

NORI PAULO GRIEBELER

**MODELO PARA O DIMENSIONAMENTO DE REDES DE DRENAGEM E
DE BACIAS DE ACUMULAÇÃO DE ÁGUA 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 "*Doctor
Scientiae*".

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2002

NORI PAULO GRIEBELER

**MODELO PARA O DIMENSIONAMENTO DE REDES DE DRENAGEM E
DE BACIAS DE ACUMULAÇÃO DE ÁGUA 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 "*Doctor Scientiae*".

Aprovada: 18 de abril de 2002

Prof. Demetrius David da Silva
(Conselheiro)

Prof. Márcio Mota Ramos
(Conselheiro)

Prof. Antônio Teixeira de Matos

Lineu Neiva Rodrigues

Prof. Fernando Falco Pruski
(Orientador)

À Suely, simplesmente por tudo

AGRADECIMENTOS

À minha Família, que, mesmo à distância, sempre esteve ao meu lado.

Ao professor Fernando Falco Pruski, pela orientação, pela amizade e apoio nos momentos difíceis.

Aos amigos Herony Ulisses Mehl, José Márcio Alves da Silva, Ricardo Santos Silva Amorim, Márcio Koetz, Sidney Sara Zanetti e Wendy Fonseca Ataíde, que, além da amizade, tornaram este trabalho possível.

Aos Professores Márcio Mota Ramos, Demetrius David da Silva e Carlos Alexandre Braz Carvalho, pelo aconselhamento e sugestões.

Aos demais colegas e aos funcionários que, com a amizade, convivência e carinho contribuíram grandemente para o êxito de mais esta jornada.

BIOGRAFIA

NORI PAULO GRIEBELER, filho de João Beno Griebeler e Alice Maria Griebeler, nasceu em 09 de março de 1970, em Marechal Cândido Rondon, PR.

Em 1994, concluiu o curso de graduação em Engenharia Agrícola, pela Universidade Estadual do Oeste do Paraná - UNIOESTE, PR.

Em 1997, concluiu o curso de Mestrado em Engenharia Agrícola na Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa, MG.

Em Março de 1998, iniciou o curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola na Universidade Federal de Viçosa, em nível de Doutorado, defendendo tese em 18 de abril de 2002.

ÍNDICE

	Página
RESUMO.....	ix
ABSTRACT.....	xi
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1. Distribuição geográfica das estradas no Brasil e sua função sócio-econômica	3
2.2. Erosão em estradas não pavimentadas	5
2.3. Práticas para o controle da erosão em estradas não pavimentadas	7
2.4. Planejamento de estradas não pavimentadas	13
2.5. Aspectos relativos à construção de estradas não pavimentadas	15
2.5.1. Uso de estabilizantes em solos para finalidades rodoviárias	18
2.5.2. Perfil transversal das estradas	18
2.6. Modelagem hidrológica associada ao estudo de estradas.....	20
2.7. Sistemas de drenagem para estradas	21
2.7.1. Conservação dos canais de drenagem	22
2.7.2. Período de retorno para o dimensionamento da rede de drenagem superficial de estradas	24
2.7.3. Erodibilidade e tensão de cisalhamento dos solos	26
2.7.3.1. Determinação da erodibilidade e da tensão crítica de cisalhamento dos solos	27

2.7.3.1.1. Canais hidráulicos	27
2.7.3.1.1.1. Inderbitzen.....	28
2.7.3.1.2. Jato submerso	29
2.7.3.1.3. Cilindro rotativo	29
2.7.3.1.4. Pinhole ou furo de agulha.....	30
2.7.4. Características geométricas e critérios de estabilidade para dimensionamento de canais	30
2.7.4.1. Escoamento em canais erodíveis	31
2.7.4.2. Critério de estabilidade baseado na velocidade máxima do escoamento	32
2.7.4.3. Critério de estabilidade baseado na tensão crítica de cisalhamento	37
2.8. Softwares desenvolvidos para projetos de canais de drenagem e controle de erosão em estradas	42
3. METODOLOGIA	43
3.1. Desenvolvimento de modelo para determinação do espaçamento entre desaguadouros e dimensionamento do canal e das características do sistema para condução e armazenamento do escoamento superficial.....	43
3.1.1. Espaçamento máximo recomendável entre desaguadouros em estradas não pavimentadas	44
3.1.1.1. Determinação do hidrograma de escoamento superficial	44
3.1.1.1.1. Modelagem do escoamento superficial advindo do leito e da área de contribuição externa à estrada.....	45
3.1.1.1.2. Modelagem do escoamento superficial no canal.....	48
3.1.1.2. Período de retorno considerado para a determinação do hidrograma de escoamento superficial	49
3.1.1.3. Determinação da tensão de cisalhamento provocada pelo escoamento superficial	51
3.1.1.4. Cálculo do espaçamento entre desaguadouros	51
3.1.1.4.1. Aprofundamento máximo tolerável no canal de drenagem	52
3.1.1.4.2. Perda de solo tolerável no canal	52

3.1.1.4.3. Perda de solo ocorrida na extremidade final do canal.....	53
3.1.1.5. Análise de desempenho da metodologia desenvolvida	56
3.1.1.5.1. Sensibilidade aos parâmetros de entrada do modelo	58
3.1.2. Metodologia para dimensionamento da seção transversal do canal e das bacias de acumulação	59
3.1.2.1. Volume das bacias de acumulação	60
3.2. Metodologia para determinação da erodibilidade e tensão crítica de cisalhamento de solos em condições típicas de canais de estradas não pavimentadas	62
3.2.1. Desenvolvimento do simulador de escoamento	62
3.2.1.1. Funcionamento do equipamento.....	64
3.2.1.2. Realização de testes com o simulador de escoamento	65
3.2.1.3. Determinação da erodibilidade e tensão crítica de cisalhamento	73
3.3. Desenvolvimento do software para aplicação do modelo desenvolvido	73
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	77
4.1. Desenvolvimento do software	77
4.1.1. Apresentação do software	77
4.1.2. Resultados fornecidos pelo software	83
4.2. Análise de desempenho do modelo desenvolvido	86
4.2.1. Análise do modelo considerando diferentes tipos de solos	86
4.2.2. Análise do modelo considerando diferentes valores de aprofundamento do canal	87
4.2.3. Análise do modelo com base na erodibilidade do solo	89
4.2.4. Análise do modelo com base na tensão crítica de cisalhamento	91
4.2.5. Análise do modelo com base na alteração da seção transversal do canal de drenagem	92
4.2.6. Análise do modelo com base na declividade do canal	94
4.2.7. Análise do modelo com base no período de retorno	95
4.2.8. Análise do modelo para diferentes localidades	97
4.2.9. Análise do modelo quanto à variação na área de contribuição ..	98

4.2.10. Análise do modelo com base na alteração das características de rugosidade do canal	100
4.2.11. Análise comparativa dos índices de sensibilidade	103
4.3. Análise dos resultados obtidos pelo modelo para dimensionamento das bacias de acumulação	104
4.4. Análise do simulador de escoamento	106
4.4.1. Aspectos construtivos e operacionais	106
4.4.2. Valores de erodibilidade e tensão crítica de cisalhamento obtidos com o uso do equipamento	107
4.4.2.1. Simulação realizada com o modelo utilizando os dados de erodibilidade e tensão crítica de cisalhamento obtidos em campo	109
5. RESUMO E CONCLUSÕES.....	111
6. RECOMENDAÇÕES.....	114
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	116

RESUMO

GRIEBELER, Nori Paulo, D.S., Universidade Federal de Viçosa, abril de 2002.
Modelo para o dimensionamento de redes de drenagem e de bacias de acumulação de água em estradas não pavimentadas. Orientador: Fernando Falco Pruski. Conselheiros: Demetrius David da Silva e Márcio Mota Ramos

O Brasil possui cerca de 1.725.000 km de estradas, sendo mais de 90% destas não pavimentadas. Essas estradas são de fundamental importância para a economia brasileira. 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 grande parte dos problemas ambientais advindos da erosão dos solos. Com base nisto, desenvolveu-se um modelo para determinação do espaçamento entre desaguadouros e o dimensionamento do canal e de bacias de acumulação, em estradas não pavimentadas. O hidrograma no canal foi obtido, utilizando-se o modelo de ondas cinemáticas, sendo este transformado em um gráfico de tensão cisalhante ao longo do tempo de ocorrência do escoamento. A perda de solo provocada pelo escoamento foi determinada, com base na diferença entre a tensão provocada pelo escoamento e a tensão crítica para cisalhamento do solo, sendo esta multiplicada pela erodibilidade do solo e pela área onde ocorre a aplicação da tensão cisalhante. O espaçamento máximo entre

desaguadouros foi estabelecido, comparando-se a perda tolerável com aquela provocada pelo escoamento, sendo o comprimento máximo do canal aquele para o qual a perda tolerável é atingida. Uma vez calculado o espaçamento entre desaguadouros, para este comprimento, são obtidos, a vazão e o volume escoado, o que permite o dimensionamento hidráulico do canal e do sistema para a acumulação de água. Para a obtenção dos parâmetros do solo necessários ao modelo, desenvolveu-se um equipamento que permite a determinação, em campo, da tensão crítica de cisalhamento e da erodibilidade do solo. Para aplicação do modelo desenvolvido, elaborou-se um software no qual os dados de entrada são a equação de intensidade, duração e frequência de precipitação, o período de retorno e as condições da estrada, da área externa a esta que contribui para o escoamento e do canal de drenagem. As simulações realizadas com o modelo mostraram ser este bastante sensível aos parâmetros de entrada, apresentando máxima sensibilidade à declividade do canal e mínima ao período de retorno.

ABSTRACT

GRIEBELER, Nori Paulo, D.S., Universidade Federal de Viçosa, april of 2002.
Model to design drainage systems and water accumulation basins in unpaved roads. Adviser: Fernando Falco Pruski. Committee Members: Demetrius David da Silva e Márcio Mota Ramos

Brazil has about 1.725.000 km of roads. More than 90% of these are unpaved. These roads constitute fundamental factor for the Brazilian economy as well as an essential element of integration and social development. Poor drainage of roads is one of the main factors that cause its degradation. This is the main responsible for the environmental problems caused by soil erosion. A model was developed to calculated the spacing between drain outlets, channel design and accumulation basins design in unpaved roads. The hydrograph was obtained in the channel using the cinematic waves model. This hydrograph was transformed in a shear stress graph along the time. The soil loss caused by runoff was determined using the difference among the shear stress caused by the runoff and the soil critical shear stress, multiplied by the soil erodibility and the shear stress application area. The maximum spacing between outlets was established by comparison of the tolerable soil loss with that soil loss caused by runoff. The maximum channel length was determined when the tolerable soil loss was reached. Once calculated the spacing between drains, it is obtained, for this length, the flow rate and the runoff volume. This allows the hydraulic

design of the channel and of the system for the water accumulation. For obtaining the parameters of the soil necessary to the model, an equipment that allows the determination of the soil critical shear stress and erodibility was developed. For application of the developed model, a software was made in which the necessary input data are the intensity-duration-frequency of precipitation equation, the return period, the characteristics of the road, the characteristics of external area that contributes to the runoff in the road channel and the characteristics of the own channel. The simulations accomplished with the model showed that this is sensitive to the entrance parameters, presenting maximum sensitivity to the channel slope and minimum sensitivity to the return period.

1. INTRODUÇÃO

Estrada corresponde a uma faixa do terreno preparada para ser utilizada por pessoas, animais ou veículos, com a finalidade de facilitar o deslocamento de um local a outro. O Brasil apresenta aproximadamente 1.725.000 quilômetros de estradas distribuídos nas diferentes regiões do País, sendo que mais de 90% são estradas não pavimentadas (DNER, 2000). Conforme ANJOS FILHO (1998), o Estado de São Paulo possui a maior malha viária do País, sendo esta de 250.000 km, dos quais apenas 30.000 km são pavimentados.

A predominância das estradas não pavimentadas em relação às pavimentadas é uma realidade praticamente em todos os países, sendo a importância destas maior em países em desenvolvimento, tendo em vista que grande parte de sua economia é baseada na produção e comercialização de produtos primários, sendo estes transportados principalmente neste tipo de estrada. Além dos aspectos econômicos, os fatores sociais envolvidos, como a integração entre comunidades e o seu desenvolvimento, estão condicionados à existência de estradas em condições favoráveis para utilização sob as mais variadas condições climáticas.

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 no Estado de São Paulo (ANJOS FILHO, 1998). GRACE III et al. (1998) salientam que mais de 90 % do sedimento produzido em áreas florestais provém das estradas,

sendo a drenagem inadequada um dos principais fatores responsáveis por essas perdas.

Diversos estudos e modelos para a compreensão e atenuação dos processos erosivos tem sido desenvolvidos para áreas cultivadas, entretanto, o esforço para o desenvolvimento de modelos voltados à minimização do processo erosivo nas estradas situadas nestas áreas ainda deixa a desejar. Fonte de processos erosivos expressivos, as estradas não pavimentadas apresentam fundamental importância no processo conservacionista, alterando as características naturais do terreno. As estradas modificam o percurso natural do escoamento superficial, alteram a capacidade de infiltração da água no solo e, em alguns casos, concentram águas advindas de áreas adjacentes, funcionando de maneira semelhante a um canal de drenagem.

Para o adequado dimensionamento de sistemas de drenagem em estradas não pavimentadas são necessários conhecimentos da vazão a ser transportada, das características geométricas dos canais e da capacidade dos solos destes canais resistir à erosão. Tendo em vista a necessidade de desenvolvimento de metodologias para a implementação de técnicas mais seguras para o dimensionamento de sistemas de drenagem em estradas de terra, desenvolveu-se o presente trabalho, que teve como objetivos:

- desenvolver modelo para o dimensionamento de redes de drenagem de bacias de acumulação de água em estradas não pavimentadas;
- desenvolver metodologia para a determinação da erodibilidade e tensão crítica de cisalhamento de solos em condições típicas de canais de estradas não pavimentadas;
- desenvolver software para a aplicação das metodologias desenvolvidas; e,
- realizar análise de sensibilidade nos parâmetros de entrada do modelo.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Distribuição geográfica das estradas no Brasil e sua função sócio-econômica

A existência de uma extensa malha viária é fundamental em qualquer nação do mundo moderno. O suporte econômico de grande parte dos municípios do interior do Brasil está na produção agropecuária, sendo que o primeiro caminho percorrido pela produção agropecuária é o que vai da propriedade rural à rede coletora, constituído essencialmente de estradas não pavimentadas. Este tipo de estrada é responsável pela interligação entre propriedades rurais e povoados vizinhos, servindo também para acesso às vias principais, ou mesmo à sede dos municípios, sendo também chamadas de estradas vicinais. Além desta classe, existem ainda as estradas destinadas unicamente à movimentação interna à propriedade, as quais tem a função de permitir o trânsito dos moradores, máquinas e equipamentos, ou o deslocamento de produtos agrícolas até as estradas vicinais.

Nos países desenvolvidos, a relação entre estradas pavimentadas e não pavimentadas¹ é maior do que em países em desenvolvimento. Da malha viária do Brasil, mais de 90% é representado por estradas não pavimentadas,

¹ Serão consideradas estradas não pavimentadas neste trabalho, todas aquelas nas quais o leito seja construído de terra ou cascalho

refletindo a importância desta classe de rodovias no contexto do sistema viário nacional. No Quadro 1 está apresentada a distribuição, por regiões, das rodovias pavimentadas e não pavimentadas no Brasil.

Quadro 1. Extensão de rodovias pavimentadas e não pavimentadas por região do Brasil

REGIÃO	Total (km)	Pavimentadas		Não pavimentadas	
		(km)	(%)	(km)	(%)
Norte	103,096	12,394	12,02	90,702	87,98
Centro - Oeste	227,825	20,814	9,14	207,011	90,86
Nordeste	405,390	45,232	11,16	360,158	88,84
Sul	476,122	32,364	6,80	443,758	93,20
Sudeste	512,496	54,184	10,57	458,312	89,43
Total	1724,929	164,988	9,57	1559,941	90,43

FONTE: DNER - Anuário Estatístico dos Transportes (2000)

THOMAZ (1984) salienta que os produtos agropecuários tem seus custos acrescidos quando transportados em estradas que apresentem elevados custos operacionais. Desta forma, estradas em condições ruins acrescentam custos desnecessários ao produto final, interferindo também nos lucros obtidos. MACHADO et al. (1997), utilizando valores de resistência ao rolamento em estradas danificadas e não danificadas, observaram que em uma estrada com boas condições de trânsito a resistência ao deslocamento pode ser bastante reduzida, resultando em grande economia no consumo de combustível.

ANJOS FILHO (1998) salienta que as estradas devem permitir o acesso da população à educação, saúde e comércio. A revitalização da economia agrícola está também relacionada diretamente à existência de estradas em boas condições de tráfego, ajudando na manutenção do homem no campo e na integração deste à sociedade urbana, representando, desta forma, importante fator para a redução do êxodo rural.

Quanto à questão erosiva, estradas em condições inadequadas podem iniciar ou agravar processos erosivos em áreas cultivadas, prejudicando a produtividade e, conseqüentemente, a lucratividade dos produtores rurais, além de afetarem a qualidade e disponibilidade dos recursos hídricos.

2.2. Erosão em estradas não pavimentadas

A erosão consiste no processo de desprendimento e transporte de partículas provocado pela ação de algum agente erosivo, sendo o vento e a água da chuva os fatores mais importantes.

Sob condições de climas tropicais, com incidência de chuvas de alta intensidade, como ocorre na maior parte do Brasil, a erosão que provoca maior degradação das terras é a causada pela chuva. Este tipo de erosão é também conhecida como erosão hídrica, sendo responsável pela perda de milhões de toneladas de solo agricultável a cada ano e também a causa de inúmeros prejuízos a áreas urbanas e setores estratégicos da economia e da sociedade.

Em estradas, mesmo nas não pavimentadas, praticamente toda a água precipitada é escoada devido à baixa capacidade de infiltração de água no seu leito, devendo o sistema de drenagem ser eficiente de modo a evitar seu acúmulo sobre o leito. Os problemas erosivos em estradas de terra devem ter uma análise mais criteriosa do que em estradas pavimentadas, tendo em vista a maior fragilidade do material do leito, o qual normalmente consiste do próprio material do local, apresentando, portanto, características bastante variadas. Mesmo quando as estradas encontram-se localizadas nas áreas internas às propriedades rurais, destinadas apenas ao uso particular, elas podem ser grandes difusoras de problemas erosivos quando mal planejadas.

A erosão do solo e suas conseqüências são vistas de maneira diferenciada nas diversas áreas de conhecimento, estando estas diferenças relacionadas aos objetivos pretendidos em cada área de estudo. No Quadro 2 estão apresentados os principais enfoques dados em várias áreas de estudo.

Para os estudos de erosão hídrica em canais de estradas, o enfoque volta-se para a área de hidráulica de canais. A capacidade resistiva do solo sob tais condições mostra-se, normalmente, superior àquela do solo sob condições de exploração agrícola, uma vez que o leito apresenta-se mais coeso devido à compactação sofrida em decorrência do deslocamento de veículos e ao próprio processo de construção da estrada.

Quadro 2. Enfoque dado ao estudo da erosão do solo em diferentes áreas do conhecimento

Área do conhecimento	Enfoque principal
Agronomia	Modelos de predição de perdas de solo e impactos provocados pelo cultivo e manejo sobre a perda de solo
Hidráulica	Estudo do escoamento e da erosão em canais
Geologia	Realização de diagnósticos ambientais e análise da influência geológica e geomorfológica no processo erosivo

Fonte: Bastos (1999)

No Estado de São Paulo, as perdas de solo associadas às estradas não pavimentadas são bastante expressivas, sendo responsáveis por danos ao meio ambiente, poluindo e assoreando mananciais hídricos (ANJOS FILHO, 1998). Em estradas não pavimentadas de pouco tráfego, a erosão hídrica pode ser relevante na própria superfície de rolamento, contudo, a partir de determinada intensidade de tráfego, a resistência do material de revestimento supera a resistência necessária para evitar a erosão hídrica (NOGAMI e VILLIBOR, 1995). REID e DUNNE (1984), entretanto, comentam que o tipo e a intensidade de trânsito a que as estradas estão sujeitas é fundamental para a produção de sedimentos. Relatam 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 eram utilizadas.

GRACE III et al. (1998) salientam que todas as partes componentes da estrada contribuem para a composição do total erodido pela mesma. Segundo King, 1989, citado por GRACE III et al. (1998), as seções de aterro respondem por 60% dos sedimentos produzidos, 25% advém das vias de circulação e 15% das seções de corte e canais laterais às estradas.

ZIEGLER et al. (2000) encontraram que, para chuvas intensas, 38 a 45% do desprendimento de sedimentos em estradas não pavimentadas foi devido ao impacto da chuva sobre seu leito, entretanto estes autores salientam que a liberação de sedimentos em estradas ainda não é claramente entendida.

A maior porção do sedimento produzido na superfície da estrada é de tamanho inferior a 2 mm, sendo o material desta granulometria o mais

prejudicial ao sistema aquático (REID e DUNNE, 1984). Segundo estes autores, comumente o material erodido das estradas move-se diretamente dos canais de drenagem aos cursos d'água. ZIEGLER et al. (2000) encontraram que, tanto o processo erosivo devido ao impacto das gotas de chuva sobre o leito como o associado ao escoamento ocorrem de maneira mais intensa no início dos eventos, justificando que isto ocorre pela existência, nesta condição inicial, de material disponível para ser transportado.

Diversas equações tem sido desenvolvidas para a predição do processo erosivo, no entanto estas equações preocupam-se, normalmente, em descrever apenas os processos associados às áreas agrícolas. NOGAMI e VILLIBOR (1995) comentam que alguns dos conceitos adotados na Equação Universal de Perdas de Solo (EUPS) são úteis para melhorar a compreensão do processo erosivo, no entanto alertam para que esta equação não deve ser utilizada em seções de corte e de aterros, e mesmo em drenos laterais de obras viárias. Estes autores relatam que existem algumas limitações nesta equação, principalmente no que se refere à inclinação da rampa, que em muito difere das áreas agrícolas. Comentam ainda que, em observações realizadas em taludes de estradas situados no Estado de São Paulo, a erosão máxima ocorreu para declividades entre 30° e 45°, sendo que para rampas mais verticais a infiltração do solo supera o efeito da intensidade da chuva, raramente ocorrendo escoamento superficial. Segundo os autores, isto ocorre devido ao fato de a superfície de secagem ser maior quando as rampas apresentam maiores inclinações.

De acordo com ZIEGLER et al. (2000), as equações para a predição de processos erosivos que não são baseadas em condições reais de estradas não predizem a perda inicial do material prontamente disponível ao transporte. Estes autores observaram este fato em estradas do Hawai e da Tailândia.

2.3. Práticas para o controle da erosão em estradas não pavimentadas

As práticas para o controle da erosão hídrica nas áreas rurais normalmente desprezam a estrada como elemento integrante do ambiente rural. A interferência mútua da estrada com as áreas marginais pode ser muito

grande no que diz respeito à erosão hídrica e suas conseqüências, podendo tanto a estrada ser prejudicada pela ocorrência de erosão e aporte de sedimentos advindos das áreas marginais, como ser a responsável por erosão nestas áreas (NOGAMI e VILLIBOR, 1995).

Alguns dos motivos que provocam a concentração de água nas estradas em áreas rurais e os problemas advindos desta, sendo os principais descritos a seguir (PARANÁ, 1994):

- a) terraços agrícolas que retêm o escoamento superficial da propriedade, deslocando-o para as estradas, provocam a ocorrência das voçorocas; e
- b) a água captada pelas estradas acumula-se provocando erosão nesta ou adentrando as áreas agrícolas, as quais não estão preparadas para recebê-la, provocando nestas o aparecimento de sulcos de erosão ou até voçorocas.

A redução dos problemas de erosão nas estradas de terra pode ser obtida por meio da adoção de medidas que evitem que a água proveniente do escoamento superficial, tanto aquele gerado na própria estrada como o proveniente das áreas nas suas margens, se acumule na estrada e passe a utilizá-la para o seu escoamento. A água escoada pela estrada deve ser coletada nas suas laterais e encaminhada, de modo a não provocar erosão, para os escoadouros naturais, artificiais, bacias de acumulação ou outro sistema de retenção localizado no terreno marginal.

As práticas a serem utilizadas para o controle da erosão são dependentes de fatores relacionados ao grau de risco de ocorrência de erosão ou à forma como o processo se apresenta.

Quando a estrada encontra-se integrada a áreas de cultivo, é recomendado que o escoamento superficial coletado nas estradas seja conduzido para estas, a fim de que seja infiltrado. Para tanto pode-se criar sistemas especiais para o escoamento e acumulação da água, de modo a não provocar prejuízos às áreas agrícolas. Estes sistemas podem ser elaborados com o avanço de camalhões ou segmentos de terraços partindo da estrada, em cota superior, adentrando às áreas agrícolas, em cota inferior, de modo que a água seja conduzida lentamente para estas. Na Figura 1 é apresentado um

esquema indicando a existência destas estruturas em estradas situadas em áreas agrícolas.

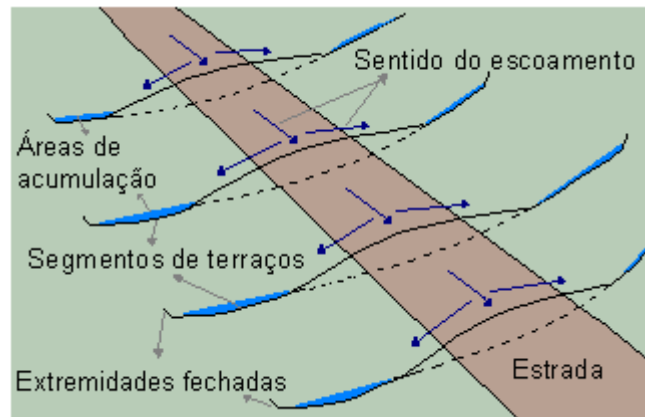


Figura 1. Esquema indicando a existência de estruturas para destinação e armazenamento de águas coletadas em estradas para serem infiltradas em áreas marginais.

O dimensionamento destas estruturas deverá considerar o máximo escoamento superficial que pode ocorrer na estrada, a capacidade de infiltração de água no solo do local que irá receber o escoamento, bem como também as culturas que irão ser exploradas, em caso de áreas agrícolas. A declividade do canal que conduzirá a água para a área marginal deve ser pequena, de modo que não provoque erosão, bem como o espaçamento entre estes canais deverá ser calculado de modo que o volume de água não seja demasiadamente elevado.

Outra alternativa para 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. Portanto, a bacia deve ser dimensionada para receber o volume escoado e possuir solo permeável para permitir que a água acumulada possa infiltrar. Na Figura 2 é apresentado um esquema deste tipo de sistema.

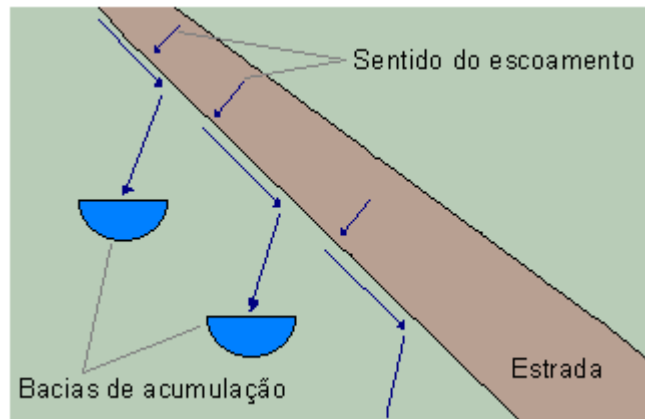


Figura 2. Desenho ilustrativo indicando a existência de bacias para coleta armazenamento e infiltração do escoamento superficial oriundo das estradas.

O sistema de bacias também pode ser implementado considerado bacias em série, principalmente quando o volume de água esperado for muito grande. Isto visa evitar que a bacia apresente superfície demasiadamente grande ou seja muito profunda, fato que poderia aumentar a área inutilizada para o cultivo, ou mesmo os riscos de ocorrência de acidentes com pessoas e animais que possam vir a circular pela área da bacia. BERTOLINI et al. (1993) salientam que a construção de bacias em série deve ser realizada com muito critério, sendo normalmente feitas em séries de três, na qual a primeira funciona como dissipador de energia, a segunda para acumulação e a terceira para segurança do sistema no caso de transbordamento.

O espaçamento mínimo entre bacias de acumulação, de acordo com BERTOLINI et al. (1993), deve ser de 40 m, independente da declividade, e os espaçamentos máximos de 120 m para declividades entre 0 e 5%, 100 m entre 5 e 10%, 80 m para declividades entre 10 e 15% e de 60 m para declividades entre 15 e 20%. Os mesmos autores relatam que o espaçamento mínimo foi estabelecido em função da operacionalidade para a construção das bacias e o critério pertinente ao espaçamento máximo em função da capacidade erosiva da água nos canais de drenagem da estrada. BUBLITZ e CAMPOS (1992) recomendam que o espaçamento entre bacias de acumulação seja feito em função da declividade da estrada, sendo que para declividades inferiores a 5%,

entre 5 e 10% e superiores a 10%, os espaçamentos devam ser de 35, 30 e 25 m, respectivamente.

Um sistema bastante comum e prático, principalmente para estradas situadas em áreas particulares em que existe sistema de terraceamento implantado ou a ser implantado, é a integração do terraço juntamente com a estrada (Figura 3). Neste sistema a água é direcionada à área de cultivo para ser retida pelo sistema de terraceamento, o qual deverá ser dimensionado prevendo o escoamento adicional.

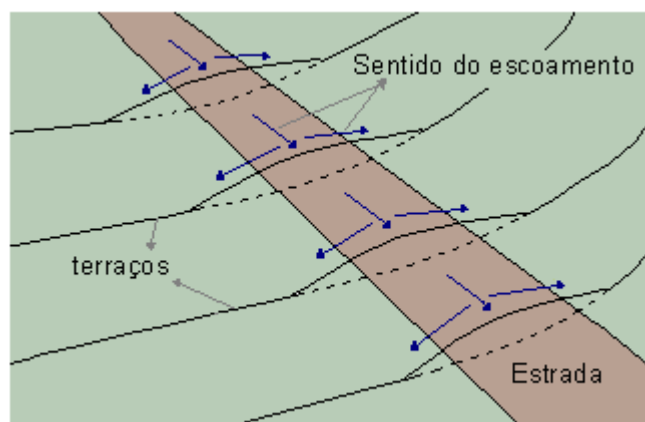


Figura 3. Desenho esquemático mostrando a integração da estrada rural com o sistema de terraceamento agrícola.

Em todos os casos deve-se considerar que o leito da estrada esteja acima do leito das áreas marginais. Este tipo de sistema cria uma ondulação sobre a estrada, a qual deve ser suavizada a fim de não dificultar o trânsito de veículos.

A diferença entre o sistema com segmentos de terraços e aquele integrado ao sistema de terraceamento é que, no primeiro, a extensão do canal corresponde apenas ao comprimento necessário para a acumulação da água para posterior infiltração, não sendo necessário que funcione como sistema de terraceamento agrícola.

BUBLITZ e CAMPOS (1992) recomendam que, em regiões cujos solos sejam derivados de basalto, as lombadas sobre as estradas conduzam as águas pluviais para os canais dos terraços, e em regiões de solos arenosos, as

águas sejam conduzidas para bacias de acumulação. Esta colocação deve estar relacionada a superfície e a taxa de infiltração. Em solos arenosos a taxa de infiltração apresenta-se normalmente maior, sendo a superfície de infiltração maior em canais de terraços. Estes autores recomendam que as lombadas sejam projetadas em locais nos quais ocorra maior risco de ocorrência de erosão devido ao escoamento, sendo normalmente recomendadas até a declividade de 8%, e o seu espaçamento normalmente coincide com o espaçamento recomendado entre terraços. É recomendado que o espaçamento entre lombadas seja de 50 m para declividades de 2% a 5%, de 40 m para declividades de 6% a 10% e de 30 metros para declividades acima de 10% (MANUAL..., 2000).

PASTORE (1997) recomenda que as águas drenadas para as laterais das estradas devam escoar em canais com desaguadouros espaçados de, no máximo, 20 m. Ainda de acordo com este autor, a erosão dos solos nos canais de drenagem depende da velocidade de escoamento da água e do tipo de solo, salientando que trechos em rampa, com solos arenosos no leito, deverão ter desaguadouros mais próximos para evitar que a água alcance velocidades incompatíveis com a resistência do solo à erosão.

Os critérios apresentados na literatura (MANUAL..., 2000, BUBLITZ e CAMPOS, 1992 e PASTORE, 1997) não consideram a resistência do solo e a condição em que se encontra o canal de drenagem da estrada, bem como também não consideram a variabilidade espacial das precipitações e das dimensões da estrada, fatores que irão interferir na vazão e no volume de escoamento.

MORRIS (1995) salienta que o pavimento deve apresentar resistência mecânica suficiente para vencer o peso exercido pelos veículos, apresentando fundações resistentes, cobertura e canais adequados para receber e transportar a água das precipitações, mantendo seu leito sempre em condições de tráfego. A utilização, no leito da estrada, de material que apresente grande resistência mecânica é uma das alternativas para que sua trafegabilidade permaneça boa ao longo do tempo. No entanto medidas adicionais devem ser tomadas para evitar seu desgaste. De acordo com Megahan, 1974, citado por LUCE e BLACK (1999), o material com o qual são construídos os leitos das estradas são geralmente bastante compactados, reduzindo sua erodibilidade, a

qual, segundo NOGAMI e VILLIBOR (1995), é um dos fatores mais importantes para a escolha do projeto mais apropriado para controlar a erosão ao longo das rodovias.

A exposição de camadas de baixa estabilidade deve ser evitada, tendo em vista a maior suscetibilidade destas à ação dos fatores erosivos. Não é incomum, na construção de estradas, a necessidade de cortes profundos nos perfis do solo, provocando a exposição de horizontes menos estáveis. COSTA et al. (1995) salientam que a exposição do horizonte C tem causado muitos danos às estradas porque trata-se de horizonte com agregação fraca e de baixa estabilidade, ficando bastante suscetível à erosão quando exposto. Comentam ainda que tanto a descontinuidade geológica como a de solos cria uma zona de instabilidade, facilitando os processos erosivos.

SWIFT Jr. (1984) salienta que o bom controle da erosão nas estradas utilizando uma camada relativamente espessa de predregulho contrasta com o pequeno controle exercido por uma camada fina do mesmo material, o qual não se mostra melhor do que uma superfície com solo nu. Este autor salienta ainda que os leitos de estradas, quando vegetados, exercem um controle considerável da erosão a um custo relativamente baixo. Esta prática, no entanto, sob trânsito freqüente não é viável, uma vez que a vegetação não se desenvolve, podendo mostrar-se eficiente apenas em estradas de uso transitório, como áreas florestais divididas em talhões.

2.4. Planejamento de estradas não pavimentadas

O objetivo principal do projeto de uma estrada é o de permitir, a um mínimo custo, que sua superfície seja segura ao deslocamento dos veículos e seu leito seja resistente ao desgaste pelo tráfego e erosão (MORRIS, 1995). Suas características dependem de diversos fatores como a localização, a forma de utilização, a finalidade e interesse regional, as condições topográficas e estruturais do terreno, os recursos gastos para a sua construção, entre outros (POLITANO et al., 1989).

De acordo com CARVALHO et al. (1997), os trabalhos para implantação de uma estrada devem iniciar por meio de estudos de

planejamento de transporte e, posteriormente, pelo estabelecimento das prioridades de ligação. Para tanto, necessita-se do levantamento da planimetria e altimetria do terreno, da geologia, do solo, da vegetação, das áreas alagadas ou com terrenos apresentando instabilidade, da rede hidrográfica, do cadastro de cidades e das vias rodoviárias e ferroviárias existentes.

O eixo de locação da estrada deverá visar o alcance entre dois pontos na menor distância possível, obedecendo critérios técnicos necessários à sua construção e o custo para a execução e manutenção da mesma. As rampas máximas deverão obedecer critérios de segurança e economia, bem como as condições tratoras dos veículos que nela irão se deslocar, devendo este deslocamento se realizar sem provocar no veículo um desgaste e consumo de combustível excessivos, e ainda não provocar ruído e emissão de poluentes em demasia (POLITANO et al., 1989).

A locação de estradas deve ser preferencialmente realizada sobre os divisores de água, não sendo requeridas, nesses casos, estruturas especiais para drenagem, reduzindo os custos de construção e manutenção. Se esta opção não for possível, deve-se utilizar gradientes suaves da ordem de 0,2 a 1%, não oferecendo assim dificuldades ao tráfego, bem como sendo favoráveis à construção de canais de drenagem ao longo da estrada. Declividades de 1 a 5% não apresentam dificuldade ao tráfego, porém o controle da erosão em drenos laterais mostra-se mais problemático. Para declividades superiores a 5%, o traçado da estrada deve ser realizado em segmentos não contínuos (HUDSON, 1995).

O traçado da estrada deverá também obedecer critérios de mínimo impacto sobre o meio ambiente. Para um bom traçado deve-se procurar um balanço entre todos itens a serem observados, no entanto, a adoção de todos os critérios a serem considerados nem sempre é possível, devendo-se utilizar o bom senso na opção por um ou outro traçado. Normalmente, a finalidade da obra permite estabelecer qual o critério de maior relevância. Conforme POLITANO et al. (1989), o fator custo normalmente é o de maior peso, porém, dependendo do caso, não pode ser tomado como prioridade, como no caso de reservas, parques ou outras áreas de proteção, em que o fator ecológico é fundamental. O menor dispêndio de capital na construção da estrada nem sempre reflete o menor custo total, devendo ser observados os custos de

manutenção e as condições de boa trafegabilidade durante todo o período de utilização da obra.

O planejamento, a implementação ou a adequação de estradas e carreadores de modo integrado às demais práticas de manejo e conservação de solo e água propicia um maior controle da erosão hídrica, bem como reduz a necessidade e os custos de manutenção. A má locação das estradas favorece à concentração da água, causando inúmeros prejuízos às propriedades rurais, aos agricultores e à sociedade em geral.

A integração da estrada ao meio e o planejamento da conservação desta juntamente com as demais áreas, agrícolas ou não, com a correta destinação da água da chuva, tendem a evitar que ocorra a erosão na estrada. Conforme COSTA et al. (1995), quando a localização das estradas é bem planejada, as demais práticas de conservação do solo mostram-se bastante eficientes, ocorrendo o oposto quando estas são mal planejadas, podendo as práticas serem mais prejudiciais do que úteis.

2.5. Aspectos relativos à construção de estradas não pavimentadas

Na construção de estradas o solo é visto como um material de construção, utilizado como camada de rolamento ou fundação, devendo apresentar características adequadas para suportar a carga a que será submetido, sem que ocorra deformação acentuada capaz de modificar a conformação original do projeto. No programa Paraná 12 meses, desenvolvido no Estado do Paraná, são descritas as atividades necessárias para a execução dos serviços de adequação de estradas realizadas (MANUAL..., 2000). Os serviços são realizados com terraplanagem, incluindo desmatamento, suavização do greide, abaulamento, construção de lombadas, bacias de acumulação, entre outros. Após a terraplanagem é realizado o revestimento primário, que tem a finalidade de proteger e dar suporte ao leito da estrada, e é construído o sistema de drenagem superficial. São ainda realizados serviços complementares como a colocação de cobertura vegetal em áreas que apresentem maiores riscos de erosão, implantação de drenagem subterrânea

em casos de aparecimento do lençol freático, além de melhorias ambientais nas áreas marginais à estrada.

Conforme MORRIS (1995), a proteção de uma estrada é obtida pelo abaulamento do leito, pela super-elevação nas curvas e pelos drenos e bueiros que removem a água provinda do escoamento para fora da estrada.

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 da água da chuva, 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 evitar que a água escoe longitudinalmente sobre a estrada, se avolumando e adquirindo energia suficiente para erodi-la. O abaulamento deve ser projetado levando em conta, além da drenagem, a comodidade dos usuários, tendo em vista que um abaulamento excessivo faz com que os condutores dos veículos prefiram o centro da pista (GUTIERREZ, 1972).

GUTIERREZ (1972) recomenda valores de declividade transversal de 2 a 8% para estradas de terra, dependendo da precipitação e do tipo de superfície. Uma superfície dura e lisa requer um abaulamento menor do que uma superfície rugosa e menos rígida. O tipo de veículo que transita na estrada deve ser determinante para a escolha do abaulamento máximo, o qual deverá ser de 3 a 6%. Em vias nas quais circulam veículos com cargas altas, como caminhões com algodão ou aves, o abaulamento excessivo poderá causar tombamento em curvas (MANUAL..., 2000).

Segundo PASTORE (1997), em leitos de estrada com solos argilosos lateríticos, as soluções mais indicadas são o agulhamento e o revestimento primário. Este autor complementa que o agulhamento é uma solução menos recomendável que o revestimento primário, no entanto apresenta menor custo de implantação. Segundo o mesmo autor, 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.

O revestimento primário envolve mais operações para a sua execução do que o agulhamento, apresentando a vantagem de se poder escolher a melhor proporção entre cascalho e solo para fazer a mistura, bem como para definir a espessura da camada a ser trabalhada (PASTORE, 1997). Este autor apresenta, para a realização do revestimento primário, os seguintes passos:

- a) regularização e abaulamento da seção transversal da estrada;
- b) escarificação do leito até cerca de 15 cm de profundidade;
- c) umedecimento do leito sem, no entanto, encharcar o solo;
- d) compactação da borda para o centro da estrada;
- e) escarificação leve da superfície compactada;
- f) lançamento e espalhamento de mistura de cascalho e solo argiloso laterítico em camada não superior a 25 cm;
- g) umedecimento da camada de mistura aplicada; e
- h) compactação da borda para o centro da estrada.

Para a execução do agulhamento o processo é semelhante, seguindo-se somente os passos a, b, c, f e h.

A mistura de solo e cascalho deverá conter, conforme PASTORE (1997), de 15 a 30% de solo e apresentar CBR (Califórnia Bearing Ratio – Índice de Suporte Califórnia) mínimo de 30%.

Em leitos de solo arenoso laterítico os principais cuidados devem ser relacionados à implantação e manutenção de um bom sistema de drenagem e em leitos com solos saprolíticos de basalto não é recomendado o agulhamento, em decorrência da falta de coesão do solo, devendo, neste caso, o solo ser inicialmente revestido. Este revestimento consiste da 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).

2.5.1. Uso de estabilizantes em solos para finalidades rodoviárias

Os solos apresentam comportamentos diferenciados e, muitas vezes, desfavoráveis à construção de estradas, não sendo recomendada a sua utilização na forma natural.

Com vistas ao aumento da resistência mecânica do leito das estradas, principalmente naquelas nas quais o material a ser utilizado não oferece boas condições para a construção do pavimento, é comum a utilização de estabilizantes químicos. Este tipo de estabilização pode ser definido como uma mistura de solo com uma ou mais substâncias em combinação, podendo esta ser pó, líquido ou gel (WIRTERKORN, 1991). Conforme KÉZDI (1979), a estabilização tem como objetivo modificar as interações solo-água, por meio de reações de superfície, fazendo com que o comportamento do solo com relação aos efeitos da água sejam mais favoráveis aos objetivos de sua utilização.

Para a construção de estradas, o solo deve apresentar, conforme INGLES e METCALF (1973), quatro propriedades principais: estabilidade de volume, resistência mecânica, permeabilidade e durabilidade.

VAILLANT (1995) testou o estabilizante de nome comercial DS-328 para três solos da região de Viçosa, MG, encontrando como principal efeito benéfico a redução da expansão dos solos e a elevação do CBR. ALCÂNTARA (1995), realizando estudo de estabilização solo-cal, obteve ganhos de resistência em ensaios de compressão simples, não encontrando, porém, uma relação direta entre alguns índices do solo como o percentual de argila e o índice de plasticidade com o ganho de resistência com a mistura solo-cal. CARDOSO (1994) obteve resultados satisfatórios no emprego da cal para a redução da expansão dos solos, a qual mostrou um desempenho ótimo entre 2 e 4%, sendo que o emprego deste produto age na estabilização de solos expansivos.

2.5.2. Perfil transversal das estradas

As estradas podem apresentar diferentes perfis, não sendo obrigatória a conformação abaulada. Dependendo da situação na qual se encontram, seja

em linhas retas ou em curvas, em terreno plano ou em encostas, ou mesmo em condições de terrenos baixos com drenagens deficientes, as estradas podem se apresentar de diferentes maneiras, no entanto, as características de boa drenagem devem ser sempre observadas.

A forma como o perfil da estrada é desenhado influenciará na maneira como a água irá escoar e no dimensionamento do sistema de drenagem. Assim, o projeto deverá acompanhar as variações da estrada ao longo do seu eixo, tendo em vista que diferentes condições ocorrem em uma mesma estrada. O planejamento e implantação deverão prever todas as possibilidades.

Sob condições de curvas, os perfis devem ser alterados para facilitar o tráfego e reduzir o risco de acidentes. Nestes casos, o perfil apresenta, normalmente, elevação em um lado da pista, o que é chamado de super-elevação, bem como alteração da largura da pista, o que é normalmente conhecido como super-largura. Na Figura 4 apresenta-se diferentes perfis transversais para estradas e a representação dos canais de drenagem superficial.

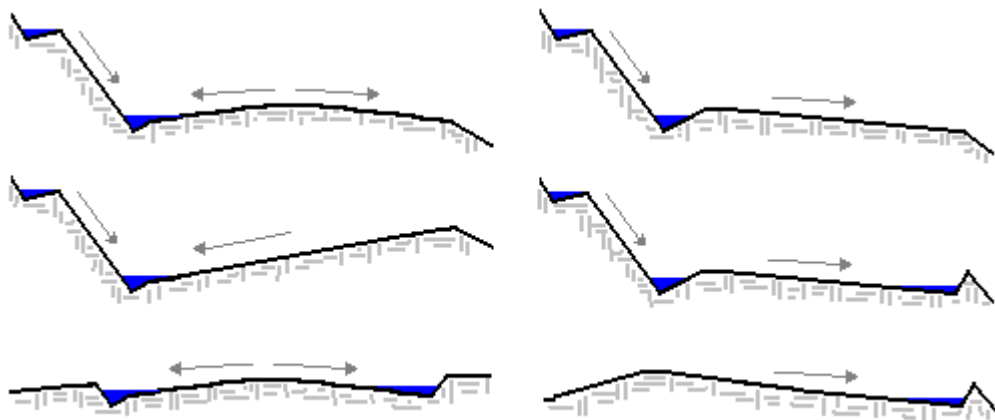


Figura 4. Perfis transversais de estradas e representação dos sistemas de drenagem superficial associados a estas estradas.

2.6. Modelagem hidrológica associada ao estudo de estradas

A hidrologia busca o entendimento do ciclo hidrológico, de tal forma que interações complexas possam ser representadas de maneira simples, a fim de poderem ser compreendidas facilmente. A descrição das interações entre os diversos componentes do ciclo hidrológico torna-se bastante complexa à medida que a variabilidade espacial e temporal de seus componentes vai sendo inserida e uma descrição física dos processos é buscada.

Em estradas, o entendimento do processo hidrológico relacionado ao escoamento superficial decorrente das chuvas torna-se menos complexo do que em áreas sob terrenos reflorestados ou agricultáveis. Naquelas superfícies, a taxa de infiltração de água no solo, o armazenamento superficial e a retenção pela cobertura vegetal não apresentam grande importância, uma vez que seus valores são muito reduzidos. ELLIOT et al. (1999) apresentaram valores de condutividade hidráulica que indicam que em estradas construídas em superfícies naturais, a taxa de infiltração é muito mais baixa do que sob outras condições de uso dos solos, incluindo estradas encascalhadas. Estes autores apresentaram valores que variaram de menos de 1 mm h^{-1} para superfícies de estradas sob condições de solo natural, ou não encascalhada, a 80 mm h^{-1} em solos florestais não movimentados. Os mesmos autores citam valores obtidos por Luce e Cundy, os quais foram de 0,1 a $0,5 \text{ mm h}^{-1}$ em estradas com solos naturais, enquanto que para estradas encascalhadas os valores variam em torno de 3 mm h^{-1} . MORFIN et al. (1996) apresentaram valores de condutividade de $0,3 \text{ mm h}^{-1}$ para estradas com leito argiloso e siltoso e, para estradas com leitos arenosos, cascalhado argiloso e cascalhado arenoso valores de 1, 2 e 3 mm h^{-1} , respectivamente. Esta baixa capacidade de infiltração favorece a ocorrência do escoamento superficial, o qual, quando não adequadamente conduzido para áreas externas à estrada, poderá provocar danos ao leito ou mesmo às áreas adjacentes.

As chuvas frontais, caracterizadas pela longa duração, baixa intensidade e por abranger grandes áreas, são importantes no projeto de estradas, uma vez que mantém o leito umedecido por longo intervalo de tempo, devendo a estrada ser prejudicada pelo tráfego sob estas condições. Para fins de dimensionamento dos sistemas de drenagem das estradas, as chuvas de

maior importância são as convectivas, uma vez são de grande intensidade, sendo responsáveis por vazões elevadas. Para a quantificação destas vazões são necessários métodos que permitam transformar informações sobre as chuvas e sobre o terreno em vazão de escoamento. Neste sentido, diversos são os métodos disponíveis, sendo o mais comum e de mais fácil utilização o método racional.

De acordo com SMEDEMA e RYCROFT (1983), o método racional foi inicialmente desenvolvido para estimar vazões máximas de escoamento em pequenas bacias urbanas, as quais apresentam grande área impermeabilizada. PRUSKI et al. (1997) desenvolveram um modelo para predição do escoamento superficial baseado em princípios físicos. SILVA (1999), utilizando o modelo desenvolvido por PRUSKI et al. (1997), desenvolveu metodologia para a obtenção do hidrograma de escoamento ao longo de encostas regulares e em canais e drenos de superfície.

2.7. Sistemas de drenagem para estradas

Em todos os solos, a resistência à deformação é reduzida expressivamente quando este apresenta-se úmido, não sendo diferente em condições de estradas, as quais somente podem permitir o deslocamento adequado eficientemente se forem corretamente drenadas (HUDSON, 1995). MARTINS et al. (1997) relatam que vias sem pavimentação não permitem que o tráfego ocorra normalmente quando desprovidas de drenagem adequada. Estes autores observaram que, mesmo em rodovias pavimentadas, sua deterioração é mais acelerada quando o sistema de drenagem não é eficiente.

O sistema de drenagem deverá ser dimensionado em função da vazão de água esperada, da capacidade erosiva do escoamento e do tipo de material dos drenos. Assim, os drenos devem ser dimensionados de modo que não sejam erodidos e dêem vazão à água coletada (GUTIERREZ, 1972). Este autor salienta também que o pior inimigo para conservação de uma estrada é a água.

Conforme NOGAMI e VILLIBOR (1995), a condução da água provinda da plataforma da estrada pode ser feita sem confinamento, no qual a água escoar produzindo escoamento sem grandes concentrações, ou com

confinamento, no qual a água é conduzida a canais longitudinais ou outros dispositivos adequados. Normalmente, os custos de condução sem confinamento são menores, porém sua utilização não é generalizada, sendo que seu uso, em algumas circunstâncias, não é possível.

A construção dos canais de drenagem em estradas não pavimentadas e de baixo volume de tráfego representa uma parcela expressiva no custo total da obra, tendo em vista que o dispêndio de capital não é tão grande nestes casos. Este fato faz com que a erosão nas bordas do pavimento seja geralmente mais grave neste tipo de rodovia do que nas rodovias de maior volume de tráfego (NOGAMI e VILLIBOR, 1995). De acordo com GUTIERREZ (1972), o custo do sistema de drenagem da estrada é determinado pela macro drenagem, enquanto que a sua vida útil é determinada pela drenagem de pequena escala, ou micro drenagem. Comenta ainda que estradas localizadas em divisores de águas são ideais do ponto de vista da drenagem, uma vez que necessitam apenas de estruturas de alívio. Aquelas localizadas em encostas são de fácil drenagem, no entanto deve-se projetar, muitas vezes, obras complementares para captação das águas e para evitar deslizamentos.

2.7.1. Conservação dos canais de drenagem

Conforme LUCE e BLACK (1999), a manutenção dos canais de drenagem remove a vegetação que retêm os sedimentos, aumentando, com esta prática, a perda de sedimentos facilmente transportáveis. Estes autores encontraram que, em segmentos de estradas nos quais a vegetação foi removida dos canais de drenagem e dos cortes da encosta, foram produzidos sete vezes mais sedimentos do que em locais nos quais a vegetação foi mantida. Enfatizam, com esta observação, a importância da revegetação após a construção da estrada e também sobre o impacto negativo da limpeza dos canais de drenagem durante sua manutenção. A revegetação, apesar de ser uma prática importante, pode apresentar outro problema, que é o assoreamento do canal devido ao acúmulo de sedimentos e o aumento do coeficiente de rugosidade do canal, fazendo com que o escoamento ocorra mais lentamente e a lâmina d'água seja aumentada. LUCE e BLACK (1999)

encontraram ainda que o tratamento dado ao canal de drenagem pode ser mais importante para o aumento da produção de sedimento do que o tratamento dado aos cortes da encosta, embora concordem que isto possa ser verdade apenas para um curto intervalo de tempo.

NOGAMI e VILLIBOR (1995) salientam que prevalece, nas rodovias com base de solo arenoso fino laterítico, o uso do mesmo solo para o acostamento, sendo nesses casos aconselhável o plantio de grama na faixa adjacente ao acostamento, o que diminui consideravelmente a necessidade de construção de canais longitudinais para escoamento da água. Estes autores recomendam que os canais sejam revestidos com grama para declividades inferiores a 2%, revestidos com solo-cimento para declividades entre 2% e 5%, e de concreto para declividades superiores a 5%.

Resultados encontrados por LUCE e BLACK (1999) lhes permitiram algumas observações importantes como a grande variabilidade na produção de sedimentos em diferentes segmentos da estrada. Este autores observaram que a produção de sedimentos é proporcional ao produto do comprimento do segmento da estrada pelo quadrado da sua declividade (LS^2). Encontraram ainda que a textura do solo tem um forte efeito na produção de sedimentos, sendo que solos de textura mais grosseira produzem menor quantidade de sedimentos, e que estradas mais antigas, com canais de drenagem sem perturbação, produzem muito menos sedimentos do que estradas novas, com canais que sofreram perturbação recente.

NOGAMI e VILLIBOR (1995) recomendam, para trechos longos de canais de drenagem, calcular a vazão e a velocidade máximas previstas para o escoamento. Esta recomendação busca evitar que o escoamento atinja velocidade erosiva, podendo causar sérios danos à estrada. É recomendado que sejam utilizadas saídas apropriadas para a água, para que esta não venha a causar erosão nas áreas marginais, sendo, em muitos casos, interessante a construção de bacias de acumulação para as águas advindas dos canais de drenagem das estradas.

2.7.2. Período de retorno para o dimensionamento da rede de drenagem superficial de estradas

O dimensionamento dos canais de drenagem de estradas deve ser baseado na vazão máxima de escoamento esperada. A vazão de escoamento deve ser determinada com base em dados pluviográficos da região onde está sendo feito o projeto, sendo a intensidade de precipitação determinada a partir da escolha de um período de retorno (T_r). A intensidade de precipitação é normalmente determinada pela equação,

$$i_m = \frac{KT_r^a}{(t+b)^c} \quad (1)$$

em que

i_m = intensidade máxima média de precipitação, mm h^{-1} ;

K, a, b, c = parâmetros relativos à localidade;

T_r = período de retorno, anos; e,

t = duração da precipitação, min.

WEST (1982) apresenta alguns valores de T_r (Quadro 3) recomendados para o dimensionamento de obras viárias.

Quadro 3. Valores de período de retorno para diferentes tipos de estruturas viárias.

Tipo de estrutura	Período de retorno (anos)
Pontes ou rodovias principais	50 - 100
Pontes ou rodovias de ligação	25
Bueiros, estradas secundárias, redes de esgotos ou drenos laterais	5 - 10

STALLINGS (1999), analisando o escoamento advindo de estradas, comenta que o período de retorno de 10 anos e a condição de solo vegetado são utilizados para o dimensionamento dos drenos, enquanto que a verificação

da estabilidade da estrada é realizada utilizando um período de retorno de 2 anos, para condições de solos argilosos. Conforme CEBTP (Centre Experimental de Recherches et D'études du Batiment et Travaux Publics), 1980, citado por PASTORE (1997), para condições de estradas com volume médio de tráfego de 200 veículos por dia e tratada com agulhamento a duração média do leito é de 3 anos. Assim, evidencia-se que os valores de T_r normalmente utilizados para a verificação da estabilidade e para o dimensionamento dos canais são diferentes. Para o dimensionamento de bacias de acumulação é recomendado um período de retorno de 10 anos (MANUAL..., 2000).

Na análise de freqüência das chuvas intensas, as séries de dados podem ser completas, parciais ou anuais. As séries completas são compostas por todos os valores disponíveis. A série parcial é constituída pelos “n” maiores valores da série com “n” anos, e a série anual é composta pelo maior valor de precipitação observado em cada ano da série histórica de dados, sendo desprezados os demais valores, mesmo que sejam superiores aos de outros anos (FREITAS et al., 2001).

O uso de séries anuais é mais difundido do que as séries parciais (MOREIRA et al., 1993), no entanto STEDINGER et al. (1992) fazem objeções ao uso deste tipo de série, tendo em vista o fato de se empregar apenas os valores máximos anuais, independentemente de um determinado valor em um ano superar o máximo de outros anos. Já BERTONI e TUCCI (1993) comentam que o uso de séries parciais é utilizado quando o número de anos de dados é pequeno e os períodos de retorno a serem utilizados são inferiores a 5 anos.

Conforme CHOW (1964), a relação entre os períodos de retorno de séries parciais e anuais pode ser obtida utilizando a seguinte expressão

$$T_{rp} = \frac{1}{\ln T_{ra} - \ln(T_{ra} - 1)} \quad (2)$$

em que

T_{rp} = período de retorno da série parcial, anos; e,

T_{ra} = período de retorno da série anual, anos.

Esta equação é recomendada para períodos de retorno inferiores a três anos. Para períodos de retorno da série anual superiores a três anos, CHOW (1964) recomenda utilizar a equação

$$T_{rp} = T_{ra} - 0,5 \quad (3)$$

2.7.3. 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 de tensão aplicada. De acordo com BASTOS (1999), a erodibilidade pode ser definida como a propriedade do solo que expressa a maior ou menor facilidade com que suas partículas são desprendidas por um agente erosivo.

LIMA et al. (1992) salientam que erodibilidade não é sinônimo de erosão, devendo ser analisados de forma diferenciada e, conforme Wischmeier e Smith, em 1978, citados por LIMA et al. (1992), enquanto a erosão depende de fatores como a declividade, características das chuvas, cobertura vegetal, entre outras, a erodibilidade é um fator intrínseco de cada solo.

Conforme BASTOS (1999), a erodibilidade é uma das características mais complexas do solo, em virtude do grande número de fatores físicos, químicos, biológicos e mecânicos intervenientes. No Brasil, com relação ao estudo da erosão, a erodibilidade do solo constitui-se no parâmetro de maior custo e morosidade para determinação, tendo em vista a extensão do território e a diversidade de solos evidenciada no país (DENARDIN, 1990). NOGAMI e VILLIBOR (1995) salientam que 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 partículas.

Sob condições de estradas, ZIEGLER et al. (2000) encontraram que a erodibilidade é variável, sendo que o material mais solto é inicialmente transportado sob taxas de erosão mais elevadas, sendo a camada abaixo mais

resistente à erosão. Este processo é denominado de erodibilidade dinâmica, sendo alterada ao longo do escoamento.

A tensão crítica de cisalhamento dos solos pode ser entendida como a máxima tensão que pode ser aplicada ao solo sem que haja desagregação de suas partículas.

2.7.3.1. Determinação da erodibilidade e da tensão crítica de cisalhamento dos solos

BASTOS (1999), após utilizar diferentes metodologias, salienta que não existe um critério considerado unânime na literatura para a determinação da erodibilidade. Nos solos estudados por este autor, o melhor desempenho foi obtido com os critérios propostos por Middleton, em 1930, baseado na razão de dispersão do solo e por Nogami e Villibor, em 1979, baseado na capacidade de infiltração e no potencial de desagregação dos solos em água.

BASTOS (1999) comenta sobre diferentes ensaios para o estudo da resistência à erosão em solos coesivos, apresentando ensaios em canais hidráulicos, ensaios de jatos submersos e em cilindros rotativos e pinhole ou furo de agulha, conforme descrito a seguir:

2.7.3.1.1. Canais hidráulicos

Ensaio em canais hidráulicos consistem na passagem de escoamento controlado de água sobre amostras de solo colocadas rente ao fundo de canais, buscando-se reproduzir uma condição próxima à normalmente encontrada na natureza. Conforme HOLLICK (1976), a diferença entre a erodibilidade no canal e na amostra de solo, a incerteza na estimativa da tensão cisalhante e as imperfeições e má distribuição do escoamento na superfície da amostra, são os principais problemas associados ao uso dos canais hidráulicos.

KAMPHUIS et al. (1990) preconizam a necessidade de extremos cuidados na moldagem das amostras empregadas nos testes em canais, devido à influência da estrutura natural dos solos na resistência à erosão, devendo ser evitada a formação de uma superfície que seja facilmente erodida,

bem como também a presença de descontinuidades que possam determinar o início do processo erosivo.

2.7.3.1.1.1. Inderbitzen

O ensaio de Inderbitzen é o ensaio do tipo canal hidráulico mais comumente utilizado no meio geotécnico (BASTOS, 1999). Neste equipamento, uma amostra de solo indeformada é presa à base de uma rampa, de modo que a superfície da amostra coincida com a superfície da rampa. Esta rampa apresenta inclinação que pode ser variada de modo a representar diferentes condições de declividade. Sobre a rampa é aplicada uma vazão conhecida, sendo coletados os sedimentos liberados pela amostra em intervalos de tempo pré definidos. Os resultados normalmente são expressos em gráficos de perda de solo por tempo.

Pela variação das declividades e das vazões são obtidas diferentes tensões cisalhantes aplicadas à amostra, podendo, desta forma, ser obtida a tensão crítica para o cisalhamento do solo. Na Figura 5 é apresentado uma representação esquemática do equipamento de Inderbitzen proposto por FRAGASSI (2001).

BASTOS (1999) descreve a respeito de discussão ocorrida sobre o teste durante o 2º Simpósio Nacional de Controle de Erosão, sendo relatado que dentre os problemas associados ao equipamento está a descontinuidade entre a amostra e a superfície da rampa, provocando turbulência na bordadura do anel.

FACIO (1991) adaptou um equipamento de Inderbitzen visando a proposição de metodologia para estudo da erodibilidade dos solos do Distrito Federal e SANTOS (1997), utilizando o mesmo equipamento desenvolvido, realizou uma caracterização geotécnica do processo evolutivo da erosão no município de Goiânia. BASTOS (1999) utilizou este equipamento para a determinação da erodibilidade e tensão crítica de cisalhamento de solos residuais da região de Porto Alegre. FRAGASSI (2001) também realizou estudo da erodibilidade de solos residuais de gnaiss da Serra de São Geraldo e de Viçosa utilizando o equipamento de Inderbitzen.

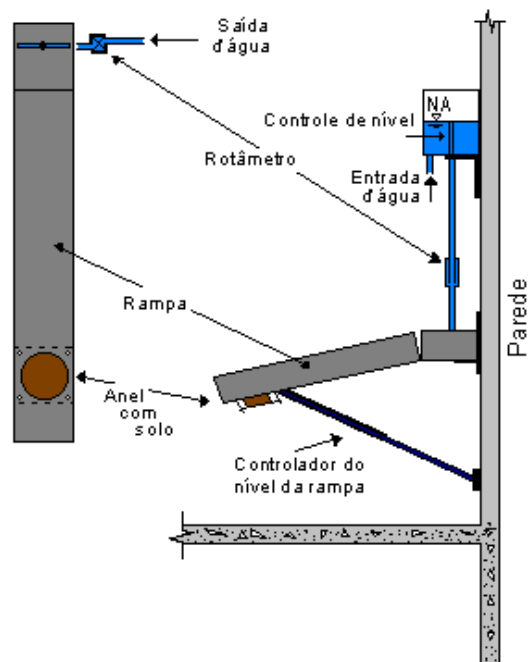


Figura 5. Equipamento de Inderbitzen para determinação da erodibilidade e da tensão crítica para cisalhamento do solo provocada pelo escoamento.

2.7.3.1.2. Jato submerso

No ensaio de jato submerso a superfície de uma amostra de solo é submetida à ação de um jato de água com altura, diâmetro e velocidade controlados, tendo a finalidade de determinar a tensão crítica de solos coesivos. O jato é aplicado sob uma lâmina d'água e a sua ação erosiva é avaliada por meio da erosão provocada.

HANSON (1991) apresenta o equacionamento para o cálculo das tensões geradas pelo ensaio de jato submerso e introduz um índice de jato, que relaciona a velocidade de erosão pelo jato com a velocidade do escoamento e o tempo. HANSON (1990) apresenta um equipamento de jato submerso para ensaio "in situ", empregado para fornecer subsídios a projetos de aterros e canais de terra.

2.7.3.1.3. Cilindro rotativo

O ensaio de cilindro rotativo consiste na colocação de uma amostra de solo cilíndrica presa a um eixo colocado internamente a um cilindro externo maior. O espaço entre a amostra de solo e a parede do cilindro externo é

preenchida com água, a qual transmite para a amostra a tensão cisalhante provocada pela rotação do cilindro externo. Para a determinação da tensão cisalhante aplicada é utilizado um torquímetro ligado ao eixo central da amostra. A velocidade de rotação do cilindro externo é aumentada até a observação do carreamento de partículas da superfície da amostra, correspondendo esta à tensão crítica de cisalhamento.

2.7.3.1.4. Pinhole ou furo de agulha

O método consiste em se fazer percolar uma amostra de água, submetida a um gradiente hidráulico definido, através de um furo de 1 mm de diâmetro que atravessa um corpo de prova cilíndrico. A resistência à erosão é estimada pelo diâmetro final do furo, pela coloração da água e pela vazão que atravessa a amostra.

Conforme BASTOS (1999), este ensaio é um dos mais empregados para caracterização de solos dispersivos.

2.7.4. Características geométricas e critérios de estabilidade para o dimensionamento de canais

Além da capacidade de escoamento, a forma geométrica dos canais de drenagem de estradas deve ser adequada de modo a oferecer segurança ao tráfego. GUTIERREZ (1972) salienta que canais retangulares, bem como canais triangulares profundos, não são recomendados, tendo em vista que, em caso de emergência, os condutores dos veículos podem utilizar o sistema de drenagem como parte da estrada. Por esta razão, este autor recomenda que o canal de drenagem seja a continuidade do leito da estrada. Este aspecto, além de uma maior segurança ao tráfego, reduz o custo de conservação, uma vez que sua manutenção é realizada juntamente com o restante da estrada. No entanto, as dimensões devem ser adequadas às necessidades da área, o que pode eventualmente aumentar a área de influência da estrada, tendo em vista a menor profundidade do canal.

Em lugares montanhosos, nos quais a construção do canal tende a aumentar em muito o volume de corte, deve-se estudar alternativas que

preservem a segurança da estrada e do tráfego, sem provocar um aumento excessivo do custo das obras (GUTIERREZ, 1972).

Em casos de encostas nas quais a área de contribuição ao escoamento possa ser demasiadamente elevada, aumentando excessivamente a vazão a ser transportada pelos canais das estradas, ou nos quais a vazão da encosta pode provocar erosão, podem ser dimensionados canais interceptores. Estes canais são localizados de modo a evitar que as águas de montante atinjam a estrada, interceptando o escoamento. Isto é feito tendo em vista que os canais das estradas, quando não consideradas essas situações, deveriam ter suas dimensões ampliadas, o que implicaria no aumento de cortes e, conseqüentemente, o aumento nos custos de manutenção das estradas (GUTIERREZ, 1972). Na Figura 6 estão ilustrados, esquematicamente, o canal da estrada e um canal interceptor situado em uma encosta.

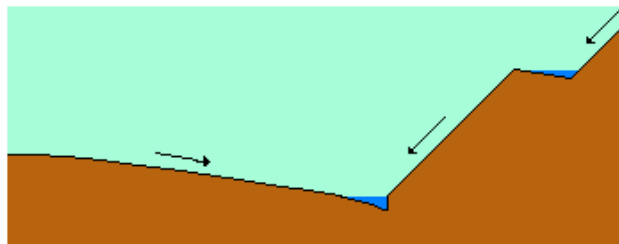


Figura 6. Esquema ilustrativo de um canal para interceptação do escoamento em encosta.

2.7.4.1. Escoamento em canais erodíveis

O escoamento em canais erodíveis é influenciado por diversos fatores. CHOW (1959) comenta que as fórmulas para aplicação em condições de escoamento uniforme, as quais são adequadas para escoamento em canais não erodíveis, não são representativas do escoamento em canais erodíveis. Isto ocorre porque a estabilidade destes canais depende das propriedades do material que forma o canal, não dependendo apenas das condições hidráulicas do escoamento. Salienta ainda que as fórmulas para escoamento uniforme somente podem ser utilizadas após a seção do canal ter estabilizado.

CARSON (1971) comenta que a capacidade de escoamento é reduzida pela atuação de forças de tensão resistivas ao escoamento impostas ao fluido pelas paredes do canal. Assim, o escoamento é retardado pela tensão atuante na bordadura e no fundo do canal e, em menor intensidade, na superfície de contato com o ar. Este mesmo autor comenta ainda que a velocidade de escoamento é nula numa fina camada de líquido em contato com a bordadura e fundo do canal.

A resistência ao escoamento ocorre também entre diferentes camadas do fluido, no entanto estas não são tão intensas quanto aquelas entre o fluido e a parede do canal em que ocorre o escoamento. Como resultado, o líquido escoar em camadas com diferentes velocidades a partir da parede do canal, aumentando sua velocidade com o afastamento destas, atingindo velocidade praticamente constante a partir de um determinado distanciamento da bordadura (CARSON, 1971).

CHOW (1959) apresenta dois métodos para o projeto de canais erodíveis que são o da velocidade máxima permissível e o método da tensão máxima de cisalhamento. No primeiro método é admitido que a partir de uma determinada velocidade de escoamento inicia-se o processo erosivo, enquanto que o segundo se baseia no conhecimento da máxima força que pode atuar junto às paredes e fundo do canal sem que as partículas do material sejam movidas.

2.7.4.2. Critério de estabilidade baseado na velocidade máxima do escoamento

A velocidade média de escoamento em canais é normalmente imposta para que o canal resista ao escoamento e apresente bom desempenho, sendo normalmente estabelecido um limite inferior, de modo a evitar a deposição de materiais em suspensão e um limite superior, fixado de modo a impedir a erosão das paredes (AZEVEDO NETO et al., 1998).

No Quadro 4 são apresentados valores recomendados por AZEVEDO NETO et al. (1998) para velocidades médias inferiores e superiores em função de diferentes condições do fluido que escoar e do material dos canais.

Quadro 4. Limites para as velocidades médias de escoamento

Condição do fluido	Velocidade média inferior (m s^{-1})
Água com partículas finas em suspensão	0,30
Água com areias finas em suspensão	0,45
Águas de esgoto	0,60
Águas pluviais	0,75
Material de constituição do canal	Velocidade média superior (m s^{-1})
Canais arenosos	0,30
Canais com saibro	0,40
Canais com seixos	0,80
Canais com materiais aglomerados resistentes	2,00
Canais de alvenaria	2,50
Canais em rocha compacta	4,00
Canais em concreto	4,50

Fonte : Azevedo Neto et al. (1998)

LENCASTRE e FRANCO (1992) salientam que a velocidade a ser utilizada deve ser aquela atuante no fundo do canal e não a velocidade média do escoamento. Estes autores ressaltam ainda que, dependendo da profundidade de escoamento, a velocidade junto ao fundo do canal será maior no escoamento de maior lâmina, mesmo que a velocidade média seja a mesma e apresentam valores de velocidade máxima não erosiva para condições de solos coesivos e não coesivos, os quais encontram-se apresentados no Quadro 5. Apresentam também fatores de correção para diferentes condições de altura de lâmina d'água e sinuosidade do canal.

No Quadro 6 são apresentados os valores de velocidades máximas recomendados por GUTIERREZ (1972) para o escoamento da água para diferentes tipos de materiais em canais de drenagem de estradas, após vários anos de sua construção. No Quadro 7 são apresentados os valores de velocidade máxima não erosiva e tensão crítica para cisalhamento apresentados por CHOW (1959).

Quadro 5. Velocidades máximas não erosivas v_c (m s^{-1}) para materiais coesivos e não coesivos (para lâmina d'água de 1 m e canais retilíneos) e fatores de correção para diferentes condições de altura de lâmina e sinuosidade do canal

Materiais coesivos								
Material do leito	Natureza do leito *							
	Muito pouco compactado ¹		Pouco compactado ²		Compactado ³		Muito compactado ⁴	
Argilas arenosas (% areia < 50)	0,45		0,90		1,30		1,80	
Solos ricos em argila	0,40		0,85		1,25		1,70	
Argilas	0,35		0,80		1,20		1,65	
Argilas muito finas	0,32		0,70		1,05		1,35	
* relação de vazios de 2,0 a 1,2 ⁽¹⁾ ; de 1,2 a 0,6 ⁽²⁾ ; de 0,6 a 0,3 ⁽³⁾ e de 0,3 a 0,2 ⁽⁴⁾								
Materiais não coesivos								
Material do leito	Diâmetro (mm)				Velocidade média (m s ⁻¹)			
Lodo	0,005				0,15			
Areia fina	0,050				0,20			
Areia média	0,250				0,30			
Areia grossa	1,000				0,55			
Cascalho fino	15,000				1,20			
Cascalho médio	25,000				1,40			
Cascalho grosso	40,000				1,80			
Cascalho grosso	75,000				2,40			
Cascalho grosso	100,000				2,70			
Cascalho grosso	150,000				3,50			
Cascalho grosso	200,000				3,90			
Fator de correção para lâminas d'água diferentes de 1 m								
Lâmina média (m)	0,3	0,5	0,75	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
Fator de correção	0,8	0,9	0,95	1,0	1,1	≅1,1	1,2	≅1,2
Fator de correção para canais sinuosos								
Grau de sinuosidade	Retilíneo	Pouco sinuoso		Moderadamente sinuoso			Muito sinuoso	
Fator de correção	1,00	0,95		0,87			0,78	
Fonte: Lencastre e Franco (1992)								

Fonte: Lencastre e Franco (1992)

Quadro 6. Tipo de leito e velocidades máximas recomendáveis para o escoamento da água

Material	Velocidade (m/s)
Areia fina	0,50
Argila arenosa, Argila sedimentar e sedimento aluvial	0,60
Argila fina	0,90
Pedregulho fina	1,15
Pedregulho grosso	1,20
Argila e pedregulho	1,50

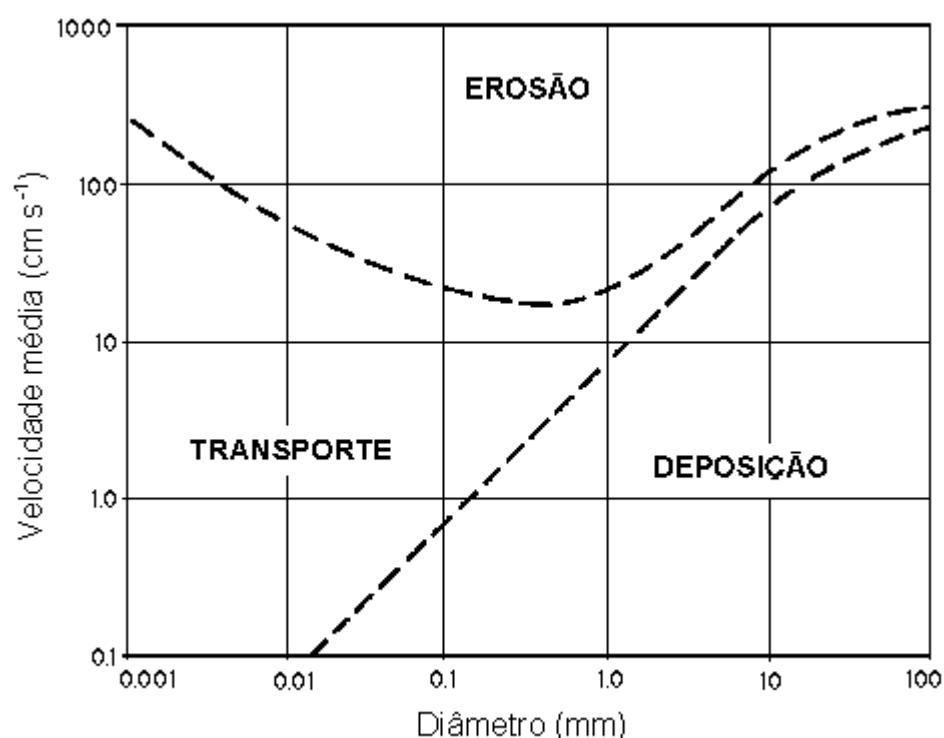
Fonte: Gutierrez (1972)

Quadro 7. Velocidades máximas não erosivas (v_c) e valores de tensão de cisalhamento (τ_c) associadas a diferentes tipos de materiais e coeficientes de rugosidade (n)

Tipo de material	n ($s\ m^{-1/3}$)	Água limpa		Água transportando siltes coloidais	
		v_c ($m\ s^{-1}$)	τ_c (Pa)	v_c ($m\ s^{-1}$)	τ_c (Pa)
Areia fina coloidal	0,020	0,46	1,29	0,76	3,59
Areia argilosa, não coloidal	0,020	0,53	1,77	0,76	3,59
Silte argiloso, não coloidal	0,020	0,61	2,30	0,91	5,27
Siltes aluviais, não coloidal	0,020	0,61	2,30	1,07	7,18
Cinza vulcânica	0,020	0,76	3,59	1,07	7,18
Argila dura, muito coloidal	0,025	1,14	12,45	1,52	22,02
Siltes aluviais, coloidal	0,025	1,14	12,45	1,52	22,02
Xistos e pans endurecidos	0,025	1,83	32,08	1,83	32,08
Pedregulho fino	0,020	0,76	3,59	1,52	15,32
Argila graduada até cascalho, não coloidal	0,030	1,14	18,19	1,52	31,60
Siltes graduados até cascalho, coloidal	0,030	1,22	20,59	1,68	38,30
Pedregulho grosseiro	0,025	1,22	14,36	1,83	32,08
Cascalhos	0,035	1,52	43,57	1,68	52,67

Fonte: Chow, (1959)

Hjulstöm, em 1935, citado por REINECK e SINGH (1980), desenvolveu um gráfico (Figura 7) no qual encontra-se representada a velocidade crítica para a qual inicia o movimento dos sedimentos. Este autor observou que, para materiais grosseiros, o início da movimentação é dependente à velocidade, entretanto para materiais finos ($d < 0,1\ mm$), devido à ação de forças coesivas, essa relação não é válida e a energia necessária para iniciar a movimentação dos grãos aumenta com a redução do tamanho destes. Estes autores relatam ainda que as partículas iniciam o seu movimento quando as forças produzidas pelo líquido em escoamento excedem as forças gravitacional e coesiva destas partículas, sendo a força de coesão um fator de grande importância para a determinação da energia necessária para iniciar a movimentação. Desta forma, solos argilosos necessitam de mais energia para que suas partículas iniciem a movimentação do que solos arenosos, entretanto uma vez em movimento, a areia será sedimentada mais rapidamente do que a argila. Observa-se porém que, quando as partículas finas do solo estiverem desagregadas, estas estarão mais sujeitas ao transporte pelo escoamento do que as areias, em virtude de seu menor peso.



Fonte: Reineck e Singh, (1980)

Figura 7. Gráfico desenvolvido por Hjulstöm (1935), mostrando a relação entre erosão, transporte e deposição de partículas sedimentares.

Sundborg, 1956, também citado por REINECK e SINGH (1980), elaborou um suplemento ao diagrama apresentado por Hjulstöm, incluindo neste os efeitos da gravidade, concentração de material em suspensão e velocidade de deposição. As partículas colocadas em movimento continuam a se mover até que a velocidade de escoamento se reduza a índices abaixo dos erosivos, o que deve ocorrer quando a velocidade de escoamento está em torno de 2/3 da velocidade erosiva crítica. REINECK e SINGH (1980) comentam que o diagrama deve ser utilizado apenas de modo qualitativo, sendo que em material natural é difícil de obter ou aplicar seus valores. Acrescentam ainda que um dos fatores principais desta limitação é o fato do material não ser uniforme e o escoamento ser turbulento. Além disso, a rugosidade exerce forte influência na velocidade de movimento dos sedimentos, o que não é contemplado no diagrama.

2.7.4.3. Critério de estabilidade baseado na tensão crítica de cisalhamento

O conceito de velocidade máxima foi utilizado durante muito tempo como critério para verificar a estabilidade de canais, no entanto a tendência é pela utilização do conceito de tensão crítica de cisalhamento (LENCASTRE, 1972). CARSON (1971) salienta que o termo tensão representa um dos mais fundamentais conceitos na mecânica dos processos erosivos.

As tensões cisalhantes, ocorrem de uma forma variável ao longo das paredes de um canal. Na Figura 8 é apresentada uma seção de canal trapezoidal indicando a variação da tensão cisalhante que atua nas paredes do mesmo.

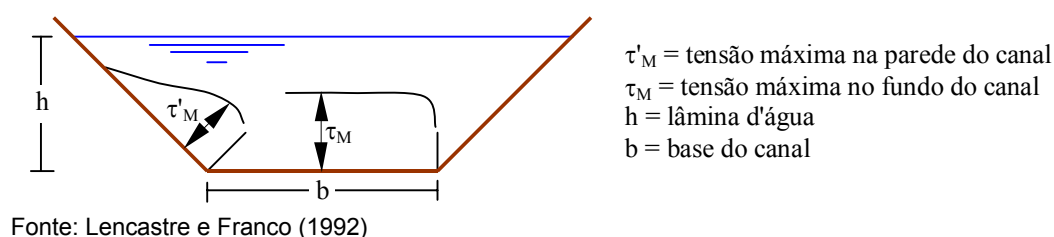


Figura 8. Distribuição das tensões cisalhantes provocadas pelo escoamento em um canal de seção trapezoidal.

LENCASTRE e FRANCO (1992) comentam que, no fundo do canal, o valor da tensão máxima ocorre no seu centro e nas paredes ocorre a uma determinada distância do fundo, a qual é função da lâmina de escoamento.

Dados de Shields, 1936, citado por REINECK e SINGH (1980), indicam que o maior tamanho de partículas que pode ser transportado pelo escoamento é determinado pela tensão de cisalhamento atuante no fundo do canal. LENCASTRE e FRANCO (1992), no entanto, comentam que a curva apresentada por Shields foi estabelecida para escoamentos em leitos de areia, com grãos de tamanho uniforme. Baseados no diagrama de Shields, estes autores apresentam uma relação expressa pela equação

$$\frac{\tau_c}{(\gamma_s - \gamma)d} = \tau^* \quad (4)$$

em que

τ_c = tensão crítica para um canal com largura infinita, Pa;

γ_s = peso específico do solo, N m^{-3} ;

γ = peso específico do fluido, N m^{-3} ;

d = diâmetro médio do material do fundo, m; e,

τ^* = coeficiente designado parâmetro de Shields, adm.

O valor de τ^* é função de Re^* , que é definido pela equação

$$\text{Re}^* = \frac{u^* d}{\nu} \quad (5)$$

em que

Re^* = Coeficiente designado como Reynolds de atrito, adm;

u^* = velocidade de atrito junto ao fundo do canal, m s^{-1} ; e,

ν = viscosidade cinemática da água, $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$.

LENCASTRE e FRANCO (1992) obtiveram, para valores de $\text{Re}^* > 400$, τ^* de 0,06.

Para materiais não coesivos grosseiros em um canal retangular de largura infinita, estes autores apresentam uma equação, convencionada como critério de Lane, para aproximação do valor da tensão crítica, a qual é expressa por

$$\tau_c = 800 d_{75} \quad (6)$$

em que d_{75} representa o diâmetro da peneira para o qual 75% do solo fica retido, em m.

No Quadro 8 são apresentados valores de τ_c citados por LENCASTRE e FRANCO (1992).

Quadro 8. Tensões críticas de cisalhamento - τ_c (Pa) para materiais coesivos e não coesivos

Materiais coesivos						
Material do leito	Natureza do leito *					
	Muito pouco compactado ¹	Pouco compactado ²	Compactado ³	Muito compactado ⁴		
Argilas arenosas (% areia < 50)	2,0	7,7	16,0	30,8		
Solos com grande quantidade de argila	1,5	6,9	14,9	27,5		
Argilas	1,2	6,1	13,7	25,9		
Argilas muito finas	1,0	4,7	10,4	17,3		
* relação de vazios de 2,0 a 1,2 ⁽¹⁾ ; de 1,2 a 0,6 ⁽²⁾ ; de 0,6 a 0,3 ⁽³⁾ e de 0,3 a 0,2 ⁽⁴⁾						
Materiais não coesivos						
Condições da água	Diâmetro médio do sedimento					
	0,1	0,2	0,5	1,0	2,0	5,0
Água clara	1,2	1,3	1,5	2,0	2,9	6,8
Água com pequena quantidade de sedimentos finos	2,4	2,5	2,7	2,9	3,9	8,1
Água com grande quantidade de sedimentos finos	3,8	3,8	4,1	4,4	5,4	9,0

Fonte: Lencastre e Franco (1992)

Equações para determinar a tensão crítica para cisalhamento do solo baseado no diâmetro do material, para materiais não coesivos, e no índice de plasticidade e grau de compactação para materiais coesivos são apresentada em HEC-15 (1988) (Hydraulic Engineering Circular nº 15). Para materiais não coesivos a tensão crítica para cisalhamento pode ser obtida com o uso da equação

$$\tau_c = 800,93 d_{50} \quad (7)$$

em que τ_c corresponde à tensão crítica para cisalhamento do solo, (Pa) e d_{50} corresponde ao diâmetro da peneira para a qual 50% do solo permanece retido, m.

Para materiais coesivos a tensão crítica de cisalhamento do solo é obtida utilizando o índice de plasticidade (IP) com base nas equações:

$$\text{Para solo não compactado: } \tau_c = 0,1628 IP^{0,840} \quad (8)$$

$$\text{Para solo medianamente compactado: } \tau_c = 0,2011 IP^{1,071} \quad (9)$$

$$\text{Para solo compactado: } \tau_c = 0,2729 IP^{1,260} \quad (10)$$

No Quadro 9 é apresentado o critério utilizado por HEC-15 para o enquadramento do solo nos diferentes níveis de compactação e, na Figura 9, um gráfico indicando a variação da tensão cisalhante com IP para as diferentes condições de compactação do solo.

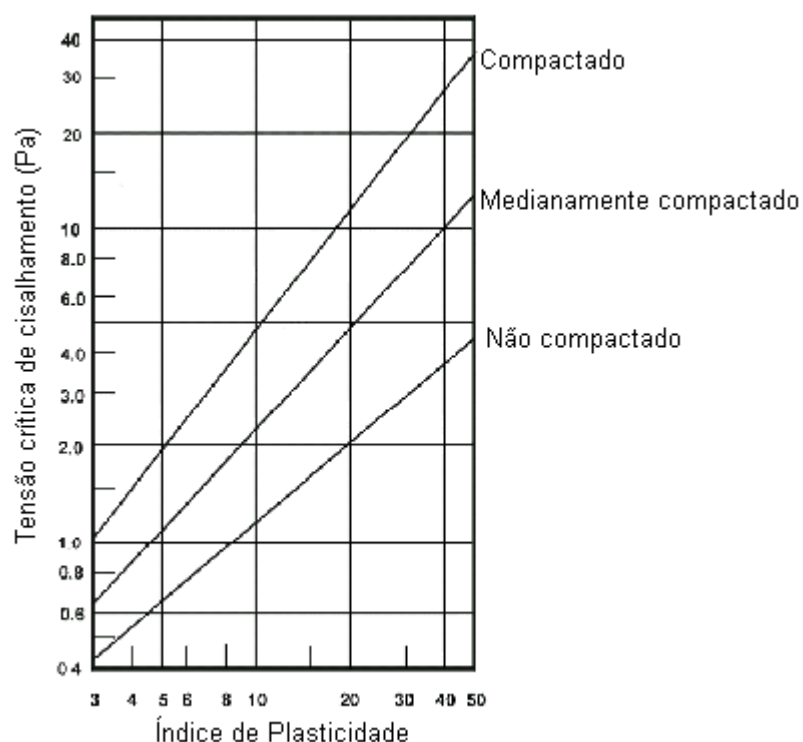
Quadro 9. Critério para classificação do solo nas diferentes condições de compactação, conforme HEC-15.

Grau de compactação	Número de golpes *
Pouco compactado	4 - 10
Medianamente compactado	10 - 30
Compactado	30 - 50

* Número de golpes requerido com o amostrador SPT para atingir 30,48 cm de penetração no solo com o amostrador de 5,08 cm assentado a 15,24 cm e impelido com um peso de 63,5 kg caindo de uma altura de 76,2 cm.

Meireles, 1967, citado por BASTOS (1999), estudando solos de Angola, classificou-os em forte, mediana e fracamente erodíveis, conforme o grau de ruína apresentado por estradas em um curto período de tempo, estabelecendo critérios baseados em granulometria e plasticidade. Conforme o mesmo autor, solos fortemente erodíveis apresentam baixa plasticidade, representada por limite de liquidez (LL) ≤ 21 % e índice de plasticidade (IP) ≤ 8 %.

Conforme CARDOSO (1994), solos da região de Viçosa, MG, com IP acima de 30% apresentam considerável potencial de expansão, devendo esta ser controlada por meio da adição de estabilizantes ou pela compactação do solo no ramo úmido da curva de Proctor.



fonte: HEC-15, 1988

Figura 9. Curva para determinação da tensão crítica de cisalhamento de solo coesivo em função do índice de plasticidade (IP) e do grau de compactação do solo.

MORFIN et al. (1996) apresentam valores de erodibilidade do solo e tensão crítica para cisalhamento do solo para diferentes composições de solos de estradas, os quais são apresentados no Quadro 10.

Quadro 10. Valores de erodibilidade em sulcos e tensão crítica para cisalhamento do solo para diferentes solos em condições de estradas

Característica do solo	Característica do leito				
	Argiloso	Siltoso	Arenoso	Argiloso cascalhado	Arenoso cascalhado
K^1	0,0002	0,0006	0,0004	0,0003	0,0003
τ_c^2	1,5	1,8	2	1,8	2

1. Erodibilidade do solo ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1} \text{Pa}^{-1}$)

2. Tensão crítica para cisalhamento do solo (Pa)

ELLIOT e HALL (1997) apresentam valores de erodibilidade de $0,0003 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$ e tensão crítica para cisalhamento do solo de 1 Pa para condições de estradas em áreas florestais.

2.8. Softwares desenvolvidos para projetos de canais de drenagem e controle de erosão em estradas

STALLINGS (1999) fez uma revisão sobre os softwares disponíveis nos Estados Unidos para projetos de canais de drenagem de estradas, encontrando apenas quatro, dos quais dois baseiam-se no critério da velocidade máxima permissível e dois no critério da tensão máxima de cisalhamento apresentado pelo HEC-15 (1998).

Os softwares baseados na velocidade máxima são o VDOT'S RDITCH e uma planilha do Microsoft Excel. O VDOT'S RDITCH foi desenvolvido pelo Departamento de Transporte do Estado da Virgínia, sendo capaz de determinar a vazão de pico e calcular a velocidade e profundidade do escoamento considerando solo argiloso, revestido com material sintético ou vegetado e pavimentado. A planilha do Microsoft Excel foi desenvolvida por Anderson and Associates (empresa de consultoria em Eng. Civil), oferecendo resultados semelhantes aos apresentados pelo software RDITCH.

Utilizando o critério da tensão crítica para cisalhamento do solo apresentado por FHWA (Federal Highway Administration) em seu HEC-15 (Hydraulic engineering circular nº 15), 1998, foram desenvolvidos dois softwares pelo próprio FHWA. O primeiro software, chamado HY-15 somente avaliava a estabilidade de canais simples e retos. O outro software, mais complexo, desenvolvido pela agência é o HYDRAIN, o qual possibilita dimensionar os canais e verificar sua estabilidade para solos coesivos e não coesivos. Para uso do HYDRAIN necessita-se, como dados de entrada, a forma do canal, a inclinação das paredes, a largura da base e o tipo de cobertura ou o tipo de solo e condição de compactação, a declividade e a vazão. Como saída, fornece a tensão máxima permissível, a tensão atuante na base do canal, a rugosidade hidráulica de Manning e a profundidade e velocidade de escoamento.

3. METODOLOGIA

O trabalho foi desenvolvido em quatro etapas, conforme os objetivos propostos e descritos na seqüência.

3.1. Desenvolvimento de modelo para determinação do espaçamento entre desaguadouros e dimensionamento do canal e das características do sistema para condução e armazenamento do escoamento superficial

Para o desenvolvimento do modelo, foram adotadas as seguintes premissas:

- a precipitação é constante ao longo de toda a área de contribuição;
- a rugosidade, a declividade e a cobertura vegetal não sofrem alterações ao longo das áreas de contribuição;
- o formato do canal não sofre alteração durante o processo de simulação;
- a taxa de infiltração, nas áreas de contribuição, não sofre alteração durante o processo de simulação;
- a erodibilidade e a tensão crítica de cisalhamento não sofrem alterações ao longo do comprimento do canal.

O modelo para obtenção do espaçamento entre desaguadouros foi desenvolvido, determinando-se inicialmente, as condições de escoamento no canal de drenagem da estrada e, posteriormente, a capacidade do solo em resistir ao desprendimento de partículas provocado pelo escoamento. O sistema para condução e armazenamento foi determinado a partir do espaçamento máximo entre desaguadouros e do estabelecimento da lâmina e do volume de escoamento para este comprimento.

3.1.1. Espaçamento máximo recomendável entre desaguadouros em estradas não pavimentadas

Para determinação do espaçamento entre desaguadouros, foi necessária a determinação do hidrograma de escoamento no canal e, a partir da associação deste com as características de resistência do solo à erosão, foi feita a quantificação da perda de solo no canal, a qual foi, então, comparada a um limite considerado tolerável.

Para obtenção do hidrograma no canal, fez-se necessária a determinação do hidrograma de escoamento nas encostas referentes à estrada e a área de contribuição externa a esta.

3.1.1.1. Determinação do hidrograma de escoamento superficial

Para determinação do hidrograma, tanto a área de contribuição relativa ao leito da estrada quanto aquela externa a esta foram divididas em linhas e colunas, sendo o hidrograma obtido para a última coluna relativa ao sentido do escoamento superficial. Este escoamento é considerado somente no sentido transversal ao canal. O hidrograma no canal foi obtido, acumulando-se os hidrogramas correspondentes à contribuição de cada linha, sendo as vazões do leito da estrada e da área externa de contribuição somadas de acordo com a coincidência dos tempos de chegada do escoamento à célula considerada. A Figura 10 representa, esquematicamente, a divisão das áreas de contribuição

ao escoamento relativas ao leito da estrada e à área externa em linhas e colunas, para a determinação do hidrograma no canal.

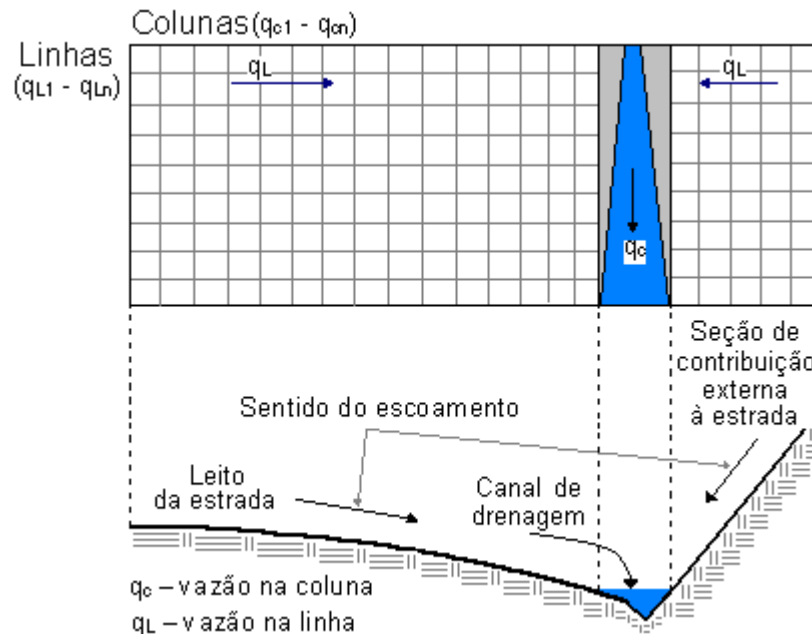


Figura 10. Representação esquemática da subdivisão feita para determinação do hidrograma no canal de drenagem da estrada.

As áreas de contribuição apresentam características, que devem ser consideradas pelo modelo, para obtenção do hidrograma no canal. Para a área de contribuição externa à estrada são necessárias informações referentes à largura, comprimento, declividade, taxa de infiltração estável da água no solo e rugosidade hidráulica, bem como o tipo de cobertura vegetal. Essas informações também são necessárias para a área de contribuição referente à estrada, com exceção da cobertura vegetal.

3.1.1.1.1. Modelagem do escoamento superficial advindo do leito e da área de contribuição externa à estrada

As equações que regem o escoamento gradualmente variado, em superfícies livres, foram estabelecidas por Saint-Venant, em 1871. São

equações que traduzem os princípios físicos da conservação da massa (equação da continuidade) e da conservação da quantidade de movimento (equação da dinâmica) (SILVA, 1996). O modelo de ondas cinemáticas é uma das formas de aplicação das equações de Saint-Venant e pode ser expresso (JULIEN et al., 1995; MUÑOZ-CARRERA e PARSONS, 1999) por

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = i_i - T_i \quad (11)$$

em que

h = profundidade do escoamento, m;

t = tempo, s;

q = vazão por unidade de largura, $m^2 s^{-1}$;

x = sentido do escoamento, m;

i_i = intensidade instantânea de precipitação, $m s^{-1}$; e

T_i = taxa de infiltração da água no solo, $m s^{-1}$.

Este modelo considera a declividade da linha de energia (S_f) igual à declividade da superfície do terreno (S_o), assumindo uma seção transversal média de escoamento.

A relação entre vazão e profundidade de escoamento é obtida a partir da equação utilizada para condições de regime uniforme, sendo expressa por

$$q = \alpha h^\beta. \quad (12)$$

A partir da equação de Manning, obtêm-se os valores de α e β , os quais são expressos por

$$\alpha = \frac{\sqrt{S_o}}{n} \quad (13)$$

$$\beta = \frac{5}{3} \quad (14)$$

em que

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

S_o = declividade do terreno na direção do escoamento, $m\ m^{-1}$;

Substituindo a equação 12 na equação 11, obtém-se

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \alpha \frac{\partial h^\beta}{\partial x} = i_i - T_i \quad (15)$$

Esta equação é resolvida utilizando-se o método de diferenças finitas, de acordo com algoritmo proposto por BRAZ (1990). A profundidade de escoamento é transformada em vazão por meio da Equação 12.

A intensidade instantânea de precipitação (i_i) é obtida empregando-se a equação desenvolvida por PRUSKI et al. (2001), a qual é representada por

$$i_i = i_m \left(1 - \frac{c\ t}{t + b} \right). \quad (16)$$

em que

i_m = intensidade máxima média de precipitação, mm;

c e b = parâmetros da equação de chuvas intensas, adm; e

t = duração da precipitação, min.

A taxa de infiltração no leito da estrada é bastante baixa, sendo, por isso, utilizado o valor de $1\ mm\ h^{-1}$. Nas áreas de contribuição externas, a taxa de infiltração é, normalmente, mais elevada, sendo considerada igual à taxa de infiltração estável da água no solo (T_{ie}).

Os parâmetros para determinação de i_m foram obtidos a partir do software Plúvio 1.3. Este software foi desenvolvido pelo Grupo de Pesquisa em Recursos Hídricos (GPRH), no Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa, e é de domínio público, podendo ser obtido no endereço <http://www.ufv.br/dea/gprh>. Este software possibilita a obtenção da equação de chuvas intensas, para qualquer localidade dos estados de Minas

Gerais, São Paulo, Paraná, Rio de Janeiro e Espírito Santo, enquanto, para os demais estados, permite sua obtenção para aquelas localidades onde existem equações disponíveis.

Os hidrogramas resultantes das encostas foram obtidos, resolvendo-se a equação 11 para diferentes intervalos de tempo (Δt), sendo, para cada Δt , obtida a vazão correspondente.

3.1.1.1.2. Modelagem do escoamento superficial no canal

A modelagem do escoamento superficial no canal foi realizada, utilizando-se a equação 17, proposta por JULIEN et al. (1995). Esta equação é obtida a partir do modelo de ondas cinemáticas (Equação 11).

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_r \quad (17)$$

em que

A = seção transversal molhada pelo escoamento, m^2 ;

Q = vazão escoada no canal, $m^3 s^{-1}$; e

q_r = vazão resultante por unidade de largura, proveniente do leito da estrada e da área externa de contribuição, $m^2 s^{-1}$.

$$q_r = q_e + q_{sc} \quad (18)$$

em que

q_e = vazão, por unidade de largura, proveniente da estrada, $m^2 s^{-1}$; e

q_{sc} = vazão, por unidade de largura, proveniente da área externa de contribuição, $m^2 s^{-1}$.

Para os casos em que a área externa de contribuição não foi considerada, o valor de q_r foi considerado igual a q_e .

Para obtenção da vazão escoada no canal, a equação 17 foi resolvida pelo método de diferenças finitas, segundo o algoritmo proposto por BRAZ (1990), sendo a área de escoamento obtida por meio da equação

$$Q = \alpha_c A^{\beta_c} \quad (19)$$

em que α_c e β_c foram obtidos para o escoamento no canal, considerando-se um rearranjo da equação de Manning, resultando, para canal triangular, nas equações

$$\alpha_c = \frac{\sqrt{S_f}}{n} \frac{(m_1 + m_2)^{1/3}}{2^{1/3} \left(\sqrt{m_1^2 + 1} + \sqrt{m_2^2 + 1} \right)^{2/3}} \quad (20)$$

$$\beta_c = \frac{4}{3} \quad (21)$$

3.1.1.2. Período de retorno considerado para a determinação do hidrograma de escoamento superficial

O período de retorno utilizado para determinação do hidrograma de escoamento superficial foi definido, com base no período médio utilizado para a manutenção das estradas. Neste trabalho, consideraram-se 3 anos como o período médio de manutenção, conforme CEBTP (Centre Experimental de Recherches et D'etudes du Batiment et Travaux Publics), citado por PASTORE (1997), segundo o qual este normalmente é o período médio de duração de um leito cascalhado tratado com agulhamento.

Considerando-se que, durante o período de manutenção, mais de uma precipitação deverá provocar tensão cisalhante acima da tensão crítica para o cisalhamento do solo, o período de retorno a ser efetivamente considerado no traçado do hidrograma deverá ser superior ao período de manutenção da estrada.

Por este motivo, estabeleceu-se um período de retorno, o qual foi denominado de período de retorno equivalente (T_{req}), utilizando-se, para tanto, a equação

$$T_{req} = K_{Treq} T_{ra} \quad (22)$$

em que

K_{Treq} = coeficiente de majoração a ser aplicado ao período de retorno referente ao período de manutenção considerado, adimensional; e

T_{ra} = período de retorno da série anual para manutenção da estrada, anos;

O cálculo de K_{Treq} foi feito por meio da equação

$$K_{Treq} = \frac{T_{ra}}{T_{rp}} \quad (23)$$

em que T_{rp} corresponde ao período de retorno da série parcial, obtido por meio das equações 2 ou 3, conforme o valor de T_{ra} adotado.

Considerando-se um período de retorno igual a T_{req} (utilizado para determinação do espaçamento entre desaguadouros), as intensidades de precipitação obtidas foram mais elevadas do que aquelas obtidas mediante o uso de T_{ra} , o que provoca a redução do espaçamento entre desaguadouros. Desta forma, considerando o período de retorno equivalente ao valor de 3 anos, definido neste trabalho como período médio para manutenção, o valor realmente adotado para realização das simulações foi 3,65 anos.

3.1.1.3. Determinação da tensão de cisalhamento provocada pelo escoamento superficial

O cálculo da tensão cisalhante associada ao escoamento foi realizado com base na equação da resistência apresentada por CHOW (1959)

$$\tau_E = \gamma R_h S \quad (24)$$

em que

τ_E = tensão provocada pelo escoamento, kgf m⁻²;

γ = peso específico da água, kgf m⁻³;

R_h = raio hidráulico, m; e

S = declividade do canal, m m⁻¹.

Tendo em vista que a tensão provocada pelo escoamento em canais não ocorre de maneira uniforme em toda a seção transversal, foi considerada apenas a tensão máxima, a qual provoca as maiores perdas de solo. Desta forma, o valor do R_h foi substituído, na equação 24, pela profundidade de escoamento, enquanto a unidade de saída foi transformada para Pascal (Pa). A equação resultante, utilizada para calcular a tensão cisalhante por meio do modelo é

$$\tau_E = \frac{\gamma y S}{0,102} \quad (25)$$

em que

τ_E = tensão provocada pelo escoamento, Pa; e

y = profundidade de escoamento, m.

3.1.1.4. Cálculo do espaçamento entre desaguadouros

Para que não ocorra erosão no canal, a tensão provocada pelo escoamento deverá ser inferior ou, no máximo, igual àquela que o solo é capaz

de resistir. Este critério, entretanto, é bastante rigoroso, uma vez que, em razão do desgaste provocado pelo próprio tráfego, há necessidade da realização de manutenções periódicas no leito da estrada e, desta forma, também em suas margens, permitindo, assim, que pequenos danos provocados pela erosão nos canais possam ser facilmente recuperados. Outro aspecto a ser considerado refere-se ao custo de implantação do sistema de drenagem, o qual aumenta para as condições em que as perdas são consideradas nulas. Desta forma, no desenvolvimento deste modelo, considerou-se a possibilidade de ocorrência de perdas de solo em limites considerados toleráveis, ou seja, que não representem comprometimento ao tráfego na estrada ao final do intervalo considerado para a realização manutenção.

3.1.1.4.1. Aprofundamento máximo tolerável no canal de drenagem

Visando a determinação de limites para os quais as perdas de solo devidas à erosão possam ser consideradas toleráveis sob o ponto de vista de trafegabilidade da estrada, estabeleceu-se, como critério, um aprofundamento máximo (a_{pm}) tolerável para o canal de drenagem, na seção correspondente ao comprimento máximo. Esta seção corresponde ao comprimento final do canal, justamente onde deverá ser locado o desaguadouro. O aprofundamento considerado tolerável é aquele que não compromete o tráfego e que possibilita fácil correção, por intermédio das operações periódicas de manutenção das estradas.

Assumiu-se, como a_{pm} , o valor de 5 cm, o qual deverá ser atingido em um intervalo de tempo equivalente ao período de retorno utilizado para manutenção da estrada.

3.1.1.4.2. Perda de solo tolerável no canal

A perda de solo correspondente ao a_{pm} é determinada empregando-se a equação

$$P_{st} = V_s \rho_s \quad (26)$$

em que

P_{st} = perda de solo tolerável, g;

V_s = volume de solo a ser removido pela erosão, cm^3 ; e

ρ_s = massa específica do solo, g cm^{-3} .

O valor de V_s é determinado por meio da equação

$$V_s = A a_{pm} \quad (27)$$

em que

A = área da superfície do solo considerada para efeito de cálculo, cm^2 ;

e

a_{pm} = aprofundamento máximo, cm.

Como foi aplicada a metodologia proposta para tensão cisalhante máxima, que ocorre no fundo do canal, considerou-se, para efeito de cálculo, uma superfície de 1 cm^2 .

3.1.1.4.3. Perda de solo ocorrida na extremidade final do canal

A partir das características do canal e da vazão obtidas e utilizando a equação 25, o hidrograma de escoamento foi transformado em um gráfico que indica a variação da tensão cisalhante ao longo do tempo. Desta forma, para cada intervalo de 1 m de canal, obteve-se o perfil de variação da tensão provocada pelo escoamento ao longo do tempo.

Para que ocorra perda de solo, a tensão provocada pelo escoamento deve superar a tensão crítica para cisalhamento do solo. A determinação da perda de solo é feita tomando-se a diferença entre a tensão média associada a cada intervalo de tempo e a tensão crítica de cisalhamento do solo. Na Figura 11 encontra-se a representação gráfica da variação da tensão cisalhante ao

longo do tempo, sendo indicada a região considerada para o cálculo da perda de solo provocada pelo escoamento e ilustrados os valores do intervalo de tensão considerado e da tensão média referente a cada intervalo.

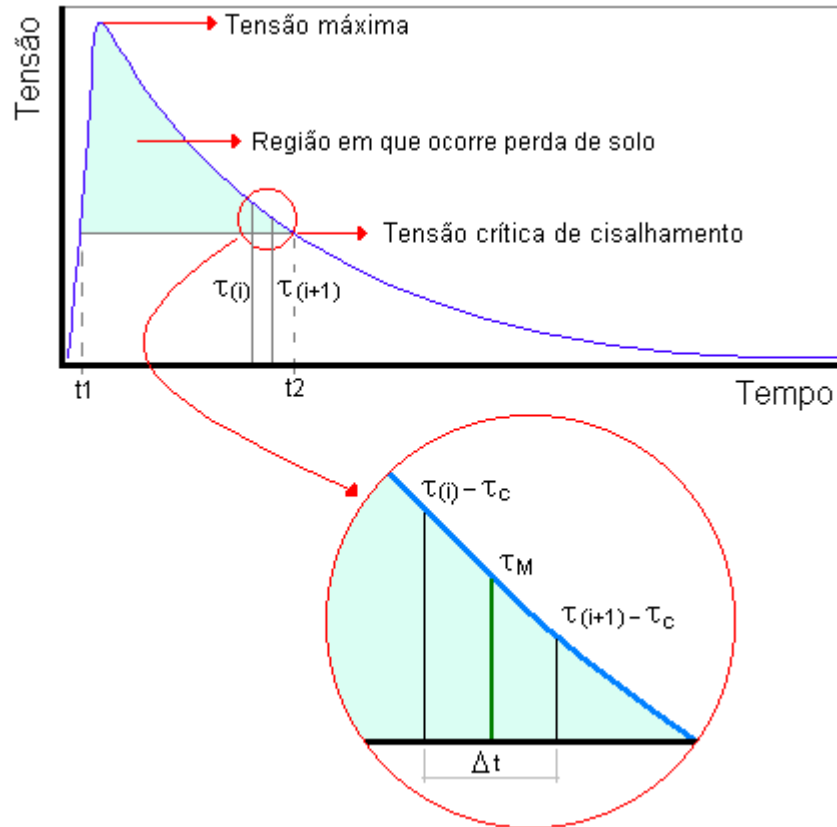


Figura 11. Representação esquemática da variação da tensão cisalhante com o tempo para o escoamento no canal de drenagem de uma estrada, indicando a região de interesse para determinação da perda de solo provocada pelo escoamento, o intervalo de tempo (Δt) e a tensão média referente a este intervalo (τ_M).

A perda de solo corresponde ao somatório das perdas ocorridas em todos os intervalos em que a tensão provocada pelo escoamento supera a tensão crítica para cisalhamento do solo, sendo determinada pela equação

$$PS_e = \sum_{t_1}^{t_2} [(\tau_M - \tau_c) \Delta t K A] \quad (28)$$

em que

Ps_e = perda de solo provocada pelo escoamento superficial, g;

τ_M = tensão média de cisalhamento durante o intervalo de tempo Δt , Pa;

τ_c = tensão crítica de cisalhamento do solo, Pa;

Δt = intervalo de tempo, min;

K = erodibilidade do solo, $g\ cm^{-2}\ min^{-1}\ Pa^{-1}$; e

A = área da superfície do solo considerada para efeito de cálculo, cm^2 .

O valor de τ_M é obtido, empregando-se a equação

$$\tau_M = \frac{\tau_{(i)} + \tau_{(i+1)}}{2} \quad (29)$$

em que

$\tau_{(i)}$ = tensão provocada pelo escoamento no tempo i , Pa; e

$\tau_{(i+1)}$ = tensão provocada pelo escoamento no tempo $i+1$, Pa.

Valores de τ_M inferiores a τ_c significam que a tensão média provocada pelo escoamento no intervalo de tempo é inferior à tensão crítica, indicando que não ocorrerá perda de solo nesse intervalo de tempo.

O valor de Δt é obtido por meio da equação

$$\Delta t = t_{(i+1)} - t_{(i)} \quad (30)$$

em que i e $i+1$ representam, respectivamente, os tempos correspondentes ao início e ao final do intervalo considerado.

Para identificação do comprimento recomendável entre desaguadouros foi feita a determinação da perda de solo para cada comprimento de canal para o qual determinou-se o gráfico da variação da tensão cisalhante ao longo do tempo. A perda provocada pelo escoamento foi comparada à perda tolerável, calculada por meio da equação 26. A excedência da perda tolerável indicava

necessidade da existência de um desaguadouro para o comprimento imediatamente anterior, sendo este o espaçamento recomendável entre desaguadouros.

3.1.1.5. Análise de desempenho do modelo desenvolvido

A análise do desempenho do modelo para determinação do espaçamento máximo entre desaguadouros foi realizada considerando-se:

a) Diferentes tipos de solo - foram considerados os valores de erodibilidade e tensão crítica de cisalhamento do solo, obtidos por MORFIN et al. (1996) para diferentes tipos de solos encontrados em leitos de estradas, apresentados no Quadro 10.

b) Diferentes valores de aprofundamento de canal - foram considerados aprofundamentos de 5 e 10 cm, sendo usados na análise os mesmos tipos de solos considerados no item a.

c) Dados de erodibilidade - foram utilizados dados de erodibilidade do solo, escalonados dentro da faixa de valores apresentados na literatura, sendo avaliados os valores de 0,0010; 0,0020; 0,0030; 0,0040 e 0,0080 g cm⁻² min⁻¹ Pa⁻¹.

d) Tensão crítica de cisalhamento - os valores de tensão crítica de cisalhamento do solo, utilizados neste trabalho, abrangeram uma faixa de valores, dentro daqueles apresentados na literatura, que permitiu analisar a sensibilidade do modelo à variação deste parâmetro, sendo utilizados valores de tensão de 1, 2, 3, 4 e 8 Pa.

e) Seção transversal do canal de drenagem - a seção transversal foi tomada como triangular, apresentando uma das paredes com declividade de 100% (talude 1:1) e a outra parede variando deste limite, 100% (talude 1:1), até valores próximos à declividade utilizada no abaulamento da estrada, caracterizando, portanto, uma estrada sem um canal perfeitamente delimitado. Assim, as demais seções utilizadas foram: 20% (talude 5:1); 10% (talude 10:1); 5% (talude 20:1); e 3,3% (talude 30:1).

f) Declividade do canal de drenagem - a variação nos valores de declividade do canal foi estabelecida dentro da faixa de valores normalmente

encontrados em estradas, sendo utilizados valores de 2,5%; 5%; 7,5; 10% e 15%.

g) Período de retorno - consideraram-se os valores de período de retorno normalmente recomendados para verificação da estabilidade dos canais, bem como valores mais elevados com a finalidade de comparação. Períodos de retorno de 2; 3 e 10 anos, aqui designados de "convencionais", foram utilizados, bem como os períodos de retorno equivalentes a estes valores, correspondentes a 2,77; 3,65 e 10,53 anos.

h) Características das precipitações - foram realizadas simulações, utilizando-se as equações de Intensidade, duração e frequência de precipitação, pertinentes a 30 localidades dos estados de Minas Gerais, São Paulo e Paraná, das quais foram escolhidas cinco, cujas características de precipitação mostraram-se bastante diferentes. Desta forma, foram utilizadas as características de precipitação referentes às localidades de Cachoeira Paulista (SP), Viçosa (MG), Guaraqueçaba (PR), Uberaba (MG) e Guarapuava (PR).

i) Área de contribuição - para as localidades Cachoeira Paulista, Viçosa e Guarapuava, que apresentaram diferenças acentuadas nas condições dos hidrogramas de escoamento, foram realizadas simulações considerando diferentes áreas de contribuição correspondentes tanto ao leito da estrada como à área externa à estrada.

j) Rugosidade do canal - foram realizadas comparações, alterando-se a rugosidade e considerando desde valores bastante baixos até valores medianos, comumente utilizados em canais. Utilizaram-se coeficientes de rugosidade de 0,012 (limite inferior de superfície encascalhada), 0,018 (canal de terra, limpo recentemente construído), 0,024 (canal encascalhado com seção uniforme), 0,030 (canal com gramas e algumas ervas daninhas) e 0,040 (canal com grande densidade de ervas daninhas).

Para realização das simulações criou-se um arquivo com dados de entrada, o qual foi denominado de condição padrão. Em todas as simulações realizadas foram alteradas apenas as características em análise, permanecendo as demais constantes. Os dados, utilizados neste trabalho, correspondentes à condição padrão são apresentados no Quadro 11.

Quadro 11. Dados de entrada correspondentes à condição padrão para realização de simulações com o software desenvolvido com base no modelo proposto

Especificação	Descrição
Precipitação	
Localidade	Viçosa, MG.
Período de retorno para dimensionamento (anos)	10
Período de retorno para espaçamento (anos)	T_r equivalente = 3,65
Estrada	
Taxa de infiltração (mm h^{-1})	1
Declividade transversal (%)	3
Semi-largura (m)	3
Rugosidade hidráulica ($\text{s m}^{-1/3}$)	0,012 (encascalhada - lim. Inferior)
Área externa de contribuição	
Taxa de infiltração (mm h^{-1})	20
Declividade (%)	20
Comprimento (m)	12
Rugosidade hidráulica ($\text{s m}^{-1/3}$)	0,10 (grama - cobert. média)
Cobertura vegetal	Sem cultivo
Bacia de acumulação	
Formato	Semicircular
Profundidade (m)	2
Canal	
Tipo	Triangular
Declividade (%)	5
Rugosidade hidráulica ($\text{s m}^{-1/3}$)	0,018 (terra recent. construído)
Aprofundamento máximo (cm)	5
Seção transversal	$m_1 = 10$; $m_2 = 1$
Solo	
Massa específica (g cm^{-3})	1,30
Erodibilidade ($\text{g cm}^{-2} \text{min}^{-1} \text{Pa}^{-1}$)	0,002
Tensão crítica (Pa)	2

3.1.1.5.1. Sensibilidade aos parâmetros de entrada do modelo

Aplicando-se a metodologia proposta por NEARING et al. (1990), foi analisada a sensibilidade do modelo à erodibilidade do solo, à tensão crítica de cisalhamento, à declividade e à rugosidade do terreno. Esta metodologia está baseada no emprego da equação

$$S = \frac{\frac{O_1 - O_2}{O_{12}}}{\frac{I_1 - I_2}{I_{12}}} \quad (31)$$

em que

S = sensibilidade do modelo aos parâmetros de entrada;

O_1 = resultado obtido com o modelo para o menor valor de entrada;

O_2 = resultado obtido com o modelo para o maior valor de entrada;

O_{12} = média dos resultados obtidos com o menor e o maior valores de entrada;

I_1 = menor valor de entrada;

I_2 = maior valor de entrada; e

I_{12} = média dos valores de entrada;

Conforme NEARING et al. (1990), o valor de S representa a mudança normalizada gerada na saída do modelo para uma mudança normalizada na entrada dos dados, a qual permite comparar a sensibilidade a diferentes magnitudes dos parâmetros de entrada, representando uma função dos parâmetros de entrada para uma resposta não-linear. Quanto maior forem os índices obtidos, mais sensível é o modelo ao parâmetro, enquanto os valores próximos a zero indicam que o modelo não apresenta sensibilidade ao parâmetro.

3.1.2. Metodologia para dimensionamento da seção transversal do canal e das bacias de acumulação

Uma vez determinado o espaçamento entre desaguadouros, um novo hidrograma foi obtido para esta seção, utilizando-se um valor de período de retorno diferente daquele utilizado para obtenção do espaçamento ($T_{rE_{sp}}$). O período de retorno considerado para o dimensionamento ($T_{rD_{im}}$) foi de 10 anos.

Com este hidrograma, determinou-se a profundidade máxima de escoamento, com a qual procedeu-se ao dimensionamento do canal de drenagem, uma vez que o tipo de canal e a inclinação das paredes são dados de entrada do modelo.

A partir do hidrograma determinado com $T_{rE_{sp}}$, determinou-se, para o comprimento referente ao espaçamento entre desaguadouros, o volume total

escoado, com o qual foi realizado o dimensionamento das bacias de acumulação.

3.1.2.1. Volume das bacias de acumulação

Para fins de dimensionamento, foram consideradas as formas geométricas semicircular e retangular. A bacia semicircular corresponde, conforme CODASP (1994), ao formato mais comum, sendo, por este motivo, considerada neste trabalho. O formato retangular foi incluído, uma vez que é de construção bastante simples, sendo facilmente implantado. Nas Figuras 12 e 13 são apresentadas as vistas superior e em corte das bacias com formato semicircular e retangular, respectivamente.

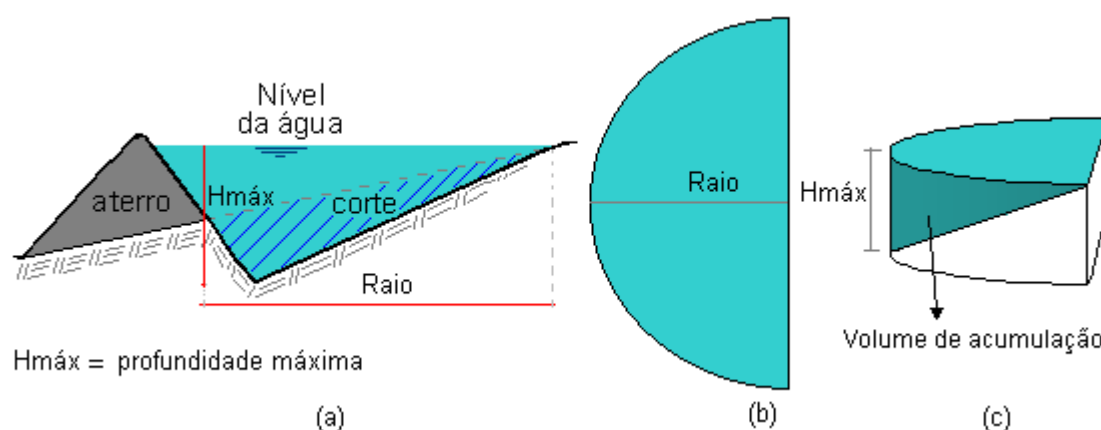


Figura 12. Representação esquemática da bacia de acumulação com formato semicircular, indicando a vista lateral na seção central (a), em planta (b) e em perspectiva (c).

Para o dimensionamento das bacias, considerou-se a profundidade máxima ($H_{\max}$) como dado a ser fornecido pelo técnico, sendo o raio para a bacia semicircular calculado por meio da equação

$$R = \sqrt{\frac{4 V}{\pi H_{\max}}} \quad (32)$$

em que

R = raio da bacia de acumulação semicircular, m;

V = volume de acumulação, m^3 ; e

$H_{m\acute{a}x}$ = profundidade máxima de água a ser acumulada na bacia, m;

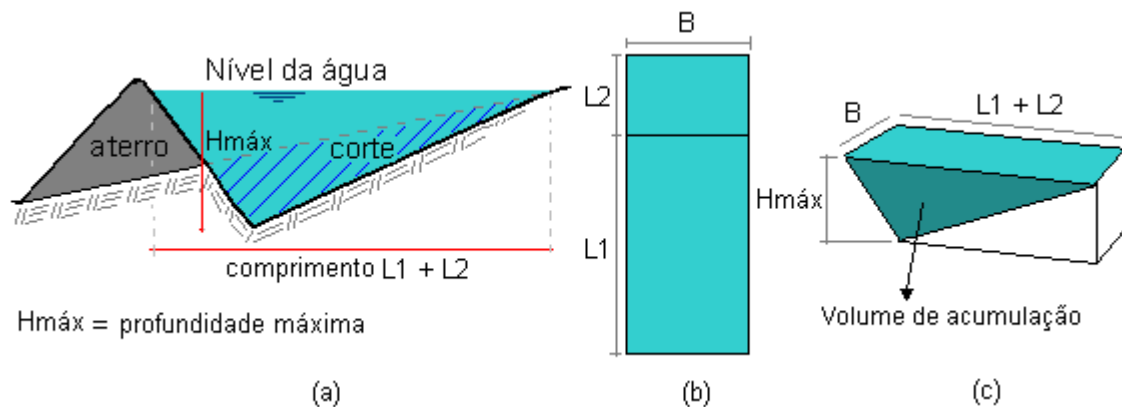


Figura 13. Representação esquemática da bacia de acumulação com formato retangular, indicando a vista lateral (a), em planta (b) e em perspectiva (c).

Para as bacias retangulares, o cálculo da largura é realizado por meio da equação

$$B = \frac{2V}{H_{m\acute{a}x}L} \quad (33)$$

em que

B = largura da bacia de acumulação retangular, m; e

L = comprimento total da bacia de acumulação retangular, m;

Para análise da metodologia, as bacias de acumulação foram dimensionadas, considerando-se, valores de escoamento obtidos para diferentes localidades, sendo consideradas neste trabalho as localidades de Cachoeira Paulista (SP), Viçosa (MG), Guaraqueçaba (PR), Uberaba (MG) e Guarapuava (PR). Conforme mencionado anteriormente, a escolha destas

localidades está associada às variações nas características das chuvas intensas evidenciadas nas mesmas.

3.2. Metodologia para determinação da erodibilidade e tensão crítica de cisalhamento de solos em condições típicas de canais de estradas não pavimentadas

Na aplicação do modelo proposto para estabelecimento do espaçamento máximo entre desaguadouros, é necessário o conhecimento da erodibilidade e da tensão crítica de cisalhamento do solo. Apesar da existência de testes e técnicas, diretas e indiretas, para obtenção destas características, estes métodos apresentam dificuldades relacionadas principalmente à necessidade de retirada de amostras a serem trabalhadas em laboratório, o que geralmente interfere nas condições de resistência desses solos ao processo erosivo e, conseqüentemente, nos valores dos próprios índices obtidos. Por este motivo, desenvolveu-se um equipamento que permite simular o escoamento, diretamente, nos canais de drenagem das estradas, não sendo necessária a retirada de amostras.

3.2.1. Desenvolvimento do simulador de escoamento

O equipamento foi desenvolvido visando à simulação do escoamento de maneira próxima à condição real, provocando pequena interferência na condição original do terreno. O equipamento consiste de 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. Na Figura 14 apresenta-se um desenho esquemático do sistema; na Figura 15 é apresentada uma foto da calha no campo e na Figura 16 são apresentados alguns detalhes da calha, na qual ocorre o escoamento.

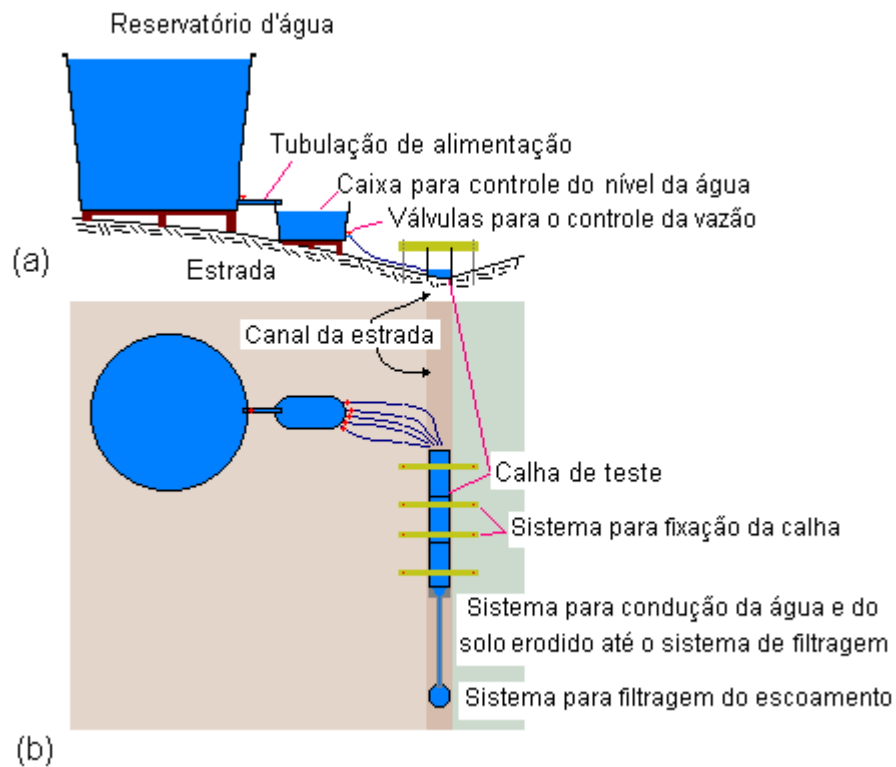


Figura 14. Representação esquemática do sistema para determinação da tensão crítica de cisalhamento e da erodibilidade do solo em estradas não pavimentadas (a) vista lateral e (b) vista superior.

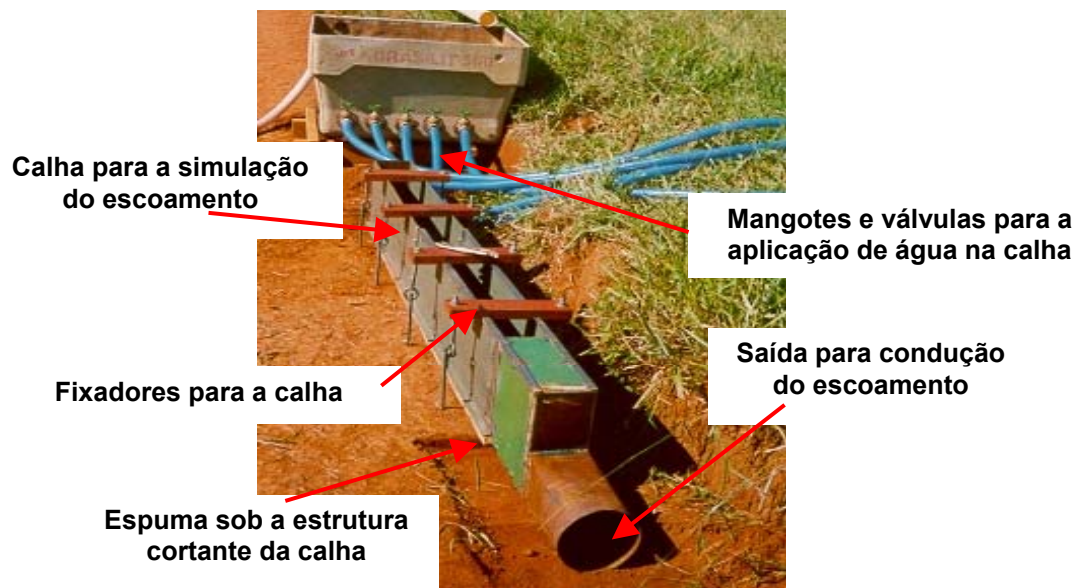


Figura 15. Foto da calha para simulação do escoamento.

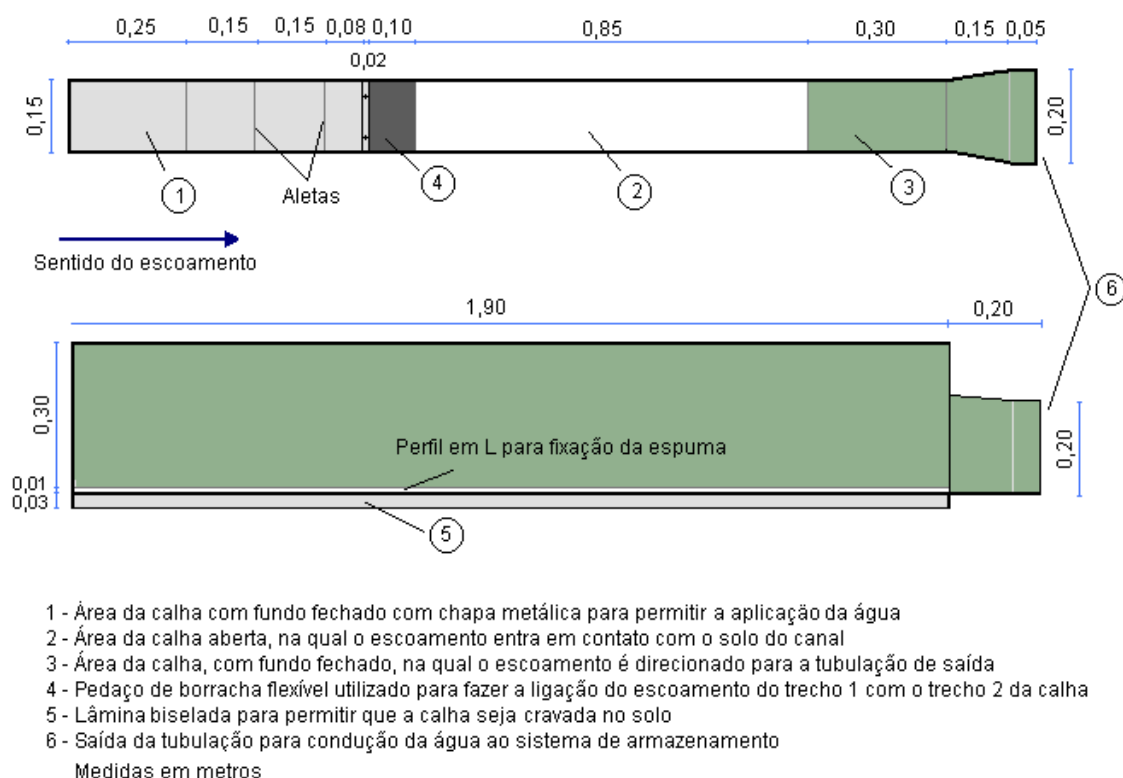


Figura 16. Desenho da calha para simulação do escoamento em canais de drenagem de estradas não pavimentadas.

3.2.1.1. Funcionamento do equipamento

A água foi lançada, a partir da caixa para controle de nível, na área da calha com fundo fechado, escoando, em seguida, para a área que permanecia aberta para contato do escoamento com o leito do canal. Dessa área, a água foi novamente direcionada para um trecho da calha com fundo fechado, a partir do qual foi conduzida para a tubulação que direcionou o escoamento para o sistema de armazenamento.

A turbulência causada no escoamento foi reduzida por meio 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 cuja função foi conduzir a água sem que houvesse ocorrência de sobressaltos.

A condução da água da superfície exposta do canal para a área de condução ao sistema de coleta foi realizada por meio da colocação de uma placa de metal, com espessura de 1 mm e 20 cm de comprimento, sendo 5 cm dobrados em ângulo de 90°, de modo que pudesse ser cravada no solo. Na Figura 17 é apresentado um desenho esquemático dessa placa de metal. Essa placa foi cravada no solo, tomando-se cuidados para que sua colocação não causasse danos ao solo e não permitisse a ocorrência de escoamento sob a mesma.

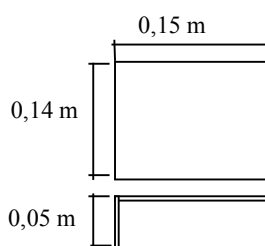


Figura 17. Placa metálica para direcionamento do escoamento da superfície do canal para a área de condução.

3.2.1.2. Realização de testes com o simulador de escoamento

Para realização dos testes no campo, foi escolhida uma estrada não pavimentada, localizada na Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa MG. O solo do leito ensaiado foi classificado como muito argiloso, sendo suas características físicas apresentadas no Quadro 12.

Quadro 12. Características físicas do solo do canal no qual foram realizados os testes com o simulador de escoamento

Granulometria (dag kg ⁻¹)			Retido na peneira 200 (%)	Massa específica (g cm ⁻³)	IP*
Argila	Silte	Areia			
62,75	6,23	31,02	30,76	1,30	20,64

* Índice de plasticidade

A instalação e os testes foram feitos conforme o seguinte procedimento:

1. Delimitou-se um trecho de canal da estrada representativo das condições relativas à declividade e forma do canal;
2. Colocou-se a calha sobre o canal e foram demarcados, no solo, os trechos para derivação da água da caixa para a calha, trecho de contato do escoamento com o leito do canal e trecho para o direcionamento da água lançada no canal para o sistema de armazenamento, respectivamente trechos 1, 2 e 3 da Figura 16;
3. A calha foi retirada e foram realizados ajustes na superfície do canal, onde é assentado o trecho da calha para aplicação da água e 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 ajustados não entram em contato com o escoamento, ficando restritos à área fechada da calha (Figura 16), não interferindo, dessa forma, na perda de solo.
4. 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 (trecho 5, Figura 16). Nas laterais da estrutura cortante em contato com o solo, foram fixadas espumas 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. A Figura 18 ilustra a estrutura cortante e a presença das espumas coladas nas laterais desta.
5. Com a calha devidamente posicionada, procedeu-se à sua cravação com o auxílio de uma marreta, tomando-se o máximo cuidado para que não ocorresse a perturbação do leito do canal ou trincas na área exposta ao escoamento.
6. 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.

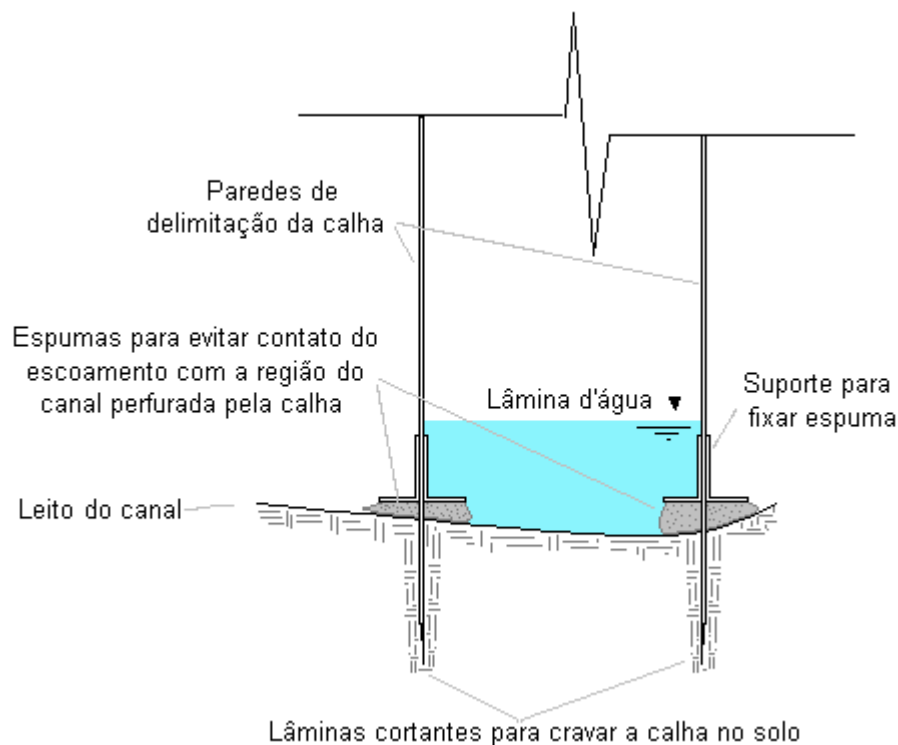


Figura 18. Representação esquemática da calha instalada, ilustrando as lâminas cortantes para cravar a calha no solo e as espumas para evitar o contato do escoamento com a região perturbada pela cravação da calha.

7. Para evitar que a derivação da água provocasse a vibração da calha, utilizaram-se fixadores, os quais foram encaixados na parte superior e presos a pinos cravados no solo, conforme ilustrado na Figura 19.
8. Sobre a calha, foi instalado um suporte de madeira para colocação de uma caixa d'água de 500 L, a qual serviu, além do controle de nível para manutenção da vazão constante ao longo do teste, de contrapeso para reduzir o risco de vazamento sob a calha. A Figura 20 representa a calha instalada e a caixa para controle do nível d'água.

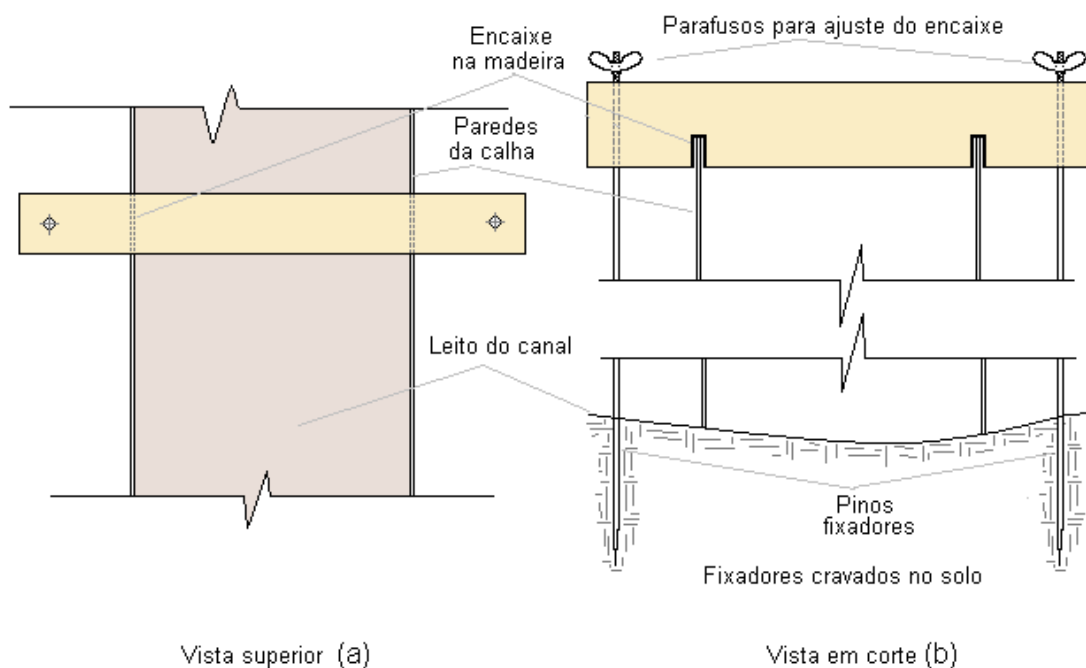


Figura 19. Esquema indicando os fixadores para evitar a vibração lateral da calha: vista superior (a) e vista em corte (b).



Figura 20. Esquema detalhado da instalação da calha, ilustrando a caixa para controle de nível e o sistema de válvulas para mudança de vazão.

9. Após 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 21.



Figura 21. Esquema da caixa para fornecimento de água para a realização dos testes e tubulação de ligação à caixa para controle de nível.

10. O controle da água lançada na caixa para controle de nível foi realizado por meio de válvula localizada no reservatório d'água e por um ladrão localizado na caixa de controle de nível;
11. A vazão aplicada no canal, em cada teste, foi controlada por válvulas instaladas na saída da caixa para controle de nível, tendo sido previamente determinada a vazão aplicada por cada válvula. O aumento de vazão foi controlado pela abertura de válvulas adicionais. No Quadro 13 são apresentadas as vazões aplicadas, o tempo de aplicação e o volume a ser armazenado.
12. Na saída da calha foram conectados tubos de PVC (200 mm), os quais conduziram o escoamento, juntamente com os sedimentos, até um sistema de armazenamento, o qual foi recoberto com lona plástica (Figura 22). Ao final de cada teste, essa lona foi lavada para retirada de qualquer sedimento que tivesse sido depositado.

Quadro 13. Vazões aplicadas, tempo de aplicação e volume a ser armazenado, nos testes realizados com o simulador de escoamento

Número de tubos	Vazão calibrada (L s ⁻¹)	Tempo previsto de aplicação (s)	Volume esperado (L)
1	1,90	180	342,0
2	3,83	120	459,6
3	5,95	60	357,0
4	7,94	60	476,4



Figura 22. Esquema indicando o sistema de condução da água da calha até o local para armazenamento do escoamento.

13. Os testes foram realizados de modo a simular o ramo ascendente do hidrograma de escoamento, sendo aplicadas quatro vazões crescentes, em seqüência, as quais foram conduzidas para quatro diferentes reservatórios (Figura 23);
14. Cada reservatório coletor armazenou sedimentos relativos a uma vazão aplicada, sendo a mudança de reservatório feita manualmente. 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 era realizada a mudança de reservatório de acumulação.



Figura 23. Representação do sistema de armazenamento do escoamento.

15. Do sistema de armazenamento, a água com os sedimentos era conduzida, utilizando-se sifões, para ser peneirada em peneira de malha 0,074 mm (#200), conforme indicado na Figura 24. Após ter sido coletado todo o sedimento com dimensões superiores a 0,074 mm, incluindo agregados, os sedimentos foram separados, de acordo com a vazão aplicada, sendo analisados de forma independente.



Figura 24. Peneiramento, em peneira de malha 200, dos sedimentos erodidos no canal.

16. Todo sedimento coletado na peneira de 0,074 mm foi armazenado em recipiente próprio, para ser, posteriormente, conduzido ao laboratório, de modo a ser desagregado e novamente filtrado na mesma peneira. Esse procedimento visou eliminar os agregados, deixando apenas o material desagregado com dimensões superiores a 0,074 mm.
17. Após terem sido desagregados e filtrados novamente, os sedimentos foram conduzidos à estufa para serem secos. Na estufa, os sedimentos permaneceram durante um período mínimo de 24 h à temperatura de 105° C, sendo, posteriormente, pesados em balança com precisão de 0,0001 g. Esta precisão foi necessária devido à pequena quantidade de material obtida em cada teste.
18. Para o mesmo 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 12). A estimativa do total de solo erodido foi obtida, procedendo-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.
19. Conhecendo-se a declividade, a vazão de entrada e a seção do canal, determinou-se a profundidade de escoamento, empregando-se a equação de Manning, sendo a tensão de cisalhamento determinada por meio da equação 25, considerando-se a profundidade de escoamento, uma vez que a seção erodível apresentava-se apenas no fundo do canal.

Antes do início dos testes, foi aplicada uma vazão de $1,9 \text{ L s}^{-1}$, referente à abertura de 1 válvula, durante 15 segundos, para a retirada de possíveis materiais soltos no canal durante sua instalação, os quais poderiam mascarar a real liberação de sedimentos da base do canal.

3.2.1.3. Determinação da erodibilidade e tensão crítica de cisalhamento

Os dados de perda de solo, obtidos nos testes, foram plotados em gráficos de perda de solo versus tensão aplicada, sendo feito o ajuste de uma equação a esse 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. A Figura 25 representa, de forma esquemática, a tensão crítica de cisalhamento do solo e sua erodibilidade.

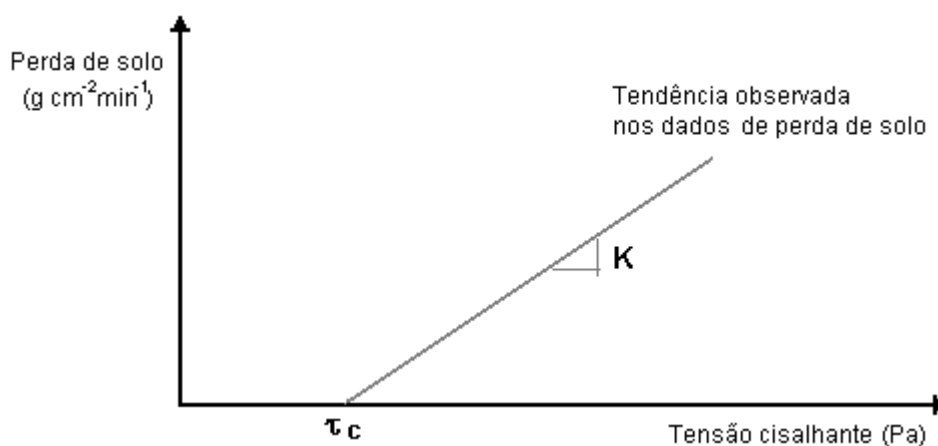
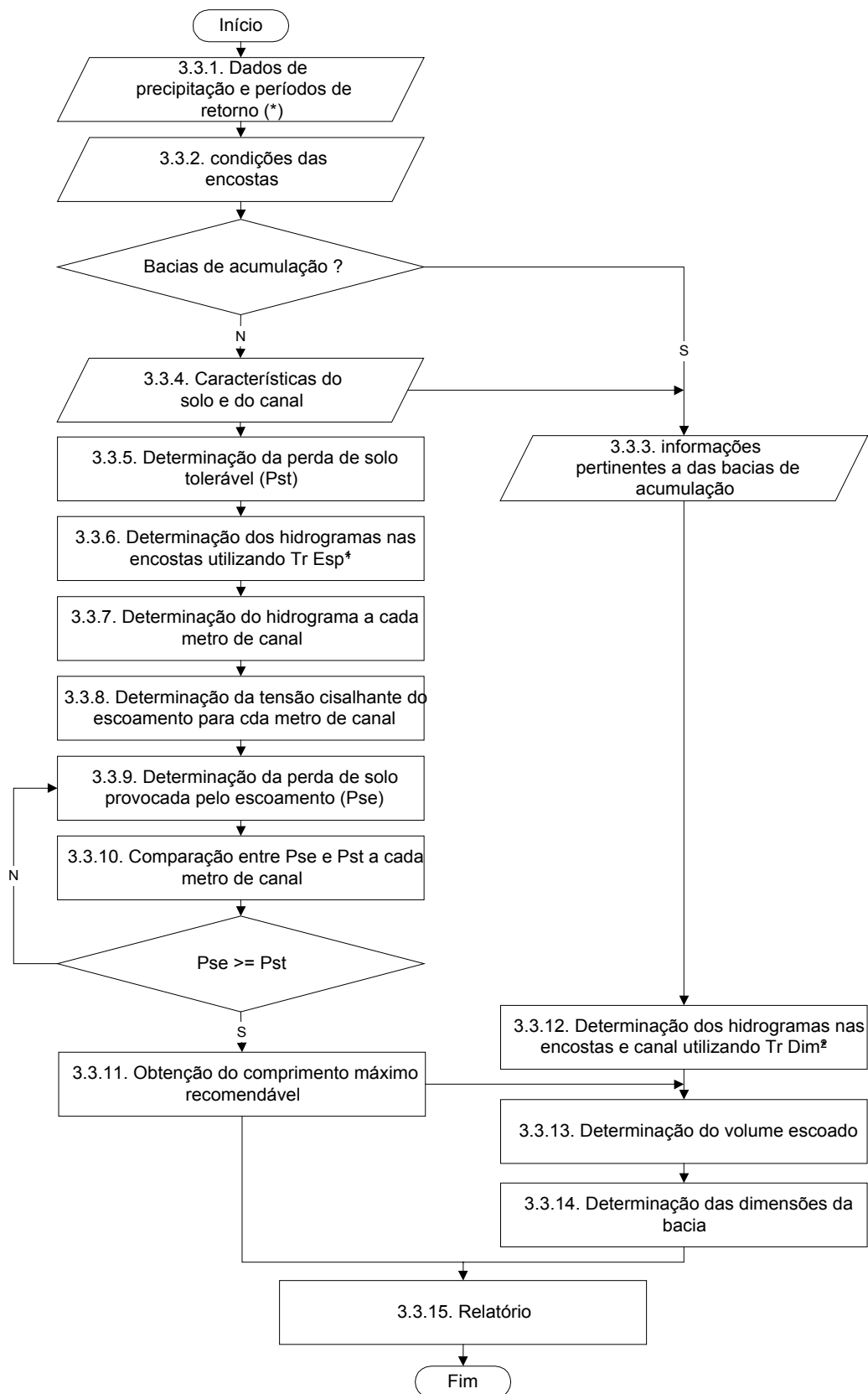


Figura 25. Representação esquemática da forma de obtenção da tensão crítica de cisalhamento e da erodibilidade do solo com base nos testes realizados.

3.3. Desenvolvimento do software para aplicação do modelo desenvolvido

Desenvolveu-se um software para que os procedimentos iterativos requeridos no uso do modelo desenvolvido fossem efetuados de forma mais fácil. Na Figura 26 é apresentado um fluxograma simplificado do algoritmo e, na sequência, descreve-se, sucintamente, cada uma das etapas previstas neste.



*1- período de retorno para determinação do espaçamento entre desaguadouros

*2 - período de retorno para dimensionamento das bacias de acumulação

Figura 26. Fluxograma simplificado do algoritmo para aplicação do modelo.

3.3.1. Dados de precipitação e períodos de retorno - consiste no fornecimento da equação de intensidade, duração e frequência de precipitação e os períodos de retorno para cálculo do espaçamento e dimensionamento.

3.3.2. Dados referentes ao leito da estrada e à área de contribuição externa à estrada - fornecimento de informações referentes ao leito da estrada e à área externa, sendo, para ambas as seções fornecidas, a taxa de infiltração estável da água no solo, a declividade, a largura e a rugosidade e, para a área de contribuição externa, é fornecida ainda a cobertura vegetal.

3.3.3. Dados das bacias de acumulação - devem ser fornecidos o tipo e a profundidade máxima da bacia de acumulação.

3.3.4. Características do canal e do solo - são requeridos, para o canal, o tipo e características da seção, a declividade, a rugosidade e o aprofundamento máximo. Do solo são requeridas a tensão crítica, erodibilidade e a massa específica.

3.3.5. Determinação da perda de solo tolerável - é obtida diretamente pelo software, a partir da entrada de dados referentes ao solo (aprofundamento e massa específica), sendo determinada conforme descrito no item 3.1.1.4.2.

3.3.6. Determinação dos hidrogramas nas áreas de contribuição - a partir dos dados de precipitação e período de retorno e das informações referentes às encostas, o sistema possibilita a determinação dos hidrogramas, conforme metodologia descrita no item 3.1.1.1.1.

3.3.7. Determinação do hidrograma no canal - obtido a partir do escoamento advindo das encostas, conforme item 3.1.1.1.2.

3.3.8. Determinação da tensão cisalhante no canal - obtida por meio da equação 25.

3.3.9. Perda de solo provocada pelo escoamento - obtida por meio da equação 28.

3.3.10. Comparação entre a perda de solo tolerável e a provocada - é realizada a comparação entre a perda provocada com a perda tolerável, conforme descrito no item 3.1.1.4.3.

3.3.11. Espaçamento máximo recomendável - estabelecido quando a perda de solo provocada pelo escoamento igualar a perda de solo tolerável.

3.3.12. Determinação dos hidrogramas nas encostas e no canal utilizando $T_r D_{im}$ - para dimensionamento das bacias de acumulação, após

estabelecido o espaçamento máximo, é determinada a vazão de escoamento utilizando-se o período de retorno para dimensionamento ($T_r D_{im}$).

3.3.13. Determinação do volume escoado - obtido utilizando-se a vazão determinada com $T_r D_{im}$.

3.3.14. Determinação das dimensões das bacias - obtidas conforme descrito no item 3.1.2.

3.3.15. Relatório - geração de um relatório em que constam as informações necessárias para o funcionamento do modelo e aquelas obtidas pelo software.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Tendo em vista que o software foi desenvolvido para permitir a realização de simulações com o modelo, este será apresentado antes dos demais objetivos

4.1. Desenvolvimento do software

O software, denominado Estradas, foi desenvolvido em ambiente de programação Delphi, sendo programado para ser utilizado em computadores com sistema operacional Microsoft Windows 95 ou superior. Apresenta interface de fácil utilização e auto-explicativa, quanto aos parâmetros de entrada, contando ainda com ilustrações para auxiliar o entendimento de abreviaturas.

4.1.1. Apresentação do software

As Figuras 27 a 35 representam as telas de apresentação, de entrada de dados e de resultados fornecidos pelo software desenvolvido.

A Figura 27 representa a tela de apresentação do software, na qual consta seu nome, sua finalidade e o grupo responsável pelo desenvolvimento.

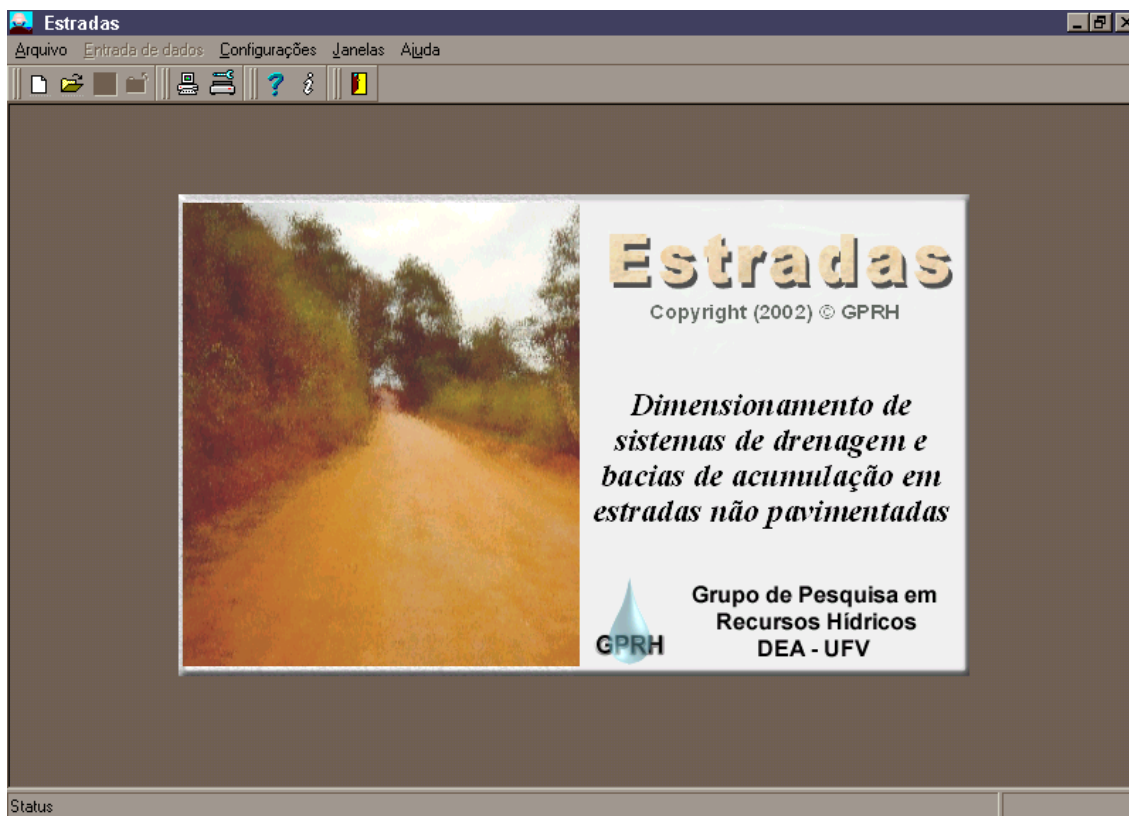


Figura 27. Tela de apresentação do software desenvolvido.

Na Figura 28 é apresentada a tela para entrada de informações pertinentes à precipitação, bem como os valores dos períodos de retorno a serem utilizados pelo software para a determinação do espaçamento entre desaguadouros ($T_{rE_{sp}}$) e para o dimensionamento das bacias de acumulação ($T_{rD_{im}}$). Nesta tela é oferecida, ao usuário, a opção do dimensionamento ou não das bacias de acumulação, bem como a escolha pelo uso do período de retorno convencional ou equivalente. Caso estes itens não sejam selecionados, o software deixará de dimensionar as bacias de acumulação, bem como calculará o espaçamento entre desaguadouros utilizando o período de retorno convencional. A partir do botão de consulta da tela, apresentada na Figura 28, é possibilitado ao usuário a chamada do software Plúvio 1.3.

Na tela representada pela Figura 29, são disponibilizadas as opções pertinentes a diferentes seções transversais típicas de estradas, cabendo ao usuário a escolha daquela que mais se adapte à condição do projeto.

Figura 28. Tela para fornecimento das informações pertinentes à precipitação e para definição dos períodos de retorno.

Figura 29. Tela para escolha do tipo de seção e para entrada dos dados pertinentes às condições do leito da estrada e da área externa de contribuição.

As seções disponibilizadas (Figura 29) visam atender todas as possibilidades possíveis. A seção 1 representa a situação em que o leito da estrada fica compreendido entre duas áreas externas de contribuição. A seção

2 corresponde à situação em que o canal de drenagem de um dos lados da estrada efetua o escoamento provindo da área externa de contribuição e o outro canal promove o escoamento oriundo do leito da estrada. Na seção 3, os canais de drenagem promovem o escoamento, apenas, da água provinda do leito da estrada.

Para definição das condições do leito da estrada, são requeridas informações referentes à taxa de infiltração estável (T_{ie}), declividade transversal, semi-largura ou largura (dependendo da seção) e rugosidade hidráulica. Para a área externa de contribuição, são requeridas a T_{ie} , declividade, comprimento, rugosidade hidráulica e cobertura vegetal.

Para obtenção da rugosidade hidráulica (n), o software apresenta tabelas, em que constam os valores de n para diferentes condições de superfície do solo. Os valores apresentados para o leito da estrada não foram obtidos diretamente para esta condição, porém apresentam-se valores que se aproximam das condições normalmente encontradas nos leitos de estradas.

Na Figura 30 apresenta-se a tela referente à entrada de dados para dimensionamento das bacias de acumulação. Os dados requeridos nesta tela somente necessitam ser preenchidos se for de interesse o dimensionamento das bacias. Nesta tela deve ser escolhido o tipo de bacia, se semicircular ou retangular, e fornecidas as demais informações requeridas para que o software realize o dimensionamento. É requerida a profundidade para a obtenção do raio nas bacias semicirculares e a largura nas bacias retangulares. O volume a ser armazenado, é calculado pelo modelo, utilizando-se o espaçamento máximo recomendável, também obtido pelo software.

A tela apresentada na Figura 31 corresponde à entrada de dados referentes ao canal e às condições do solo neste. Para o canal, são solicitados, o tipo de seção (triangular ou trapezoidal) bem como suas dimensões. São ainda requeridas a declividade do canal, a sua rugosidade, a qual pode ser obtida a partir de uma tabela disponível no software, na qual constam os valores desta variável para diferentes condições do canal, o aprofundamento máximo admissível e um comprimento arbitrado. Com o uso do software, pode-se calcular, a cada metro, a tensão atuante no fundo do canal até atingir o comprimento arbitrado, obtendo-se também a variação da tensão cisalhante com o tempo e a perda de solo provocada pelo escoamento.

Figura 30. Tela para escolha do tipo de bacia de acumulação e entrada dos dados necessários a seu dimensionamento.

Figura 31. Tela para fornecimento dos dados relativos à geometria do canal e às informações pertinentes ao solo.

O comprimento arbitrado deverá ser fornecido para que o software estabeleça o intervalo de análise. Caso o espaçamento recomendável entre os desaguadouros seja superior ao comprimento arbitrado, este deverá ser aumentado, de modo que seu valor seja superior ao espaçamento a ser

determinado pelo software. A percepção deste fato é possível pela verificação da perda provocada pelo escoamento. Caso esta perda seja inferior àquela considerada tolerável, o comprimento arbitrado será inferior ao espaçamento recomendável e, portanto, o comprimento arbitrado deverá ser aumentado. O tempo de processamento está relacionado a esse comprimento, uma vez que o software calcula a perda de solo a cada metro, até atingir o comprimento arbitrado. Na tela representada na Figura 31, são também requeridas informações pertinentes às condições do solo do canal, representadas pela erodibilidade, tensão crítica de cisalhamento e massa específica.

Fornecidas todas essas informações, o software realiza as interações necessárias à obtenção dos resultados, devendo ser pressionado, para tanto, o botão Simulação, sendo apresentadas as telas que constam na Figura 32.

Calculando perda de solo ...

Calculando hidrograma no leito da estrada: t = 1962,3 min

Calculando hidrograma na área externa: t = 72,4 min

Calculando hidrograma no canal: t = 2059,7 min

Calculando perda de solo na seção 194 m

Calculando volume da bacia de acumulação ...

Calculando hidrograma na estrada: t = 110,7 min

Calculando hidrograma na área externa: t = min

Figura 32. Telas indicando o processamento das informações para a determinação do espaçamento entre desaguadouros e do volume da bacia de acumulação.

Nessas telas aparece, inicialmente, a determinação do espaçamento entre desaguadouros e, posteriormente, aparecerá a tela indicando os resultados pertinentes ao cálculo da bacia de acumulação.

4.1.2. Resultados fornecidos pelo software

Na Figura 33 é apresentada a tela referente aos resultados fornecidos pelo software, estando indicados a perda tolerável, o espaçamento máximo recomendável, a tensão cisalhante máxima na seção referente ao espaçamento determinado, a perda de solo estimada na base do canal para o espaçamento máximo e a vazão máxima obtida considerando o $T_r E_{sp}$.

The screenshot shows a software window titled 'Resultados'. It contains two main sections for input parameters: 'Canal' and 'Bacia de acumulação'. Below these is a table with 5 columns: 'Seção (m)', 'Lâmina (cm)', 'Vazão (L/s)', 'Tensão máxima (Pa)', and 'Perda de solo (g)'. The table lists 13 sections. At the bottom right, there are buttons for 'Simulação', 'Relatório', and 'Fechar'.

Canal Parameters:

- Perda tolerável de solo: 13,0 gramas
- Espaçamento máximo: 80 m
- Tensão cisalhante máxima: 41,8 Pa
- Perda de solo estimada: 12,9 gramas
- Vazão: 25,6 L s⁻¹

Bacia de acumulação Parameters:

- Volume escoado por metro de canal: 1,0 m³
- Volume escoado: 80,0 m³
- Vazão: 0,1 L s⁻¹
- Raio: 7,0 m

Table Data:

Seção (m)	Lâmina (cm)	Vazão (L/s)	Tensão máxima (Pa)	Perda de solo (g)
1	0,0	0,0	0,0	0,0
2	2,2	0,7	10,8	0,8
3	2,6	1,0	12,6	1,1
4	2,9	1,4	14,0	1,5
5	3,1	1,7	15,2	1,8
6	3,3	2,1	16,3	2,1
7	3,5	2,4	17,3	2,3
8	3,7	2,8	18,1	2,6
9	3,9	3,1	18,9	2,9
10	4,0	3,4	19,7	3,1
11	4,2	3,8	20,4	3,4
12	4,3	4,1	21,1	3,6
13	4,4	4,5	21,7	3,8

Figura 33. Tela apresentando os resultados fornecidos pelo software.

Nesta tela são apresentadas, também, as informações para dimensionamento das bacias de acumulação, sendo indicados o volume escoado por metro linear de canal, o volume total escoado, a vazão máxima e a largura da bacia para acumulação do volume escoado. Esta figura apresenta, ainda, uma tabela na qual são indicados, para diferentes comprimentos do canal, os valores da lâmina máxima de água presente no canal, da vazão máxima, da tensão máxima e da perda de solo obtidos pelo software. O botão simulação, presente nesta tela, permite o acesso à tela apresentada na Figura 34.

Na tela apresentada pela Figura 34, estão colocados os comandos que permitem, ao usuário, alterar o formato da bacia, recalcular o volume escoado para espaçamentos diferentes daquele calculado pelo software, bem como verificar a relação entre as dimensões da bacia.

O software permite também acessar um relatório (Figura 35), no qual são apresentadas as informações de entrada e aquelas fornecidas como resultado.

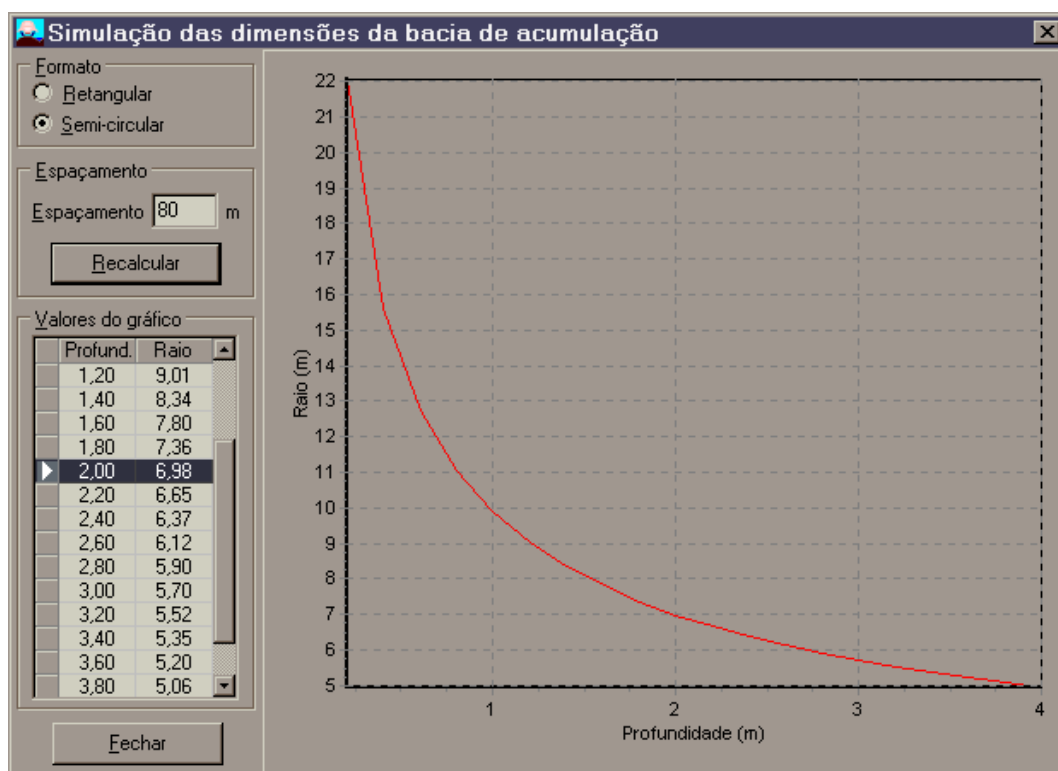


Figura 34. Tela apresentando o gráfico que representa a simulação dos resultados pertinentes a diferentes condições das bacias de acumulação.

Relatório

Imprimir

Fechar

RELATÓRIO DE ESTRADAS

Dados de entrada

Parâmetros da equação de chuvas intensas

Estado: Minas Gerais

Localidade: Viçosa

Latitude: 20°45'00"

Longitude: 42°51'00"

Parâmetros: K: 1082,8

a: 0,265

b: 23,781

c: 0,775

Período de retorno (anos)

Dimensionamento: 10

Espaçamento: 2

Canal

Tipo: triangular

m1: 5,0

m2: 1,0

Declividade longitudinal (m m⁻¹): 0,0500

Rugosidade (s m^{-1/3}): 0,0220

Solo

Tensão crítica de cisalhamento (Pa): 2,00

Erodibilidade (g m⁻² Pa⁻¹ min⁻¹): 0,00

Densidade aparente (g cm⁻³): 1,30

Aprofundamento máximo (cm): 10,0

Estrada

Largura (m): 3

Declividade transversal (m m⁻¹): 0,03

Taxa de infiltração (mm h⁻¹): 1,0

Rugosidade (s m^{-1/3}): 0,012

Área de contribuição externa

Largura (m): 12

Declividade (m m⁻¹): 0,20

Taxa de infiltração (mm h⁻¹): 20,0

Rugosidade (s m^{-1/3}): 0,100

Cobertura vegetal: Cultivo em fileiras estreitas; Fileiras retas; Boa

Bacia de acumulação

Profundidade (m): 2,0

Resultados

Canais de drenagem

Tensão cisalhante máxima na seção crítica (Pa): 41,8

Perda de solo permissível (g): 13,0

Volume escoado (m³): 52,0

Comprimento recomendado (m): 80,0

Perda de solo provocada (g): 12,9

Vazão máxima (L s⁻¹): 25,6

Bacias de acumulação

Profundidade (m): 2,0

Capacidade de acumulação (m³): 80,0

Raio (m): 6,98

Figura 35. Relatório apresentando os dados de entrada e os resultados fornecidos pelo software.

85

4.2. Análise de desempenho da modelo desenvolvido

4.2.1. Análise do modelo considerando diferentes tipos de solos

Na Figura 36 são apresentados os resultados de perda de solo, obtidos por meio do software, tendo-se por base os valores de erodibilidade e tensão crítica de cisalhamento, apresentados por MORFIN et al. (1996) para diferentes tipos de solos (Quadro 10). Observa-se que o solo argiloso foi o mais resistente à erosão e o siltoso o menos resistente, uma vez que os solos argilosos apresentam maior coesão entre as partículas e, conseqüentemente, maior resistência ao processo erosivo, o que acaba sendo refletido em uma menor erodibilidade. Para solos com maior quantidade de silte, a coesão mostra-se menor, refletindo-se em uma menor resistência.

Por meio das informações contidas na Figura 36, é possível proceder à avaliação da variação da perda de solo, ao longo do canal, bem como obter os espaçamentos recomendáveis entre desaguadouros, considerando diferentes limites de perdas de solo. Nesta figura, pode-se também observar que a perda de solo e, conseqüentemente, o aprofundamento do canal, apresenta uma taxa de variação mais acentuada nos menores comprimentos, sendo essa taxa reduzida à medida que o comprimento aumenta. Este fato é explicado pela variação na profundidade de escoamento ao longo do canal. Com o aumento da vazão, a profundidade de escoamento também aumenta. Entretanto, no caso de canais triangulares, como o utilizado nas simulações, a taxa de aumento da profundidade é decrescente com o aumento da vazão, uma vez que a largura da superfície molhada aumenta. Assim, para os menores comprimentos, os incrementos de vazão provocam maiores incrementos na profundidade de escoamento e, conseqüentemente, na tensão máxima de cisalhamento, e, portanto, a taxa de variação desta diminui com o aumento do comprimento do canal.

Considerando-se uma perda de solo de 6,5 g (5 cm de aprofundamento), os espaçamentos entre os desaguadouros obtidos para os diferentes solos foram: 103 m (argiloso); 71 m (arenoso cascalhado); 63 m (argiloso cascalhado); 47 m (arenoso) e 23 m (siltoso). Tomando-se como base o solo mais resistente à erosão (argiloso) e que, conseqüentemente,

proporcionou o maior espaçamento, os demais espaçamentos representam, em relação a este, 68,9% (arenoso encascalhado), 61,2% (argiloso encascalhado), 45,6% (arenoso) e 22,3% (siltoso). Os resultados obtidos representam, portanto, uma tendência de comportamento, que corresponde àquela observada em condições reais, nas quais os solos mais resistentes, aqui representados por maiores valores de tensão crítica de cisalhamento e menores valores de erodibilidade, mostram maior capacidade para resistirem ao processo erosivo.

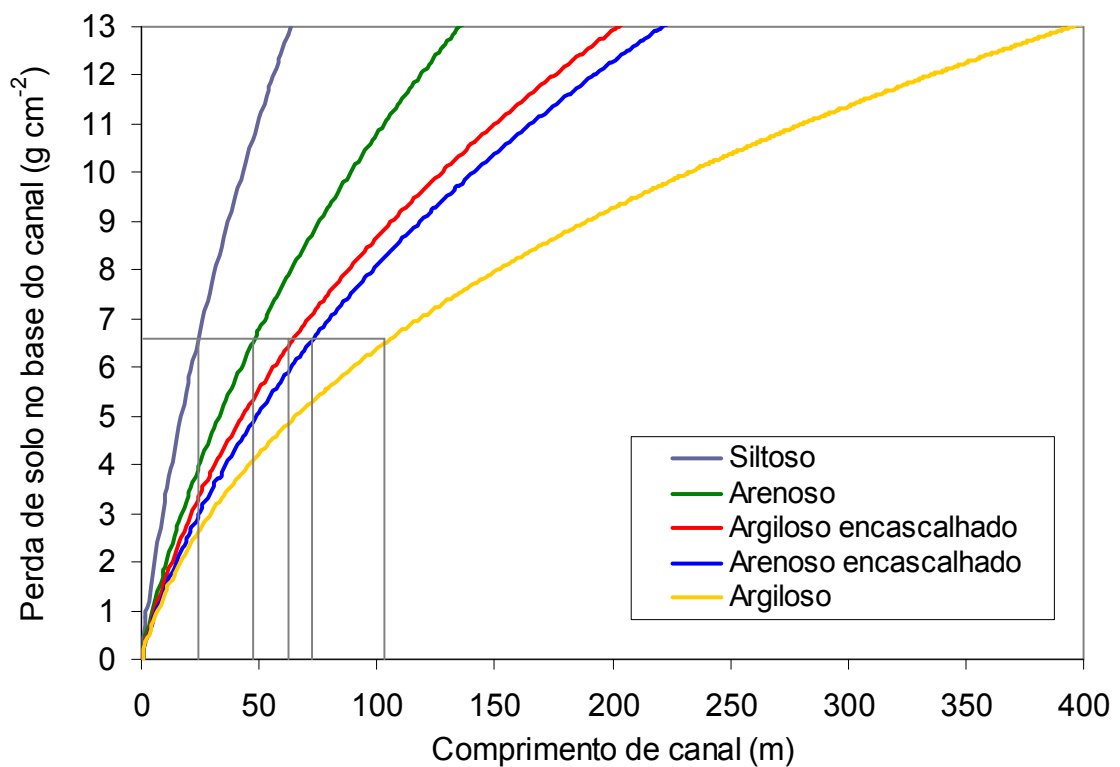


Figura 36. Perdas de solo obtidas na base do canal ao longo de seu comprimento, utilizando dados de erodibilidade e tensão crítica de cisalhamento para diferentes tipos de solo.

4.2.2. Análise do modelo considerando diferentes valores de aprofundamento do canal

Na Figura 37 são apresentados os espaçamentos obtidos, considerando os aprofundamentos máximos toleráveis no canal de 5 e 10 cm,

os quais foram obtidos utilizando-se os valores de erodibilidade e tensão crítica de cisalhamento, apresentados por MORFIN et al. (1996) para os diferentes tipos de solos apresentados no Quadro 10.

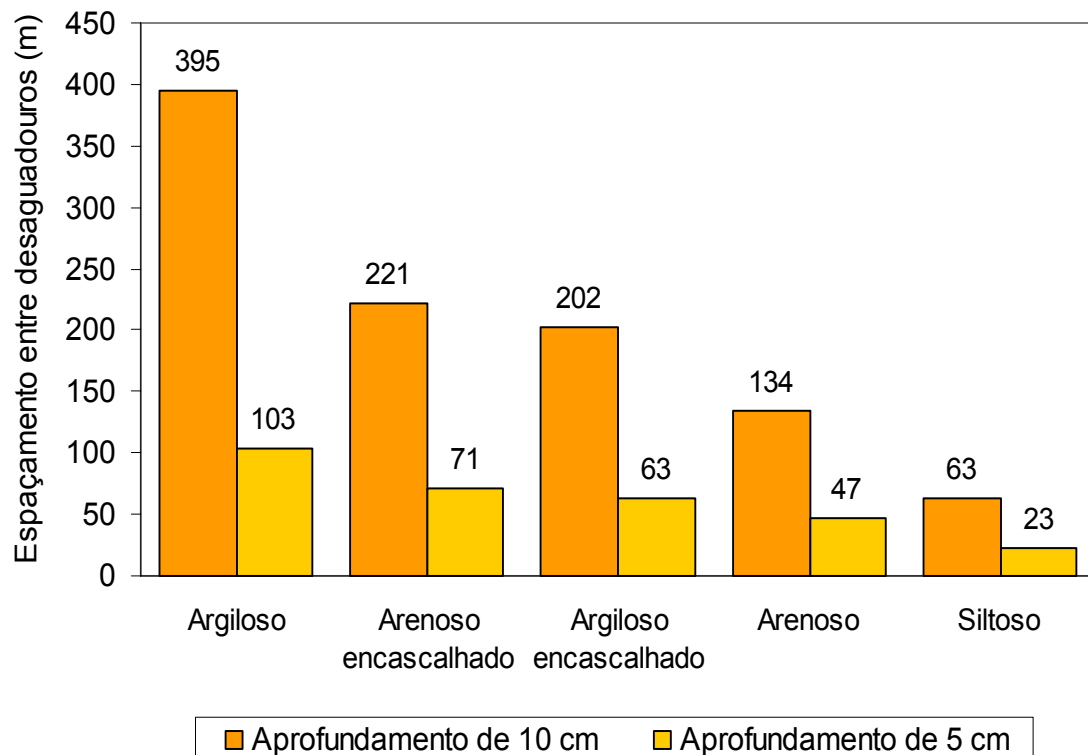


Figura 37. Espaçamento máximo recomendável obtido utilizando dados de erodibilidade e tensão crítica de cisalhamento para diferentes tipos de solos e valores de aprofundamento de canal de 5 e 10 cm.

Comparando a diferença entre os espaçamentos obtidos, e considerando-se aprofundamentos de 5 cm ($P_{st} = 6,5$ g) e 10 cm ($P_{st} = 13$ g), observa-se o aumento destes em 283,5% (argiloso); 211,3% (arenoso encascalhado); 220,6% (argiloso encascalhado); 185,1% (arenoso) e 173,9% (siltoso), ao passar do aprofundamento de 5 para 10 cm. Evidencia-se, portanto, que a variação do espaçamento obtido não é linear com a variação do aprofundamento, uma vez que o aprofundamento foi aumentado em 100% e os resultados superaram, sensivelmente, este valor. Esta diferença decorre do fato que, para canais triangulares, a variação da profundidade de escoamento

e, conseqüentemente, da tensão cisalhante, não é linear com o aumento no comprimento do canal, conforme comentado no item 4.2.1.

No Quadro 14 são apresentados os índices de sensibilidade do modelo à mudança no valor do aprofundamento do canal. Solos de menor resistência ao processo erosivo proporcionam um menor comprimento de canal, o qual é refletido no índice de sensibilidade, evidenciando que esses solos são menos sensíveis ao aprofundamento do que os solos de maior resistência.

Quadro 14. Índices de sensibilidade obtidos para o parâmetro aprofundamento do canal

Valor de entrada		Tipo de solo	Resposta do modelo		Índice de sensibilidade
l_1 (cm)	l_2 (cm)		O_1	O_2	
5	10	Argiloso	103	395	1,77
		Arenoso encascalhado	71	221	1,54
		Argiloso encascalhado	63	202	1,57
		Arenoso	47	134	1,44
		Siltoso	23	63	1,39

4.2.3. Análise do modelo com base na erodibilidade do solo

Na Figura 38 são apresentadas as curvas de perda de solo ao longo do canal, considerando-se diferentes valores de erodibilidade do solo. Nesta figura, observa-se que, para um mesmo comprimento de canal, aumentando a erodibilidade, ou seja, a taxa de desprendimento de solo, aumenta também a perda de solo, uma vez que este fator entra como multiplicador na equação para estimativa da perda de solo (Equação 28). Desta forma, uma maior taxa de desprendimento fará com que o limite tolerável de perda de solo seja atingido mais rapidamente, provocando uma redução no espaçamento entre desaguadouros. Os espaçamentos indicados na Figura 38 correspondem à uma perda de solo, na base do canal, de 6,5 g (5 cm de aprofundamento).

No Quadro 15 são apresentados os índices de sensibilidade do modelo à erodibilidade do solo, considerando-se 5 cm de aprofundamento. Os valores negativos, apresentados no índice de sensibilidade, indicam que a variação dos dados de entrada e dos resultados obtidos são inversamente proporcionais. Os

resultados obtidos indicam que o modelo é bastante sensível à variação na erodibilidade do solo. Observa-se também, que os índices de sensibilidade diminuem (em módulo) à medida que o valor da erodibilidade aumenta, o que também está diretamente relacionado à variação não-linear da profundidade de escoamento e, conseqüentemente, da tensão de cisalhamento, com o aumento do comprimento do canal, conforme já discutido no item 4.2.1.

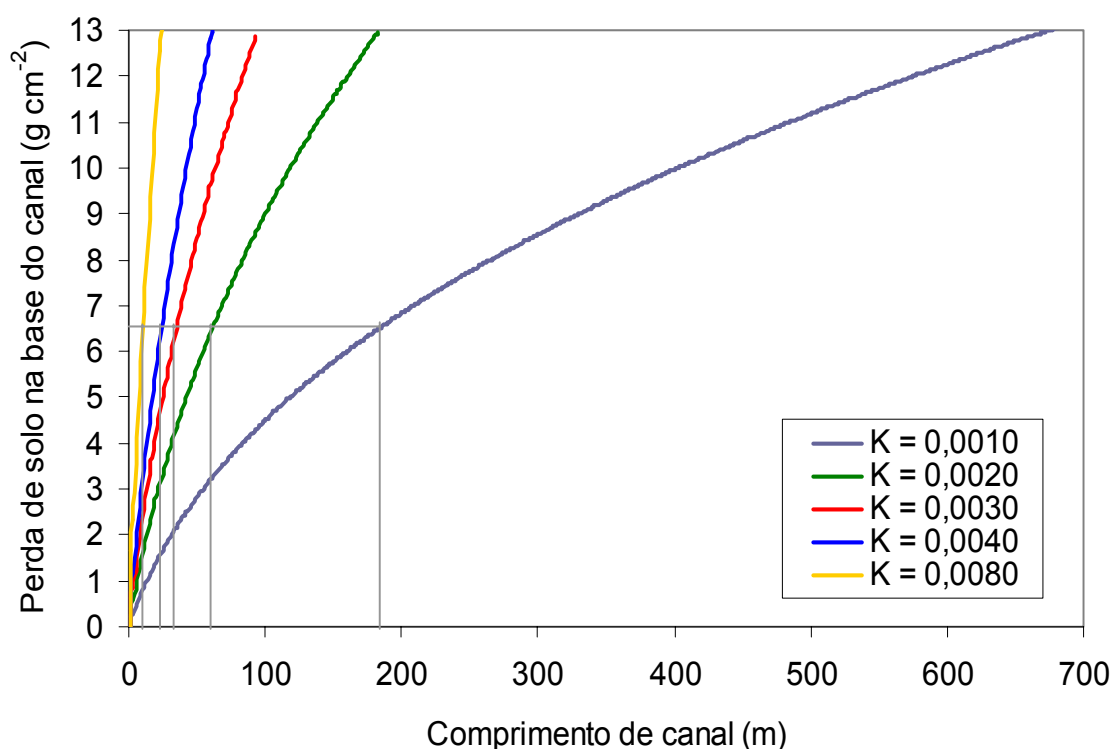


Figura 38. Variação da perda de solo ao longo do canal de drenagem para diferentes valores de erodibilidade do solo, em $\text{g cm}^{-2} \text{ min}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$.

Quadro 15. Índices de sensibilidade para o parâmetro erodibilidade, considerando 5 cm de aprofundamento

Valor de entrada (I)		Resposta do modelo (O)		Índice de sensibilidade
I_1	I_2	O_1	O_2	
0,0010	0,0020	184	61	-1,51
0,0020	0,0030	61	34	-1,42
0,0030	0,0040	34	24	-1,21
0,0040	0,0080	24	10	-1,24

4.2.4. Análise do modelo com base na tensão crítica de cisalhamento

Na Figura 39 são apresentados os resultados obtidos considerando a variação na tensão crítica de cisalhamento do solo do canal.

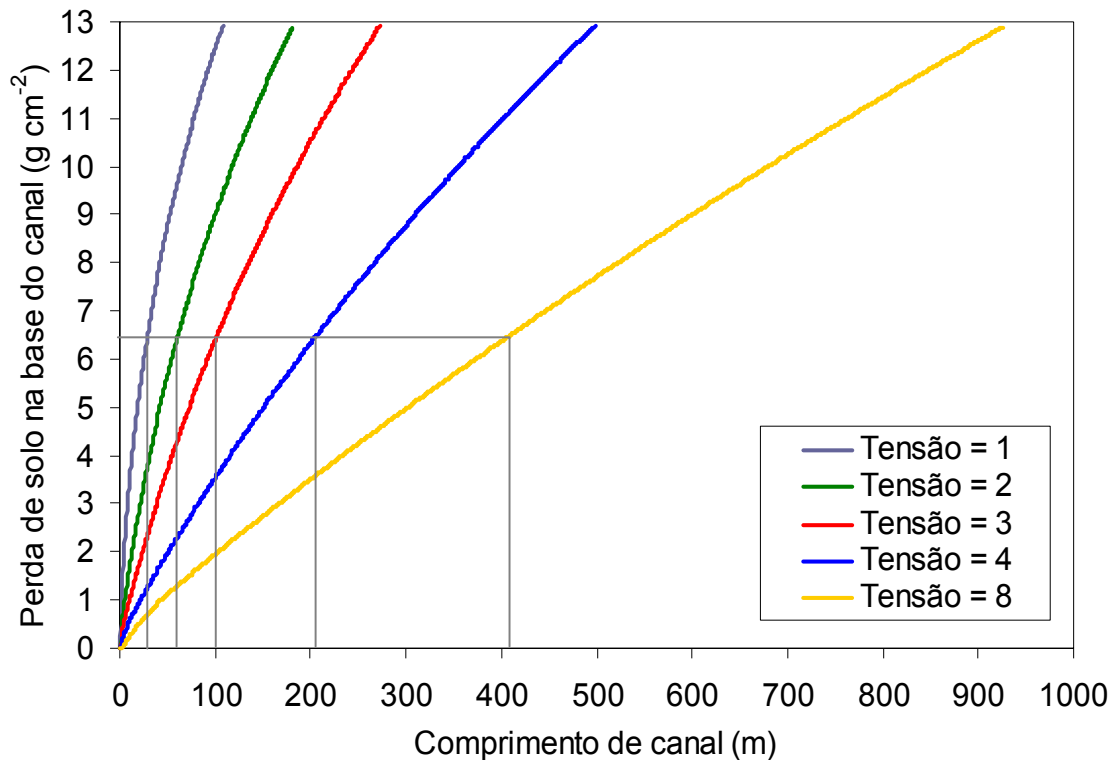


Figura 39. Variação da perda de solo na base do canal ao longo do comprimento para diferentes valores de tensão crítica de cisalhamento, em Pa.

Nesta figura, observa-se que, aumentando a tensão crítica de cisalhamento, aumenta também o espaçamento entre desaguadouros. Tal fato pode ser explicado em razão do modelo utilizar, para o cálculo do espaçamento entre desaguadouros, a área do gráfico de variação da tensão cisalhante em função da tensão localizada entre a tensão crítica (τ_c) e a tensão máxima provocada pelo escoamento (Figura 11). Desta forma, aumentando a tensão crítica de cisalhamento do solo, diminui a diferença entre estes dois pontos no gráfico. A tendência aproximadamente triangular de variação da tensão

cisalhante em função do tempo, evidenciada neste gráfico, também pode se justificar este fato, uma vez que, elevando-se o valor de τ_c , reduz o tempo que o escoamento se apresenta acima da tensão crítica e, conseqüentemente, o número de intervalos de tempo que serão utilizados para estimativa da perda de solo.

Na equação 28, observa-se que, tanto a variação na diferença entre a tensão provocada pelo escoamento e a tensão crítica de cisalhamento quanto a redução no número de intervalos de tempo considerados, provocarão a redução na perda de solo obtida pelo modelo, acarretando o aumento no espaçamento entre desaguadouros.

No Quadro 16 são apresentados os índices de sensibilidade do modelo à variação da tensão crítica de cisalhamento, para 5 cm de aprofundamento, evidenciando-se que a variação de espaçamento entre desaguadouros em função deste fator é oposta ao da erodibilidade, ou seja, aumentando o valor do parâmetro de entrada, aumenta também o espaçamento, o que demonstra que a variação do espaçamento é diretamente proporcional à tensão crítica de cisalhamento. Observa-se, também, um aumento da sensibilidade do modelo com o aumento da tensão crítica de cisalhamento.

Quadro 16. Índices de sensibilidade obtidos para o parâmetro tensão crítica de cisalhamento considerando 5 cm de aprofundamento

Valor de entrada (I)		Resposta do modelo (O)		Índice de sensibilidade
I_1	I_2	O_1	O_2	
1	2	29	61	1,07
2	3	61	102	1,26
3	4	102	151	1,36
4	8	151	410	1,39

4.2.5. Análise do modelo com base na alteração da seção transversal do canal de drenagem

Na Figura 40 apresenta-se a variação na perda de solo, ao longo do canal, determinada com base na mudança dos valores de inclinação das paredes da seção transversal. Canais com maiores inclinações nas paredes,

ou seja, com ângulos de abertura internos maiores, favorecem o aumento na área da seção molhada, fazendo com que, à medida que a vazão cresce, a taxa de acréscimo da profundidade de escoamento e, conseqüentemente, da tensão provocada por este diminua. Assim, a alteração na seção transversal, aumentando o ângulo de abertura, provocará o aumento do espaçamento máximo admissível.

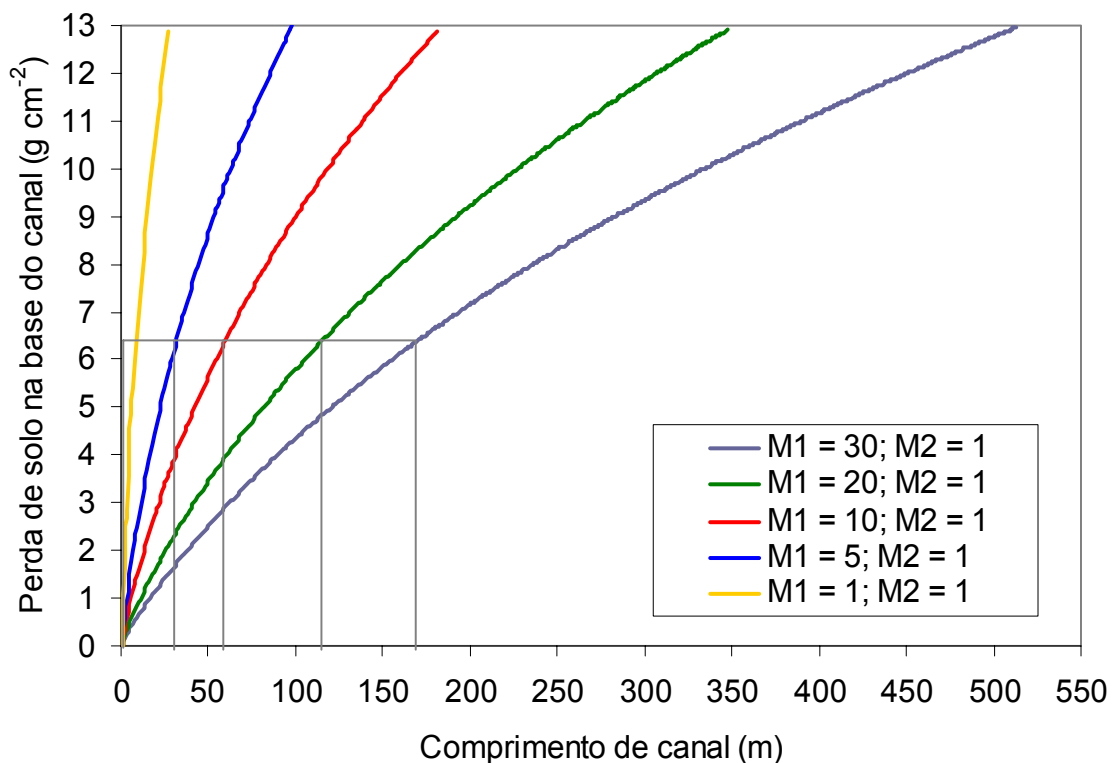


Figura 40. Variação da perda de solo na base do canal ao longo do comprimento para diferentes seções transversais.

Considerando um aprofundamento de 5 cm (6,5 g), foram obtidos espaçamentos entre desaguadouros de 174; 118; 61; 32 e 9 m, considerando-se valores de inclinação da parede do canal, em um dos lados, de 3,3% (talude 30:1); 5% (talude 20:1); 10% (talude 10:1); 20% (talude 5:1) e 100% (talude 1:1), respectivamente. Estes números refletem a importância da consideração da seção transversal do canal para a determinação do espaçamento entre desaguadouros.

4.2.6. Análise do modelo com base na declividade do canal

A Figura 41 ilustra a influência da declividade no espaçamento entre desaguadouros, sendo representada a perda de solo ao longo do comprimento do canal.

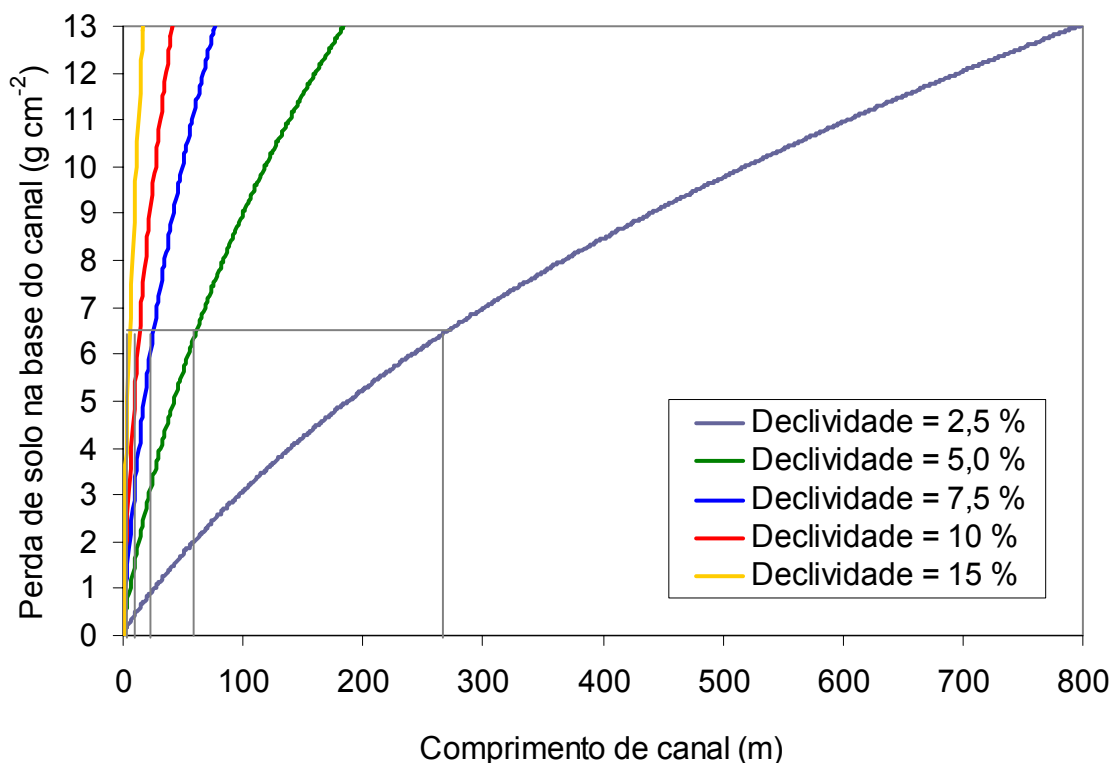


Figura 41. Variação da perda de solo na base do canal ao longo do comprimento para diferentes declividades.

A declividade do canal interfere, diretamente, na tensão de cisalhamento provocada pelo escoamento, uma vez que esta entra como multiplicador na equação para cálculo da tensão cisalhante (Equação 25). Apesar da declividade do solo ser multiplicador nesta equação, o aumento provocado na tensão não é linear, uma vez que, para uma mesma vazão, a velocidade de escoamento também aumenta em função da raiz quadrada da declividade, reduzindo a profundidade de escoamento, sendo que, tanto a profundidade de escoamento quanto a declividade do canal são parâmetros de

entrada da equação 25. Desta forma, aumentando a declividade, aumenta a tensão cisalhante aplicada sobre o solo e, conseqüentemente, a área do gráfico de tensão cisalhante em função do tempo acima da tensão crítica de cisalhamento do solo.

No Quadro 17 apresentam-se os valores do índice de sensibilidade do modelo à variação da declividade do canal, para 5 cm de aprofundamento, evidenciando-se grande sensibilidade do modelo em relação à declividade do terreno, sendo que o índice aumenta com o aumento da declividade. O sinal negativo indica que a variação da declividade é, inversamente, proporcional à variação do espaçamento, uma vez que, com o aumento da declividade, o espaçamento é reduzido.

Quadro 17. Índices de sensibilidade obtidos para o parâmetro declividade para 5 cm de aprofundamento

Valor de entrada (I)		Resposta do modelo (O)		Índice de sensibilidade
I_1	I_2	O_1	O_2	
2,5	5,0	270	61	-1,89
5,0	7,5	61	25	-2,09
7,5	10,0	25	13	-2,21
10,0	15,0	13	5	-2,22

4.2.7. Análise do modelo com base no período de retorno

Na Figura 42 é apresentada a variação na perda de solo, em função do período de retorno considerado, sendo representados tanto os períodos de retorno convencionais (T_r) quanto os equivalentes (T_{req}). Observa-se que, para uma mesma perda de solo, o espaçamento entre desaguadouros é reduzido com o aumento no valor de T_r , uma vez que a intensidade da precipitação esperada aumenta e, com isso, a profundidade do escoamento, aumentando a tensão cisalhante provocada por este.

Considerando 5 cm de aprofundamento, obtêm-se espaçamentos entre desaguadouros de 81 e 69 m, para os períodos de retorno convencional e equivalente de 2 e 2,77 anos, respectivamente, de 67 e 61 m, considerando-se 3 e 3,65 anos, e de 39 e 38 m considerando-se 10 e 10,53 anos.

A diferença percentual obtida nos espaçamentos entre desaguadouros, considerando T_r e T_{req} , é maior para menores valores de T_r . Para T_r de 2 anos a redução no espaçamento entre desaguadouros é de 14,8%, considerando o valor de T_{req} no lugar do T_r . Para T_r de 3 anos, a redução é de 8,9% e para 10 anos é de 2,6%, enquanto o aumento percentual entre os valores de T_r e T_{req} foi de 38,5; 21,7 e 5,3%, respectivamente, para valores de T_r de 2; 3 e 10 anos.

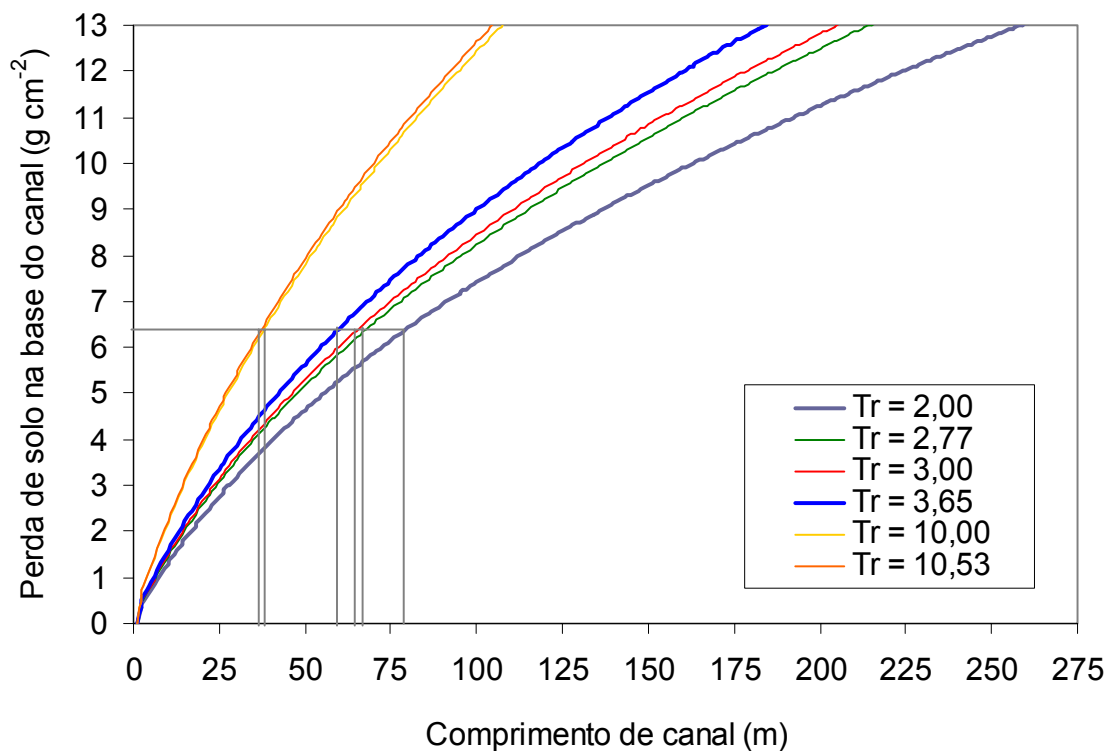


Figura 42. Variação da perda de solo ao longo do canal para diferentes períodos de retorno.

No Quadro 18 são apresentados os valores de sensibilidade do modelo ao período de retorno considerado, sendo evidenciado que os índices foram sensivelmente inferiores àqueles obtidos para as outras variáveis, não tendo sido evidenciadas variações tão expressivas deste índice com a variação do período de retorno considerado.

Quadro 18. Índices de sensibilidade obtidos para o parâmetro período de retorno, para 5 cm de aprofundamento

Valor de entrada (I)		Resposta do modelo (O)		Índice de sensibilidade*
I_1	I_2	O_1	O_2	
2	2,77	81	69	0,49
3	3,65	67	61	0,48
10	10,53	39	38	0,50

4.2.8. Análise do modelo para diferentes localidades

Na Figura 43 apresenta-se a variação da perda de solo, ao longo do comprimento do canal da estrada, para diferentes localidades.

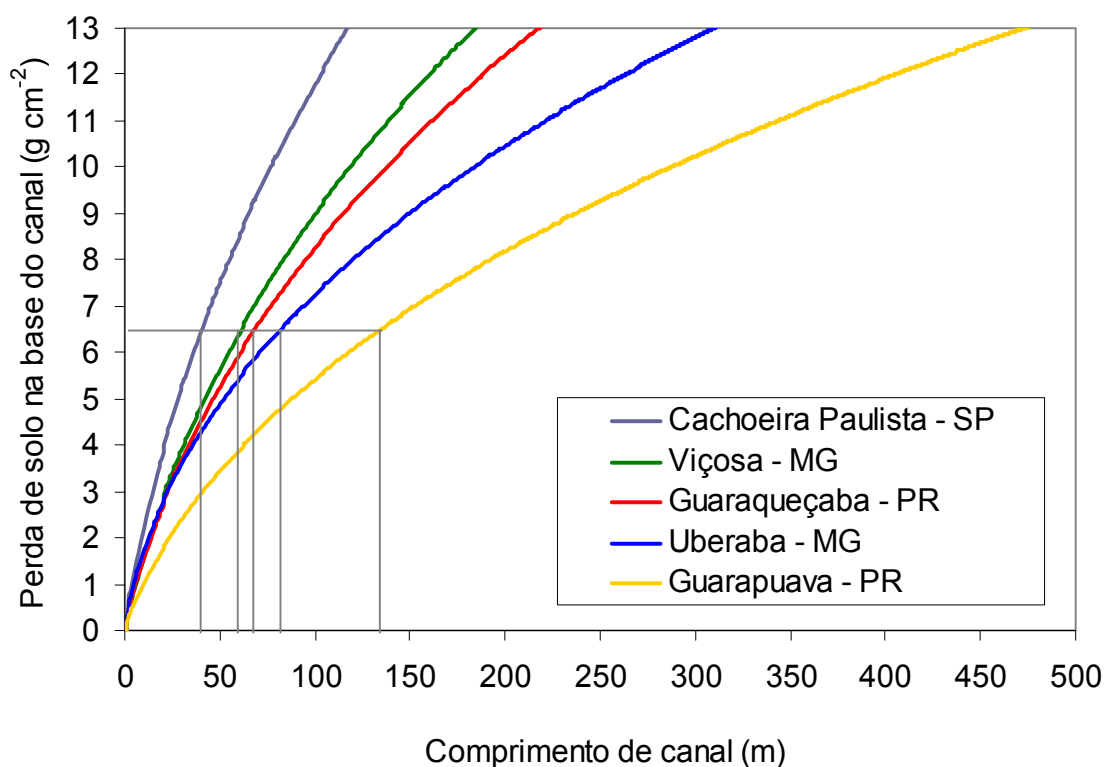


Figura 43. Variação da perda de solo na base do canal ao longo do comprimento considerando diferentes localidades.

Na Figura 43, observa-se que as variações nas perdas de solo, entre as localidades, são bastante elevadas, o que reflete a importância da utilização

de informações representativas da precipitação da localidade em estudo para a determinação do espaçamento entre desaguadouros. A variação apresentada está diretamente relacionada às mudanças que ocorrem na equação de intensidade duração e frequência de precipitação (i_m) entre as localidades, sendo esperados menores espaçamentos para locais em que as precipitações são mais intensas.

Os espaçamentos determinados, considerando-se o aprofundamento de 5 cm para o canal de drenagem, foram 40, 61, 68, 82 e 134 m, para as localidades de Cachoeira Paulista (SP), Viçosa (MG), Guaraqueçaba (PR), Uberaba (MG) e Guarapuava (PR), respectivamente. Considerando a localidade de Cachoeira Paulista como base, na qual obteve-se o menor espaçamento entre desaguadouros, as demais localidades apresentaram espaçamentos que superaram este em 52,5% (Viçosa), 70,0% (Guaraqueçaba), 105% (Uberaba) e 235% (Guarapuava).

4.2.9. Análise do modelo quanto à variação na área de contribuição

Para um mesmo local e período de retorno, a mudança na vazão de escoamento, a ser conduzida pelo canal, está diretamente relacionada à área de contribuição, tanto advinda do leito da estrada quanto da área externa a esta. A área de influência de cada uma e suas características irão interferir tanto na vazão de escoamento quanto no volume total escoado. Desta forma, alterando-se a área de contribuição, ou suas características, o reflexo ocorrerá no espaçamento entre desaguadouros, uma vez que este depende do hidrograma de escoamento gerado no canal.

Na Figura 44 apresenta-se a variação da perda de solo unitária ao longo do canal de drenagem, considerando-se as condições de precipitação pertinentes às localidades de Cachoeira Paulista (SP), Viçosa (MG) e Guarapuava (PR), sendo considerada a simulação do espaçamento com e sem a contribuição advinda da área externa, evidenciando-se um acréscimo no espaçamento mediante a inexistência área externa de contribuição.

Os espaçamentos observados, considerando o aprofundamento de 5 cm, foram 40, 51, 61, 73, 134 e 165 m, considerando-se, respectivamente, as localidades de Cachoeira Paulista, com e sem área externa de contribuição, Viçosa, com e sem área externa de contribuição, e Guarapuava, com e sem área externa de contribuição. Estes valores indicam que o modelo responde bem à consideração da área externa de contribuição. A magnitude da diferença entre a presença ou não de área externa de contribuição é uma função da área que está contribuindo para o escoamento e de suas características.

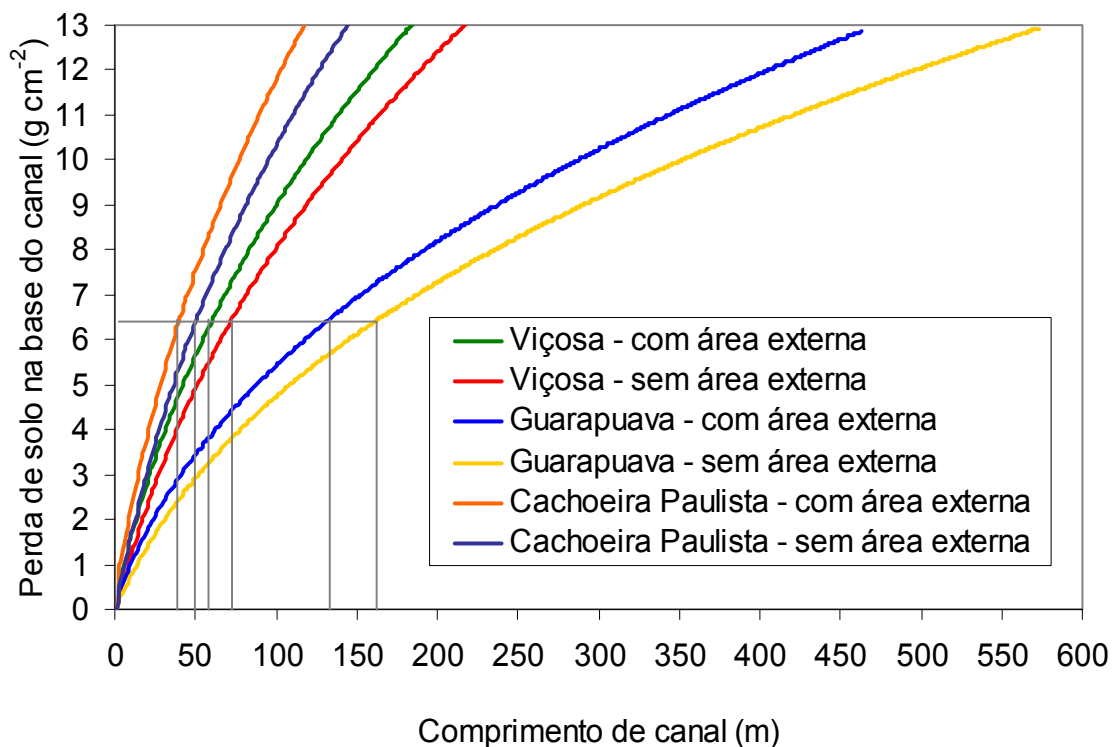


Figura 44. Variação na perda de solo ao longo do canal com base nas características de precipitação das localidades de Cachoeira Paulista (SP), Viçosa (MG) e Guarapuava (PR), considerando tanto a contribuição advinda somente da estrada, como da estrada e da área externa de contribuição.

4.2.10. Análise do modelo com base na alteração das características de rugosidade do canal

Na Figura 45 é apresentada a variação da perda de solo ao longo do comprimento do canal, considerando-se diferentes valores de rugosidade.

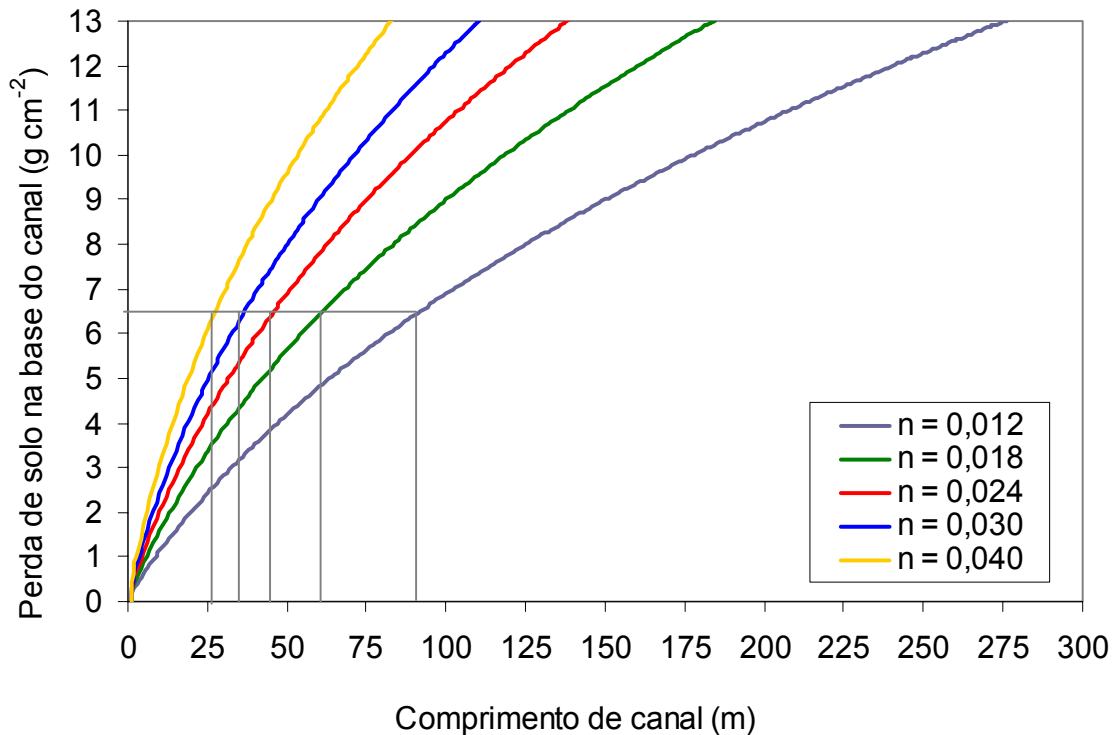


Figura 45. Variação da perda de solo na base do canal ao longo do comprimento, para diferentes rugosidades hidráulicas do canal.

Observa-se, nesta figura, um aumento na perda de solo com o aumento da rugosidade, o qual está associado ao aumento da tensão aplicada ao solo, uma vez que a profundidade de escoamento é aumentada. Os espaçamentos obtidos para 5 cm de aprofundamento foram de 91, 61, 45, 36 e 27 m, correspondentes aos valores de rugosidade (n) de 0,012; 0,018; 0,024; 0,030 e 0,040 respectivamente, evidenciando-se que, com o aumento da rugosidade do canal diminui o espaçamento entre desaguadouros.

No Quadro 19 apresentam-se os valores de sensibilidade do modelo para diferentes valores de rugosidade do terreno, os quais foram inversamente proporcionais ao crescimento do espaçamento, evidenciando-se que o índice de sensibilidade do modelo não sofre variações expressivas com a variação da rugosidade.

Quadro 19. Índices de sensibilidade obtidos para o parâmetro rugosidade hidráulica do canal

Valor de entrada (I)		Resposta do modelo (O)		Índice de sensibilidade
I_1	I_2	O_1	O_2	
0,012	0,018	91	61	-0,99
0,018	0,024	61	45	-1,06
0,024	0,030	45	36	-1,00
0,030	0,040	36	27	-1,00

Os critérios de estabilidade para o dimensionamento de canais são baseados na tensão crítica de cisalhamento ou na velocidade máxima permissível, os quais mostram-se conflitantes, quando comparados com os resultados obtidos neste trabalho.

Na Figura 46 apresenta-se a variação da velocidade e da tensão de cisalhamento ao longo do comprimento de canal, considerando-se dois valores de rugosidade bastante distintos. Observa-se que, no comprimento de 200 m, para o menor valor de rugosidade (0,012), a tensão provocada pelo escoamento foi de 38,1 Pa e a velocidade de $2,1 \text{ m s}^{-1}$, enquanto aumentando-se a rugosidade para 0,030, a tensão aplicada subiu para 52,3 Pa, enquanto a velocidade do escoamento foi reduzida para $1,1 \text{ m s}^{-1}$, indicando, portanto, resultados opostos. De acordo com o critério de estabilidade de canais baseado na velocidade, o aumento da rugosidade promove redução na velocidade de escoamento e, conseqüentemente, o aumento do espaçamento admissível entre desaguadouros. Já com o critério da tensão, a resposta é oposta, sendo interessante a redução da rugosidade de modo que a tensão aplicada seja reduzida.

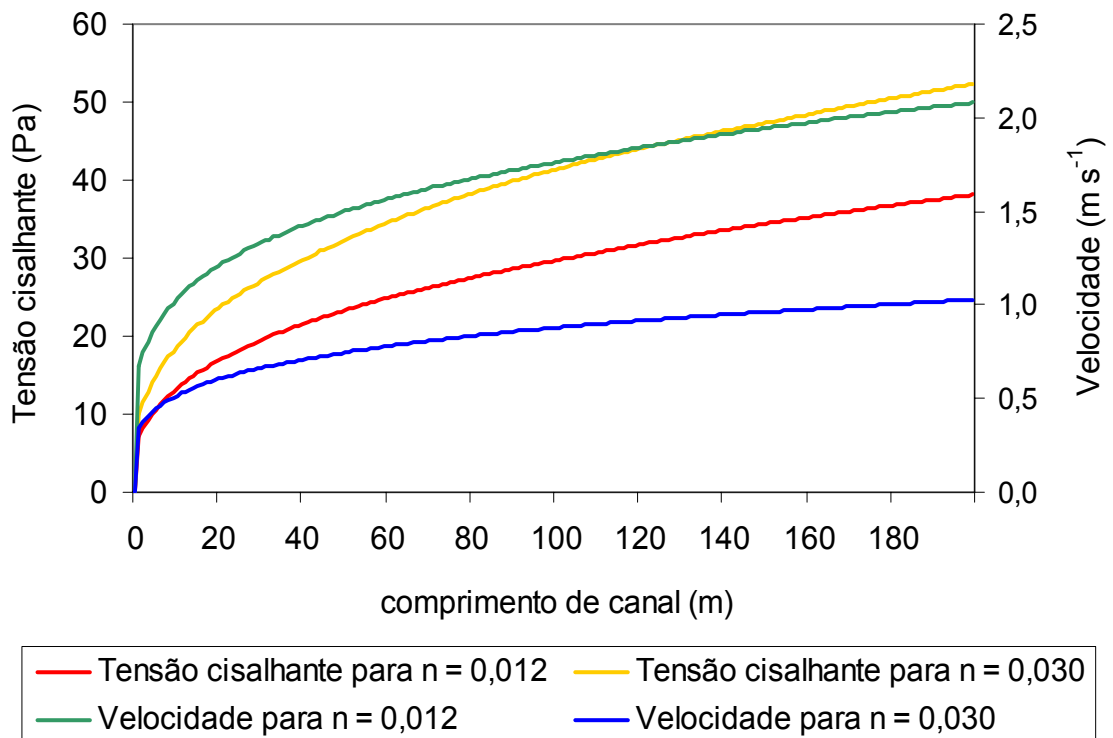


Figura 46. Variação da velocidade de escoamento e da tensão cisalhante ao longo do comprimento do canal, para diferentes condições de rugosidade hidráulica do canal.

A redução na velocidade de escoamento com o aumento da rugosidade está associada à dissipação de energia provocada pelo aumento da rugosidade. De acordo com o critério da tensão cisalhante, admite-se que, quanto maior a tensão, menor será o espaçamento recomendável entre desaguadouros. Baseado neste conceito, pode-se evidenciar que o aumento da rugosidade reduz o espaçamento entre desaguadouros, uma vez que, como consequência da dissipação da energia, aumenta a profundidade de escoamento e aumenta a tensão cisalhante.

Com o aumento da rugosidade, a velocidade é reduzida e, conseqüentemente, a energia associada ao escoamento também é reduzida. Para superfícies pouco rugosas, a dissipação da energia do escoamento ocorre em proporção inferior àquela que ocorreria sob condição de superfícies mais rugosas, permanecendo o escoamento com elevada energia. Esta energia acumulada no escoamento deve ser mantida dentro de limites aceitáveis e ser, de alguma forma, dissipada, de modo a não provocar erosão nos trechos a

jusante. Em canais concretados, a dissipação de energia é normalmente realizada por meio da construção de bacias de dissipação. Entretanto, em estradas não pavimentadas, ainda não existem critérios estabelecidos para promover esta dissipação.

Desta forma, considera-se a forma de dissipação dessa energia um aspecto bastante importante a ser analisado em trabalhos futuros. Normalmente o aumento da rugosidade ocorre devido à presença de vegetação no canal, aumentando também a capacidade de resistência do canal, uma vez que a energia não é dissipada diretamente sobre sua superfície, e sim pela vegetação.

4.2.11. Análise comparativa dos índices de sensibilidade

Os índices de sensibilidade obtidos mostram que o modelo é bastante sensível a alguns dos parâmetros estudados, indicando que pequenas alterações nesses parâmetros resultam em diferenças expressivas nos resultados apresentados pelo modelo. A determinação e utilização desses parâmetros deve, desta forma, ser criteriosa, de modo que os resultados fornecidos sejam coerentes com a realidade do problema abordado. No Quadro 20 é apresentada uma síntese dos índices de sensibilidade obtidos para os diferentes parâmetros analisados.

Quadro 20. Valores dos índices de sensibilidade obtidos para diferentes parâmetros de entrada do modelo

Parâmetro de entrada	Intervalo de valores	Índice de sensibilidade
Aprofundamento de canal (cm)	5 - 10	1,54
Erodibilidade do solo ($\text{g cm}^{-2} \text{ min}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$)	0,0010 - 0,0020	-1,51
	0,0040 - 0,0080	-1,24
Tensão crítica de cisalhamento (Pa)	1 - 2	1,07
	4 - 8	1,39
Declividade (%)	2,5 - 5	-1,89
	10 - 15	-2,22
Período de retorno (anos)	2 - 2,77	0,49
Rugosidade do canal ($\text{s m}^{-1/3}$)	0,012 - 0,018	- 0,99
	0,030 - 0,040	-1,00

De acordo com os valores apresentados no Quadro 20, o modelo apresenta maior sensibilidade à declividade do canal, seguido do aprofundamento do canal. O aprofundamento do canal, no entanto, corresponde a um critério estabelecido para o modelo, sendo a adoção de valor maior ou menor dependente das condições de risco e recuperação consideradas no projeto.

Os valores do índice de sensibilidade do modelo à erodibilidade e tensão crítica de cisalhamento também mostram-se elevados, indicando que essas características do solo são de grande importância para o modelo.

Os menores valores do índice de sensibilidade foram obtidos para a comparação entre os períodos de retorno convencional e equivalente. O índice de sensibilidade obtido para a rugosidade do canal mostrou que a proporção da variação no comprimento do canal é a mesma do parâmetro de entrada.

4.3. Análise dos resultados obtidos pelo modelo para o dimensionamento das bacias de acumulação

A determinação do volume de escoamento a ser armazenado pela bacia foi feita utilizando-se o valor do período de retorno para dimensionamento ($T_r D_{im}$), sendo determinado para o espaçamento máximo entre desaguadouros, obtido pela metodologia proposta. Desta forma, o volume a ser armazenado pelas bacias está, diretamente, relacionado às características utilizadas na determinação do espaçamento. Parâmetros de entrada que favoreçam o aumento do espaçamento resultarão, para uma mesma localidade, na necessidade de bacias de acumulação com volumes também maiores. Por outro lado, espaçamentos pequenos limitam o uso de bacias de acumulação, uma vez que, apesar do volume mostrar-se menor, a necessidade de implantação de bacias muito próximas limita a utilização das áreas localizadas às margens da estrada. Para áreas com utilização agrícola, ou onde seja possível a implantação de estruturas como terraços, esta poderá ser uma boa alternativa, principalmente quando os espaçamentos recomendados forem pequenos.

A possibilidade de alteração dos valores de espaçamento entre as bacias de acumulação, por meio do botão simulação, presente na tela de resultados (Figura 34), permite o redimensionamento das bacias para comprimentos diferentes daqueles calculados, sendo seu uso recomendável, principalmente, quando os espaçamentos entre desaguadouros mostraram-se muito grandes. Para esta situação, os volumes escoados são muito elevados, podendo tornar-se limitante para a construção de bacias de acumulação, devido ao perigo que a construção dessas pode representar para pessoas e animais. Para este caso, a construção de bacias de acumulação em série, ou em distâncias menores, pode ser uma solução recomendável.

Nos Quadros 21 e 22 são apresentadas as dimensões das bacias de acumulação obtidas com a metodologia, considerando-se as condições de precipitação e os espaçamentos obtidos para as localidades apresentadas no item 4.2.8.

Quadro 21. Raio calculado para bacias de acumulação semicirculares, com base no volume escoado por metro de canal (V_m) e espaçamentos entre desaguadouros obtidos para diferentes localidades, para aprofundamento do canal de 5 cm, profundidade da bacia de 2 m e período de retorno de 10 anos

Localidade	Espaçamento (m)	$V_m (m^3)$	Volume (m^3)	Raio (m)
Cachoeira Paulista	40	1,33	53,20	5,82
Viçosa	61	0,98	59,80	6,17
Guaraqueçaba	68	0,98	66,60	6,51
Uberaba	82	1,11	91,00	7,61
Guarapuava	134	0,62	83,10	7,27

Tendo em vista o fato de que, para o cálculo do espaçamento, é utilizado o $T_r E_{sp}$, e para o cálculo do volume da bacia de acumulação é usado o $T_r D_{im}$, ocorrem inversões no comportamento da equação de intensidade, duração e frequência de precipitação, quando consideram-se esses períodos de retorno. Este comportamento ocasiona situações como aquelas apresentadas nos Quadros 21 e 22, em que a intensidade de precipitação pertinente ao $T_r E_{sp}$ obtida para Viçosa e Guaraqueçaba, foi maior que aquela

para Uberaba. Entretanto, para o $T_{rD_{im}}$ houve inversão do comportamento, sendo a intensidade de precipitação para Uberaba superior. Este comportamento refletiu-se no volume escoado por metro linear de canal, bem como nas dimensões das bacias de acumulação.

Quadro 22. Largura calculada para bacias de acumulação retangulares, com base no volume escoado por metro de canal (V_m) e espaçamentos entre desaguadouros obtidos para diferentes localidades, para aprofundamento de canal de 5 cm, profundidade da bacia de 2 m e período de retorno de 10 anos com comprimento total de 22,86 m*

Localidade	Espaçamento (m)	$V_m (m^3)$	Volume (m^3)	Largura (m)
Cachoeira Paulista	40	1,33	53,20	2,55
Viçosa	61	0,98	59,80	2,87
Guaraqueçaba	68	0,98	66,60	3,19
Uberaba	82	1,11	91,00	4,36
Guarapuava	134	0,62	83,10	3,98

*Inclinações da escavação e do camalhão de 10% e 70% respectivamente

Nos Quadros 21 e 22, observa-se que as menores dimensões foram obtidas para as localidades nas quais as precipitações são mais intensas, justamente pelo fato de o espaçamento entre desaguadouros ser menor nessas localidades.

4.4. Análise do simulador de escoamento

Para análise do desempenho do equipamento, foram considerados aspectos construtivos e operacionais, bem como os resultados obtidos dos testes realizados.

4.4.1. Aspectos construtivos e operacionais

O equipamento é bastante simples, uma vez que não apresenta dispositivos eletrônicos ou elétricos, sendo o controle de vazão realizado

manualmente. A instalação do equipamento também mostrou-se bastante simples, porém foram observados problemas que podem limitar seu uso, os quais são apresentados na sequência

- necessidade de grande quantidade de mão de obra, sendo necessário, no mínimo, quatro pessoas para realização do teste;
- tendo em vista o fato de o sistema funcionar por gravidade, a realização do teste só é possível em locais com grande declividade da estrada, ou com a presença de "barrancos" laterais;
- como o método consome elevado volume de água, há necessidade do transporte de água e da presença de um reservatório com grande volume para acumulação de água;
- a adaptação do equipamento é boa em canais, cujo leito seja suficientemente largo para que a calha permaneça em posição próxima à horizontal; entretanto, sua instalação apresenta dificuldades para canais com seção irregular;
- o grande volume de água utilizado nos testes torna necessários reservatórios com grande volume para armazenamento do escoamento superficial; e
- o controle da vazão é realizado manualmente, apresentando pequenas oscilações em virtude de turbulência devido ao aporte da água.

A estrutura cortante para cravar a calha no solo e evitar vazamentos mostrou-se eficiente nos canais em que foi realizado o estudo, pois não ocorreu vazamento sob a mesma. Da mesma forma, a utilização da espuma aderida à calha junto à estrutura cortante evitou que o escoamento atingisse o solo perturbado pela inserção da calha e provocasse perdas nessa superfície de contato.

4.4.2. Valores de erodibilidade e tensão crítica de cisalhamento obtidos com o uso do equipamento

No Quadro 23 são apresentados os valores médios de vazão, tempo de aplicação e tensão aplicada, considerando-se dois testes realizados. É

apresentada, também, a perda de solo média provocada para cada tensão. Na Figura 47 é apresentada a curva de perda de solo por tensão aplicada e o valor de erodibilidade obtido com o uso do equipamento desenvolvido.

Quadro 23. Dados médios de perdas de solo pertinentes aos testes de campo

Vazão (L/s)	Tempo (min)	Tensão (Pa)	Perda de solo ($\text{g min}^{-1} \text{cm}^{-2}$)
1,90	3,21	10,84	0,00414
3,83	1,90	17,27	0,00515
5,95	1,02	23,38	0,00745
7,94	0,96	28,39	0,00637

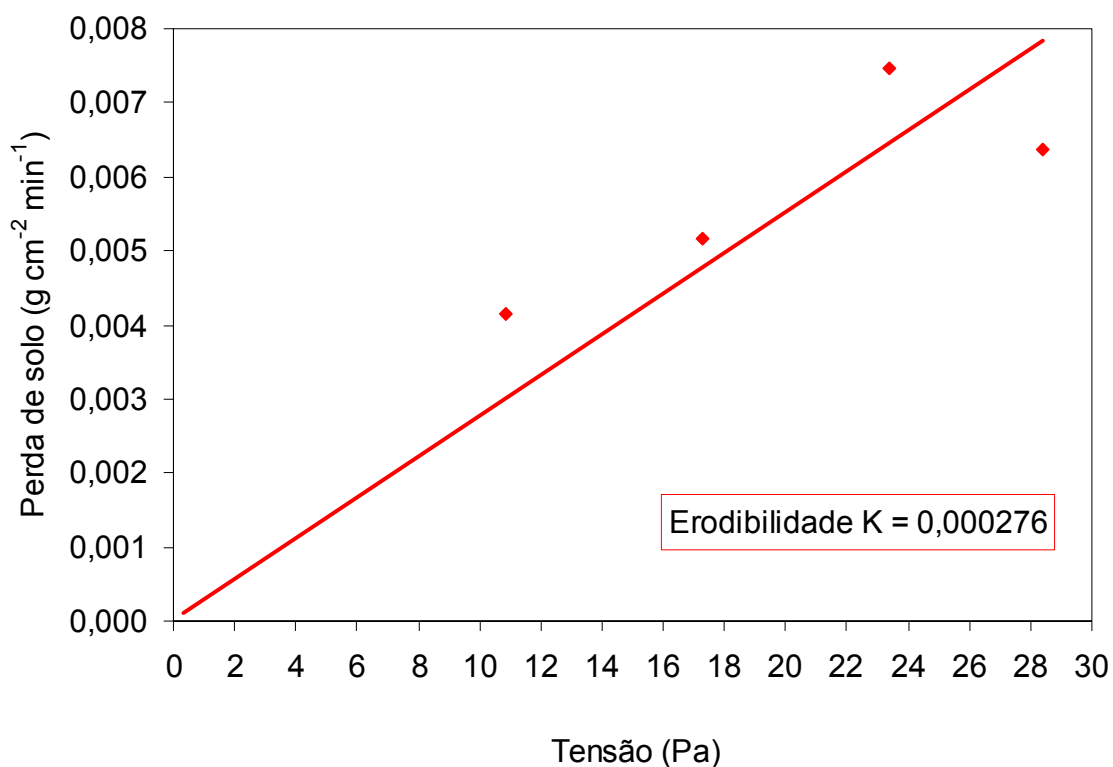


Figura 47. Valores de perda de solo e curva de ajuste obtidos para diferentes tensões aplicadas com o simulador de escoamento, indicando o valor de erodibilidade encontrado ($\text{g cm}^{-2} \text{min}^{-1} \text{Pa}^{-1}$).

O valor de erodibilidade obtido ($K = 0,000276 \text{ g cm}^{-2} \text{min}^{-1} \text{Pa}^{-1}$) apresenta-se inferior àqueles obtidos na literatura, para condições de estradas (Quadro 10). Entretanto, um valor de erodibilidade inferior ao obtido ($0,00006 \text{ g}$

$\text{cm}^{-2} \text{ min}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$) foi apresentado por ALBERTS et al. (1995) como limite inferior para terras não utilizadas para cultivo agrícola. Isto indica que o valor encontrado não apresenta-se fora da faixa de valores possíveis para este parâmetro, uma vez que o solo analisado apresentava-se bastante compactado e sem indícios aparentes de erosão, indicando, portanto, uma condição representativa de sua estabilidade. O valor de erodibilidade bastante baixo pode, ainda, ser explicado em razão de o canal no qual o teste foi realizado encontrar-se bastante próximo à pista de rolamento, indicando que este pode ter sofrido compactação devido ao trânsito de veículos.

4.4.2.1. Simulação realizada com o modelo utilizando os dados de erodibilidade e tensão crítica de cisalhamento obtidos em campo

A simulação realizada com o modelo utilizando os dados padrão (Quadro 11), e erodibilidade e tensão crítica de cisalhamento obtida em campo (0), pode ser visualizada na Figura 48.

Nesta figura, observa-se que, para 5 cm de aprofundamento (6,5 g), obteve-se um comprimento máximo recomendável de 1550 m entre desaguadouros. Em comparação com os valores obtidos, utilizando os dados da literatura, este comprimento pode ser considerado bastante elevado, o que deve-se, principalmente, ao pequeno valor de erodibilidade apresentado, bem como ao valor nulo da tensão crítica de cisalhamento.

Este valor de espaçamento, entretanto, apesar de se mostrar bastante elevado, pode ser justificado pelas condições observadas em campo. Apesar da estrada apresentar longos trechos em declive, sem saídas laterais para a água de escoamento, não foi notada a presença de indícios de erosão, a não ser em locais específicos, como curvas, indicando a dissipação de energia e locais nos quais o horizonte C apresentava-se nitidamente na superfície, indicando condição inferior de estruturação do solo. A presença de longos trechos de estrada em declive nos quais a erosão nos canais não é evidenciada de forma intensiva é um fato comum na região onde foram realizados os testes (Viçosa, MG).

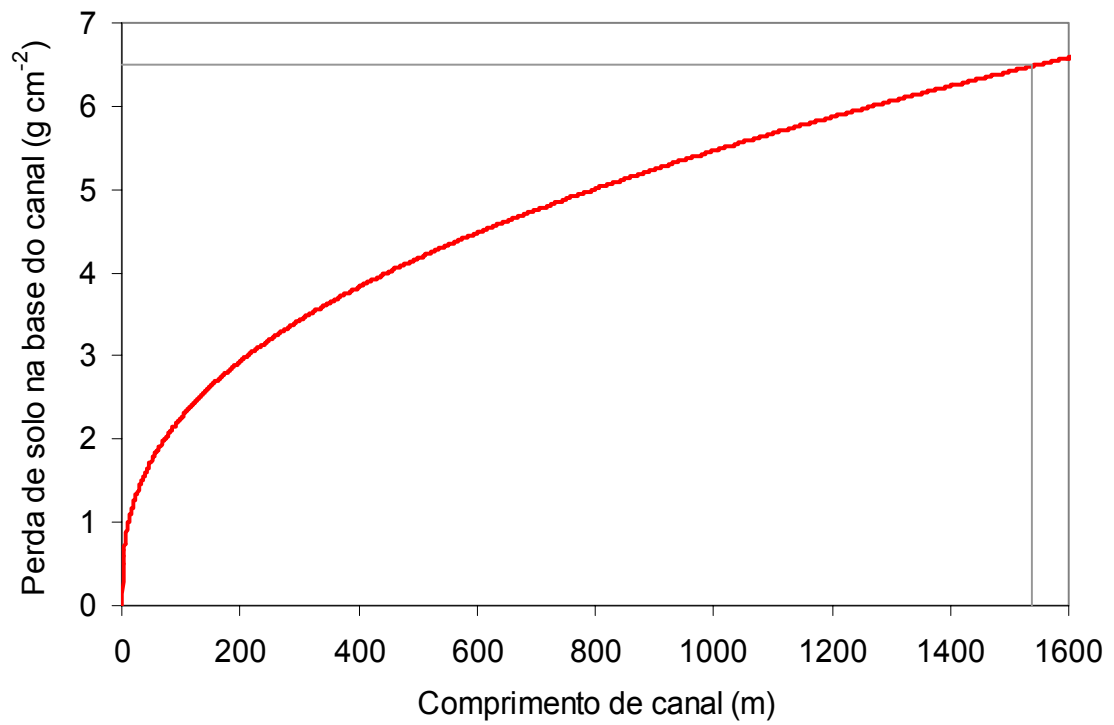


Figura 48. Variação da perda de solo na base do canal ao longo do comprimento do canal considerando os resultados de erodibilidade e tensão crítica de cisalhamento obtidos em campo.

5. RESUMO E CONCLUSÕES

Desenvolveu-se um modelo para determinação do espaçamento máximo recomendável entre desaguadouros e para o dimensionamento da seção transversal dos canais de drenagem e de bacias de acumulação em estradas não pavimentadas. O modelo desenvolvido considera, para a determinação do espaçamento entre desaguadouros, as condições do escoamento no canal e as características de resistência do solo à erosão. As informações necessárias referentes ao canal são sua seção transversal, a erodibilidade, a tensão crítica de cisalhamento, a rugosidade e a declividade. Para o modelo hidrológico são requeridas informações sobre as áreas de contribuição e intensidade máxima média de precipitação. As condições do escoamento são determinadas aplicando-se o modelo de ondas cinemáticas, possibilitando a obtenção do hidrograma de escoamento no canal de drenagem, o qual será utilizado para determinar a tensão de cisalhamento neste. O hidrograma de escoamento no canal da estrada é transformado em um gráfico de tensão de cisalhamento ao longo do tempo. A tensão cisalhante provocada pelo escoamento é comparada com a tensão crítica de cisalhamento do solo. A área do gráfico de tensão cisalhante em função do tempo, localizada acima da tensão crítica de cisalhamento do solo, é determinada para cada intervalo de tempo, sendo calculada a tensão cisalhante média provocada pelo escoamento. Esta tensão é subtraída da tensão crítica de cisalhamento, sendo, então, multiplicada pela erodibilidade do

solo e pela área sujeita ao cisalhamento, obtendo-se, conseqüentemente, a perda de solo. A quantidade de solo perdida é comparada a um limite tolerável de perdas de solo, determinado a partir do estabelecimento de um aprofundamento máximo permissível no canal. O espaçamento máximo corresponde ao comprimento para o qual a perda provocada iguala-se à perda tolerável. Tendo sido determinado o espaçamento do canal, é determinado, para este espaçamento, o volume de água escoado, o qual é utilizado para o dimensionamento das bacias de acumulação.

Tendo em vista que a aplicação do modelo requer o uso de parâmetros representativos da resistência do solo à erosão, foi desenvolvido um teste que permite obter a tensão crítica de cisalhamento e da erodibilidade do solo no campo. Este teste consiste na utilização de uma calha metálica, que é cravada no canal da estrada, à qual é aplicada a água para que possam ser simuladas as condições de escoamento representativas daquelas encontradas na estrada. Parte da área interna da calha é aberta, de modo que o escoamento ocorra diretamente sobre o leito do canal. O escoamento provoca uma tensão cisalhante que produz o desprendimento do solo do leito do canal, sendo a água com os sedimentos em suspensão coletada. De posse 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.

Para aplicação do modelo desenvolvido, foi elaborado um software que permite a realização das interações necessárias para obtenção do espaçamento máximo recomendável entre desaguadouros e o dimensionamento dos canais de drenagem e das bacias de acumulação.

Com base nos resultados fornecidos pelo modelo, fez-se uma análise da sua sensibilidade aos diversos parâmetros de entrada utilizados pelo modelo.

Os resultados encontrados permitiram as seguintes conclusões:

- o modelo permite a determinação do espaçamento máximo recomendável entre desaguadouros, a partir da estimativa da perda de solo obtida, comparando a tensão provocada pelo escoamento com a tensão crítica de cisalhamento do solo;

- o modelo permite a determinação do volume requerido para as bacias de acumulação, a partir da quantificação do escoamento superficial, com base nas condições de precipitação e características de infiltração de água no solo;
- o ensaio desenvolvido para obtenção da erodibilidade e tensão crítica de cisalhamento apresentou resultados satisfatórios;
- o software elaborado permite a aplicação do modelo desenvolvido, de maneira simples e rápida;
- dentre os dados de entrada utilizados no modelo para estimativa do espaçamento máximo recomendável entre desaguadouros, a máxima sensibilidade foi obtida para a declividade do terreno e a mínima sensibilidade para o período de retorno;
- o modelo apresentou grande sensibilidade ao aprofundamento do canal;
- o modelo apresentou uma redução na sensibilidade com o crescimento dos valores de erodibilidade;
- o modelo apresentou um aumento na sensibilidade com o crescimento dos valores de tensão crítica de cisalhamento;
- o modelo apresentou variação, aproximadamente, linear com a variação na rugosidade do solo.

6. RECOMENDAÇÕES

Considera-se que o modelo desenvolvido representa um expressivo avanço para o entendimento e dimensionamento de sistemas de drenagem e controle do processo erosivo em estradas não pavimentadas. No entanto, são necessários estudos complementares, como os citados na seqüência

- Modelo para a determinação do espaçamento máximo recomendável entre desaguadouros em estradas não pavimentadas e para o dimensionamento de bacias para acumulação
 - avaliação, a partir do monitoramento em condições reais de operação de estradas não pavimentadas;
 - determinação da tensão crítica de cisalhamento e da erodibilidade do solo, em diferentes estágios, após a construção do canal de drenagem da estrada;
 - avaliação de metodologias já disponíveis para obtenção da erodibilidade e da tensão crítica de cisalhamento do solo;
 - obtenção de uma base de dados de erodibilidade e tensão crítica de cisalhamento do solo, para os principais solos encontrados no Brasil;
 - levantamento das características geométricas dos canais, encontradas em estradas não pavimentadas, e avaliação da variação dessas ao longo do tempo;

- avaliação dos valores mais representativos, para o período de retorno e para o aprofundamento do canal.
- determinação do limite máximo permissível para o escoamento superficial antes que dissipação de energia torne-se necessária;
- Metodologia para a determinação da erodibilidade e tensão crítica de cisalhamento de solos, em condições típicas de canais de estradas não pavimentadas
 - aperfeiçoamento do simulador de escoamento de modo a aumentar sua praticidade, visando à redução da mão-de-obra necessária à execução dos testes;
 - permitir a recirculação da água, depois que os sedimentos foram retirados do escoamento, visando à economia de água;
 - realizar ajustes no equipamento de modo a permitir sua utilização em diferentes tipos de seções de canais, bem como sua adaptação para diferentes declividades do terreno.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Solo - Análise granulométrica** - NBR7183. Rio de Janeiro: 1982. 7 p.
- ALBERTS, E. E., M. A. NEARING, WELTZ, M. A. et al., **Soil Component**. USDA - Water Erosion Predict Project (WEPP), Technical documentation, p. 7.10 - 7.47
- ALCÂNTARA, M. A. M., **Estabilização química dos solos para fins rodoviários: Técnicas disponíveis e estudo de caso dirigido à estabilização solo-cal de três solos de Ilha Solteira - SP**. Viçosa : Universidade Federal de Viçosa, 1995. 91p. (dissertação de mestrado).
- ANJOS FILHO, O., Estradas de terra. **Jornal O Estado de São Paulo**, São Paulo. Suplemento agrícola, 29 de abril de 1998.
- AZEVEDO NETO, J. M., Fernandez y Fernandez, M., ARAÚJO, R. et al. **Manual de Hidráulica**. São Paulo: Edgard Blücher, 1998. 669 p.
- BASTOS, C. A. B., **Estudo geotécnico sobre a erodibilidade de solos residuais não saturados**. Porto Alegre : Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1999. 256p. (Tese de Doutorado).
- BERTOLINI, D., DRUGOWICH, M. I., LOMBARDI NETO, F. BELINAZZI JÚNIOR, R. **Controle de erosão em estradas rurais**. Campinas: CATI, 1993. 37p. (boletim técnico 207)
- BERTONI, J. C. e TUCCI, C. E. M. **Precipitação**. In: TUCCI, C. E. M., Hidrologia. Porto Alegre: EDUSP; ABRH, 1993. p.177-231.
- BRAZ, R. L. **Hydrology - an introduction to hydrologic science**. New York: Addison-Wesley Publishing Company, 1990. 643p.

- BUBLITZ, U. e CAMPOS, L. C., **Adequação de estradas rurais em microbacias hidrográficas** – especificações de projetos e serviços. Curitiba, PR: EMATER-PR, 1992. 70p. (informação técnica 18).
- CARDOSO, D. L., **Contribuição à identificação e tratamento dos solos expansivos da região de Viçosa - MG**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 1994. 194p. (dissertação de mestrado).
- CARSON, M. A., **The mechanics of erosion**. London: J. W. Arrowsmith limited, Bristol. 1971. 174p.
- CARVALHO, C. A. B. **Estrada - Projeto, concordância vertical**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 1993. (caderno didático).
- CARVALHO, C. A. B.; LÓSS, Z. J.; LIMA, D. C. e SOUZA, A. C. V., **Estradas – projeto : Introdução, concordância horizontal, superelevação e superlargura**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 1997. Cadernos didáticos. 64p.
- CHOW, V. T. **Open channel hydraulics**. USA: McGraw-Hill book company inc. 1959. 680p.
- CHOW, V. T., **Handbook of applied hydrology**. New York, McGraw-Hill, 1964, não paginado.
- CODASP - Companhia de Desenvolvimento Agrícola de São Paulo. **Manual técnico de motomecanização agrícola**. São Paulo: 1994. 101p.
- FREITAS et al. , **Equações de chuvas intensas no Estado de Minas Gerais**. Belo Horizonte: COPAS, Viçosa: UFV, 2001. 65p.
- COSTA, L. M., JUCKSCH, I. e GJORUP, G. B., **Manejo de solos**, in: Curso de atualização em fertilidade de solos módulo 15. Brasília, DF.: ABEAS; Viçosa, MG: UFV, Departamento de solos e nutrição de plantas, 1995.
- DENARDIN, J. E., **Erodibilidade do solo estimada por meio de parâmetros físicos e químicos**, Piracicaba: ESALQ, 1990. 113p. Tese de Doutorado
- DNER, Anuário estatístico dos transportes: **GEIPOT**, 2000. www.dner.gov.br.
- ELLIOT, W. J. e HALL, D. E., **Water Erosion Prediction Project (WEPP) Forest Applications**. USDA, 1997.
- ELLIOT, W. J., FOLTZ, R. B. e LUCE, C. H. Modeling low-volume road erosion. **Seventh international conference on low-volume roads**, Washington, 1999, p. 244-249.

- FÁCIO, J. A., **Proposição de uma metodologia de estudo da erodibilidade dos solos do Distrito Federal**. Brasília : Universidade de Brasília, 1991. 107p. (dissertação de mestrado).
- FRAGASSI, P. F. M., **Estudo da erodibilidade dos solos residuais de Gnaíse da Serra de São Geraldo e de Viçosa (MG)**. Viçosa : UFV, 2001. 119p. (dissertação de mestrado).
- GRACE III, J. M., RUMMER, B., STOKES, B. J. e WILHOIT, J. Evaluation of erosion control techniques on forest roads. **Transactions of the ASAE**, v. 41, n.2, 1998. p.383-391.
- GUTIERREZ, R. E., **Manual de caminos vicinales**. Mexico: Representaciones y Servicios de Ingenieria S.A., 1972. 390p.
- HANSON G. J. Surface erodibility of earthen channels at high stresses - part 1 - Open channel testing. **Transactions of the ASAE**, v. 33, n. 1, 1990. p.6-15.
- HANSON, G. J. Development of a jet index to characterize erosion resistance of soil in earthen spillways. **Transactions of the ASAE**, v. 34, n.5, 1991. p. 2015-2020.
- HEC - 15, Hydraulics Engineering Circular, 15. **Design of road side channels with flexible linings**, Apostila, Federal Highway Administration. www.fhwa.com. 1998,150p.
- HOLLICK, M. Towards a routine test for the assessment of the critical tractive forces of cohesive soils. **Transactions of the ASAE**, v. 19, n. 6, 1976. p.1076-1081.
- HUDSON, N. **Soil conservation**, Iowa, United States: Iowa State University Press. 1995. 391p.
- INGLES, O. G. e METCALF, J. B. , **Soil stabilization - principles and practice**. New York: John Wiley Sons, 1973. 374p.
- JULIEN, P. Y., SAGHAFIAN, B, e OGDEN, F. L. Raster-based hydrologic modeling of spatially-varied surface runoff. **Water Resources Bulletin**, v.31, n.3, 1995, p. 523-536.
- KAMPHUIS, J. W., GASKIN, P. N. e HOOGENDOORN, E. Erosion tests on four Ontário clays. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 27, 1990. P. 692-696.
- KÉZDI, A., **Stabilized earth roads**. Budapest, Akadémiai Kiadó, Elsevier Scientific Publishing, 1979. 354p.
- LENCASTRE, A. e FRANCO, F. M., **Lições de hidrologia**. Lisboa: Universidade Nova de Lisboa. 1992. 451p.

- LENCASTRE, A. **Manual de Hidráulica Geral**. São Paulo: Edgard Blücher, 1972. 411p.
- LIMA, P. M. P., BAHIA, V. G., CURI, N. et al. Princípios de erodibilidade do solo, **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v.16, n.176, 1992. p.38-43
- LUCE, C. C. e BLACK, T. A. Sediment production from forest roads in western Oregon. **Water Resources Research**, v.35, n.8, 1999. p.2561-2570.
- MACHADO, J. A. B. C., OLIVEIRA, J. A. F. e CAMPOS, J. F., Rodovias municipais não pavimentadas – Rodovias vicinais – metodologia para priorização de investimentos em melhoramentos, In: ABPv, I simpósio internacional de pavimentação de rodovias de baixo volume de tráfego (SINBATRA). **Anais...** Rio de Janeiro: ABPv, 1997.p.128-135.
- MANUAL DE EXECUÇÃO DE SERVIÇOS DE ADEQUAÇÃO DE ESTRADAS RURAIS, **Projeto Paraná 12 meses**, subcomponente manejo e conservação de recursos naturais. Paraná: DER. 2000. (informe técnico).
- MARTINS, M. C., SILVA, J. K. R., F., JOSÉ FERNANDES, M., RICARDO A. e ODA, S., Urbanização, drenagem e pavimentos, In: ABPv, I simpósio internacional de pavimentação de rodovias de baixo volume de tráfego (SINBATRA). **Anais...** Rio de Janeiro: ABPv, 1997.p.137-149.
- MOREIRA, J. C., DAMÁZIO, J. M., COSTA, J. P. e KELMAN, J. Estimação de vazões extremas: séries parciais ou máximos anuais? In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE HIDROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS, 5, 1983, Blumenau, SC. **Anais...** ABRH, 1983. p.135-143.
- MORFIN, S., ELLIOT, W. FOLTZ, R., MILLER, S., Predicting effects of climate, soil, and topography on road erosion with the WEPP model. **ASAE Annual International Meeting**: Phoenix, Arizona. 1996.
- 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.
- MUÑOS-CARREDA, R. e PARSONS, J. E. **VFMOD - Vegetative filter strips hydrology and sediment transport model: model documentation and user's manual (version 1.04)**. North Carolina: Biological and Agricultural Engineering - NCSU, 1999. 92p.
- NEARING, M. A., DEER-ASCOUGH, L.,LAFLEN, J.M. Sensitivity analysis of the WEPP hillslope profile erosion model. **American Society of Agricultural Engineers**, v.3, n.33, p.839-849, 1990.
- NOGAMI, J. S. e VILLIBOR, D. F., **Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos**. São Paulo: Villibor, 1995. 240p.

- PARANÁ, Secretaria de Estado da Agricultura e do Abastecimento. **Manual técnico do subprograma de manejo e conservação do solo**. Curitiba, 1994. 306p.
- PASTORE, E., Estudos para planejamento da conservação de estradas de terra do município e de usinas de açúcar e álcool de São Joaquim da Barra – Estado de São Paulo, In: ABPv, I simpósio internacional de pavimentação de rodovias de baixo volume de tráfego (SINBATRA). **Anais...** Rio de Janeiro: ABPv, 1997.p.1-11.
- POLITANO. W; LOPES, L. R. e AMARAL, C. **O papel das estradas na economia rural**. São Paulo: Nobel, 1989. 78p.
- PRUSKI, F. F., FERREIRA, P. A., RAMOS, M. M. & CECON, P. R. A model to design level terraces. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, 123: 8-12, 1997.
- PRUSKI, F. F., GRIEBELER, N. P., SILVA, D. D. Comparação entre dois métodos para a determinação do volume de escoamento superficial. Viçosa, MG.: **Revista Brasileira de Ciência do Solo** v.2, n.25, p. 403-410, 2001.
- REID, L. M. e DUNNE, T. Sediment production from forest roads. **Water Resources Research**, v. 20, n.11, 1984. p.1753-1761.
- REINECK, H. E. e SINGH, I. B., **Depositional sedimentary environments**. Berlin: Springer Verlag.1980.
- SANTOS, R. M. M., **Caracterização geotécnica e análise do processo evolutivo das erosões no município de Goiânia**. Brasília : Universidade de Brasília, 1997. 120p. (Dissertação de mestrado).
- SILVA, M. M. P. C. S. R. **Modelo distribuído de simulação do escoamento superficial**. Lisboa: UTL, 1996. 321p. (Tese de Doutorado).
- SILVA, J. M., **Metodologia para obtenção do hidrograma de escoamento superficial ao longo de uma encosta**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 1999. 64p. (dissertação de mestrado).
- SMEDEMA, L. K. e RYCROFT, DF. W. **Land drainage: planning and design of agricultural drainage systems**. New York: Cornell University Press, 1983. 376p.
- STALLINGS, S. L., **Roadside ditch design and erosion control on Virginia highways**. Blacksburg, Virginia: Virginia Polytechnic Institute and State University, 1999, 93p. (Masters of Science Thesis)
- STEDINGER, J. R. VOGEL, R. M. e FOUFOULA-GEORGIOU, E. **Frequency analysis of extreme events**. In: MAIDMENT, D. R. Handbook of Hydrology. New York: MacGraw-Hill, Inc. 1992, cap. 18, pg. 18.1-18.66.

- SWIFT Jr. L. W. Gravel and grass surfacing reduces soil loss from mountain roads. **Forest Science**, v. 30, n.3, 1984. p.657-670.
- THOMAZ, C. A., **Pavimentação de estradas vicinais**. São Paulo: ABCP, 1984. 58p.
- VAILLANT, J. M. M., **Efeitos estabilizantes do DS-328 sobre três solos de Viçosa - MG, para fins rodoviários**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 1995. 76p. (dissertação de mestrado).
- WEST, E. M., **Drainage for highways and airports**, In: WOODS, K. B., BERRY, D. S. and GOETZ, W. H. Highway engineering handbook. New York: McGraw-Hill book company. 1982. p. 12.1 - 12.44.
- WINTERKORN, H. F. e PAMUCKU, S., Soil stabilization and grouting, In: FANG, Y., **Foundation engineering handbook**. 2 ed. New York, Van Nostrand Reinhold, 1991. p. 317-178.
- ZIEGLER, A. D., SUTHERLAND, R. A. e GIAMBELLUCA, T. W., Partitioning total erosion on unpaved roads into splash and hydraulic components: The roles of interstorm surface preparation and dynamic erodibility. **Water Resources Research**, v. 36, n. 9, 2000. P.2787-2791.