, Konto River Project, Kingdom of the Netherlands, Ministry of Foreign Affairs, Director General of International Cooperation, 1991.

SANTOS, R. M. M. dos. **Caracterização geotécnica e análise do processo evolutivo das erosões no município de Goiânia**. 1997. 120 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Brasília, Brasília, DF.

SETOR DE CONSERVAÇÃO DE ESTRADAS DA KLABIN AGRO-FLORESTAL. **Normas e métodos básicos para execução de projetos de estradas**, Telêmaco Borba: Klabin, 1985. 101 p.

THOMAZ, C. A. **Pavimentação de estradas vicinais**. São Paulo: ABCP, 1984. 58 p.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. **Predicting rainfall erosion losses, in Agriculture Handbook 537**. U.S.; Washington, 1978. 58 p.

VARGAS, M. **Introdução à mecânica dos solos**. São Paulo: Mcgraw-Hill do Brasil, 1977.

VEIGA, M. da. **Erodibilidade em entressulcos e algumas propriedades físicas, químicas e mineralógicas de solos do Rio Grande do Sul, em laboratório**. 1988. 116 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

ZIEGLER A. D.; GIAMBELLUCA T. W. Importance of rural roads as source areas for runoff in mountainous areas of northern Thailand. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 196, n. 1/4, p. 204-229, Sept. 1997.

ZIEGLER A. D.; GIAMBELLUCA T. W. Importance of rural roads as source areas for runoff in mountainous areas of northern Thailand. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 196, n. 1/4, p. 204-229, Sept. 1997a.

ZIEGLER A. D.; GIAMBELLUCA T. W. Simulation of runoff and erosion on mountainous roads in northern Thailand: a first look, in human impact on erosion and sedimentation. **IAHS Publicação 245**, 1997b. p.21-29.

ZIEGLER A. D.; SUTHERLAND R. A.; GIAMBELLUCA T. W. Runoff generation and sediment transport on unpaved roads, paths, and agricultural land surfaces in northern Thailand. **Earth surface Processes and landforms**, Sussex, v, 25, n. 5, p. 519-534, May 2000.

ZIEGLER A. D.; SUTHERLAND R. A.; GIAMBELLUCA T. W.; SUTHERLAND, R.A. Erosion prediction on unpaved mountain roads in northern Thailand, I, Validation of dynamic erodibility modeling using KINEROS2. **Hydrologic Process**, Sussex, v. 15, n. 3, p. 337-358, Feb. 2001. in press.

ZIEGLER A. D.; GIAMBELLUCA T. W.; SUTHERLAND, R. A. Erosion prediction on unpaved mountain roads in northern Thailand: Validation of dynamic erodibility modeling using KINEROS2. **Hydrologic Processes**, Sussex, v. 15, n. 3, p. 337-358, Feb. 2001.

APÊNDICES

APÊNDICE A

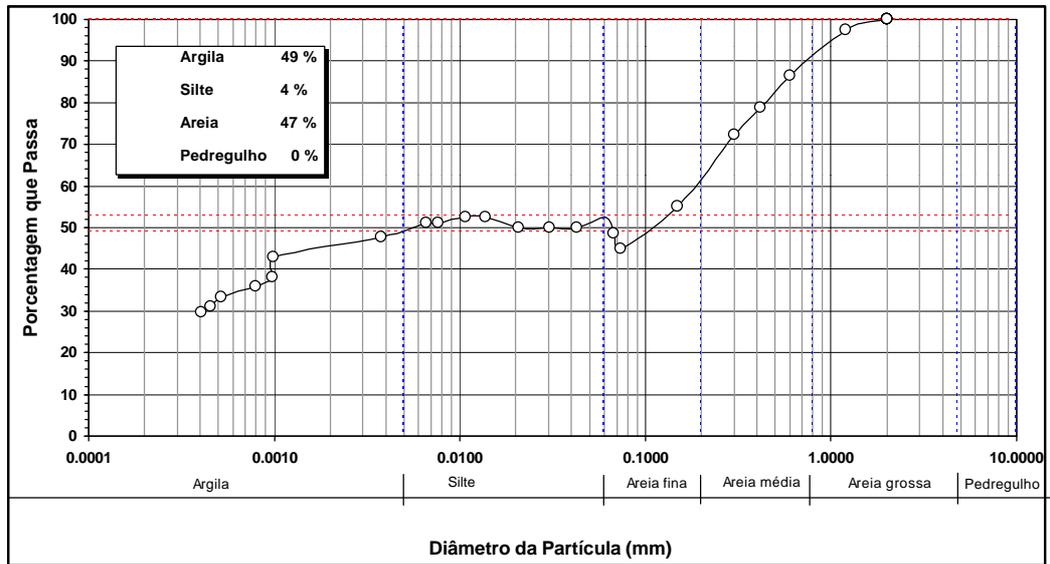


Figura 1A. Curva granulométrica correspondente ao horizonte A.

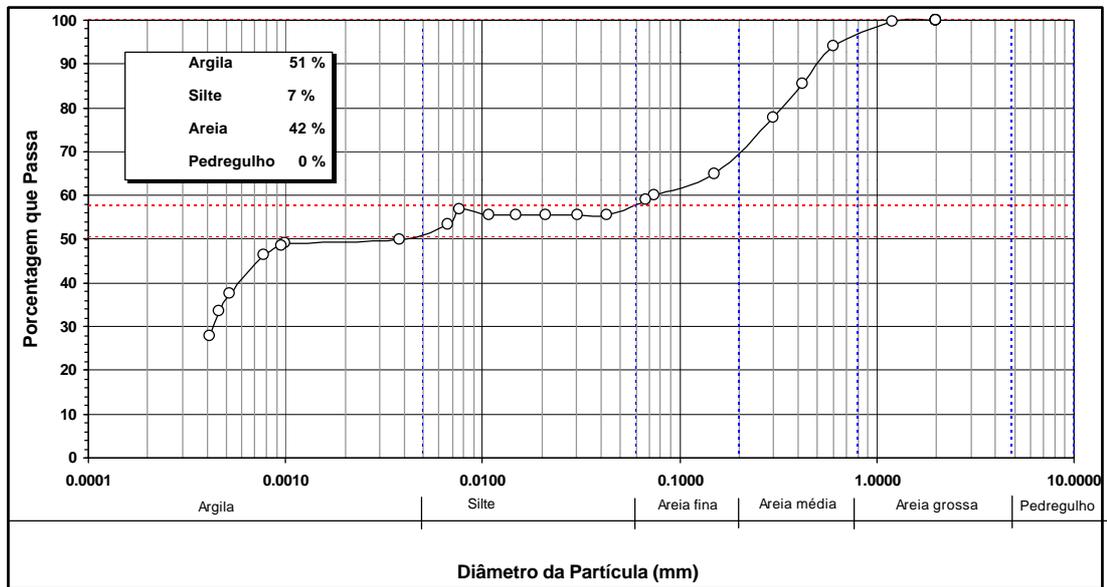


Figura 2A. Curva granulométrica correspondente ao horizonte B.

APÊNDICE B

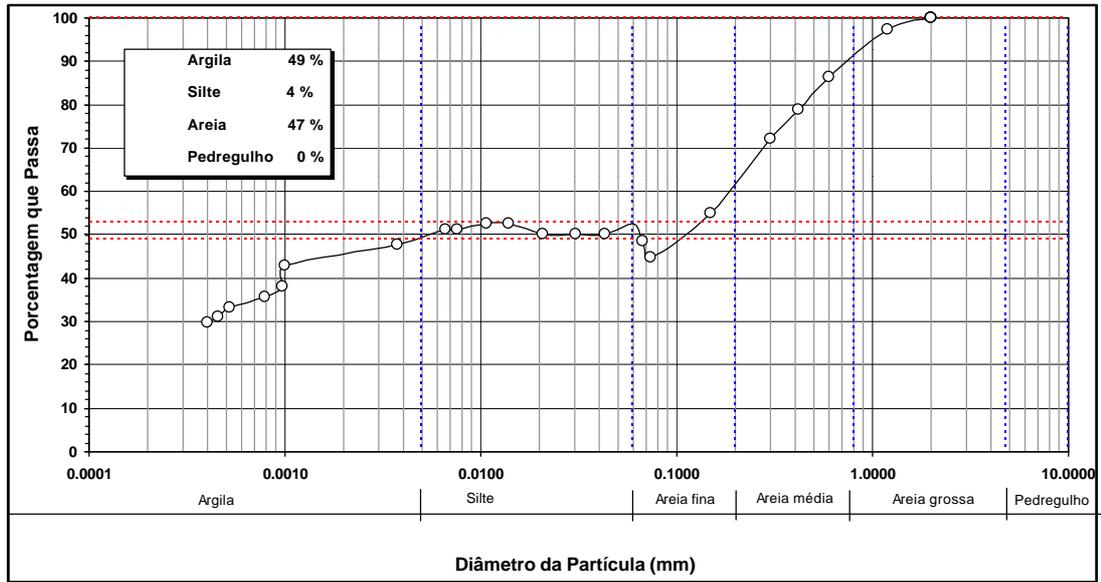


Figura 1B. Curva granulométrica correspondente ao horizonte $C_{(residual\ maduro)}$.

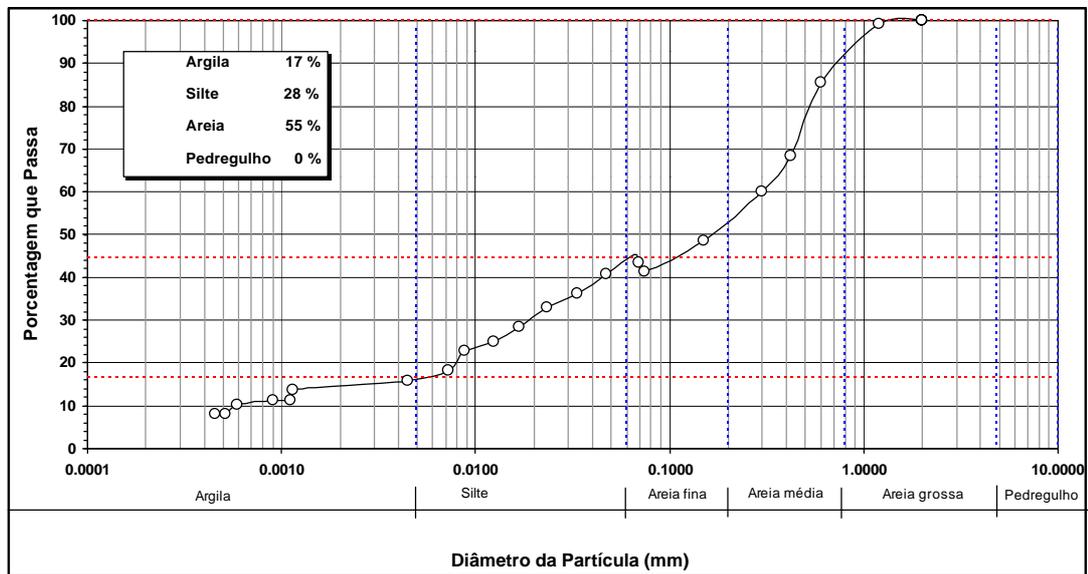


Figura 2B. Curva granulométrica correspondente ao horizonte $C_{(residual\ jovem)}$.

APÊNDICE C

Quadro 1C. Testes de campo realizados para o horizonte A

Teste	Declividade (%)	Vazão (L/s)	Tempo (min)	Altura da lamina d'água (m)	Tensão (Pa)	Perda de solo (g min ⁻¹ cm ⁻²)	Perda de solo acumulada (g min ⁻¹ cm ⁻²)
1	17,5	0,53	14,18	0,0063	7,76	0,00117	0,00117
		1,07	7,63	0,0096	11,78	0,00080	0,00197
		1,61	4,10	0,0123	15,02	0,00059	0,00256
		2,15	3,61	0,0146	17,85	0,00053	0,00308
		2,69	3,46	0,0168	20,42	0,00092	0,00400
2	15,98	0,53	10,25	0,0065	9,54	0,00182	0,00182
		1,07	6,65	0,0099	14,46	0,00119	0,00301
		1,61	4,10	0,0127	18,45	0,00053	0,00354
		2,15	3,38	0,0151	21,93	0,00069	0,00422
		2,69	3,00	0,0172	25,08	0,00067	0,00490
3	17,2	0,53	12,73	0,0064	9,07	0,00057	0,00057
		1,07	6,83	0,0097	13,75	0,00117	0,00174
		1,61	4,28	0,0124	17,54	0,00031	0,00205
		2,15	3,56	0,0147	20,85	0,00072	0,00277
		2,69	3,10	0,0168	23,84	0,00055	0,00332

Quadro 2C. Testes de campo realizados para o horizonte B

Teste	Declividade (%)	Vazão (L/s)	Tempo (min)	Altura da lamina d'água (m)	Tensão (Pa)	Perda de solo (g min ⁻¹ cm ⁻²)	Perda de solo acumulada (g min ⁻¹ cm ⁻²)
1	12,4	0,53	15,33	0,0070	8,61	0,00286	0,00286
		1,07	8,16	0,0107	13,06	0,00247	0,00533
		1,61	6,58	0,0137	16,66	0,00520	0,01053
		2,15	4,11	0,0162	19,80	0,00227	0,01281
		2,69	3,18	0,0186	22,64	0,00541	0,01821
2	14,81	0,53	15,41	0,0067	9,75	0,00026	0,00026
		1,07	8,15	0,0101	14,78	0,00022	0,00047
		1,61	5,65	0,0130	18,86	0,00537	0,00584
		2,15	3,80	0,0154	22,41	0,00094	0,00678
		2,69	3,10	0,0176	25,62	0,00098	0,00776
3	14,40	0,53	15,48	0,0067	9,57	0,00061	0,00061
		1,07	7,68	0,0102	14,51	0,00046	0,00107
		1,61	5,48	0,0131	18,50	0,00040	0,00147
		2,15	4,06	0,0155	21,99	0,00052	0,00199
		2,69	3,06	0,0178	25,14	0,00052	0,00251

Quadro 3C. Testes de campo realizados para o horizonte C_(residual jovem)

Teste	Declividade (%)	Vazão (L/s)	Tempo (min)	Altura da lamina d'água (m)	Tensão (Pa)	Perda de solo (g min ⁻¹ cm ⁻²)	Perda de solo acumulada (g min ⁻¹ cm ⁻²)
1	4,3	0,53	14,46	0,0097	4,11	0,00123	0,00123
		1,07	6,30	0,0147	6,23	0,01119	0,01242
		1,61	4,68	0,0188	7,94	0,01302	0,02544
		2,15	3,45	0,0223	9,44	0,00261	0,02805
		2,69	3,01	0,0256	10,79	0,00054	0,02859
2	4,8	0,53	13,45	0,0094	4,44	0,00189	0,00189
		1,07	6,61	0,0142	6,72	0,01517	0,01706
		1,61	4,71	0,0182	8,58	0,05066	0,06772
		2,15	3,56	0,0216	10,19	0,00548	0,07320
		2,69	3,41	0,0247	11,66	0,00226	0,07547
3	6,8	0,53	13,80	0,0084	5,66	0,00035	0,00035
		1,07	6,33	0,0128	8,58	0,03312	0,03347
		1,61	4,86	0,0164	10,95	0,00304	0,03652
		2,15	3,68	0,0195	13,01	0,00417	0,04068
		2,69	3,18	0,0223	14,87	0,00160	0,04228

Quadro 4C. Testes de campo para o horizonte C_(residual maduro)

Teste	Declividade (%)	Vazão (L/s)	Tempo (min)	Altura da lamina d'água (m)	Tensão (Pa)	Perda de solo (g min ⁻¹ cm ⁻²)	Perda de solo acumulada (g min ⁻¹ cm ⁻²)
1	8,3	0,53	15,00	0,0080	6,51	0,00006	0,00006
		1,07	7,36	0,0121	9,86	0,00262	0,00268
		1,61	5,05	0,0154	12,58	0,00317	0,00586
		2,15	4,10	0,0183	14,96	0,00177	0,00763
		2,69	3,00	0,0210	17,10	0,00534	0,01298
2	9,7	0,53	15,03	0,0076	7,26	0,00004	0,00004
		1,07	7,83	0,0115	11,00	0,00074	0,00078
		1,61	5,51	0,0147	14,04	0,00061	0,00135
		2,15	4,33	0,0175	16,68	0,00025	0,00160
		2,69	3,56	0,0200	19,07	0,01775	0,01800
3	8,8	0,53	14,50	0,0078	6,78	0,00003	0,00003
		1,07	7,66	0,0119	10,28	0,00063	0,00066
		1,61	5,16	0,0152	13,11	0,00232	0,00299
		2,15	3,85	0,0180	15,58	0,00093	0,00393
		2,69	2,98	0,0206	17,82	0,00034	0,00427

APÊNDICE D

Quadro 1D. Testes de Inderbitzen com amostras indeformadas realizados para o horizonte A

Teste	Declividade (%)	Velocidade (m s ⁻¹)	Vazão (L/s)	Tempo (min)	Altura da lamina d'água (m)	Tensão (Pa)	Perda de solo (g min ⁻¹ cm ⁻²)
1	2	0,568	0,155	30	1,66	0,32	0,00076
	5	0,607			1,55	0,76	0,00249
	7	0,633			1,49	1,02	0,00368
	10	0,672			1,40	1,37	0,00659
	15	0,738			1,28	1,88	0,01461
2	2	0,568	0,155	30	1,66	0,32	0,00154
	5	0,607			1,55	0,76	0,00386
	7	0,633			1,49	1,02	0,00927
	10	0,672			1,40	1,37	0,02572
	15	0,738			1,28	1,88	0,01617

Quadro 2D. Testes de Inderbitzen com amostras indeformadas realizados para o horizonte B

Teste	Declividade (%)	Velocidade (m s ⁻¹)	Vazão (L/s)	Tempo (min)	Altura da lamina d'água (m)	Tensão (Pa)	Perda de solo (g min ⁻¹ cm ⁻²)
1	2	0,568	0,155	30	1,66	0,32	0,00301
	5	0,607			1,55	0,76	0,00258
	7	0,633			1,49	1,02	0,00856
	10	0,672			1,40	1,37	0,00386
	15	0,738			1,28	1,88	0,01409
2	2	0,568	0,155	30	1,66	0,32	0,00280
	5	0,607			1,55	0,76	0,00506
	7	0,633			1,49	1,02	0,00201
	10	0,672			1,40	1,37	0,00505
	15	0,738			1,28	1,88	0,00413

Quadro 3D. Testes de Inderbitzen com amostras indeformadas realizados para o horizonte C_(residual jovem)

Teste	Declividade (%)	Velocidade (m s ⁻¹)	Vazão (L/s)	Tempo (min)	Altura da lamina d'água (m)	Tensão (Pa)	Perda de solo (g min ⁻¹ cm ⁻²)
1	2	0,568	0,155	30	1,66	0,32	0,00632
	5	0,607			1,55	0,76	0,04079
	7	0,633			1,49	1,02	0,01413
	10	0,672			1,40	1,37	0,03527
	15	0,738			1,28	1,88	0,00706
2	2	0,568	0,155	30	1,66	0,32	0,00647
	5	0,607			1,55	0,76	0,02535
	7	0,633			1,49	1,02	0,03080
	10	0,672			1,40	1,37	0,04655
	15	0,738			1,28	1,88	0,02815

Quadro 4D. Testes de Inderbitzen com amostras indeformadas realizados para o horizonte C_(residual maduro)

Teste	Declividade (%)	Velocidade (m s ⁻¹)	Vazão (L/s)	Tempo (min)	Altura da lamina d'água (m)	Tensão (Pa)	Perda de solo (g min ⁻¹ cm ⁻²)
1	2	0,568	0,155	30	1,66	0,32	0,00302
	5	0,607			1,55	0,76	0,00654
	7	0,633			1,49	1,02	0,00578
	10	0,672			1,40	1,37	0,00304
	15	0,738			1,28	1,88	0,00956
2	2	0,568	0,155	30	1,66	0,32	0,00258
	5	0,607			1,55	0,76	0,00385
	7	0,633			1,49	1,02	0,00378
	10	0,672			1,40	1,37	0,00386
	15	0,738			1,28	1,88	0,00293

APÊNDICE E

Quadro 1E. Testes de Inderbitzen com amostras deformadas realizados para o horizonte A

Teste	Declividade (%)	Velocidade (m s ⁻¹)	Vazão (L/s)	Tempo (min)	Altura da lamina d'água (m)	Tensão (Pa)	Perda de solo (g min ⁻¹ cm ⁻²)
1	2	0,568	0,155	30	1,66	0,32	0,00479
	5	0,607			1,55	0,76	0,08576
	7	0,633			1,49	1,02	0,12874
	10	0,672			1,40	1,37	0,13911
	15	0,738			1,28	1,88	0,30552
2	2	0,568	0,155	30	1,66	0,32	0,01877
	5	0,607			1,55	0,76	0,05857
	7	0,633			1,49	1,02	0,10763
	10	0,672			1,40	1,37	0,11028
	15	0,738			1,28	1,88	0,25913

Quadro 2E. Testes de Inderbitzen com amostras indeformadas realizados para o horizonte B

Teste	Declividade (%)	Velocidade (m s ⁻¹)	Vazão (L/s)	Tempo (min)	Altura da lamina d'água (m)	Tensão (Pa)	Perda de solo (g min ⁻¹ cm ⁻²)
1	2	0,568	0,155	30	1,66	0,32	0,00098
	5	0,607			1,55	0,76	0,00206
	7	0,633			1,49	1,02	0,00323
	10	0,672			1,40	1,37	0,00646
	15	0,738			1,28	1,88	0,00393
2	2	0,568	0,155	30	1,66	0,32	0,00131
	5	0,607			1,55	0,76	0,00158
	7	0,633			1,49	1,02	0,00131
	10	0,672			1,40	1,37	0,0118
	15	0,738			1,28	1,88	0,00160

Quadro 3E. Testes de Inderbitzen com amostras indeformadas realizados para o horizonte C_(residual jovem)

Teste	Declividade (%)	Velocidade (m s ⁻¹)	Vazão (L/s)	Tempo (min)	Altura da lamina d'água (m)	Tensão (Pa)	Perda de solo (g min ⁻¹ cm ⁻²)
1	2	0,568	0,155	30	1,66	0,32	0,13093
	5	0,607			1,55	0,76	0,41568
	7	0,633			1,49	1,02	0,45307
	10	0,672			1,40	1,37	0,45176
	15	0,738			1,28	1,88	0,63487
2	2	0,568	0,155	30	1,66	0,32	0,09124
	5	0,607			1,55	0,76	0,42653
	7	0,633			1,49	1,02	0,49192
	10	0,672			1,40	1,37	0,53281
	15	0,738			1,28	1,88	0,58875

Quadro 4E. Dados relativos aos testes de Inderbitzen com amostras indeformadas realizados para o horizonte C_(residual maduro)

Teste	Declividade (%)	Velocidade (m s ⁻¹)	Vazão (L/s)	Tempo (min)	Altura da lamina d'água (m)	Tensão (Pa)	Perda de solo (g min ⁻¹ cm ⁻²)
1	2	0,568	0,155	30	1,66	0,32	0,07045
	5	0,607			1,55	0,76	0,21559
	7	0,633			1,49	1,02	0,31438
	10	0,672			1,40	1,37	0,35569
	15	0,738			1,28	1,88	0,40532
2	2	0,568	0,155	30	1,66	0,32	0,04595
	5	0,607			1,55	0,76	0,19218
	7	0,633			1,49	1,02	0,27474
	10	0,672			1,40	1,37	0,33512
	15	0,738			1,28	1,88	0,53299