



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
INFRA-ESTRUTURA E GERÊNCIA VIÁRIA**

Camila Belleza Maciel

**ANÁLISES GEOTÉCNICAS E HIDROSEDIMENTOLÓGICAS
DE ESTRADAS NÃO PAVIMENTADAS: ESTUDO DE CASO DA
FAZENDA CERRO AZUL – PLANALTO NORTE
CATARINENSE**

Florianópolis
2010

Camila Belleza Maciel

**ANÁLISES GEOTÉCNICAS E HIDROSEDIMENTOLÓGICAS
DE ESTRADAS NÃO PAVIMENTADAS: ESTUDO DE CASO DA
FAZENDA CERRO AZUL – PLANALTO NORTE
CATARINENSE**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador:

Marciano Maccarini, PhD.

Co-orientador:

Rafael Augusto dos Reis Higashi, Dr.

Florianópolis
2010

Catálogo na fonte pela Biblioteca Universitária da
Universidade Federal de Santa Catarina

M152a Maciel, Camila Belleza

Análises geotécnicas e hidrossedimentológicas de estradas não pavimentadas [dissertação] : estudo de caso da Fazenda Cerro Azul - Planalto Norte Catarinense / Camila Belleza Maciel ; orientador, Marciano Maccarini, co-orientador, Rafael Augusto dos Reis Higashi. - Florianópolis, SC, 2010.

144 p.: il., grafs., tabs., mapas

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

Inclui referências

1. Engenharia civil. 2. Estradas não pavimentadas. 3. Dispositivos de drenagem. 4. Estabilização de solo. I. Maccarini, Marciano. II. Higashi, Rafael Augusto dos Reis. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. IV. Título.

CDU 624

**ANÁLISES GEOTÉCNICAS E HIDROSEDIMENTOLÓGICAS
DE ESTRADAS NÃO PAVIMENTADAS: ESTUDO DE CASO DA
FAZENDA CERRO AZUL – PLANALTO NORTE
CATARINENSE**

Dissertação julgada adequada para a obtenção do Título de MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGEC da Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC.

Prof. Janaíde Cavalcante Rocha, Dra. – Coordenadora do PPGEC

Prof. Marciano Maccarini, PhD. – ECV/UFSC (Orientador)

Prof. Rafael Augusto dos Reis Higashi, Dr. – ECV/UFSC (Co-Orientador)

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. Fernando Falco Pruski, Dr. – DEA/UFV

Prof. Masato Kobiyama, Dr. – ENS/UFSC

Prof. Orlando Martini de Oliveira, Dr. – ECV/UFSC

Florianópolis, março de 2010

AGRADECIMENTOS

À minha mãe e amiga Lila pelo amor, companheirismo, compreensão e incentivo ao meu crescimento pessoal e profissional.

Ao meu pai Régis, apesar de não estar presente fisicamente, sempre me incentivou nos estudos e sempre estará em meus pensamentos e no meu coração.

Ao meu namorado Gustavo pelo amor, apoio e compreensão em todos os momentos.

Às minhas irmãs Priscila e Paola pela amizade, incentivo e apoio.

À colega e amiga Ângela, pelo companheirismo e apoio desde as coletas de amostras de solo em campo até a finalização desta dissertação.

Ao Professor Masato Kobiyama pelos ensinamentos, amizade e incentivo à pesquisa científica desde os tempos da graduação.

Ao Professor Marciano Maccarini pelo apoio, ensinamentos e atenção dada a este trabalho.

Ao Professor Rafael Augusto dos Reis Higashi pelo apoio e auxílio desde o início desta pesquisa, com a realização dos ensaios geotécnicos.

À Universidade Federal de Santa Catarina, por meio do Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, pela oportunidade de realização do mestrado.

À empresa Battistella Florestas pelo financiamento da pesquisa por meio da bolsa de mestrado e apoio em campo.

Ao Professor Fernando Falco Pruski pelas contribuições, pela atenção dada a este trabalho e pela amizade.

Aos Professores Orlando Martini de Oliveira e Antônio Fortunato Marcon pelas contribuições nas bancas de avaliação e qualificação, respectivamente.

Aos funcionários da Battistella Florestas, José Lucindo e Antônio, pelo auxílio nas coletas de amostras de solo em campo.

Ao laboratorista da UNISUL, Alfeu Santos pelo auxílio e suporte técnico.

Aos colegas do Laboratório de Mecânica dos Solos, da Engenharia Civil – UFSC e do Laboratório de Hidrologia – LabHidro, pela amizade e apoio.

A todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

Muito Obrigada!

RESUMO

Diversos estudos e modelos para a compreensão e minimização dos processos erosivos têm sido desenvolvidos atualmente. Entretanto, estudos voltados à minimização de processos erosivos em estradas não pavimentadas ainda são poucos. Tendo em vista a necessidade de um estudo científico neste assunto, o presente trabalho visa minimizar impactos ambientais de estradas não pavimentadas, por meio da implementação de técnicas adequadas para o dimensionamento de sistemas de drenagem destas estradas. Este trabalho foi desenvolvido em uma fazenda de reflorestamento de pinus, localizada na divisa entre os municípios de Rio Negrinho e Doutor Pedrinho, Planalto Norte Catarinense, e tem como objetivo a caracterização física e mecânica do solo utilizado na construção e adequação de estradas não pavimentadas e a análise, por meio de ensaios geotécnicos, do comportamento deste solo utilizando cal cálcica hidratada como agente estabilizante. O teor de cal ótimo para estabilização foi definido por meio do Método de Eades e Grim com 7%. A eficiência deste teor de cal foi confirmada por meio do Método Expedito das Pastilhas MCT, em que o solo analisado, antes classificado como Siltoso/Arenoso – Não Laterítico (NS`-NA`), passou a ser classificado como Arenoso – Laterítico (LA- LA'). Foram analisados também os resultados obtidos por meio do Ensaio Índice de Suporte Califórnia (CBR), que mostraram que com um teor de 6% de cal o solo passa a apresentar resistência elevada. Além disso, com dados obtidos em campo e em laboratório, obteve-se o melhor dimensionamento dos dispositivos de drenagem das estradas da área de estudo por meio do modelo ESTRADAS. Foram analisados quatro trechos de estradas, um trecho sem área de contribuição externa à estrada e outros três trechos com variação nas características da cobertura vegetal da área de contribuição externa, sendo elas: vegetação rasteira, solo exposto e plantio de pinus em idade adulta. Com os resultados, conclui-se que além da declividade da estrada, o fator determinante no espaçamento entre as bacias de acumulação é o tipo de cobertura vegetal da área de contribuição externa à estrada. O trecho com área externa com solo exposto apresentou a maior perda de solo entre os trechos analisados e, conseqüentemente, o menor espaçamento entre as bacias de acumulação. O espaçamento no trecho de estrada sem área de contribuição foi o mesmo obtido no trecho de estrada com área de contribuição externa à estrada caracterizada por reflorestamento de pinus em idade adulta, em função da elevada taxa de infiltração estável.

Palavras-chave: Estradas não pavimentadas. Dispositivos de drenagem. Estabilização de solo.

ABSTRACT

Several studies and models for understanding and minimization of erosion have been currently developed. However, there are a few studies focusing on minimizing erosion on unpaved roads still now. With the need for a scientific study on this topic, the present study aims to minimize environmental impacts of unpaved roads, through the implementation of appropriate techniques for the drainage system design of these roads. This study was carried out on a pine reforestation farm, located at a border between the cities of Rio Negrinho and Doutor Pedrinho, Santa Catarina North Plateau, and its objectives were: (i) to characterize the physical and mechanical properties of the soils used in the construction and adequacy of unpaved roads; and (ii) to analyze, by geotechnical tests, the behavior of soil which contains hydrated lime calcium as stabilizing agent. The optimum content of lime stabilization was determined 7% by the Eades and Grim method. The efficiency of lime content was confirmed by the MCT Classification method, where the soil analyzed before classified as Silty / Sandy - Not Lateritic (NS `NA"), was classified as Sandy - Lateritic (LA - LA '). The results obtained by the California Bearing Ratio (CBR) test were analyzed and showed that with a lime content of 6% the soil begins to possess a high resistance. Moreover, with data from field and laboratory, the best design of drainage devices of roads in the study area was obtained by using the model ESTRADAS. Four stretches of road were analyzed, being one stretch without area of external contribution to the road and three stretches with a variation in the vegetation characteristics in the area of external contribution to the road, i.e., vegetation tripping, bare soil and planted pine trees in adulthood. With the obtained results, it is concluded that, besides the slope of the road, the determinant factor in the spacing between the accumulation basins is the vegetation type of the area of external contribution to the road. The stretch with the external exposed soil showed the largest soil loss among the analyzed stretches and, consequently, the smaller spacing between the accumulation basins. The spacing on the stretch of road without contribution area was same on the stretch of road with the external contribution area to the road characterized by pine reforestation in adulthood, due to the high infiltration rate.

Key-words: Unpaved roads. Drainage devices. Soil stabilization

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Caminhão com alta capacidade de carga após carregamento	33
Figura 2 - Bueiro	35
Figura 3 - Sarjeta	36
Figura 4 - Bigode ou Sangra	37
Figura 5 - Caixa de acumulação ou contenção	38
Figura 6 - Apresentação do modelo ESTRADAS	42
Figura 7 – Representação esquemática da subdivisão para determinar o hidrograma no canal de drenagem da estrada	44
Figura 8 - 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).	48
Figura 9 - Parâmetros de Entrada do Modelo ESTRADAS	50
Figura 10 - Localização da Área de Estudo no Planalto Norte Catarinense	53
Figura 11 – Localização da área de estudo no Mapa Rodoviário de Santa Catarina. Adaptado de DEINFRA (2009)	54
Figura 12 - Jazida de Solo da Fazenda Cerro Azul	55
Figura 13 - Mapa da Fazenda Cerro Azul	56
Figura 14 – Classificação dos Solos da Área de Estudo	58
Figura 15 - Fluxograma das etapas da pesquisa	59
Figura 16 - Transporte das amostras de solo	60
Figura 17 - Secagem do solo em laboratório	60
Figura 18 - Pesagem do cilindro durante o ensaio de compactação	62
Figura 19 - Prensa utilizada no ensaio do ISC	63
Figura 20 - Gráfico de Classificação MCT	65
Figura 21 – Exemplos de Misturas Solo-Cal	68
Figura 22 - Estrada na Fazenda Cerro Azul	69
Figura 23 – Tela de entrada dos dados referentes à estrada	70
Figura 24 – Detalhe da tela de entrada de seleção do tipo de seção transversal	71
Figura 25 – Detalhe da tela de entrada de dados sobre o leito da estrada	71
Figura 26 – Detalhe da tela de entrada de dados da área externa à estrada	72
Figura 27 – Ensaio de Infiltrabilidade	74

Figura 28 – Detalhe da tela de entrada de dados referentes ao canal da estrada	75
Figura 29 – Foto do canal da estrada da área de estudo	75
Figura 30 – Detalhe da tela de entrada de dados do solo da estrada	76
Figura 31 – Equipamento do Ensaio Inderbitzen – Concepção original	77
Figura 32 – Tensões críticas de cisalhamento - τ_c (Pa) para materiais coesivos	79
Figura 33 – Conjunto frasco e funil utilizado no Ensaio Frasco de Areia	80
Figura 34 – Realização do ensaio Frasco de Areia	81
Figura 35 – Tela de entrada dos dados referentes às bacias de acumulação	82
Figura 36 – Detalhe da tela de entrada dos dados do canal de condução	83
Figura 37 – Detalhe do canal de condução à bacia de acumulação	83
Figura 38 – Dimensionamento das bacias de acumulação	84
Figura 39 – Tela de entrada dos dados referentes à precipitação	85
Figura 40 – Caracterização visual do Trecho 1	87
Figura 41 – Caracterização visual do Trecho 2	88
Figura 42 – Caracterização visual do Trecho 3	89
Figura 43 – Caracterização visual do Trecho 4	90
Figura 44 - Granulometria do solo com e sem defloculante	91
Figura 45 - Curva de compactação	94
Figura 46 – Resultados de pH obtidos por meio do Método Eades e Grim	96
Figura 47 - Curva de compactação – Solo melhorado com cal	96
Figura 48 - Curva de Compactação – Proctor Normal e Proctor Intermediário (7% cal)	98
Figura 49 – Resultados do Ensaio CBR com e sem imersão	99
Figura 50 - Gráfico da Classificação MCT – Método Expedito das Pastilhas	101
Figura 51 – Resultados do modelo ESTRADAS no trecho 1A	103
Figura 52 – Simulação do espaçamento das bacias de acumulação no trecho 1A	104
Figura 53 – Resultados do modelo ESTRADAS no trecho 1B	105
Figura 54 – Simulação do espaçamento das bacias de acumulação no trecho 1B	105
Figura 55 – Resultados do modelo ESTRADAS no trecho 1C	106
Figura 56 – Simulação do espaçamento das bacias de acumulação no trecho 1C	107

Figura 57 – Resultados do modelo ESTRADAS no trecho 2A	109
Figura 58 – Simulação do espaçamento das bacias de acumulação no trecho 2A	109
Figura 59 – Resultados do modelo ESTRADAS no trecho 2B	110
Figura 60 – Simulação do espaçamento das bacias de acumulação no trecho 2B	111
Figura 61 – Resultados do modelo ESTRADAS no trecho 2C	112
Figura 62 – Simulação do espaçamento das bacias de acumulação no trecho 2C	112
Figura 63 – Resultados do modelo ESTRADAS no trecho 3A	114
Figura 64 – Simulação do espaçamento das bacias de acumulação no trecho 3A	114
Figura 65 – Simulação do espaçamento das bacias de acumulação no trecho 3A (30 m)	115
Figura 66 – Resultados do modelo ESTRADAS no trecho 3B	116
Figura 67 – Simulação do espaçamento das bacias de acumulação no trecho 3B	116
Figura 68 – Simulação do espaçamento das bacias de acumulação no trecho 3B (30 m)	117
Figura 69 – Resultados do modelo ESTRADAS no trecho 3C	118
Figura 70 – Simulação do espaçamento das bacias de acumulação no trecho 3C	118
Figura 71 – Resultados do modelo ESTRADAS no trecho 4A	120
Figura 72 – Simulação do espaçamento das bacias de acumulação no trecho 4A	121
Figura 73 – Simulação do espaçamento das bacias de acumulação no trecho 4A (30 m)	121
Figura 74 – Resultados do modelo ESTRADAS no trecho 4B	122
Figura 75 – Simulação do espaçamento das bacias de acumulação no trecho 4B	123
Figura 76 – Simulação do espaçamento das bacias de acumulação no trecho 4B (30 m)	123
Figura 77 – Resultados do modelo ESTRADAS no trecho 4C	124
Figura 78 – Simulação do espaçamento das bacias de acumulação no trecho 4C	125
Figura 79 – Espaçamento entre as bacias de acumulação recomendado pelo modelo ESTRADAS	127
Figura 80 – Levantamento das bacias de acumulação em campo	130
Figura 81 – Ineficiência de uma bacia de acumulação em campo	131
Figura 82 – Falta de manutenção de uma bacia de acumulação em campo	132

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Rede Rodoviária do Brasil	31
Tabela 2 - Rede Rodoviária em Santa Catarina	32
Tabela 3- Critério para classificação do solo nas diferentes condições de compactação, conforme HEC-15	78
Tabela 4- Granulometria Cerro Azul	92
Tabela 5 - Densidade real dos grãos	92
Tabela 6 - Classificação HRB e SUCS	93
Tabela 7 – Resultados do ensaio de compactação	93
Tabela 8 – Resultados do ISC com e sem imersão	94
Tabela 9 - Valores de pH obtidos	95
Tabela 10-Umidade ótima e densidade máxima	97
Tabela 11 - Umidade e densidade aparente seca – Energia Proctor Normal e Intermediária	97
Tabela 12 - Umidade ótima x Densidade Aparente Seca Máxima Cerro Azul (7% cal)	98
Tabela 13 - CBR com e sem imersão utilizando teores de cal	99
Tabela 14 – Resultados do Ensaio de Classificação MCT	100
Tabela 15 – Dados de entrada utilizados nos Trechos de Estrada 1	102
Tabela 16 – Dados de entrada utilizados nos Trechos de Estrada 2	108
Tabela 17 – Dados de entrada utilizados nos Trechos de Estrada 3	113
Tabela 18 – Dados de entrada utilizados nos Trechos de Estrada 4	119
Tabela 19 – Dimensionamento obtido por meio do modelo ESTRADAS	126
Tabela 20 – Dimensionamento das bacias de acumulação nos quatro trechos de estrada na declividade de 2%	128
Tabela 21 – Dimensionamento das bacias de acumulação nos quatro trechos de estrada na declividade de 6%	128
Tabela 22 – Dimensionamento das bacias de acumulação nos quatro trechos de estrada na declividade de 12%	129

LISTA DE ABREVIATURAS

ANA – Agência Nacional de Águas

CBR - *Califórnia Bearing Ratio*

DER – Departamento de Estradas de Rodagem

DNIT - Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transporte

DEINFRA - Departamento Estadual de Infra-Estrutura – Santa Catarina

EPAGRI - Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina

GPS - *Global Position System*

IP - Índice de Plasticidade

ISC - Índice de Suporte Califórnia

L - Laterítico

LA - Areia Laterítica

LA' - Solo Arenoso Laterítico

LG' - Solo Argiloso Laterítico

LL - Limite de Liquidez

LP - Limite de Plasticidade

MCT - Miniatura, Compactado, Tropical

N - Não Laterítico

NA - Areia Não Laterítica

NA' - Solo Arenoso Não Laterítico

NG' - Solo Argiloso Não Laterítico

NS' - Solo Siltoso Não Laterítico

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Descrição	Unidade
A	Seção transversal molhada pelo escoamento	m^2
a_{pm}	Aprofundamento máximo do canal de estrada	cm
B	Largura da bacia de acumulação retangular	m
h	Profundidade do escoamento	m
i_i	Intensidade instantânea de precipitação	$m.s^{-1}$
i_m	Intensidade máxima média de precipitação	mm
K	Erodibilidade do Solo	$g.cm^{-2}.min^{-1}.Pa^{-1}$
L	Comprimento total da bacia de acumulação retangular	m
n	Rugosidade	$s.m^{-1/3}$
P_{st}	Perda de solo tolerável	g
Q	Vazão escoada no canal	$m^3.s^{-1}$
q	Vazão por unidade de largura	$m^2.s^{-1}$
q_r	Somatório de vazão resultante por unidade de largura, proveniente do leito da estrada e da área externa de contribuição	$m^2.s^{-1}$
S	Declividade	$m.m^{-1}$
S_t	Declividade transversal	$m.m^{-1}$
T_i	taxa de infiltração da água no solo	$m.s^{-1}$
T_{ie}	Taxa de Infiltração Estável da água no solo	$mm.h^{-1}$
τ_c	Tensão crítica de cisalhamento	Pa
γ	Massa específica do solo	$g.cm^{-3}$

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	27
1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	27
1.2. OBJETIVOS	29
1.2.1. Objetivo Geral	29
1.2.2. Objetivos Específicos	29
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	31
2.1. ESTRADAS NÃO PAVIMENTADAS	31
2.1.1. Sistemas de Drenagem em Estradas Não Pavimentadas	34
2.1.2. Técnicas de Estabilização de Solo para Fins Rodoviários	38
2.2. EROÇÃO EM ESTRADAS NÃO PAVIMENTADAS	40
2.3. MONITORAMENTO DOS PROCESSOS EROSIVOS	40
2.4. MODELAGEM DOS PROCESSOS EROSIVOS	41
2.5. TEORIA DO MODELO ESTRADAS	42
2.5.1. Determinação do Escoamento Superficial	42
2.5.1.1. <i>Modelagem do Escoamento Advindo do Leito e da Área Externa à Estrada</i>	44
2.5.1.2. <i>Modelagem do Escoamento Superficial no Canal da Estrada</i>	46
2.5.1.3. <i>Período de Retorno Considerado para Determinação do Hidrograma de Escoamento Superficial</i>	46
2.5.2. Determinação da Perda de Solo	46
2.5.2.1. <i>Perda de Solo Tolerável no Canal</i>	47
2.5.2.2. <i>Perda de Solo Provocada pelo Escoamento</i>	47
2.5.3. Espaçamento entre Desaguadouros	48
2.5.4. Determinação das Dimensões das Bacias de Acumulação	49
2.5.5. Parâmetros de Entrada do Modelo ESTRADAS	49
2.5.6. Resultados Obtidos por Meio do Modelo ESTRADAS	50
3. ÁREA DE ESTUDO	53
3.1. LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA	53
3.2. FORMAÇÃO GEOLÓGICA	57
3.3. PEDOLOGIA	57
3.4. COBERTURA VEGETAL E USO DO SOLO	58
4. MATERIAIS E MÉTODOS	59
4.1. ENSAIOS GEOTÉCNICOS EM LABORATÓRIO COM SOLO NATURAL	59

4.1.1.	Análise granulométrica por sedimentação	61
4.1.2.	Limites de Atterberg	61
4.1.3.	Densidade Real dos Grãos	61
4.1.4.	Ensaio de Compactação	62
4.1.5.	Índice de Suporte Califórnia (ISC ou CBR) e Expansão	63
4.1.6.	Ensaio Expedito para Classificação MCT - Miniatura Compactado Tropical	64
4.2.	ENSAIOS GEOTÉCNICOS EM LABORATÓRIO COM SOLO-CAL	67
4.3.	LEVANTAMENTO DOS DISPOSITIVOS DE DRENAGEM EM CAMPO	68
4.4.	APLICAÇÃO DO MODELO ESTRADAS	69
4.4.1.	Dados Referentes à Estrada	69
4.4.1.1.	<i>Leito da Estrada</i>	70
4.4.1.2.	<i>Área Externa à Estrada</i>	72
4.4.1.3.	<i>Canal da Estrada</i>	74
4.4.1.4.	<i>Características do Solo</i>	75
4.4.2.	Dados referentes às bacias de acumulação	82
4.4.3.	Dados referentes à precipitação	84
4.5.	ESTUDO DE CASO: FAZENDA CERRO AZUL	86
4.5.1.	Definição do trecho de estrada 1	87
4.5.2.	Definição do trecho de estrada 2	88
4.5.3.	Definição do trecho de estrada 3	89
4.5.4.	Definição do trecho de estrada 4	90
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	91
5.1.	CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA DO SOLO DA JAZIDA CERRO AZUL	91
5.1.1.	Teor de Umidade Natural	91
5.1.2.	Análise Granulométrica	91
5.1.3.	Densidade Real dos Grãos	92
5.1.4.	Limites de Atterberg	92
5.1.5.	Ensaio de Compactação	93
5.1.6.	Índice de Suporte Califórnia - ISC	94
5.1.7.	Ensaio de Expansão	95
5.2.	CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA DO SOLO MELHORADO COM CAL	95
5.2.1.	Determinação do Teor Ótimo de Cal	95
5.2.2.	Ensaio de Compactação	96
5.2.3.	Índice de Suporte Califórnia - ISC	98
5.2.4.	Ensaio de Expansão	100

5.2.5.	Avaliação da erosão por meio dos Ensaios da Metodologia MCT - Método Expedito das Pastilhas	100
5.3.	DIMENSIONAMENTO DOS DISPOSITIVOS DE DRENAGEM	101
5.3.1.	Análise do Trecho 1	101
5.3.2.	Análise do Trecho 2	107
5.3.3.	Análise do Trecho 3	113
5.3.4.	Análise do Trecho 4	119
5.3.5.	Comparação entre os Trechos de Estrada 1 a 4	125
5.4.	COMPARAÇÃO ENTRE O ESPAÇAMENTO E DIMENSIONAMENTO DAS BACIAS DE ACUMULAÇÃO RECOMENDADO PELO MODELO ESTRADA E O DIMENSIONAMENTO VERIFICADO EM CAMPO	130
6.	CONCLUSÕES	133
7.	RECOMENDAÇÕES	135
8.	REFERÊNCIAS	137

1. INTRODUÇÃO

1.1. Considerações Iniciais

O Brasil possui 1.580.813 km de estradas distribuídas nas diferentes regiões, das quais aproximadamente 87 % não são pavimentadas (DNIT, 2009). Estas estradas possuem grande importância econômica, uma vez que representam o elo principal entre propriedades rurais e centros urbanos.

Entretanto, as estradas não pavimentadas têm sido um dos grandes problemas relacionados à conservação do solo, principalmente devido aos processos erosivos ocorridos tanto no leito das estradas como também nas margens. Tais processos acentuam-se com a implantação destas estradas, promovendo a retirada da cobertura vegetal, a movimentação do solo e a compactação de seu leito, tornando tais vias muito vulneráveis à erosão.

O estudo da erosão hídrica é complexo, pois envolve diferentes mecanismos que são agravados pela multiplicidade e inter-relação de fatores intervenientes no fenômeno (MACIEL et al., 2009a). Entre os fatores que interferem nos processos erosivos, destacam-se, além dos fatores climáticos, a declividade, a capacidade de infiltração de água no solo, a distância percorrida pelo escoamento superficial, a rugosidade superficial, a resistência do solo à ação erosiva da chuva (PEREIRA et al., 2003).

Entretanto, quando não há um controle dos processos erosivos, ocorrem grandes prejuízos em relação aos aspectos ambientais, sociais e econômicos, devido ao transporte de partículas de solo, nutrientes, matéria orgânica, defensivos agrícolas, etc. (BERTONI E LOMBARDI NETO, 1993).

As questões ambientais são de fundamental importância dentro dos estudos de implantação e conservação de estradas não pavimentadas. Por modificarem as características naturais do terreno, estas estradas modificam também o percurso natural do escoamento superficial, alterando a capacidade de infiltração da água no solo e, em alguns casos, concentrando águas advindas de áreas adjacentes, funcionando de maneira semelhante a um canal de drenagem (GRIEBELER, 2002).

Com o intuito de implementar ações para o controle da erosão e assoreamento, algumas medidas vêm sendo criadas nos últimos anos.

Tais medidas buscam relacionar os aspectos técnicos, econômicos e ambientais visando alternativas a serem incorporadas como medidas mitigadoras de impactos ambientais (ANTONANGELO E FENNER, 2005). Nesse contexto, a Agência Nacional de Águas – ANA desenvolveu o Programa Produtor de Água, que tem como foco o controle da erosão e do assoreamento no meio rural, por meio do incentivo aos produtores rurais visando à adoção de boas práticas de conservação do solo e da água. Este programa propicia a melhoria da qualidade da água e o aumento das vazões médias dos rios em bacias hidrográficas de importância estratégica para o Brasil (CHAVES et al., 2004).

Ward e Trimble (2004) destacam que o sedimento é o mais significativo de todos os poluentes, por sua concentração na água, seus impactos no uso da água e seus efeitos no transporte de outros poluentes. A maioria das bacias de captação de água para consumo está localizada em áreas rurais e, portanto, são influenciadas pelo excesso de sedimentos encontrados no sistema fluvial. Quando se trata de mananciais de abastecimento de água, o tempo e o custo do processo de tratamento aumentam muito em casos de excesso de turbidez.

Associado ao acréscimo de áreas florestadas no decorrer dos anos, as exigências para as estradas não pavimentadas nestas áreas elevaram-se em função de alguns fatores: aumento do volume de tráfego, principalmente durante os períodos de corte, necessidade de trafegabilidade durante todo o ano, principalmente nos períodos de chuva, necessidade de estradas com maior vida útil, com baixo custo de manutenção. Desta forma, o setor de estradas tem adquirido grande importância dentro do setor florestal, uma vez que os custos do transporte, incluindo os custos de implantação e manutenção de estradas, incidem significativamente sobre o valor final da madeira. Grace 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.

Estudos do comportamento dos materiais utilizados na construção e adequação de estradas não pavimentadas tornam-se extremamente necessários a fim de minimizar os impactos causados por estas atividades (MACIEL et al., 2009b). Por isso, um estudo aprofundado destas estradas, principalmente em relação às características físicas do solo, à topografia e ao dimensionamento dos dispositivos de drenagem, tende a minimizar os processos erosivos e, conseqüentemente, a produção de sedimentos em bacias hidrográficas.

1.2. Objetivos

1.2.1. *Objetivo Geral*

Caracterizar o solo utilizado na construção e adequação das estradas de uma fazenda de reflorestamento e dimensionar os dispositivos de drenagem superficial das mesmas, com o intuito de reduzir os impactos ambientais decorrentes da erosão hídrica.

1.2.2. *Objetivos Específicos*

- Caracterizar o solo utilizado na adequação das estradas em função dos aspectos geotécnicos e hidrológicos;
- Avaliar a resistência mecânica do solo utilizado na adequação das estradas não pavimentadas;
- Avaliar o comportamento de solo melhorado com cal em função dos resultados obtidos nos ensaios de geotécnicos e também sobre a resistência à erosão, por meio do Ensaio Exedito MCT;
- Dimensionar os dispositivos de drenagem por meio do modelo ESTRADAS de acordo com a variação de declividades das estradas (2%, 6% e 12%);
- Dimensionar os dispositivos de drenagem por meio do modelo ESTRADAS de acordo com a variação das características das áreas de contribuição externas ao leito da estrada;
- Comparar o dimensionamento das bacias de acumulação recomendados pelo modelo ESTRADAS com o dimensionamento adotado em campo.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Estradas não pavimentadas

No Brasil, e em muitos outros países, a maior parte da rede viária é composta por estradas não pavimentadas. Estas estradas, também conhecidas como estradas vicinais, possuem grande importância no desenvolvimento econômico e social do país, pois representam o principal meio de escoamento da produção agropecuária, além de serem, muitas vezes, os únicos meios de acesso aos serviços de saúde, educação e lazer dos moradores locais à sede dos municípios.

De acordo com os dados publicados em 2009 pelo DNIT, no documento intitulado “Relatório de Extensões do Sistema Rodoviário Nacional”, a rede de estradas do Brasil é composta por 1.580.813,7 km de rodovias, incluindo rodovias federais, estaduais e municipais (Tabela 1), dos quais apenas 13,44% são pavimentadas e o restante, 1.368.371,7 km, são constituídas por estradas não pavimentadas (86,56%).

Tabela 1 - Rede Rodoviária do Brasil

<i>Regiões Brasileiras</i>	<i>Pavimentadas</i>		<i>Não Pavimentadas</i>		<i>Total</i>
	km	%	km	%	km
Norte	17.779,5	15,75	95.108,5	84,25	112.888,0
Nordeste	56.134,6	15,41	364.244,0	84,59	420.378,6
Sudeste	69.917,0	13,30	455.724,9	86,7	525.641,9
Sul	40.146,5	11,98	294.826,5	88,01	334.973,0
Centro-Oeste	28.464,4	15,22	158.467,8	84,78	186.932,2

Fonte: DNIT (2009)

No sul do país, nota-se que o percentual de estradas não pavimentadas é o mais alto. Em Santa Catarina, este número chega a quase 89% do total de estradas existentes, incluindo rodovias federais, estaduais e municipais, como se pode verificar na Tabela 2.

Essas estradas, por apresentarem sua superfície exposta estão sujeitas a um processo contínuo de deterioração. O estado da superfície é função, diretamente, do tipo de solo, da capacidade de suporte, das solicitações do tráfego, das condições climáticas, dos dispositivos de

drenagem presentes, da geometria da estrada e das atividades de manutenção e adequação utilizadas (SANT'ANNA, 2006).

Tabela 2 - Rede Rodoviária em Santa Catarina

<i>Rodovias</i>	<i>Pavimentadas</i>		<i>Não Pavimentadas</i>		<i>Total</i>
	km	%	km	%	km
Federais	2.248,1	98,3	38,9	1,7	2.287,0
Estaduais	3.811,6	68,24	1.773,5	31,76	5.585,1
Municipais	914,6	1,7	52.977	98,3	53.891,6
Total km	6.974,3	11,29	54.789,4	88,7	61.763,7

Fonte: DNIT (2009)

Segundo DER (2000), boas condições de suporte, de rolamento e aderência são características fundamentais que uma estrada de terra deve apresentar a fim de garantir condições satisfatórias de tráfego. A capacidade de suporte é a característica que confere à estrada sua maior ou menor capacidade de não se alterar frente às solicitações de tráfego. As deformações típicas devido à falta de capacidade de suporte são: afundamentos localizados, ondulações transversais, formação de trilhas de roda, etc.

As condições de rolamento estão relacionadas com a regularização da pista e as condições de aderência estão relacionadas com o atrito entre os pneus do veículo e a pista (DER, 2000). Os problemas mais típicos ligados às más condições de rolamento e aderência se localizam quase que exclusivamente na camada de revestimento. Entre eles estão: esburacamento generalizado, materiais granulares soltos, pista escorregadia, etc (IPT, 1985).

Neste contexto, estão inseridas as estradas florestais, cuja finalidade é tornar acessíveis as áreas florestais, de forma a garantir que máquinas, veículos, equipamentos e mão de obra possam ser utilizados nas operações florestais, sobretudo durante a colheita e transporte (SANT'ANNA et al., 2000). As estradas florestais têm como principais características o baixo volume de tráfego, às vezes temporário, e o tráfego pesado, por meio de veículos com capacidade de carga entre 30 e 40 toneladas (Figura 1).

De acordo com Sant'Anna et al. (2000), toda a estrada florestal tem um padrão previamente estabelecido de acordo com a necessidade da empresa. O padrão de estradas florestais é influenciado por alguns

fatores, tais como custos de construção e manutenção, custo do transporte, volume de madeira a ser transportado, densidade de tráfego e uso múltiplo.



Figura 1 - Caminhão com alta capacidade de carga após carregamento

As classificações das estradas são muito variáveis de país para país ou até mesmo de região para região. Entretanto, uma boa classificação de estradas florestais deve ser clara em suas características, de forma a permitir um diálogo sem problemas de terminologia, fornecendo subsídios para planejar uma estrada florestal ou avaliar as já existentes (SANT'ANNA et al., 2000). De acordo com os mesmos autores a classificação mais usual de estradas florestais baseia-se na função e objetivos de cada uma delas:

- Estradas Primárias: têm a capacidade de suportar transporte durante o ano todo, e em algumas vezes, sob área de manejo, podem utilizá-las por vários anos. Sua principal função é permitir o acesso às áreas de produção florestal e às estradas externas às fazendas.

- Estradas Secundárias: ligam as áreas de produção florestal às estradas primárias. Normalmente dividem a área florestal em talhões. Possuem um padrão de construção simples, ficando muitas vezes intransitáveis em períodos de chuva.

- Trilhas ou Ramais: são os caminhos em que existe somente o trânsito de máquinas florestais. São abertos dentro da floresta, muitas vezes somente com o rebaixamento dos tocos e sem a movimentação de

terra. São estradas temporárias, tendo como função a redução da distância entre o local de colheita e a estrada secundária.

De uma maneira geral, a grande maioria das estradas situadas em zonas rurais foi aberta pelos colonizadores de uma forma inadequada, por ter sido orientada basicamente pela estrutura fundiária e pelas facilidades do terreno. A manutenção das estradas construídas desta forma é de alto custo e de difícil execução (BAESSO E GONÇALVES, 2003).

Os materiais utilizáveis na construção, recuperação e conservação de rodovias são na maioria das vezes, encontrados nos próprios trechos ou em jazidas próximas aos mesmos. Em cada região, a escassez ou abundância destes materiais depende quase que exclusivamente das características geológicas e pedológicas locais (HIGASHI, 2008). Por sua natureza linear, uma rodovia pode atravessar uma grande variedade de solos, que apresentam diferentes características e propriedades distintas, e podem responder diferentemente às solicitações impostas pelas obras de engenharia.

A manutenção freqüente e adequada é importante para reduzir os custos de reconstrução a longo prazo, particularmente no que se refere ao revestimento primário e às estruturas de drenagem. Desta forma, a manutenção periódica deve incluir, entre outros serviços, uma conformação da pista de rolamento, a reposição de pequenos segmentos onde o revestimento encontra-se deficiente, a limpeza das obras de drenagem, o reparo e a inclusão de dispositivos de proteção às saídas de drenagem e ainda a recomposição de áreas degradadas por meio de técnicas de proteção vegetal (BAESSO E GONÇALVES, 2003).

2.1.1. *Sistemas de Drenagem em Estradas Não Pavimentadas*

A superfície compactada de estradas não pavimentadas restringe a infiltração da água, levando a um aumento das taxas de escoamento superficial. As estradas, além de receberem águas diretamente sobre seu leito, podem também servir para o escoamento de águas oriundas de áreas laterais à estrada, o que aumenta ainda mais os danos causados pela água. De acordo com Casarin e Oliveira (2009), para que o sistema de drenagem funcione de forma adequada é necessário o conhecimento da erodibilidade do solo, capacidade de infiltração de água no solo, além da adoção de práticas mecânicas de abatimento de taludes com elevação do greide e interceptação de águas por meio de dispositivos de drenagem e captação.

Um sistema de drenagem adequado constitui um aspecto tão ou mais importante do que o próprio revestimento de uma estrada não pavimentada (BAESSO E GONÇALVES, 2003). Ele é formado por um conjunto de dispositivos superficiais e subterrâneos. Estes dispositivos têm como objetivo não permitir a permanência de águas no leito das estradas, protegendo o corpo das estradas das infiltrações e preservando a vida útil das mesmas.

A seguir estão alguns dispositivos de drenagem utilizados em estradas florestais.

Os bueiros (Figura 2) são estruturas drenantes, contituídas por tubos de concreto, normalmente posicionados transversalmente à plataforma, que tem como objetivo permitir a passagem das águas sob a estrada. Podem drenar as águas precipitadas sobre a plataforma e tadules de corte (PARANÁ, 2004).



Figura 2 - Bueiro

Sarjetas ou valetas laterais (Figura 3) são dispositivos de drenagem executados no bordo da plataforma, tendo como objetivo a coleta do escoamento superficial da pista e dos taludes, conduzindo-o para um talvegue natural, bueiro ou bigode.



Figura 3 - Sarjeta

Os bigodes ou sangras (Figura 4) são dispositivos de drenagem superficial que têm como objetivo conduzir as águas das sarjetas ou bueiros diretamente para um talvegue natural, caixa de retenção ou outro dispositivo de drenagem.



Figura 4 - Bigode ou Sangra

A construção de caixas de acumulação ou contenção (Figura 5) tem como objetivo o aproveitamento racional das águas de chuva, reduzindo ao máximo suas perdas nos períodos chuvosos, facilitando sua infiltração no solo. Isto irá alimentar o lençol freático, como também evitar que descargas de bueiros e sarjetas sejam lançados diretamente em terrenos agriculturáveis ou desprotegidos, acelerando o processo erosivo (DER, 2000).

Alguns autores citam que o espaçamento mínimo entre bacias de acumulação deve ter como base a declividade do terreno. Bertolini (1993) definiu que o espaçamento mínimo das bacias de acumulação deve ser de 40 metros independentemente da declividade. Já os espaçamentos máximos devem ser 120 m para declividades entre 0 e 5%, 100 m entre 5 e 10%, 80 m entre 10 e 15% e 60 m para declividades entre 15 e 20%. 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 devem ser de 35, 30 e 25 m, respectivamente.



Figura 5 - Caixa de acumulação ou contenção

2.1.2. Técnicas de Estabilização de Solo para Fins Rodoviários

De acordo com o DNIT (2006), a estabilização das camadas da pavimentação ocorre por compactação de um material ou mistura de materiais que apresentem uma granulometria apropriada e índices geotécnicos específicos, fixados em especificações.

Segundo Guimarães (2002), quando o solo não possui as características geotécnicas exigidas para suportar a obra projetada, principalmente quanto à sua resistência, torna-se necessário corrigi-lo ou substituí-lo por outro, com a adição ou subtração de componentes, ou com a ação de agentes químicos. A escolha da técnica, denominada estabilização de solo, deve ser baseada na economia e ainda na finalidade da obra.

A estabilização de solos para fins rodoviários pode ser agrupada em duas categorias: estabilização mecânica e estabilização por aglutinantes (estabilização química). Na estabilização mecânica, a granulometria do solo é conservada ou corrigida pela mistura de um ou mais solos, antes da compactação, com o intuito de aumentar a coesão e/ou o ângulo de atrito interno do solo. Na estabilização química, adiciona-se ao solo uma substância que aumente a sua coesão ou que o impermeabilize, impedindo a redução da resistência pela ação da água.

Entre os tipos de estabilização química utilizados em estradas estão o solo-cimento, solo-cal, estabilização betuminosa, etc. (CAPUTO, 2008). O tipo de estabilização escolhida depende das propriedades do solo no estado natural, das propriedades desejadas para o solo estabilizado e dos efeitos no solo após a estabilização (CORRÊA, 2008)

A resistência mecânica dos solos e misturas pode ser avaliada pelo índice de suporte Califórnia (ISC ou CBR), em que, além do valor da capacidade de suporte de amostras deformadas, obtém-se, também, o valor da expansão, que, segundo Nogami e Villibor (1995), tem sido um parâmetro de grande importância em obras viárias (PEREIRA et al., 2006).

Diversos estudos já foram realizados na estabilização de solos utilizados em estradas não pavimentadas. Pereira et al. (2006) analisaram o emprego do resíduo sólido industrial *grits*, oriundo da indústria de celulose, como agente estabilizante de dois solos da Zona da Mata Norte de Minas Gerais, obtendo ganhos na resistência mecânica do solo, observados pelo ensaio CBR.

Fernandes et al. (2002) analisaram o potencial de uso do alcatrão de madeira de eucalipto como aditivo químico para estabilização de solos residuais característicos da microrregião de Viçosa – Minas Gerais utilizados em estradas florestais. Apesar de aumentar a resistência mecânica das misturas com adição de alcatrão, nenhum dos teores de alcatrão analisados atingiu as exigências mínimas do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER) para camada de sub-base de pavimentos rodoviários flexíveis.

Outros pesquisadores analisaram a cal como agente estabilizante. Esta é uma das técnicas mais antigas utilizadas pelo homem para obtenção da estabilização ou melhoria de solos instáveis. A adição deste estabilizante a um material natural pode resultar na melhoria de algumas de suas propriedades de interesse à pavimentação, possibilitando uma alternativa a mais para a construção de rodovias. Araújo e Barroso (2009) concluíram, após analisarem dois solos que ocorrem na Região do Baixo Jaguaribe - CE, com três teores de cal (3, 5 e 7%), que a cal exerceu influência de maneira imediata na resistência dos solos, reduzindo ou anulando a plasticidade destes e melhorando a trabalhabilidade dos mesmos.

2.2. Erosão em estradas não pavimentadas

O conceito de erosão está ligado aos processos de desgaste da superfície do terreno com a retirada e o transporte dos grãos minerais. Em sentido amplo, a erosão consiste no desgaste, no afrouxamento do material rochoso e na remoção dos detritos através dos processos atuantes na superfície da Terra (BIGARELLA, 2003). Segundo Fendrich et al. (1997), esses processos ocorrem devido a agentes naturais, como águas, ventos, gravidade ou geleiras.

Nas condições de clima tropical, como na maior parte do Brasil, com incidência de chuvas de alta intensidade e temperaturas normalmente elevadas, a erosão hídrica apresenta maior interesse por ser de ocorrência mais frequente.

As estradas aceleram a erosão potencial devido à remoção da camada superficial do solo, às modificações da estrutura natural do solo e à consolidação do solo, tendo por resultado a infiltração diminuída, às alterações na hidrologia subsuperficial, e ao fluxo de água concentrado devido à intercepção de trajetos naturais do escoamento superficial (GRACE, 1999).

A construção e planejamento inadequados de estradas não pavimentadas são as principais causas da ocorrência de processos erosivos. Isto ocorre devido à alteração do percurso natural do escoamento superficial, construção com greides acentuados e com inadequada rede de drenagem, além de grandes cortes e aterros (MACHADO E SOUZA, 1990).

Segundo Zoccal (2007), das perdas anuais de solo no estado de São Paulo, que superam mais de 200 milhões de toneladas, 50% são causados pelas estradas vicinais de terra, e cerca de 70% deste solo chega aos mananciais pelas estradas vicinais de terra, em forma de sedimentos transportados pela água. Como consequências estão o assoreamento e a poluição dos recursos hídricos, aumentando a degradação do meio ambiente e reduzindo drasticamente a qualidade e quantidade de água.

2.3. Monitoramento dos Processos Erosivos

As taxas de erosão do solo variam em função das etapas de construção e adequação das estradas não pavimentadas. Segundo Tüchy (1982), a taxa de erosão antes da construção de uma estrada florestal varia entre 20 a 30 kg.ha⁻¹.ano⁻¹. Durante a construção da estrada, esta

taxa aumenta para 2.000 a 3.000 kg.ha⁻¹.ano.⁻¹. Após o término dos trabalhos e revegetação dos taludes, esta taxa fica entre 100 a 150 kg.ha⁻¹.ano.⁻¹. O autor relata ainda que o tempo teórico para que um solo florestal de 18 cm de profundidade seja erodido é de 575.000 anos. Este mesmo solo, porém com a camada vegetal removida, seria erodido em 18 anos.

A produção de sedimentos das estradas florestais está correlacionada com: o tipo de solo; o comprimento e inclinação da rampa; e a inclinação e altura dos taludes de corte e aterro (LUCE, 1993). A erosão será maior com o aumento da declividade e do comprimento de rampa, fatores que aceleram a velocidade da enxurrada (DADALTO et al., 1990). A intensidade de tráfego também é outro fator importante na produção de sedimentos. Além disso, as características do solo, tais como erodibilidade do solo, tensão crítica de cisalhamento, são de fundamental importância em estudos de perdas de solo em estradas não pavimentadas. Em estudos realizados por Reid e Dunne (1984) estes mostraram que a produção de sedimentos em estradas florestais em períodos de tráfego intenso foi 7,5 vezes superior em relação a outros períodos em que estas estradas não eram utilizadas.

2.4. Modelagem dos Processos Erosivos

Diversos estudos têm sido desenvolvidos para a predição de processos erosivos. No entanto, poucos são os trabalhos que descrevem os processos erosivos que ocorrem em estradas não pavimentadas. Geralmente estes estudos são desenvolvidos em áreas agrícolas.

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.

Segundo Ziegler et al. (2000), de acordo com estudos realizados em estradas do Hawai e da Tailândia, 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.

No Brasil, diversos pesquisadores têm desenvolvido trabalhos relacionados a estradas não pavimentadas. Entretanto, poucos são os trabalhos de modelagem dos processos erosivos em estradas. Entre eles está o trabalho desenvolvido por Griebeler et al. (2002), que busca, por

meio do *software* ESTRADAS, o dimensionamento de redes de drenagem de água em estradas não pavimentadas.

2.5. Teoria do Modelo ESTRADAS

O *software* HIDROS é um conjunto de *softwares* utilizados no dimensionamento e manejo de projetos hidroagrícolas, desenvolvidos pelo Grupo de Pesquisa em Recursos Hídricos – GPRH do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa. Dentre esses *softwares*, o ESTRADAS permite o dimensionamento de sistemas de drenagem e bacias de acumulação em estradas não pavimentadas (PRUSKI et al., 2006). A Figura 6 apresenta a página inicial do modelo ESTRADAS.

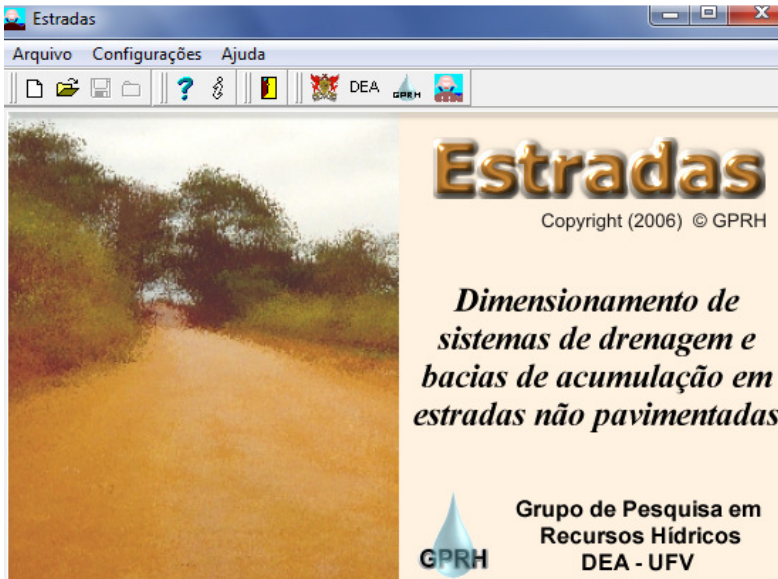


Figura 6 - Apresentação do modelo ESTRADAS

2.5.1. Determinação do Escoamento Superficial

O desenvolvimento do modelo ESTRADAS iniciou com a determinação do hidrograma de escoamento no canal e, a partir da associação deste com as características de resistência do solo à erosão, é

possível quantificar a perda de solo no canal, sendo esta 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 à área de contribuição externa a esta (GRIEBELER, 2002).

Para determinação do hidrograma, tanto a área de contribuição relativa ao leito da estrada quanto à área externa à estrada, o modelo divide estas áreas 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 é então obtido, acumulando-se os hidrogramas correspondentes à contribuição de cada linha, sendo que as vazões do leito da estrada e da área externa de contribuição são somadas de acordo com a coincidência dos tempos de chegada do escoamento à célula considerada.

As áreas de contribuição apresentam características que são utilizadas 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.

A Figura 7 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.

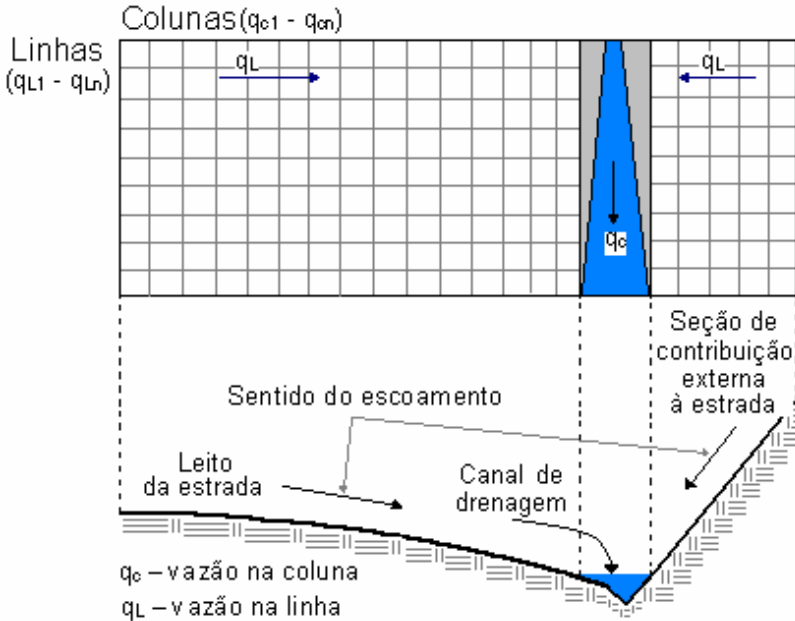


Figura 7 – Representação esquemática da subdivisão para determinar o hidrograma no canal de drenagem da estrada

Fonte: Pruski *et al.* (2006)

2.5.1.1. Modelagem do Escoamento Advindo do Leito e da Área Externa à Estrada

O modelo de ondas cinemáticas, uma das formas de aplicação das equações de Saint-Venant, que traduzem os princípios físicos da conservação da massa (equação da continuidade) e da conservação da quantidade de movimento (equação da dinâmica) é utilizado pelo *software* ESTRADAS e pode ser expresso como:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} = i_i - T_i \quad (1)$$

onde h é a profundidade do escoamento (m); t é o tempo (s); q é a vazão por unidade de largura ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$); x é o sentido do escoamento (m); i_i é a intensidade instantânea de precipitação ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); e T_i é a taxa de infiltração da água no solo ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$).

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

$$q = \alpha h^\beta \quad (2)$$

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

$$\alpha = \frac{\sqrt{S_o}}{n} \quad (3)$$

$$\beta = \frac{5}{3} \quad (4)$$

onde n é o coeficiente de rugosidade do terreno ($\text{s.m}^{-1/3}$); e S_o é a declividade do terreno na direção do escoamento (m.m^{-1}).

Substituindo a Equação (1) na Equação (2), obtém-se:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \alpha \frac{\partial q^\beta}{\partial x} = i_i - T_i \quad (5)$$

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

$$i_i = i_m \left(1 - \frac{ct}{t+b} \right) \quad (6)$$

onde i_m é a intensidade máxima média de precipitação (mm); c e b são parâmetros da equação de chuvas intensas (adimensional); e t é a 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}).

2.5.1.2. *Modelagem do Escoamento Superficial no Canal da Estrada*

O modelo ESTRADAS realiza a modelagem do escoamento superficial da estrada por meio da Equação 7 proposta por Julien et al. (1995) obtida a partir do modelo de ondas cinemáticas (Equação 1).

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_r \quad (7)$$

onde A é a seção transversal molhada pelo escoamento (m^2); Q é a vazão escoada no canal ($m^3 \cdot s^{-1}$); q_r é o somatório de vazão resultante por unidade de largura, proveniente do leito da estrada e da área externa de contribuição ($m^2 \cdot s^{-1}$).

2.5.1.3. *Período de Retorno Considerado para Determinação do Hidrograma de Escoamento Superficial*

No modelo ESTRADAS são utilizados dois diferentes períodos de retorno. Um é utilizado na determinação da vazão máxima para o dimensionamento dos canais e das áreas de captação do escoamento. Um segundo período de retorno é utilizado na determinação do espaçamento dentre desaguadouros, que corresponde ao período médio utilizado na manutenção de estradas.

De acordo com Pruski et al. (2006), durante o período de manutenção, mais de uma precipitação deverá provocar tensão cisalhante acima da tensão crítica para o cisalhamento do solo. Sendo assim, o período de retorno a ser efetivamente considerado pelo modelo ESTRADAS no traçado do hidrograma deverá ser superior ao período de manutenção da estrada, o qual é denominado período de retorno equivalente (T_{req}). Neste caso, um coeficiente de majoração é aplicado ao período de retorno referente à manutenção das estradas.

2.5.2. *Determinação da Perda de Solo*

O modelo ESTRADAS estabelece como limite máximo a perda de solo devido à erosão quando esta não afeta a trafegabilidade da estrada. Para isto, é levado em conta o aprofundamento máximo para o canal de drenagem, na seção correspondente ao comprimento final do canal, onde será locado o desaguadouro (PRUSKI et al., 2006). Considera-se aceitável o aprofundamento máximo de 5 a 10 cm, que

deverá ser atingido no período equivalente ao período de manutenção das estradas.

2.5.2.1. *Perda de Solo Tolerável no Canal*

A perda de solo tolerável no canal, limitada pelo aprofundamento máximo do mesmo, é determinada por:

$$P_{st} = V_s \cdot \rho_s \quad (8)$$

onde P_{st} é a perda de solo tolerável (g); V_s é o volume de solo a ser removido pela erosão (cm^3); e ρ_s é a massa específica do solo ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$).

O volume de solo a ser removido pela erosão é determinado como:

$$V_s = A a_{pm} \quad (9)$$

onde V_s é a área da superfície do solo considerada para efeito de cálculo (cm^2); e a_{pm} é o aprofundamento máximo (cm).

Como a erosão ocorre sobre a superfície do terreno, a massa específica do solo deve ser determinada na primeira camada de solo, ou seja, de 0 a 5 cm da superfície, que estará sujeita ao escoamento superficial.

2.5.2.2. *Perda de Solo Provocada pelo Escoamento*

Para que ocorra perda de solo, a tensão provocada pelo escoamento deve superar a tensão crítica para cisalhamento do solo. A perda de solo é determinada tomando-se a diferença entre a tensão média associada a cada intervalo de tempo e a tensão crítica de cisalhamento do solo. Na Figura 8 pode-se observar a tensão cisalhante ao longo do tempo, com a indicação da região considerada para o cálculo da perda de solo provocada pelo escoamento. Também é indicado o intervalo de tensão considerado e da tensão média referente a cada intervalo.

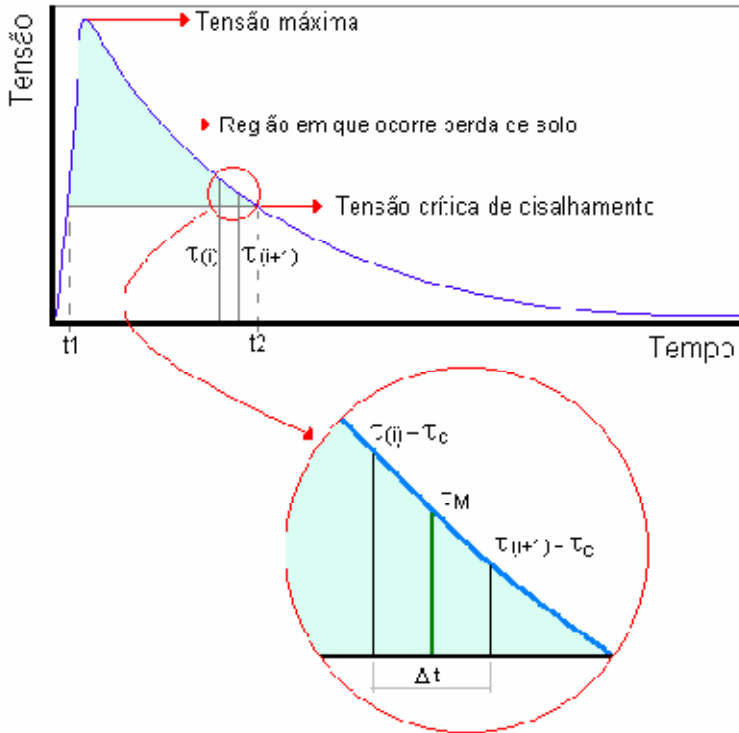


Figura 8 - Variação da tensão cisalhante com o tempo para o escoamento no canal de drenagem de uma estrada, indicando a região de interesse para determinação da perda de solo provocada pelo escoamento, o intervalo de tempo (Δt) e a tensão média referente a este intervalo (τ_M).

Fonte: Pruski et al. (2006)

2.5.3. Espaçamento entre Desagudouros

A definição do comprimento recomendável entre desagudouros inicia com a determinação da perda de solo para cada metro de comprimento de canal. A perda de solo provocada pelo escoamento é comparada à perda de solo tolerável calculada. Este procedimento é realizado para cada metro de canal, sendo o espaçamento máximo recomendado determinado no trecho de canal imediatamente anterior ao trecho no qual a perda máxima tolerável tenha sido superada.

2.5.4. Determinação das Dimensões das Bacias de Acumulação

O modelo ESTRADAS utiliza dois tipos de bacias de acumulação: o formato semicircular e o retangular. Para as bacias de acumulação com formato semicircular o raio é calculado como:

$$R = \sqrt{\frac{4V}{\pi H_{máx}}} \quad (10)$$

onde R é o raio da bacia de acumulação semicircular (m); V é o volume de acumulação (m^3); e $H_{máx}$ é a profundidade máxima de água a ser acumulada na bacia (m).

A largura das bacias de acumulação de formato retangular é calculada como:

$$B = \frac{2V}{H_{máx}L} \quad (11)$$

onde B é a largura da bacia de acumulação retangular (m); e L é o comprimento total da bacia de acumulação retangular (m);

O volume (V) é determinado utilizando-se o volume escoado para o comprimento total recomendado, sendo usado o período de retorno para o dimensionamento do sistema.

2.5.5. Parâmetros de Entrada do Modelo ESTRADAS

Para o funcionamento, o modelo ESTRADAS necessita de alguns parâmetros de entrada referentes à estrada, à bacia de acumulação a ser dimensionada e informações sobre a precipitação local (GRIEBELER, 2002). Estes parâmetros estão apresentados na Figura 9.

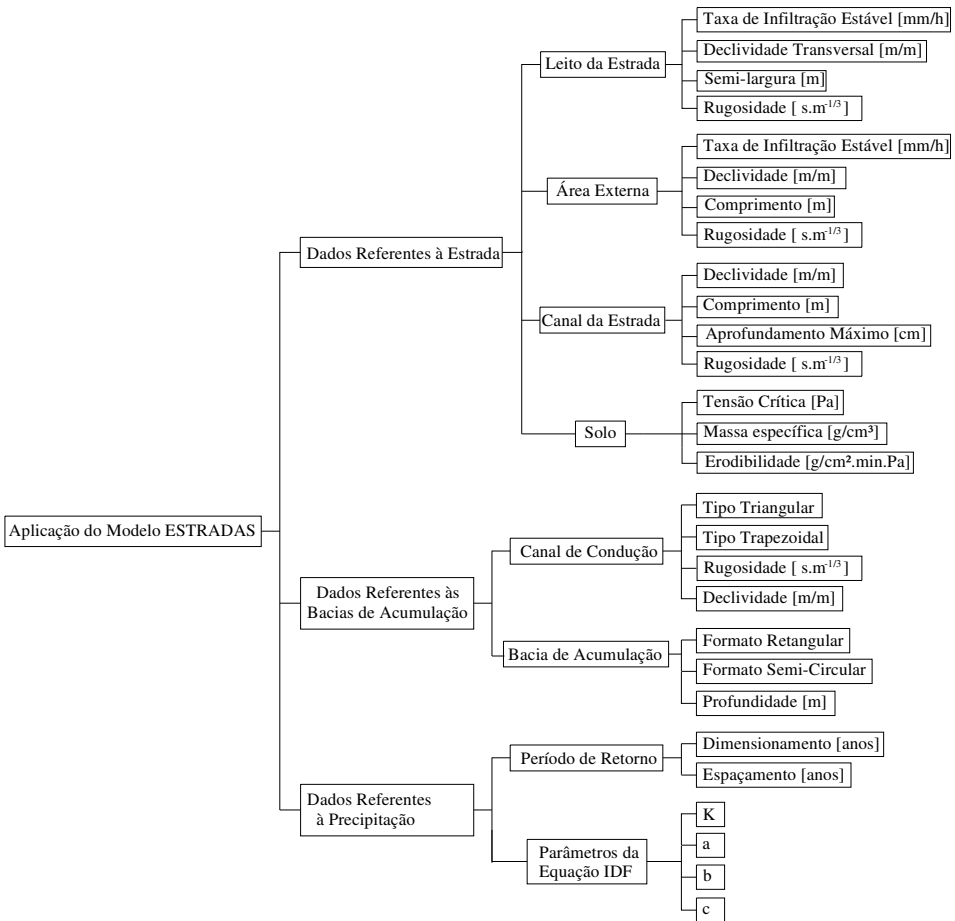


Figura 9 - Parâmetros de Entrada do Modelo ESTRADAS

2.5.6. Resultados Obtidos por Meio do Modelo ESTRADAS

Após a entrada dos dados solicitados pelo modelo, o *software* inicia o processo de dimensionamento, determinando inicialmente o espaçamento entre desaguadouros. Nesta etapa o programa mostra o andamento dos cálculos, sendo inicialmente obtido o hidrograma do leito da estrada e, posteriormente, o hidrograma na área externa à estrada e então o hidrograma do canal. Após esta etapa, o *software*

calcula a perda de solo, para cada metro de canal, em todo o comprimento de canal indicado pelo usuário anteriormente.

Após a determinação do espaçamento entre desaguadouros, o *software* realiza o cálculo das dimensões das bacias de acumulação. Com base no hidrograma do canal da estrada, é determinado então o volume a ser armazenado nas bacias de acumulação. Para cada seção do canal o *software* determina a perda do solo e as dimensões da bacia de acumulação, sendo que os resultados são mostrados em tela. Na sequência há a opção de emissão de relatório, no qual constam os parâmetros de entrada do modelo e resultados obtidos em cada seção do canal.

3. ÁREA DE ESTUDO

3.1. Localização Geográfica

A área de estudo corresponde à Fazenda Cerro Azul, pertencente à Empresa Battistella Florestal. Esta fazenda, destinada à produção de *Pinus taeda*, está situada no planalto norte do Estado de Santa Catarina, entre os municípios de Rio Negrinho e Doutor Pedrinho. A sede da fazenda encontra-se nas coordenadas 26°38'12.62"S e 49°38'4.06"O. A região apresenta uma altitude média de 792 m e apresenta uma precipitação média anual de 1.572 mm.ano⁻¹ (KOBİYAMA et al., 2004). A Figura 10 mostra a localização da área de estudo, indicando o seu posicionamento no Planalto Norte Catarinense.

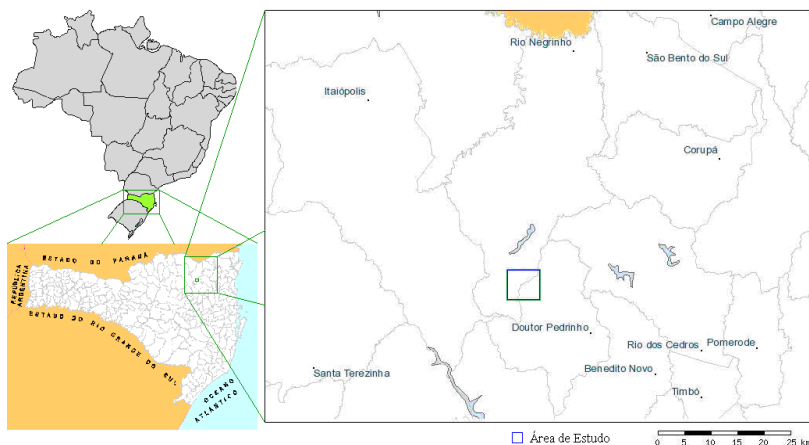


Figura 10 - Localização da Área de Estudo no Planalto Norte Catarinense

A Figura 11 mostra o detalhe da localização das rodovias próximas à área de estudo, de acordo com o mapa rodoviário do DEINFRA - SC (2009).



Figura 11 – Localização da área de estudo no Mapa Rodoviário de Santa Catarina. Adaptado de DEINFRA (2009)

A Figura 12 apresenta a foto da jazida de solo utilizada na construção e adequação das estradas da Fazenda Cerro Azul, que foi analisada neste trabalho.



Figura 12 - Jazida de Solo da Fazenda Cerro Azul

O mapa da Fazenda Cerro Azul é apresentado na Figura 13, onde pode-se verificar a localização tanto da malha viária quanto dos corpos d'água localizados na fazenda. Nota-se que toda a área da fazenda é bem drenada e, em um grande número de estradas não pavimentadas, os corpos d'água estão muito próximos a elas.

Isto aumenta a preocupação com a implantação de técnicas adequadas que minimizem a produção de sedimentos, por meio da quebra da conectividade hidráulica entre cursos d'água e canais de drenagem, evitando assim a poluição dos recursos hídricos em função da redução de sólidos em suspensão que são carregados.

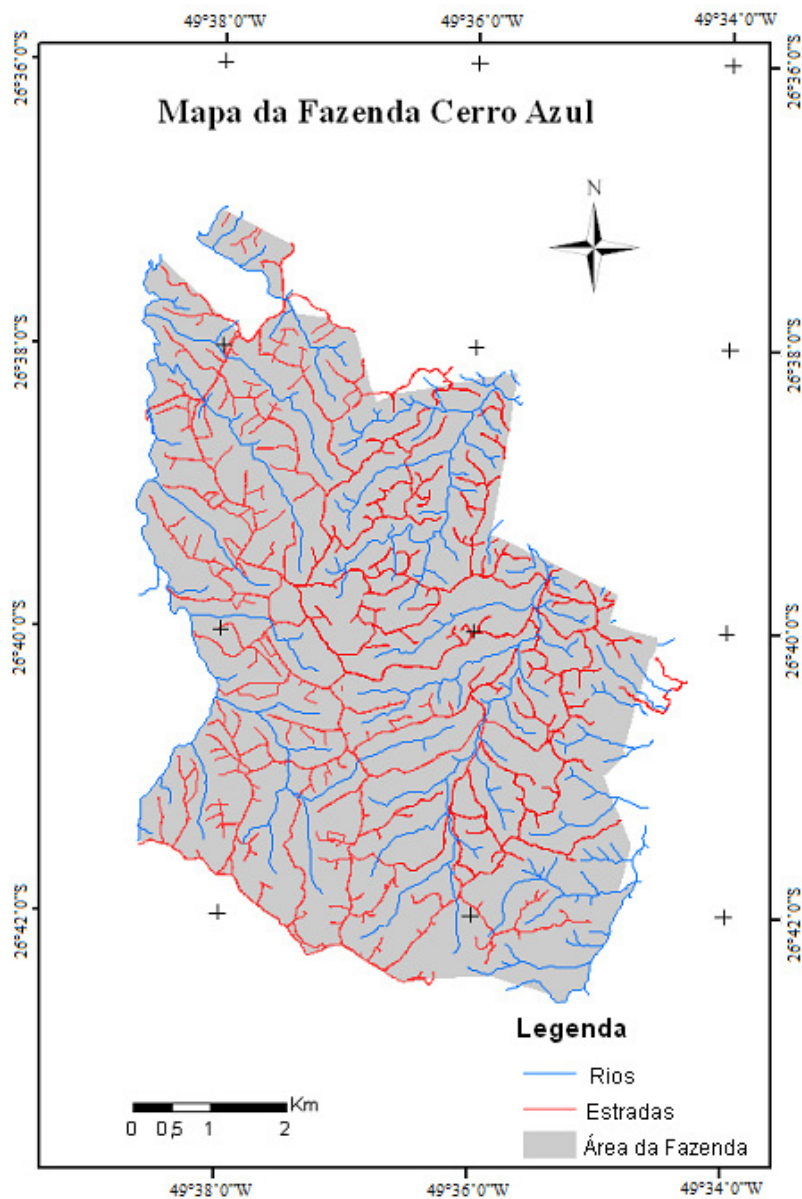


Figura 13 - Mapa da Fazenda Cerro Azul

3.2. Formação Geológica

Segundo Bortoluzzi et al. (1987), o substrato dos municípios de Rio Negrinho e Doutor Pedrinho, é formado por rochas sedimentares pertencentes aos Grupos Itararé e Guatá, do Super Grupo Tubarão. Esta unidade compreende um conjunto de espessas camadas de sedimentos derivados de rochas em ambiente glacial e periglacial. Os processos de deposição se estenderam do Carbonífero Superior ao Permiano Médio (SILVA E BORTOLUZZI, 1987).

O grupo Itararé, segundo Silva e Bortoluzzi (1987), é representado pelas Formações Mafra e Rio do Sul. Na Formação Mafra predominam arenitos finos a grosseiros de coloração esbranquiçada a vermelha com matriz areno-argilosa a argilosa, derivadas de uma seqüência flúvio marinha com influência glacial. Enquanto a Formação Rio do Sul é composta por folhelhos de argilitos cinza escuros e pretos e arenitos finos a médios de origem glácio-marinha, com cobertura superior em argilitos, folhelhos, arenitos finos e médios.

O grupo Guatá é representado pela Formação Rio Bonito, composto por depósitos litorâneos e fluviais, abrangendo a parte sul do município de Rio Negrinho, e composto por arenitos finos a muito finos, intercalados com argilitos e folhelhos carbonosos.

No município de Rio Negrinho a Formação Mafra é predominante. A parte central é representada pela Formação Rio do Sul e na região sul pela Formação Rio Bonito. Na área de estudo predomina a formação geológica sedimentar.

3.3. Pedologia

Segundo o mapa de solos da EMBRAPA (2004) para o Estado de Santa Catarina, em escala 1:250.000, o solo da área de estudo caracteriza-se como Cambissolo (Ca) (Figura 14). O Cambissolo, de acordo com a nova classificação de solos (EMBRAPA, 2006) é um solo pouco desenvolvido, com horizonte B incipiente. Uma das principais características dos Cambissolos é serem pouco profundos e, muitas vezes, cascalhentos. Estes são solos "jovens" que possuem minerais primários e altos teores de silte até mesmo nos horizontes superficiais. O alto teor de silte e a pouca profundidade fazem com que estes solos tenham permeabilidade muito baixa.

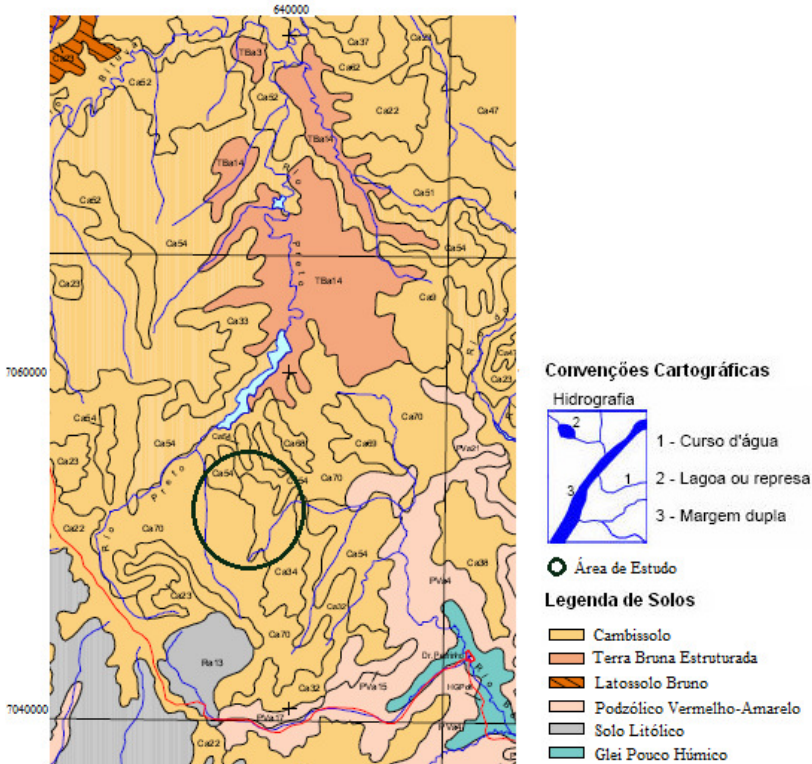


Figura 14 – Classificação dos Solos da Área de Estudo

3.4. Cobertura Vegetal e Uso do Solo

O uso do solo da área de estudo é o reflorestamento de *Pinus taeda*. A cobertura vegetal anteriormente existente era de mata nativa, pertence ao bioma Mata Atlântica, onde predominava a Floresta Ombrófila Mista que se caracterizava, principalmente, pela presença de pinheiro-do-paraná (*Araucaria angustifolia*) (EPAGRI/CIRAM, 2009).

Sua formação apresentava um estrato superior constituído pela araucária, e submatas bastante heterogêneas, contando ainda com a presença de espécies como imbuia (*Ocotea porosa*), sapopema (*Sloanea lasiocoma*), erva-mate (*Ilex paraguariensis*) e taquara (*Merostachys multiramea*) (EPAGRI/CIRAM, 2009).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a presente pesquisa foram realizados os ensaios descritos nos itens subseqüentes seguindo uma metodologia constituída por quatro etapas (Figura 15).

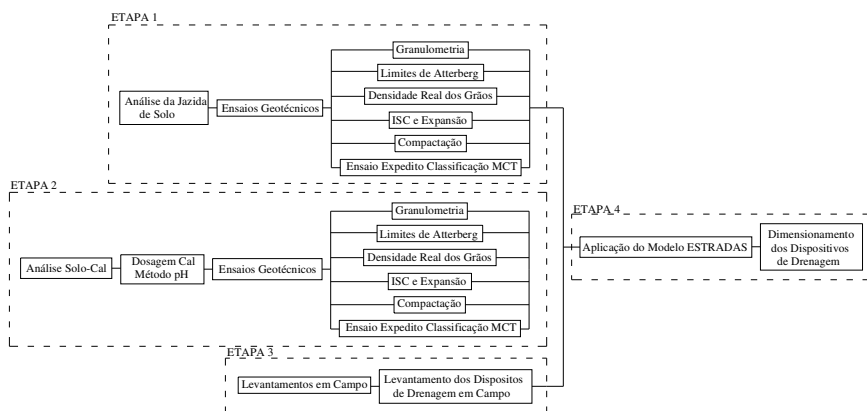


Figura 15 - Fluxograma das etapas da pesquisa

A etapa 1 do fluxograma apresenta a caracterização física e mecânica do solo utilizado na construção e adequação das estradas não pavimentadas da Fazenda Cerro Azul. A etapa 2 apresenta os resultados obtidos com a estabilização deste solo com a utilização de cal. Esta etapa visa a obtenção de resultados positivos em relação à diminuição da produção de sedimentos nestas estradas. As etapas 1 e 2 relacionam-se com os materiais do leito da estrada. A etapa três refere-se ao levantamento de dados das estradas e dispositivos de drenagem em campo. Por fim, a etapa 4 apresenta a aplicação do modelo ESTRADAS e posterior dimensionamento dos dispositivos de drenagem.

4.1. Ensaios Geotécnicos em Laboratório com Solo Natural

Foram coletadas amostras de solos da jazida utilizada na adequação e manutenção das estradas não pavimentadas da Fazenda Cerro Azul. Aproximadamente 40 kg de material foram armazenados em sacos e, posteriormente, secos ao ar (Figura 16 e Figura 17).



Figura 16 - Transporte das amostras de solo



Figura 17 - Secagem do solo em laboratório

Tais amostras foram encaminhadas ao Laboratório de Mecânica dos Solos da Universidade do Sul de Santa Catarina - UNISUL, campus

Ponte do Imaruí, no município de Palhoça, onde foram realizados os ensaios descritos a seguir.

4.1.1. *Análise granulométrica por sedimentação*

Este ensaio foi realizado de acordo com a NBR 7181/1984. Foram utilizadas amostras de solo em estado natural, com e sem a adição de defloculante Hexa-metafosfato de sódio. Este procedimento foi realizado para a verificação do comportamento do material em campo, ou seja, sem desagregação de sua macroestrutura proveniente da cimentação das partículas finas por óxidos e hidróxidos de ferro.

4.1.2. *Limites de Atterberg*

Os limites de Atterberg ou limites de consistência são um método de avaliação da natureza do solo. O limite de liquidez (LL) é o teor de umidade do solo com o qual se unem, em um centímetro de comprimento, as bordas inferiores de uma canelura feita em uma massa de solo colocada na Concha de Casagrande sob a ação de 25 golpes da concha sobre a base deste aparelho. Em outras palavras, o Limite de Liquidez é o teor em água acima do qual o solo adquire o comportamento de um líquido, sendo expresso em porcentagem. Para a realização deste ensaio foi utilizada a norma NBR 6459/1984.

O Limite de Plasticidade (LP) é o teor de umidade com o qual se consegue fazer um cilindro, com uma pequena massa de solo, de 3 mm de diâmetro com 6 a 10cm de comprimento. Desta forma, o Limite de Plasticidade é o teor de umidade abaixo do qual o solo passa do estado plástico para o estado semi-sólido, ou seja, ele perde a capacidade de ser moldado e passa a ficar quebradiço. Este ensaio foi realizado com base na norma NBR7180/1984.

4.1.3. *Densidade Real dos Grãos*

As amostras de solos foram submetidas ao ensaio de massa específica real dos grãos (δ) de acordo com a Norma NBR-6508/1984.

4.1.4. Ensaio de Compactação

O ensaio de compactação é um procedimento que visa a densificação do solo e, conseqüentemente, a obtenção do peso específico aparente seco ($\gamma_{dm\acute{a}x}$) e da umidade ótima ($\omega_{\acute{o}t}$) para a compactação de um solo. Em outras palavras, este ensaio consiste em compactar uma porção de solo em um cilindro com volume conhecido, fazendo-se variar a umidade de forma a obter o ponto de compactação máxima no qual se obtém a umidade ótima de compactação (Figura 18). A relação do peso específico aparente seco do solo e sua umidade correspondente são apresentadas em forma de uma curva de compactação do solo, onde o ramo ascendente da curva de compactação é conhecido como ramo seco e o ramo descendente como ramo úmido (TRINDADE et al., 2008).

O ensaio pode ser realizado em três níveis de energia de compactação, conforme as especificações da obra: normal, intermediária e modificada. Neste trabalho foram realizados ensaios de compactação na Energia Proctor Normal e Proctor Intermediária, de acordo com a norma NBR 7182/1986.



Figura 18 - Pesagem do cilindro durante o ensaio de compactação

4.1.5. Índice de Suporte Califórnia (ISC ou CBR) e Expansão

O Índice de Suporte Califórnia (ISC ou CBR - *California Bearing Ratio*) é expresso em porcentagem, sendo definido como a relação entre a pressão necessária para produzir uma penetração de um pistão num corpo de prova de solo ou material granular e a pressão necessária para produzir a mesma penetração no material padrão referencial (Figura 19) (BERNUCCI et al., 2007).

Para determinar o Índice de Suporte Califórnia foi utilizada a norma NBR 9895/1987. Foi realizado o ensaio com corpos-de-prova para amostras de solo natural compactadas nas duas energias de compactação (Proctor Normal e Proctor Intermediário).



Figura 19 - Prensa utilizada no ensaio do ISC

4.1.6. *Ensaio Expedito para Classificação MCT - Miniatura Compactado Tropical*

Este método, conhecido também como Ensaio Expedito das Pastilhas MCT, proposto por Nogami e Villibor (1994), permite a classificação do solo, por meio do comportamento de pastilhas moldadas em anéis de aço inox ou PVC de 20 mm de diâmetro interno e 5 mm de altura.

A fração do solo que passa na peneira de 0,42 mm de abertura é umedecida e espatulada até apresentar consistência plástica para posterior moldagem das pastilhas, as quais são postas a secar em estufa ou ao ar livre. A contração é medida pela diferença entre o diâmetro do anel e o diâmetro da pastilha seca. Os anéis contendo as pastilhas de solo são então colocados sobre pedra porosa com livre suprimento de água.

Ao absorver água, são observados fenômenos como inchamento, trincamento e amolecimento. Este último é determinado através da penetração de uma agulha padronizada com massa de 10 g e diâmetro de 1,30 mm.

O ensaio é realizado em quatro anéis e posteriormente é efetuada a média dos valores obtidos. De posse do valor da média da contração e da penetração, estes são locados no gráfico da Figura 20 e determina-se a classificação MCT.

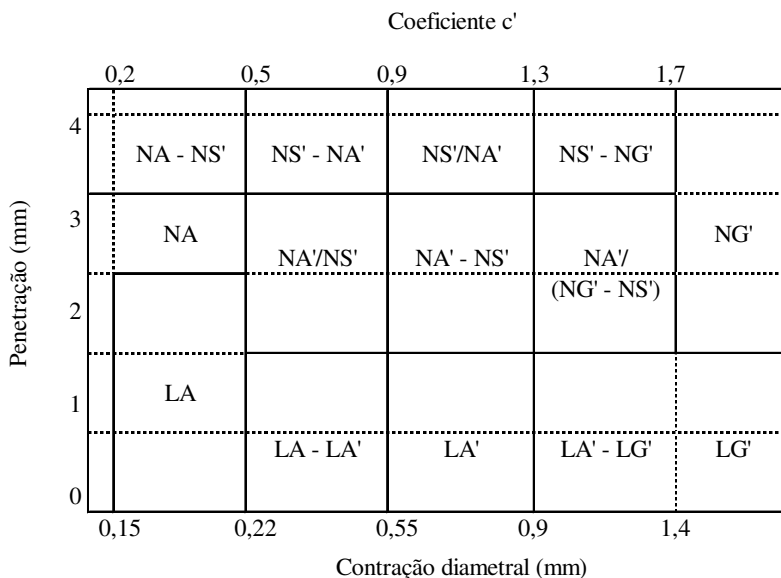


Figura 20 - Gráfico de Classificação MCT

Fonte: Nogami e Villibor (1994)

Este método classifica os solos em duas grandes classes: os lateríticos e os não lateríticos. No total são sete grupos de solos com características distintas quanto ao seu comportamento geotécnico. Os solos lateríticos são subdivididos em areias (LA), arenosos (LA'), argilosos (LG'). Os solos não lateríticos são subdivididos em argilosos (NG'), siltosos (NS'), arenosos (NA') e areias (NA). As principais características destes tipos de solo, segundo Nogami e Villibor (1995) são:

Areias Lateríticas (LA): os solos deste grupo, mesmo quando devidamente compactados, podem ser relativamente permeáveis, pouco coesivos e pouco contráteis quando secos, características estas pouco desejáveis para base de pavimentos econômicos nas regiões tropicais, apesar de possuírem elevada capacidade de suporte e módulos de resiliência relativamente elevados.

Arenosos Lateríticos (LA'): quando devidamente compactados, os solos deste grupo adquirem elevada capacidade de suporte, elevado módulo de resiliência, baixa permeabilidade, pequena contração por

perda de umidade, razoável coesão e pequena expansibilidade por imersão em água. Estas propriedades podem possibilitar o uso em bases e sub-bases de pavimentos.

Lateríticos Argilosos (LG’): quando compactados apropriadamente, estes solos apresentam maior resistência à erosão hidráulica, do que os solos do grupo LA’. Quando apresentam agregados bem desenvolvidos, são altamente permeáveis, apesar de serem granulometricamente argilas e, devido a isto, geram taludes de corte não sujeitos à erosão pluvial.

Areias Não Lateríticas (NA): os solos deste grupo são areias, siltes e misturas de areia e siltes nos quais os grãos são constituídos essencialmente de quartzo e/ou mica. As areias e siltes quartzosos são expansivos ou muito pouco expansivos, enquanto que as variedades micáceas podem ser altamente expansivas. Quando compactados, possuem capacidade de suporte de pequena a média e, geralmente, são muito erodíveis.

Arenosos Não Lateríticos (NA’): Granulometricamente os solos deste grupo são misturas de areias quartzosas com finos passando na peneira de 0,075mm. Quando a areia for bem graduada e a percentagem de finos obedecer às condições estipuladas, os solos deste grupo podem apresentar propriedades adequadas para serem usados como base de pavimentos. Contudo, se a areia for mal graduada e os finos não obedecerem às condições acima, eles podem ser totalmente impróprios para bases de pavimentos.

Argilosos Não Lateríticos (NG’): quando compactados, os solos deste grupo apresentam características das argilas tradicionais muito plásticas e expansivas. O emprego dos solos deste grupo se prende às restrições conseqüentes da sua elevada expansibilidade, plasticidade, compressibilidade e contração, quando submetidos à secagem.

Siltosos Não Lateríticos (NS’): os solos deste grupo caracterizam-se por terem capacidade de suporte baixa, baixo módulo de resiliência, elevada erodibilidade, elevada expansibilidade, elevado coeficiente de absorção e permeabilidade média.

4.2. Ensaio Geotécnicos em Laboratório com Solo-Cal

Com o objetivo de avaliar o comportamento destes solos adotando a estabilização com cal como técnica de estabilização de solos, foi utilizado o Método de Eades e Grim – Método do pH. Este método permite, por meio da determinação do pH de uma mistura de solo, água e porcentagens determinadas de cal, definir o teor ótimo de cal para estabilizar o solo em questão. O menor teor que conduz a um pH de 12,4 é o teor necessário para estabilizar o solo, ou seja, na mistura há cal suficiente para toda a fase rápida e para dar início às reações pozolânicas, as quais consomem mais cal. Para a realização deste ensaio, foram adotados os seguintes procedimentos (CORRÊA, 2008):

1. Colocam-se no interior de recipientes plásticos com tampas de rosca, amostras de solo seco ao ar, passando na peneira n° 40. A quantidade de solo deve ser tal a garantir um peso de solo seco de 20 g;
2. Adicionar ao solo seco, teores de cal de 0%, 1%, 2%, 3%, 4%, 5%, 6% , 7% e 8%. Misturar o solo seco e a cal;
3. Acrescentar 100 ml de água destilada às misturas de solo-cal (Figura 21);
4. Agitar as misturas, pelo menos durante 30 segundos, até completa homogeneização;
5. Agitar as garrafas por um período de 30 segundos, a cada 10 minutos;
6. Após uma hora, transferir a “lama” a um recipiente de plástico aberto e determinar o pH. O pHmetro (medidor de pH) deve ser calibrado com uma solução de pH igual a 12;
7. Registrar o pH de cada mistura solo-cal. O menor teor que conduz a um pH de 12,4 é o teor necessário para estabilizar o solo, ou seja, na mistura há cal suficiente para toda a fase rápida e para dar início às reações pozolânicas, as quais consomem mais cal.



Figura 21 – Exemplos de Misturas Solo-Cal

Após a determinação do teor ótimo de cal, os ensaios foram feitos para três teores de cal acima do teor ótimo e três teores de cal abaixo do teor ótimo encontrado. Foi utilizada neste estudo cal cálcica hidratada (CH-I).

Os ensaios realizados nestes casos foram:

- (i) Análise granulométrica por sedimentação após compactação: ABNT 7181/1984;
- (ii) Ensaio de Compactação: NBR 7182/1986
- (iii) Índice de Suporte Califórnia (ISC) e Expansão: NBR 9895/1987;
- (iv) Ensaio Expedito para Classificação MCT (Miniatura Compactado Tropical (Método das Pastilhas): Nogami e Villibor (1994).

4.3. Levantamento dos Dispositivos de Drenagem em Campo

Com o auxílio de uma máquina fotográfica, uma trena e um aparelho GPS (*Global Positioning System*), da marca Garmin, foi feito o levantamento em campo das estradas e do dimensionamento dos dispositivos de drenagem adotados pela empresa nas estradas da Fazenda Cerro Azul (Figura 22). Após a inserção destes dados no

Google Earth, foi utilizada a ferramenta para verificação das distâncias entre as bacias de acumulação adotadas nas estradas.



Figura 22 - Estrada na Fazenda Cerro Azul

4.4. Aplicação do Modelo ESTRADAS

4.4.1. *Dados Referentes à Estrada*

Os dados de entrada no modelo ESTRADAS podem ser divididos em quatro segmentos: leito da estrada, área externa à estrada, canal da estrada e características do solo (Figura 23).

The screenshot shows the 'Estradas' software interface with the following sections and fields:

- Menu:** Arquivo, Configurações, Ajuda
- Toolbar:** Includes icons for file operations, help, and specific road analysis tools.
- Section Selection:** Three radio buttons for 'Seção 1', 'Seção 2', and 'Seção 3'. 'Seção 1' is selected.
- Leito da estrada (Road Bed):**
 - Taxa de infiltração estável: [] mm/h
 - Declividade transversal: [] m/m
 - Semi-largura: [] m
 - Rugosidade: []
- Área externa (External Area):**
 - Taxa de infiltração estável: [] mm/h
 - Declividade: [] m/m
 - Comprimento: [] m
 - Rugosidade: []
 - Buttons: Cobertura vegetal, Valores de rugosidade
- Canal da estrada (Road Channel):**
 - Tipo: Triangular (dropdown)
 - Declividade: [] m/m
 - Comprimento: [] m
 - Aprofundamento máximo: [] cm
 - Rugosidade: []
 - Buttons: Valores de rugosidade do canal
- Solo (Soil):**
 - Tensão crítica: [] Pa
 - Massa específica: [] g/cm³
 - Erodibilidade: [] g/cm².min.Pa
- Inputs:** m1 [] m2 []
- Buttons:** Ajuda, Calcular

Figura 23 – Tela de entrada dos dados referentes à estrada

4.4.1.1. Leito da Estrada

Por meio dos levantamentos realizados em campo, observaram-se os tipos de seção transversal mais utilizados na construção e adequação das estradas não pavimentadas da área de estudo. Os dois tipos analisados correspondem à seção 1 e seção 3 (Figura 24). A seção transversal 1 corresponde à estrada com área de contribuição externa ao leito da estrada. Já na seção transversal 3, não há área de contribuição externa, sendo os dispositivos de drenagem dimensionados somente pela área de contribuição do próprio leito da estrada.

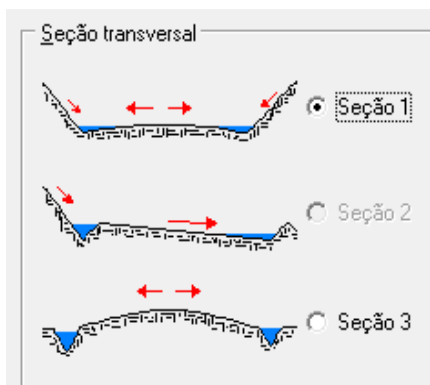


Figura 24 – Detalhe da tela de entrada de seleção do tipo de seção transversal

Entre os dados de entrada do modelo, em relação às características do leito da estrada (Figura 25), está a taxa de infiltração estável no leito da estrada. Segundo estudos anteriores, estas taxas apresentam-se baixas em leitos de estradas não pavimentadas, em função da compactação do solo. Elliot et al. (1999) obtiveram taxas de infiltração menores que 1 mm.h^{-1} . Estes autores citam valores de taxas de infiltração entre $0,1$ a $0,5 \text{ mm.h}^{-1}$ em estradas com solos naturais e valores próximos a 3 mm.h^{-1} para estradas encascalhadas. Neste trabalho, a taxa de infiltração estável foi definida como 1 mm.h^{-1} .

Leito da estrada

Taxa de infiltração estável mm/h

Declividade transversal m/m

Semi-largura m

Rugosidade

Figura 25 – Detalhe da tela de entrada de dados sobre o leito da estrada

A declividade transversal (m/m) do leito da estrada, observada durante o levantamento de campo, foi definida como sendo 0,02 m/m na maior parte das estradas da área de estudo. Além disso, a semi-largura das estradas corresponde, em média, a 3m.

O leito das estradas não pavimentadas apresenta características semelhantes aos canais de terra limpos, porém já tendo sofrido intemperismo. Desta forma, o valor adotado para a rugosidade no leito da estrada foi igual a $0,022 \text{ s.m}^{-1/3}$, conforme banco de dados do modelo ESTRADAS, que utiliza valores de rugosidade propostos por Chow (1986).

4.4.1.2. Área Externa à Estrada

Em relação à área externa ao leito da estrada (Figura 26), observou-se, em função dos serviços de bordadura, a predominância de algumas características, tais como comprimento médio de 5 m, com declividade de 0,4 m/m e cobertura vegetal variando entre rasteira e solo com muitos resíduos, após os serviços de manutenção das estradas. Além disso, há também áreas de contribuição com predominância de floresta em idade adulta. Neste caso, foi considerado um comprimento médio desta área de 20 m. Os três tipos de cobertura associados às áreas externas à estrada foram avaliados nos trechos de estrada apresentados a seguir. A rugosidade nesses três tipos de cobertura, segundo o banco de dados do modelo ESTRADAS, corresponde a $0,08 \text{ s.m}^{-1/3}$ nos trechos com pouca cobertura, $0,150 \text{ s.m}^{-1/3}$ nos trechos sem preparo e com muitos resíduos e, $0,200 \text{ s.m}^{-1/3}$, nos trechos com áreas de reflorestamento em idade adulta.

Área externa

Taxa de infiltração estável mm/h

Declividade m/m

Comprimento m

Rugosidade

Cobertura vegetal Valores de rugosidade

Figura 26 – Detalhe da tela de entrada de dados da área externa à estrada

A obtenção das taxas de infiltração estável nas áreas externas à estrada foi feita com base em estudos realizados por Grandó et al. (2009) para determinação das áreas suscetíveis à erosão dentro de uma microbacia experimental em uma fazenda de reflorestamento de pinus no município de Rio Negrinho – SC, próximo à área de estudo em questão, onde o solo foi classificado como Cambissolo. Foram analisados 13 diferentes locais, com variações no tipo de solo e cobertura vegetal. Com base nos ensaios do Critério de Erodibilidade MCT, os autores realizaram os ensaios de infiltrabilidade e perda de massa por imersão modificado.

O ensaio de infiltrabilidade, conforme Nogami e Villibor (1995), tem como objetivo mensurar a velocidade e a quantidade de água que penetra no solo, através de uma simulação em laboratório. Esta consiste em recolher um corpo de prova cilíndrico de PVC (altura de 5 cm e diâmetro de 5 cm), determinar sua umidade e colocá-lo sobre um papel filtro em cima de uma pedra porosa submersa em água e dentro de um recipiente. Este tem ligação com um tubo capilar horizontal (6 mm de diâmetro) contendo água em seu interior, nivelado com a parte superior da pedra porosa, no qual serão realizadas as leituras de absorção de água (Figura 27). No decorrer do ensaio foram feitas medições nos intervalos de tempo (1, 2, 4, 9, 16, 25, 36, 49, 64 minutos e assim por diante), até acontecer a estabilização do movimento. Por fim foi gerado um gráfico com os dados das medições de tempo pela distância percorrida pela água no tubo capilar (HIGASHI, 2006).

Com base nos resultados obtidos nos ensaios de infiltrabilidade, foi determinada a taxa de infiltração estável para áreas com vegetação rasteira, sendo este valor igual a 24 mm.h^{-1} , taxa de infiltração estável de 14 mm.h^{-1} , para solo exposto e 136 mm.h^{-1} em áreas de plantio de pinus em idade adulta.



Figura 27 – Ensaio de Infiltrabilidade

4.4.1.3. *Canal da Estrada*

Em relação ao canal de drenagem, as informações referentes ao tipo de canal (triangular ou trapezoidal), declividade (m.m^{-1}) e comprimento do canal (m) foram verificados durante levantamentos de campo. Os canais das estradas da área de estudo correspondem ao tipo triangular, com o dimensionamento conforme as definidas em m1 e m2 (Figura 28). Esta inclinação é definida pelo operador de motoniveladora durante os serviços de adequação ou manutenção das estradas. As declividades analisadas nos trechos são $0,02 \text{ m.m}^{-1}$, $0,06 \text{ m.m}^{-1}$ e $0,12 \text{ m.m}^{-1}$, ou seja, são as declividades predominantes nas estradas da área de estudo (Figura 29). O aprofundamento máximo tolerável (cm) foi estabelecido de acordo com os valores citados por Pruski et al. (2006), sendo definido como 5 cm.

Canal da estrada

Tipo

Declividade m/m

Comprimento m

Aprofundamento máximo cm

Rugosidade

Valores de rugosidade do canal

N.A.

m1 m2

O diagrama mostra um canal triangular com um nível de água (N.A.) representado por uma linha azul. As margens do canal são indicadas por m1 e m2, e a profundidade máxima é indicada por um '1' em vermelho. O canal está representado em um plano inclinado com hachuras.

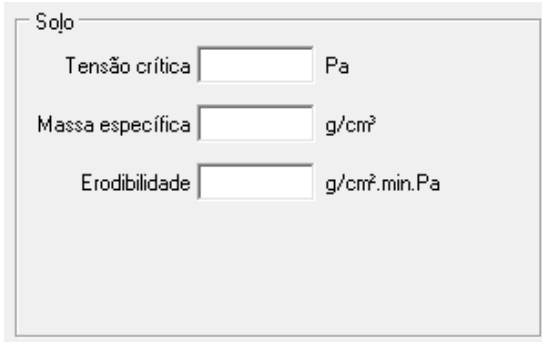
Figura 28 – Detalhe da tela de entrada de dados referentes ao canal da estrada



Figura 29 – Foto do canal da estrada da área de estudo

4.4.1.4. Características do Solo

Entre as características do solo solicitadas pelo modelo ESTRADAS estão: tensão crítica de cisalhamento do solo, massa específica e erodibilidade (Figura 40).



Solo		
Tensão crítica	<input type="text"/>	Pa
Massa específica	<input type="text"/>	g/cm ³
Erodibilidade	<input type="text"/>	g/cm ² .min.Pa

Figura 30 – Detalhe da tela de entrada de dados do solo da estrada

Tensão Crítica Cisalhante do Solo

A tensão crítica de cisalhamento dos solos devido ao escoamento superficial pode ser entendida como a máxima tensão que pode ser aplicada ao solo sem que haja desagregação de suas partículas (GRIEBELER, 2002).

Existem métodos diretos e indiretos para determinação da tensão crítica cisalhante do solo. Entre os métodos diretos, onde são utilizados procedimentos que permitem acompanhar a variação da tensão aplicada pelo escoamento e da quantidade de solo desprendida. Entre estes métodos, pode-se citar os canais hidráulicos, que consistem em passar uma lâmina de água, com tensão cisalhante conhecida, sobre uma amostra de solo ou diretamente sobre o terreno. Um exemplo deste método é o Ensaio de Inderbitzen (Figura 31), onde a perda de solo é determinada por meio de um equipamento onde uma amostra indeformada de solo é colocada em um plano de inclinação variável por onde passa um fluxo de água com vazão controlada (BASTOS, 1999). 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 (GRIEBELER, 2002).

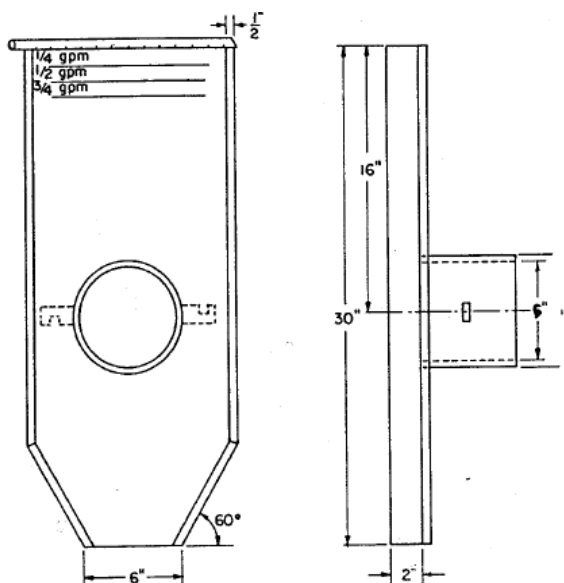


Figura 31 – Equipamento do Ensaio Inderbitzen – Concepção original
 Fonte: Inderbitzen (1961)¹ apud Bastos (1999)

Entre os métodos indiretos, a determinação da tensão crítica cisalhante do solo baseia-se em características do solo, tais como Limites de Atterberg, grau de compactação do solo, etc.

Neste trabalho, a tensão crítica cisalhante do solo foi determinada por um método indireto utilizado por HEC-15 (*Hydraulic Engineering Circular* n.º 15) (1988). Para materiais coesivos a tensão crítica de cisalhamento do solo é obtida utilizando o índice de plasticidade (IP) com base nas seguintes equações:

Para solo não compactado

$$\tau_c = 0,1628 \cdot IP^{0,840} \quad (12)$$

Para solo medianamente compactado

$$\tau_c = 0,2011 \cdot IP^{1,071} \quad (13)$$

¹ INDERBITZEN, A.L. An erosion test for soils. *Materials Research & Standards*, Philadelphia, v.1, n.7, p.553-554, 1961.

Para solo compactado

$$\tau_c = 0,2729 \cdot IP^{1,260} \quad (14)$$

Na Tabela 3 é apresentado o critério utilizado por HEC-15 para o enquadramento do solo nos diferentes níveis de compactação.

Tabela 3- 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 65 kg caindo de uma altura de 75 cm.

Na Figura 32 é apresentado um gráfico indicando a variação da tensão cisalhante com IP para as diferentes condições de compactação do solo.

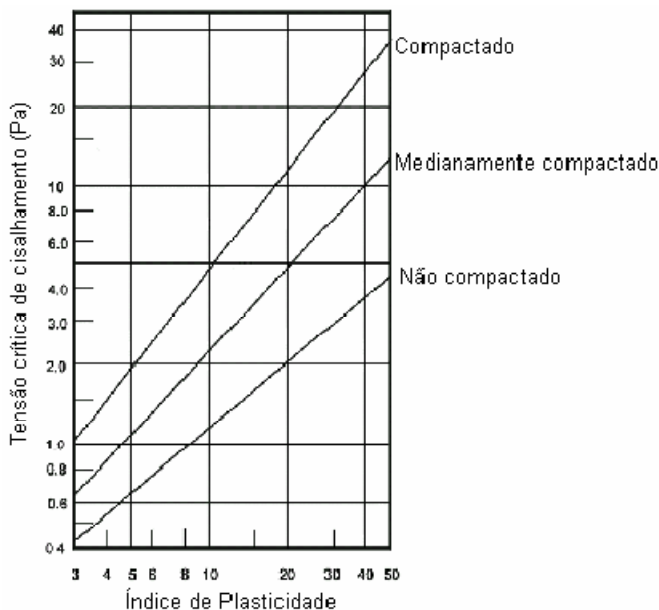


Figura 32 – Tensões críticas de cisalhamento - τ_c (Pa) para materiais coesivos

Neste trabalho, a tensão cisalhante crítica (τ_c) foi determinada por meio da Equação 14, na qual o solo da estrada foi considerado compactado, correspondendo a 9,04 Pa.

Massa específica aparente do solo

A massa específica aparente úmida do solo (γ_h) foi determinada em campo por meio do Ensaio Frasco de Areia (NBR 7185/1986). Esse método é uma maneira prática de se determinar a massa específica aparente em campo. Utilizou-se um frasco de areia ao qual se adapta um funil munido de um registro (Figura 33). Colocou-se a bandeja nesta superfície e fez-se uma cavidade cilíndrica no solo com diâmetro igual ao furo da bandeja e profundidade de cerca de 15 cm. Após ter-se escavado um volume determinado no solo, encheu-se o buraco resultante com areia de densidade conhecida contida no frasco. Comparando o peso necessário para encher o buraco com o peso da amostra escavada, obteve-se a massa específica aparente do solo naquele ponto.



Figura 33 – Conjunto frasco e funil utilizado no Ensaio Frasco de Areia

Este ensaio foi realizado em três pontos diferentes dentro da área de estudo (Figura 34). Em dois pontos obteve-se o valor de massa específica úmida (γ_h) igual a $1,33 \text{ g.cm}^{-3}$. No outro ponto, obteve-se o valor de $1,83 \text{ g.cm}^{-3}$. Neste último ponto observou-se a presença de grande quantidade de matéria orgânica, sendo este valor descartado.



Figura 34 – Realização do ensaio Frasco de Areia

Erodibilidade do solo

A erodibilidade do solo, sob condições de escoamento superficial corresponde à quantidade de solo desprendido por unidade de área, tempo e de tensão aplicada. 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 (NOGAMI E VILLIBOR, 1995).

Alguns trabalhos já foram realizados em relação a valores de erodibilidade do solo em canais de drenagem. Tais valores variam de 0,001 a 0,008 $\text{g.cm}^{-2}.\text{min}^{-1}.\text{Pa}^{-1}$, como cita Griebeler (2002). A erodibilidade do solo na foi definida com base na literatura, em trabalho publicado por Morfin et al.² (1996) *apud* Griebeler (2002). Neste estudo foi obtido um valor de erodibilidade de 0,0036 $\text{g.cm}^{-2}.\text{min}^{-1}.\text{Pa}^{-1}$ para solos com elevado teor de silte sob condições de estrada, características estas semelhantes às condições deste estudo.

² Morfin, S.; Elliot, B. W.; Foltz, R.; Miller, S., Predicting effects of climate, soil, and topography on road erosion with the WEPP model. ASAE Annual International Meeting 1996, St. Joseph. Missouri: ASAE. 1996. 12p.

4.4.2. Dados referentes às bacias de acumulação

As bacias de acumulação ou caixas de contenção consistem em uma técnica de armazenamento de água oriunda dos canais de drenagem, com o intuito de reduzir a velocidade de escoamento da água e aumentar a infiltração de água no solo, abastecendo o lençol freático.

Neste campo do *software* são solicitadas informações sobre o canal de condução, que incluem o tipo do canal (trapezoidal ou triangular), e declividade ($m.m^{-1}$), além do formato das bacias de acumulação (retangular ou semi-circular) e a profundidade (m) (Figura 35). Estas informações foram obtidas com base nas informações obtidas durante levantamentos de campo da área de estudo.

Figura 35 – Tela de entrada dos dados referentes às bacias de acumulação

O tipo de canal de condução mais observado nas estradas da área de estudo corresponde ao tipo trapezoidal, executado com auxílio de retro-escavadeira. Desta forma, o dimensionamento dos dispositivos de drenagem, por meio do modelo, será realizado com base neste tipo de canal de condução. O dimensionamento destes canais pela empresa é baseado na largura da concha da retro escavadeira, ou seja, 0,80 m, no entanto a base dos canais da área de estudo apresenta-se com 0,60 m de largura e com cerca de 70° de inclinação (Figura 36). De acordo com

medições realizadas, em geral os canais de condução apresentam declividade de $0,05\text{m}\cdot\text{m}^{-1}$.

Canal de condução

Tipo

N.A.

B

Z

B 0.60 m Z 0.25 ...

Rugosidade Declividade

Valores de rugosidade do canal

Figura 36 – Detalhe da tela de entrada dos dados do canal de condução

O valor de rugosidade adotado corresponde à um canal de condução limpo, mas já tendo sofrido intemperismo, sendo este valor igual a $0,022\text{ s}\cdot\text{m}^{-1/3}$, segundo Chow (1986) (Figura 37).



Figura 37 – Detalhe do canal de condução à bacia de acumulação

Em relação às bacias de acumulação, de acordo com o levantamento de campo, estas possuem formato retangular, com profundidade de 1 m, apresentando, em geral, o dimensionamento a seguir (Figura 38).

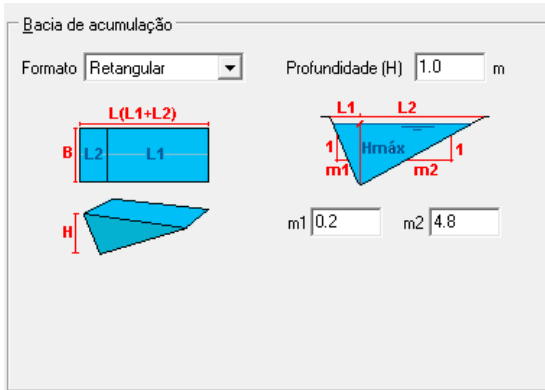


Figura 38 – Dimensionamento das bacias de acumulação

4.4.3. *Dados referentes à precipitação*

O modelo ESTRADAS necessita de dados referentes ao período de retorno e dados da equação Intensidade-Duração-Frequência (IDF) do local de estudo (Figura 39).

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 (GRIEBELER, 2002). Neste trabalho, o período de manutenção das estradas não pavimentadas foi considerado como 2 anos, sendo este o menor período de retorno considerado pelo modelo ESTRADAS.

Figura 39 – Tela de entrada dos dados referentes à precipitação

Segundo Back (2002), para a caracterização das chuvas deve-se considerar as seguintes grandezas:

Altura Pluviométrica (h)

É o volume de água precipitado por unidade de área. Geralmente é expressa em milímetros (mm), sendo que um milímetro de chuva corresponde ao volume de um litro por metro quadrado de área (L/m^2).

Duração (t)

Corresponde ao intervalo de tempo decorrido entre o início e o término da precipitação. Normalmente expresso em minutos ou hora.

Intensidade (i)

É definida como a relação entre a altura (h) e a duração (t) da chuva. Geralmente é expressa por milímetros/minuto ou milímetros/hora.

Frequência (F)

É dada pelo número de ocorrência de determinado valor de precipitação num intervalo de tempo. Para a aplicação em engenharia, a frequência da chuva é definida preferencialmente pelo período de retorno (T), medido em anos, significando que um evento de chuva com duração (t) e intensidade (i) será igualado ou superado, em média, uma vez a cada T anos.

O estudo das relações intensidade-duração-frequência (IDF) das precipitações intensas é de grande interesse nos trabalhos de hidrologia devido à sua aplicação na estimativa de vazões para o dimensionamento de obras de engenharia, tais como vertedores de barragens, bueiros, terraços, canais de drenagem, etc. (Back, 2000).

Os parâmetros da equação IDF para o município de Rio Negrinho, no qual a maior parte da área de estudo está inserida, foram obtidos por meio de um estudo já realizado por Back (2002). Os parâmetros obtidos para a estação pluviométrica do município de Rio Negrinho (Código 02649055) são:

$$K = 1.241,6$$

$$m = 0,1792$$

$$b = 20,9$$

$$n = 0,7869$$

4.5. Estudo de Caso: Fazenda Cerro Azul

Foram avaliados quatro trechos de estrada não pavimentada pertencentes à Fazenda Cerro Azul. Estes trechos foram escolhidos devido à repetição de suas características dentro da fazenda, tais como mesmo tipo de seção transversal, características da área de contribuição externa semelhantes, mesma declividade, etc.

Estes trechos foram definidos em campo, com o auxílio de trena, nível de bolha e análise visual da cobertura vegetal presente nas áreas de contribuição.

4.5.1. Definição do trecho de estrada 1

O trecho de estrada definido como Trecho 1 corresponde ao trecho com área de contribuição externa à estrada com 5 metros de comprimento, correspondendo à bordadura da estrada (Figura 40). A bordadura das estradas da empresa é realizada com o corte das árvores localizadas na segunda ou terceira linha de plantio a partir da estrada. Este serviço tem como objetivo a redução da umidade do leito da estrada, além de uma maior proteção contra a propagação de incêndios nas áreas de plantio. A cobertura vegetal característica deste trecho corresponde à vegetação rasteira.



Figura 40 – Caracterização visual do Trecho 1

4.5.2. Definição do trecho de estrada 2

O trecho de estrada definido como Trecho 2 corresponde ao trecho com área de contribuição externa estrada com 5 metros de comprimento. No entanto, esta área apresenta solo exposto, sem preparo, com muito resíduo (Figura 41).



Figura 41 – Caracterização visual do Trecho 2

4.5.3. Definição do trecho de estrada 3

O trecho de estrada definido como Trecho 3 corresponde ao trecho sem área externa de contribuição, ou seja, só haverá contribuição do próprio leito da estrada (Figura 42).



Figura 42 – Caracterização visual do Trecho 3

4.5.4. Definição do trecho de estrada 4

O trecho de estrada definido como Trecho 4 corresponde ao trecho com área de contribuição externa estrada com 20 metros de comprimento, caracterizando-se por ter cobertura vegetal com reflorestamento em idade adulta (Figura 43).



Figura 43 – Caracterização visual do Trecho 4

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Caracterização Geotécnica do Solo da Jazida Cerro Azul

5.1.1. Teor de Umidade Natural

Conforme os ensaios realizados em laboratório, a amostra de solo coletada na jazida Cerro Azul apresentou teor de umidade de 13,90%.

5.1.2. Análise Granulométrica

A Figura 44 apresenta as curvas granulométricas do solo natural, com e sem a utilização de defloculante, na fração fina, para os solos da jazida Cerro Azul.

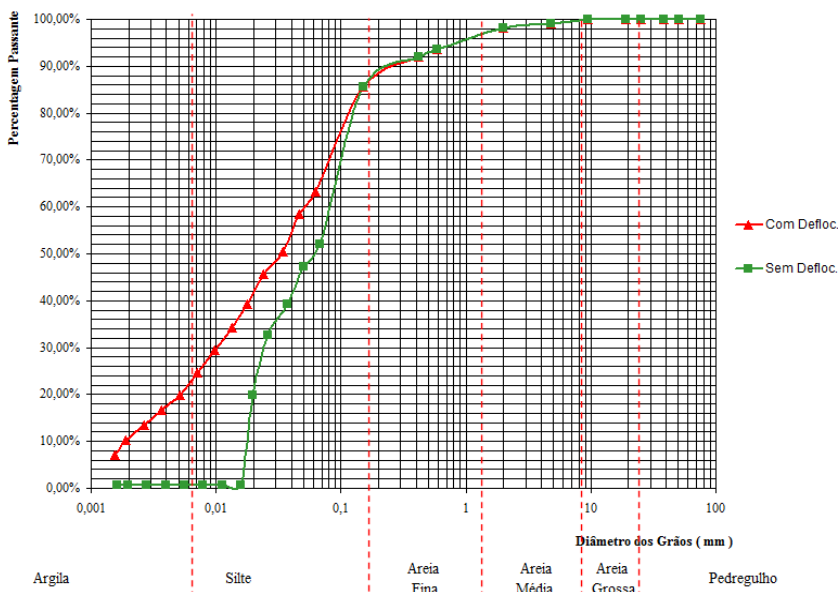


Figura 44 - Granulometria do solo com e sem defloculante

Os valores da granulometria do solo são mostrados na Tabela 4.

Tabela 4- Granulometria Cerro Azul

Granulometria	Com Defloculante	Sem Defloculante
Argila	19,67%	0,64%
Silte	57,52%	76,55%
Areia Fina	14,79%	14,79%
Areia Média	6,10%	6,10%
Areia Grossa	1,11%	1,11%
Pedregulho	0,81%	0,81%

Observou-se uma considerável variação em relação à porcentagem de argila e silte quanto à adição ou não de defloculante, sendo que a porcentagem de argila foi maior com a utilização do defloculante. Isto se deve a uma maior defloculação dos agregados de solo. Estes resultados demonstraram a diferença entre o comportamento do solo em campo e quando analisado em laboratório. Isso porque o solo *in situ* possui a estrutura formando os torrões ou grumos.

5.1.3. Densidade Real dos Grãos

A densidade real dos grãos, obtida por meio do método do Picnômetro, encontra-se na Tabela 5.

Tabela 5 - Densidade real dos grãos

Picnômetro N ^o	Picnômetro + Água (g)	T (°C)	Picnômetro +Solo+Água (g)	Solo Seco (g)	Água Desloc. (g)	δ (g/cm ³)
1	1.184,60	22	1.246,00	105,35	43,95	2,397

5.1.4. Limites de Atterberg

A partir dos resultados encontrados nesse ensaio e no ensaio de granulometria é possível classificar o solo, segundo a classificação HRB e SUCS (Tabela 6).

Pela classificação HRB (*Highway Research Board*) – Sistema Rodoviário de Classificação, o solo da jazida Cerro Azul caracteriza-se como argiloso (A-7-6), sendo este inadequado como camada de um pavimento. Para a classificação SUCS – Sistema Unificado de Classificação do Solo, a jazida Cerro Azul caracteriza-se como solo argiloso pouco plástico (CL).

Tabela 6 - Classificação HRB e SUCS

Limite Liquidez	35,70
Limite Plasticidade	19,60
Índice de Plasticidade	16,10
% Passante Peneira 4 (4,8mm)	99,19
% Passante Peneira 10 (2,0mm)	98,08
% Passante Peneira 40 (0,42mm)	91,98
% Passante Peneira 200 (0,075mm)	77,19
Índice de Grupo	15,9
Classificação HRB	A-7-6
Classificação SUCS	CL

5.1.5. Ensaio de Compactação

O ensaio de compactação com utilização do solo natural foi realizado com a energia de compactação Proctor Normal e os resultados são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Resultados do ensaio de compactação

ω (%)	γ_d (kN/m ³)
17,10	14,80
19,40	15,62
20,90	15,91
23,00	15,64
25,07	15,10

Com os valores obtidos foi elaborado um gráfico com os pontos encontrados e traçada uma linha de tendência que é apresentada na Figura 45.

A partir da curva pode-se estimar o valor da umidade ótima ($\omega_{ót}$), que caracteriza o teor de umidade que resultará em um solo com melhor resistência às cargas. Estima-se que a umidade ótima esteja próxima a 20,9% e o peso específico aparente seco máximo apresente valor próximo a 15,92 kN/m³.

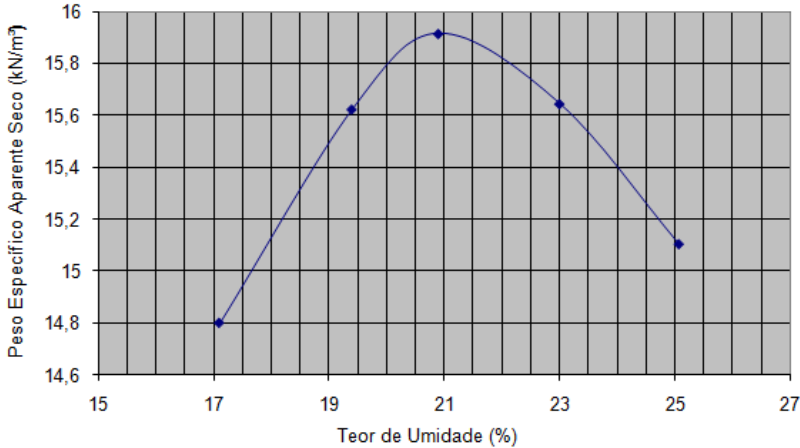


Figura 45 - Curva de compactação

5.1.6. Índice de Suporte Califórnia - ISC

Após a determinação da umidade ótima do solo, por meio do ensaio de compactação, foi possível realizar o ensaio do Índice de Suporte Califórnia (Tabela 8). Para o ensaio com imersão, realizado a fim de reproduzir a condição mais desfavorável, o tempo de cura foi de quatro dias imerso em água.

Com Imersão	21%
Sem Imersão	23%

Os valores obtidos estão na faixa de 20% a 42%, valores que segundo o método de dimensionamento de pavimentos flexíveis, proposto por Murillo Lopes de Souza e regulamentado pelo DNER em 1979 (SOUZA, 1981), poderiam ser utilizados como material de sub-base.

5.1.7. Ensaio de Expansão

Outro parâmetro analisado foi a expansão do solo quando em contato com a água, resultado esse obtido juntamente com o ensaio do ISC. O valor de expansão obtido foi 0,62%.

5.2. Caracterização Geotécnica do Solo Melhorado com Cal

5.2.1. Determinação do Teor Ótimo de Cal

A determinação do teor ótimo de cal com o intuito de melhorar suas características foi realizada de acordo com o Método Eades e Grim – Método do pH. Na Tabela 9 estão apresentados os teores de cal avaliados e seus respectivos valores de pH obtidos, sendo o teor de cal ideal aquele que obter valor de pH igual a 12,4, ou seja, 7%.

Tabela 9 - Valores de pH obtidos

Cal	Cerro Azul (pH)
0%	5,8
1%	8,8
2%	10,2
3%	11,6
4%	12,0
5%	12,2
6%	12,3
7%	12,4
8%	12,5

A Figura 46 apresenta o gráfico obtido a partir do ensaio de dosagem de cal para estabilização do solo.

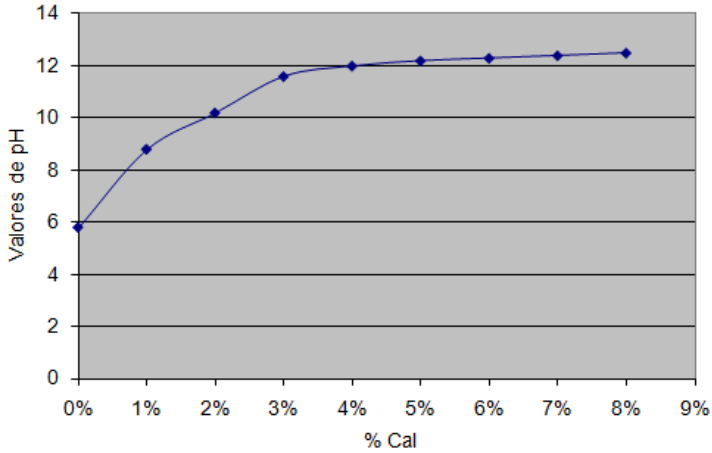


Figura 46 – Resultados de pH obtidos por meio do Método Eades e Grim

5.2.2. Ensaio de Compactação

Nesse ensaio, utilizando a energia de compactação Proctor Normal, foi encontrada a umidade ótima e a densidade aparente seca máxima do solo com diferentes teores de cal. As curvas de compactação são apresentadas na Figura 47.

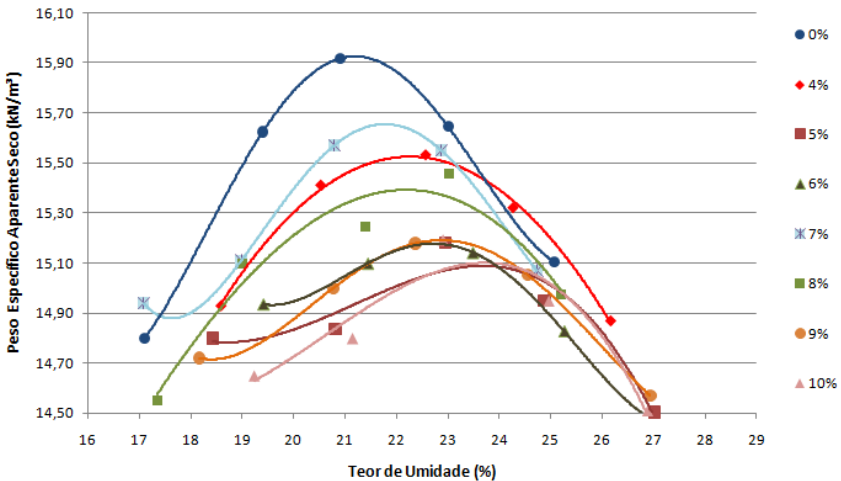


Figura 47 - Curva de compactação – Solo melhorado com cal

Por meio da análise das curvas de compactação apresentadas na Figura 47, foi obtida a relação entre o teor de cal, a umidade ótima e a densidade aparente seca máxima (Tabela 10).

Tabela 10-Umidade ótima e densidade aparente seca máxima

% Cal	Umidade Ótima	Densidade Máxima
	$\omega_{ót}$ (%)	$\gamma_{dmáx}$ (kN/m ³)
0%	21,30	15,92
4%	22,20	15,53
5%	23,90	15,08
6%	22,70	15,17
7%	21,80	15,65
8%	22,10	15,38
9%	22,90	15,20
10%	23,50	15,11

Os resultados da densidade seca máxima para as amostras de solo estabilizadas com cal foram inferiores ao da densidade seca máxima obtida com o solo natural. Atribui-se este comportamento ao maior teor de umidade necessário para a obtenção da respectiva densidade seca máxima das amostras de solo-cal e também às partículas de cal (cuja massa específica geralmente varia entre 22 e 24 kN/m³), substituindo uma parcela dos grãos de massa específica superior. Cabe salientar, que a cal hidratada é ávida por água e possui propriedade de retenção de água elevada.

Para o teor de cal ótimo (7%) foram executados os ensaios de compactação com as Energias Proctor Normal e Proctor Intermediário, a fim de verificar quais mudanças ocorreriam e a sua magnitude (Tabela 11).

Tabela 11 - Umidade e densidade aparente seca – Energia Proctor Normal e Intermediária

Proctor Normal		Proctor Intermediário	
Umidade %	γ_d (kN/m ³)	Umidade %	γ_d (kN/m ³)
17,08	14,94	18,59	15,18
18,98	15,11	20,46	15,63
20,79	15,57	22,84	15,92
22,87	15,55	24,31	15,52
24,73	15,07	26,40	14,90

Com os valores da Tabela 11 foram construídas as curvas de compactação (Figura 48).

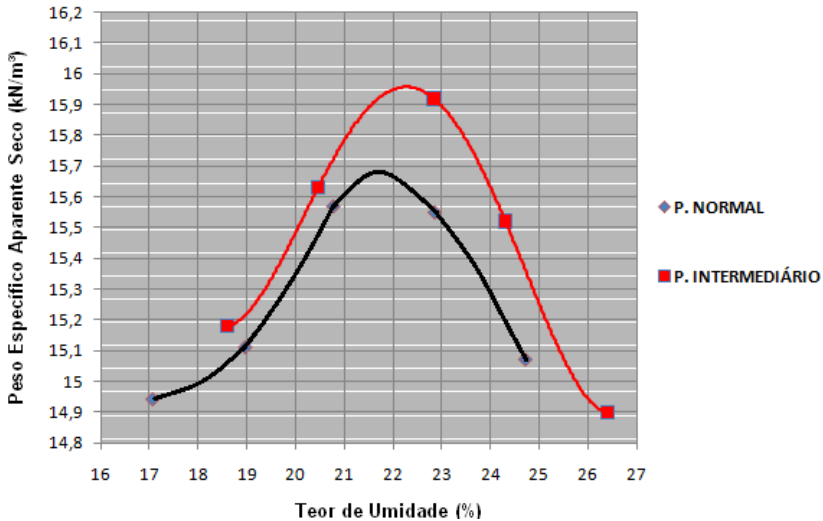


Figura 48 - Curva de Compactação – Proctor Normal e Proctor Intermediário (7% cal)

Por meio do gráfico pode-se estimar os valores de umidade ótima e densidade aparente seca máxima para as diferentes energias (Tabela 12).

Tabela 12 - Umidade ótima x Densidade Aparente Seca Máxima Cerro Azul (7% cal)

Cerro Azul 7%	Proctor Normal	Proctor Intermediário
Umidade Ótima (%)	21,80	22,30
Densidade Aparente Seca Máxima (kN/m ³)	15,67	15,95

5.2.3. Índice de Suporte Califórnia - ISC

Os resultados do ensaio CBR (Tabela 13) permitem avaliar se a estabilização do solo com o auxílio d cal foi bem sucedida ou não, de acordo com a capacidade do solo de resistir ou não às cargas solicitadas.

Tabela 13 - CBR com e sem imersão utilizando teores de cal

% Cal	CBR Com Imersão	CBR Sem Imersão
0%	21	23
4%	27	39
5%	34	44
6%	68	54
7%	69	59
8%	104	54
9%	85	41
10%	60	36

Este ensaio apresentou uma variação positiva até certo ponto e depois uma variação negativa, demonstrando que o excesso de cal pode prejudicar o solo ao invés de estabilizá-lo (Figura 49).

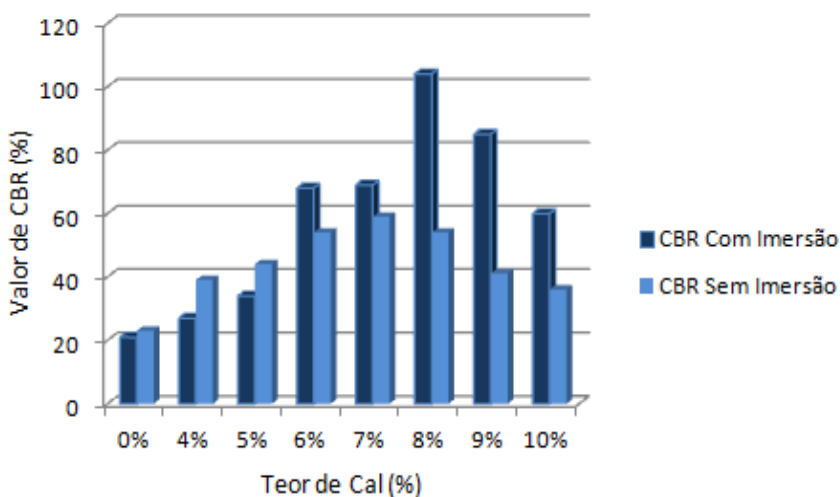


Figura 49 – Resultados do Ensaio CBR com e sem imersão

O ensaio CBR permitiu a verificação da melhoria da resistência mecânica do solo após a adição de cal hidratada, sendo satisfatório com 6% de cal, 1 % a menos que o recomendado pelo método do pH.

5.2.4. Ensaio de Expansão

Nas duas energias de compactação adotadas (Proctor Normal e Intermediário), utilizando 7% de cal, obteve-se uma redução no valor de expansão em relação ao solo natural, sendo estes valores iguais a 0,01%. Esta redução nas características de expansão é geralmente atribuída a uma diminuição da afinidade com água dos solos saturados pelo íon cálcio e pela formação de uma matriz cimentante que resiste à expansão volumétrica (MOORE et al, 1987).

5.2.5. Avaliação da erosão por meio dos Ensaio da Metodologia MCT - Método Expedito das Pastilhas

O resultado deste ensaio possibilitou a análise do solo em questão como um parâmetro para a caracterização do mesmo. Pela classificação MCT o solo da jazida Cerro Azul foi classificado como solo Siltooso – Arenoso – Não Laterítico (NS'-NA').

Os solos classificados como Não Laterítico não apresentam um bom comportamento em seu estado compactado. Os solos deste grupo caracterizam-se por terem capacidade de suporte baixa, baixo módulo de resiliência, elevada erodibilidade, elevada expansibilidade, elevado coeficiente de absorção e permeabilidade média.

Após a adição de cal ao solo, este passou a ser classificado como Laterítico nas misturas com teores de cal acima do estabelecido pelo método do pH como sendo o teor ótimo (7%) (Tabela 14).

Tabela 14 – Resultados do Ensaio de Classificação MCT

Cal	Penetração	Contração	Classificação MCT
0%	5,0mm	0,8mm	NS' - NA' – Siltooso - Arenoso Não Laterítico
4%	4,0mm	0,4mm	NS'-NA' – Siltooso - Arenoso Não Laterítico
5%	3,0mm	0,3mm	NA-NS' - Arenoso – Siltooso Não Laterítico
6%	5,0mm	0,1mm	NA'-NS'- Arenoso – Siltooso Não Laterítico
7%	0,0mm	0,4mm	LA- LA'- Arenoso – Laterítico
8%	0,0mm	0,2mm	LA- Arenoso Laterítico
9%	0,0mm	0,1mm	LA- Arenoso Laterítico
10%	0,0mm	0,7mm	LA'- Arenoso Laterítico

Com base nestes resultados, visualizou-se a classificação MCT por meio da Carta de Classificação MCT (Nogami e Villibor, 1994) – Método Expedito das Pastilhas (Figura 50).

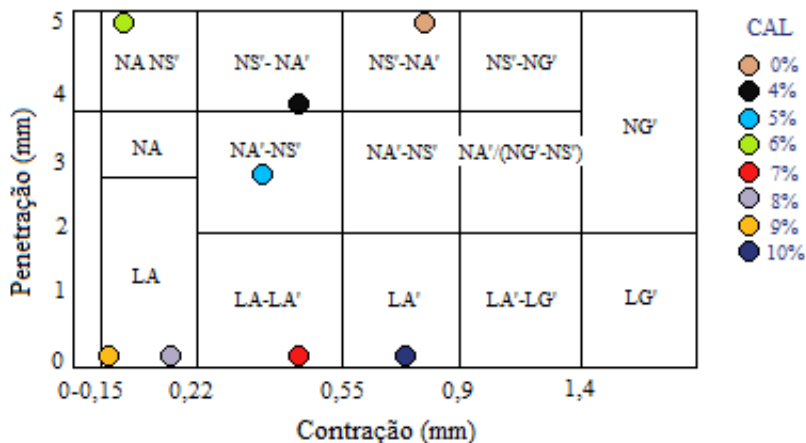


Figura 50 - Gráfico da Classificação MCT – Método Expedito das Pastilhas

5.3. Dimensionamento dos Dispositivos de Drenagem

Por meio da aplicação do modelo ESTRADAS, foi possível dimensionar os dispositivos de drenagem da Fazenda Cerro Azul de acordo com as características da área de contribuição do canal de drenagem e declividades das estradas. Foram analisados quatro trechos com características diferentes em relação à área de contribuição externa à estrada, além de três declividades diferentes em cada trecho – A, B e C (2%, 6% e 12%, respectivamente), conforme os itens a seguir.

5.3.1. Análise do Trecho 1

Os dados utilizados no trecho de estrada definido como Trecho 1, trecho com área de contribuição externa, caracterizada por pouca vegetação rasteira, estão descritos na Tabela 15. Devido à cobertura deste trecho ser do tipo rasteira, sem cultivo, o coeficiente de rugosidade, por meio da classificação adotada pelo modelo, corresponde a $0,080 \text{ s.m}^{-3}$. A taxa de infiltração estável da área externa à estrada foi definida como 24 mm.h^{-1} .

Tabela 15 – Dados de entrada utilizados nos Trechos de Estrada 1

Dados de Entrada	Descrição
Estrada	
Taxa de infiltração	1 mm h ⁻¹
Declividade transversal	2%
Semi-largura	3 m
Rugosidade hidráulica	0,022 s m ^{-1/3} (canais de terra limpos, porém já tendo sofrido intemperismo)
Área de Contribuição	
Externa	
Taxa de infiltração	24 mm.h ⁻¹
Declividade	40%
Comprimento	5 m
Rugosidade hidráulica	0,08 s m ^{-1/3} (pouca cobertura)
Cobertura vegetal	Vegetação rasteira
Bacia de acumulação	
Formato	Retangular
Profundidade	1 m
Canal	
Tipo	Triangular
Declividade	2% (Trecho 1A), 6% (Trecho 1B), 12% (Trecho 1C)
Rugosidade hidráulica	0,025 (sem vegetação)
Aprofundamento máximo	5 cm
Seção Transversal	m1 = 5 m2 = 1
Solo	
Massa específica	1,33 g.cm ⁻³
Erodibilidade	0,0036 g.cm ⁻² .min ⁻¹ .Pa ⁻¹
Tensão crítica	9,04 Pa

a) Trecho 1-A

A declividade longitudinal do trecho classificado como 1A corresponde a 2%.

Foram utilizados os dados de entrada de acordo com a Tabela 15. Desta forma, obteve-se o dimensionamento do espaçamento entre as bacias de acumulação. Este espaçamento, onde as perdas de solo atingem seu valor limite, foi definido pelo modelo ESTRADAS como 979 m (Figura 51). Porém, no que se refere ao dimensionamento das

bacias de acumulação, este valor não é adequado. Caso estas bacias sejam dimensionadas com 1 m de profundidade, o que é aceitável em termos de segurança, as mesmas deveriam ter 136,53 m de largura. No entanto, o modelo ESTRADAS permite a simulação de um novo espaçamento entre as bacias de acumulação, reduzindo o espaçamento e, com isso, obtendo uma redução no dimensionamento das mesmas, o que torna o serviço viável na prática.

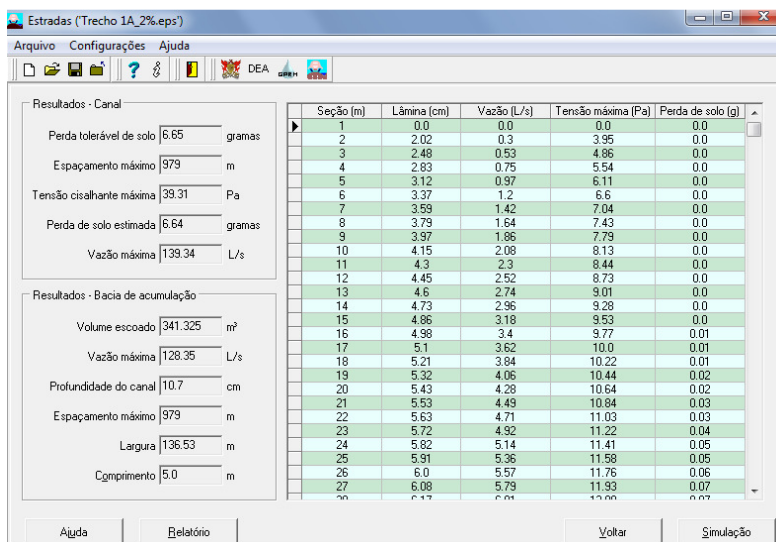


Figura 51 – Resultados do modelo ESTRADAS no trecho 1A

Ao simular novos espaçamentos entre as bacias de acumulação, constatou-se que com 30 m entre as bacias de acumulação, estas passam a ter 4,18 m de largura quando calculadas com 1 m de profundidade e comprimento de 5 m (Figura 52). Este dimensionamento tem como base o volume de água escoado, obtido a partir da quantificação do escoamento superficial em função das condições de precipitação e características de infiltração de água no solo. Um novo dimensionamento das bacias de acumulação pode ser realizado a partir deste volume ($0,348 \text{ m}^3/\text{m}$), multiplicando-o pelo espaçamento desejado. Além disso, alterando a profundidade da bacia de acumulação, conforme o gráfico mostrado na Figura 52 pode-se obter um novo dimensionamento, reduzindo assim a largura da bacia de acumulação.

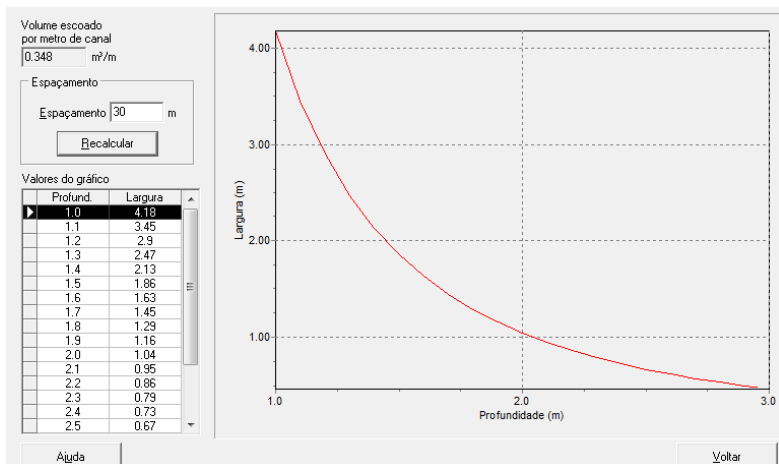


Figura 52 – Simulação do espaçamento das bacias de acumulação no trecho 1A

b) Trecho 1-B

Adotando os dados de entrada da Tabela 15 e alterando a declividade longitudinal do trecho para 6%, o que o classifica o trecho como 1B, foi possível o determinar o espaçamento máximo tolerável entre as bacias de acumulação e, conseqüentemente, o dimensionamento das bacias de acumulação.

O espaçamento máximo entre as bacias de acumulação foi definido pelo modelo ESTRADAS como 97 m. No entanto, o dimensionamento das bacias de acumulação não é adequado, uma vez que este deveria ser de 1 m de profundidade para 13,44 m de largura (Figura 53).

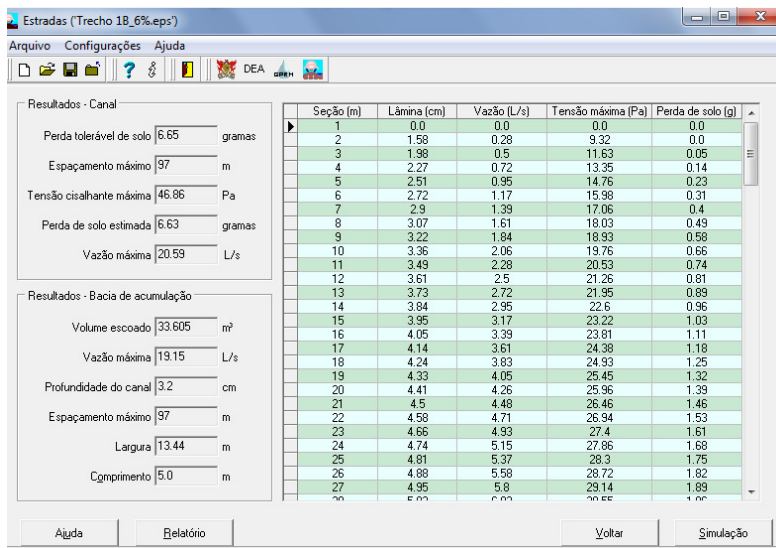


Figura 53 – Resultados do modelo ESTRADAS no trecho 1B

Porém, após a simulação com espaçamento entre as bacias de acumulação de 30 m, a largura da bacia de acumulação proposta pelo modelo passa a ser 4,16 m (Figura 54).

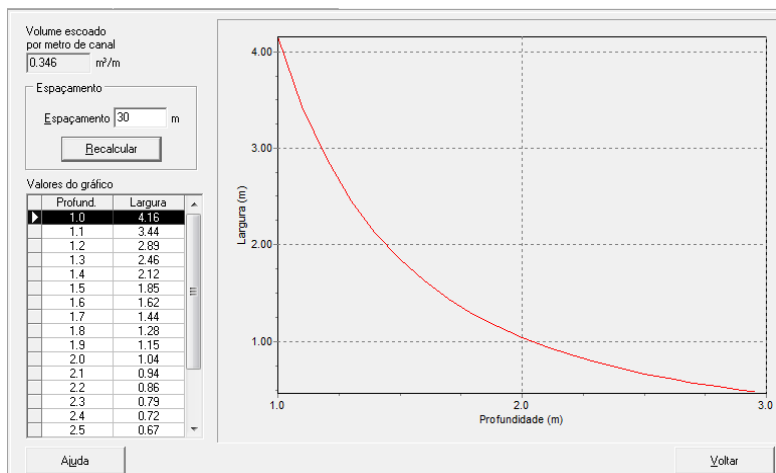


Figura 54 – Simulação do espaçamento das bacias de acumulação no trecho 1B

c) Trecho 1-C

A declividade longitudinal do trecho classificado como 1C corresponde a 12%.

Desta forma, obteve-se o espaçamento entre as bacias de acumulação onde as perdas de solo são consideradas limites. Este espaçamento foi definido pelo modelo ESTRADAS como 22 m (Figura 55). Com base neste valor de espaçamento, o dimensionamento das bacias de acumulação proposto pelo modelo foi 2,98 m com uma profundidade de 1 m (Figura 56).

Este dimensionamento pode ser aumentado utilizando-se um aprofundamento máximo do canal de drenagem igual a 10 cm, ao invés de 5 cm como foi adotado. Desta forma, a perda de solo tolerável e, consequentemente, o espaçamento entre as bacias de acumulação, serão maiores.

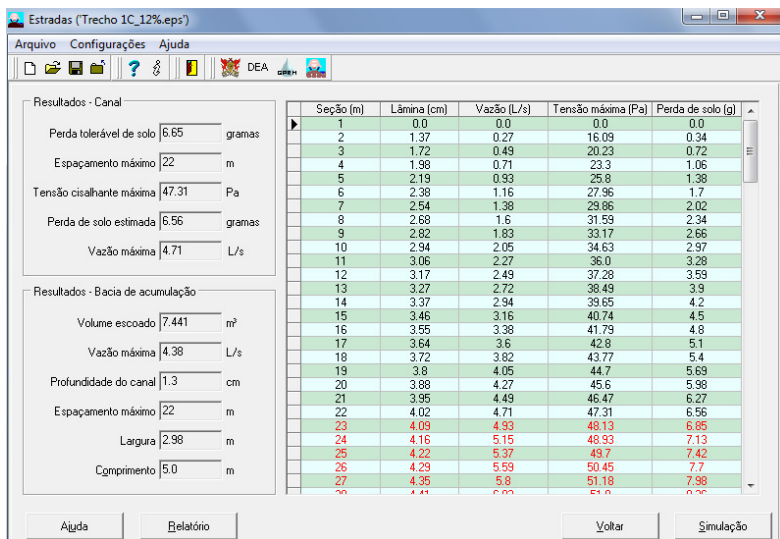


Figura 55 – Resultados do modelo ESTRADAS no trecho 1C

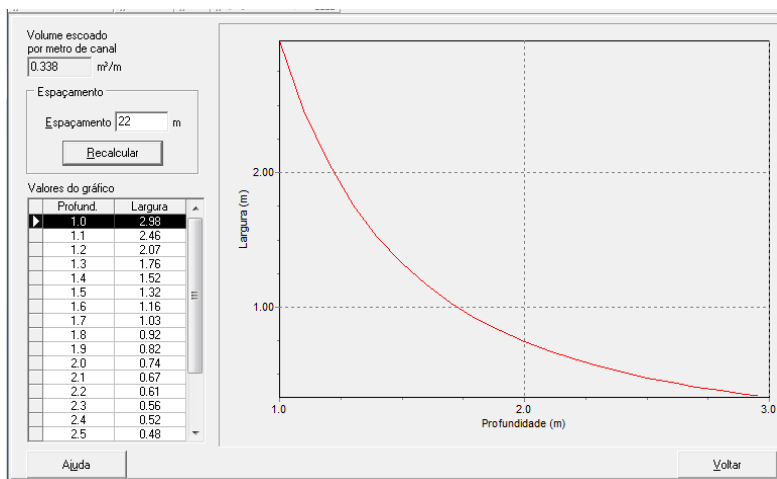


Figura 56 – Simulação do espaçamento das bacias de acumulação no trecho 1C

5.3.2. Análise do Trecho 2

A cobertura vegetal característica deste trecho corresponde a solo exposto, sem preparo, com muito resíduo (Tabela 16). Esta condição é caracterizada pelo modelo com um valor de rugosidade igual a $0,15 \text{ s.m}^{-3}$. Já taxa de infiltração estável foi definida com base nos resultados obtidos por Grando et al. (2009) como sendo 14 mm.h^{-1} .

Tabela 16 – Dados de entrada utilizados nos Trechos de Estrada 2

Dados de Entrada	Descrição
Estrada	
Taxa de infiltração	1 mm h ⁻¹
Declividade transversal	2%
Semi-largura	3 m
Rugosidade hidráulica	0,022 s m ^{-1/3} (canais de terra limpos, porém já tendo sofrido intemperismo)
Área de Contribuição	
Externa	
Taxa de infiltração	14 mm.h ⁻¹
Declividade	40%
Comprimento	5 m
Rugosidade hidráulica	0,15 s m ^{-1/3} (solo exposto com muito resíduo)
Cobertura vegetal	Solo exposto
Bacia de acumulação	
Formato	Retangular
Profundidade	1 m
Canal	
Tipo	Triangular
Declividade	2% (Trecho 2A), 6% (Trecho 2B), 12% (Trecho 2C)
Rugosidade hidráulica	0,025 (sem vegetação)
Aprofundamento máximo	5 cm
Seção Transversal	m1 = 5 m2 = 1
Solo	
Massa específica	1,33 g.cm ⁻³
Erodibilidade	0,0036 g.cm ⁻² .min ⁻¹ .Pa ⁻¹
Tensão crítica	9,04 Pa

a) Trecho 2-A

A declividade longitudinal do trecho classificado como 2A corresponde a 2%. Aplicando os dados de entrada descritos na Tabela 16, obteve-se o espaçamento máximo entre as bacias de acumulação. O espaçamento proposto pelo modelo ESTRADAS é de 879 m e largura de 139,61 m (Figura 57).

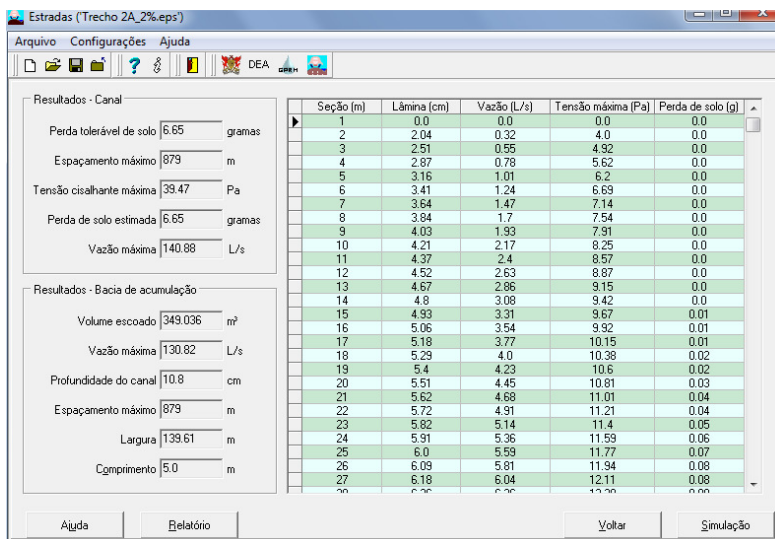


Figura 57 – Resultados do modelo ESTRADAS no trecho 2A

No entanto, o dimensionamento das bacias de acumulação proposto pelo modelo não é viável na prática. Por meio da simulação de um novo espaçamento, sendo este definido como 30 m, o dimensionamento das bacias de acumulação passa a ser 4,76 m de largura com 1 m de profundidade (Figura 58).

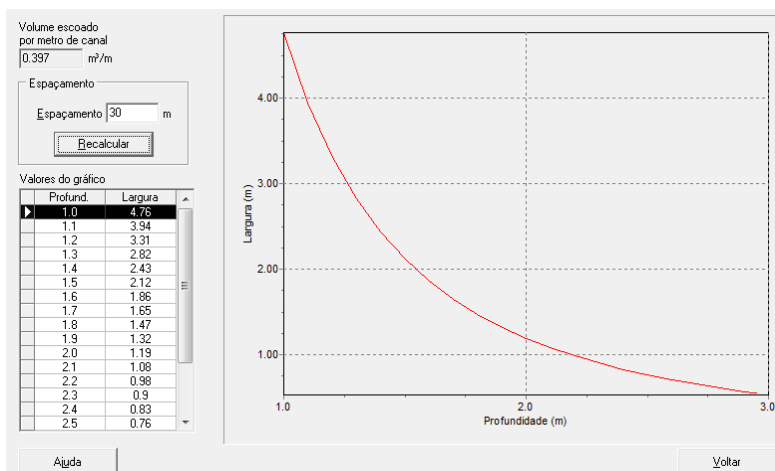


Figura 58 – Simulação do espaçamento das bacias de acumulação no trecho 2A

b) Trecho 2-B

A declividade longitudinal do trecho classificado como 2B corresponde a 6%. Com base nos dados de entrada característicos do trecho de estrada 2 (Tabela 16), obteve-se o espaçamento limite entre as bacias de acumulação, sendo este igual a 86 m e largura de 13,58 m (Figura 59).

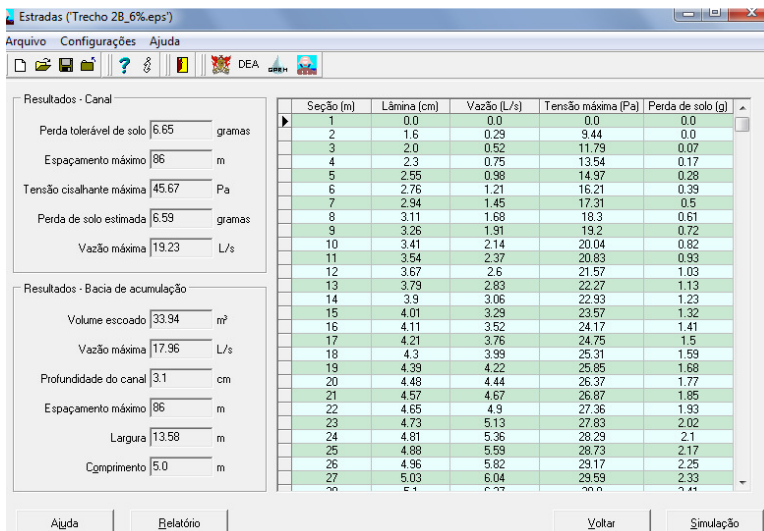


Figura 59 – Resultados do modelo ESTRADAS no trecho 2B

Simulou-se um novo espaçamento das bacias de acumulação, para melhor adequação do dimensionamento das mesmas em função dos serviços em campo. Adotando um espaçamento de 30m, as bacias de acumulação passam a ter 4,74 m de largura por 1 m de profundidade (Figura 60).

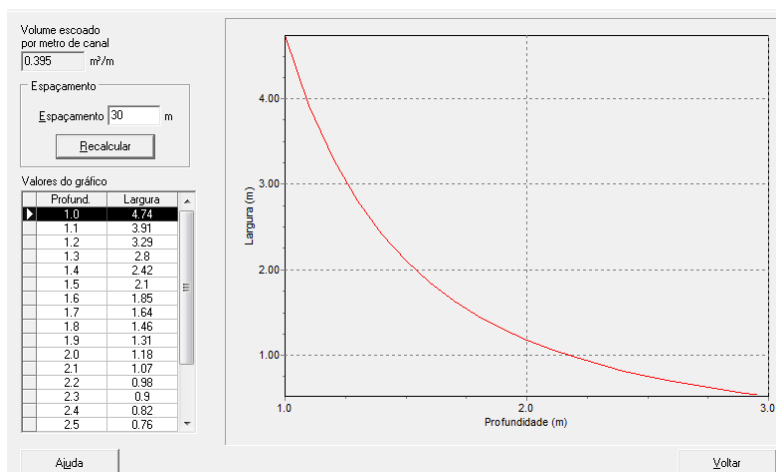


Figura 60 – Simulação do espaçamento das bacias de acumulação no trecho 2B

c) Trecho 2-C

A declividade longitudinal do trecho classificado como 2C corresponde a 12%. O espaçamento máximo entre as bacias de acumulação proposto foi de 19 m. O dimensionamento das bacias de acumulação neste trecho é de 2,91 m de largura por 1 m de profundidade (Figura 61 e Figura 62).

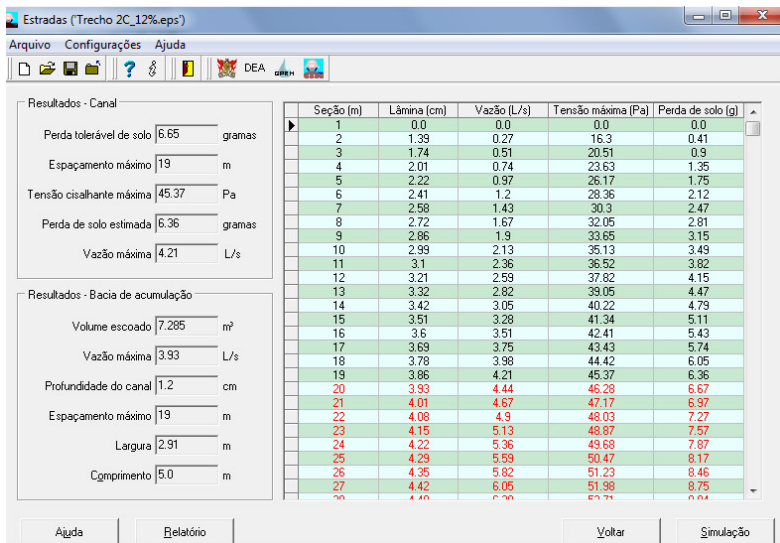


Figura 61 – Resultados do modelo ESTRADAS no trecho 2C

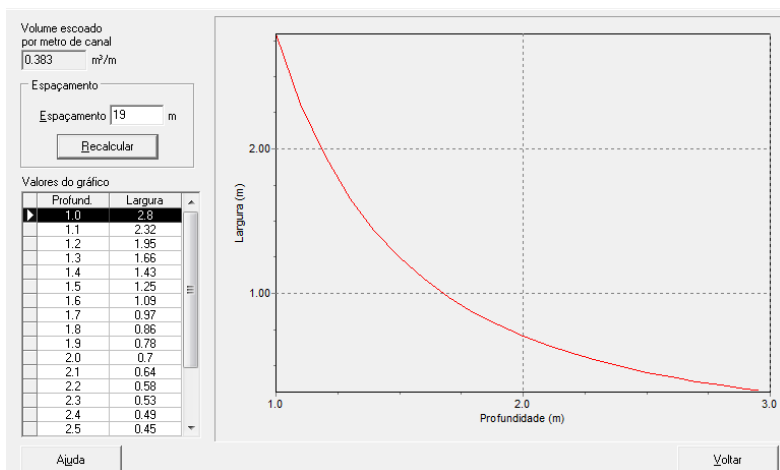


Figura 62 – Simulação do espaçamento das bacias de acumulação no trecho 2C

5.3.3. Análise do Trecho 3

O trecho de estrada definido como Trecho 3 corresponde ao trecho de estrada sem área de contribuição externa ao leito da estrada (Tabela 17).

a) Trecho 3-A

A declividade longitudinal do trecho classificado como 3A corresponde a 2%.

Neste caso, o modelo ESTRADA definiu como espaçamento máximo entre as bacias de acumulação o comprimento de 1181 m. Com este espaçamento, o modelo propôs um dimensionamento com 118,49 m de largura com 1 m de profundidade (Figura 63).

Tabela 17 – Dados de entrada utilizados nos Trechos de Estrada 3

Dados de Entrada	Descrição
Estrada	
Taxa de infiltração	1 mm h ⁻¹
Declividade transversal	2%
Semi-largura	3 m
Rugosidade hidráulica	0,022 s m ^{-1/3} (canais de terra limpos, porém já tendo sofrido intemperismo)
Bacia de acumulação	
Formato	Retangular
Profundidade	1 m
Canal	
Tipo	Triangular
Declividade	2% (Trecho 2A), 6% (Trecho 2B), 12% (Trecho 2C)
Rugosidade hidráulica	0,025 (sem vegetação)
Aprofundamento máximo	5 cm
Seção Transversal	m1 = 0,5 m2 = 0,4
Solo	
Massa específica	1,33 g.cm ⁻³
Erodibilidade	0,0036 g.cm ⁻² .min ⁻¹ .Pa ⁻¹
Tensão crítica	9,04 Pa

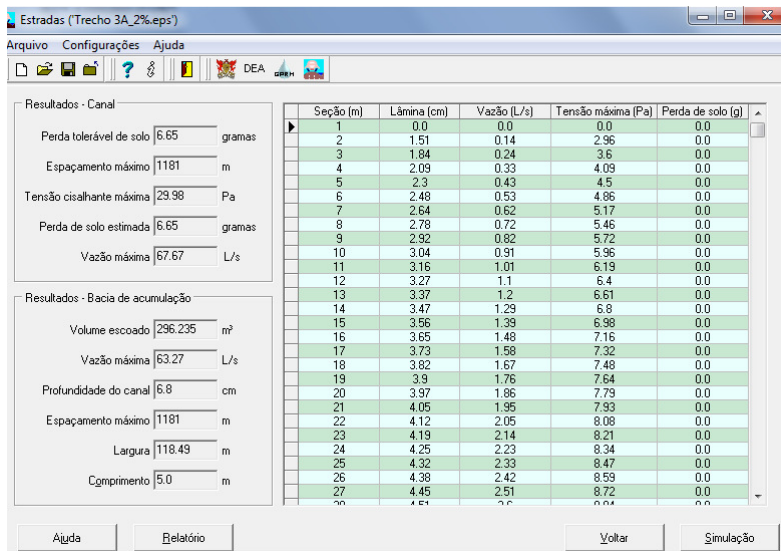


Figura 63 – Resultados do modelo ESTRADAS no trecho 3A

Após a simulação de vários espaçamentos, adotou-se o valor de 40 m de espaçamento entre as bacias de acumulação, obtendo desta forma o dimensionamento das bacias de acumulação com 4,01 m de largura e 1 m de profundidade (Figura 64).

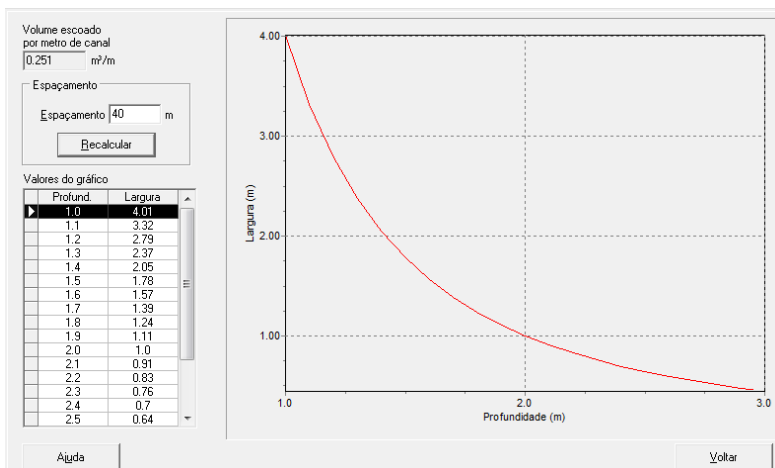


Figura 64 – Simulação do espaçamento das bacias de acumulação no trecho 3A

Com o intuito de comparar os resultados obtidos com os trechos 1 e 2, onde simulou-se o espaçamento das bacias de acumulação com 30 m, esta simulação também foi realizada no Trecho 3. Após esta simulação de espaçamento, o modelo ESTRADAS sugeriu bacias de acumulação com 3,01 m de largura (Figura 65).

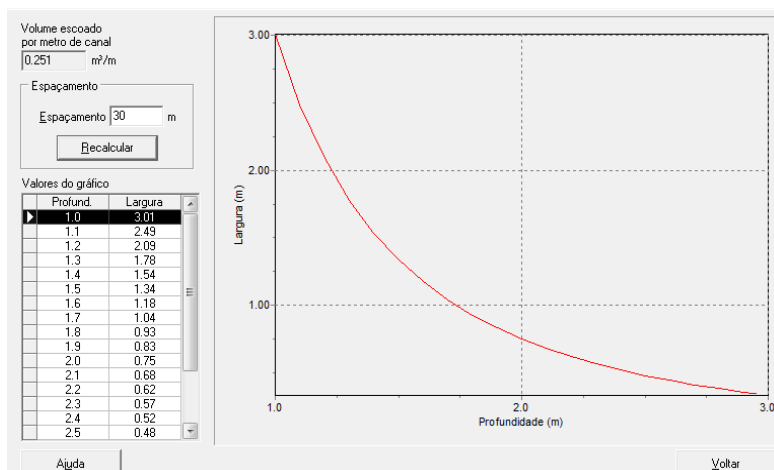


Figura 65 – Simulação do espaçamento das bacias de acumulação no trecho 3A (30 m)

b) Trecho 3-B

A declividade longitudinal do trecho classificado como 3B corresponde a 6%. Após a entrada dos dados correspondentes a este trecho (Tabela 17), o espaçamento entre as bacias de acumulação foi obtido, sendo este igual a 114 m. Já o dimensionamento das bacias proposto foi de 11,4 m de largura e 1 m de profundidade (Figura 66).

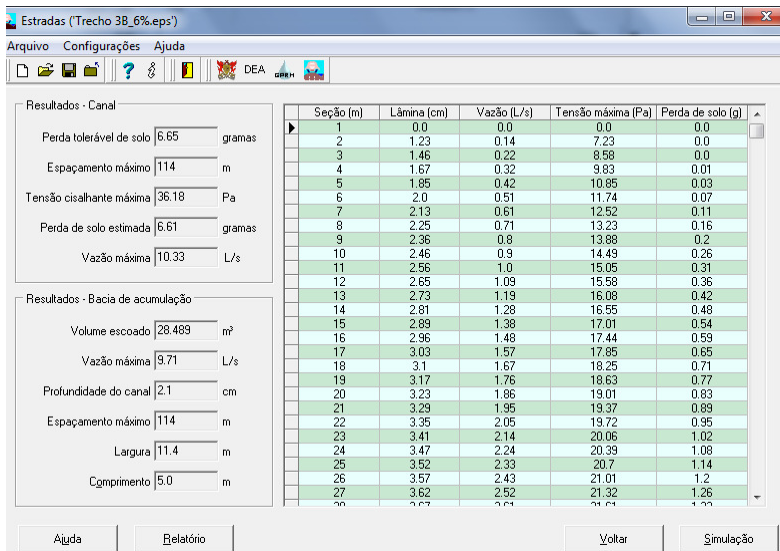


Figura 66 – Resultados do modelo ESTRADAS no trecho 3B

Para tornar este dimensionamento viável na prática, simulou-se um espaçamento de 40 m entre as bacias de acumulação. Como consequência obteve-se um novo dimensionamento, sendo este de 4 m de largura e 1 m de profundidade (Figura 67).

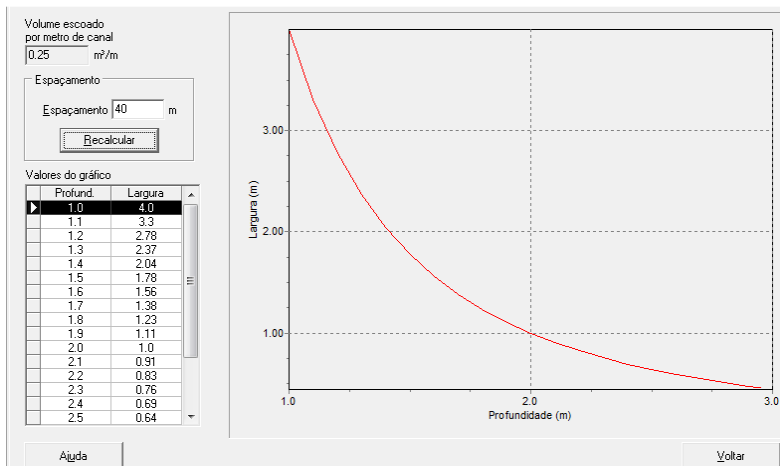


Figura 67 – Simulação do espaçamento das bacias de acumulação no trecho 3B

Como foi realizado no Trecho 3 – B, simulou-se o espaçamento das bacias de acumulação com 30 m. Após esta simulação de espaçamento, o modelo ESTRADAS sugeriu bacias de acumulação com 3,00 m de largura (Figura 68).

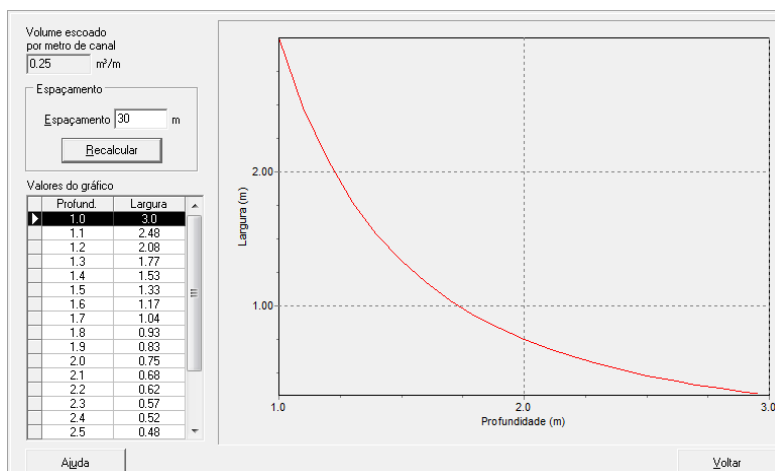


Figura 68 – Simulação do espaçamento das bacias de acumulação no trecho 3B (30 m)

c) Trecho 3-C

A declividade longitudinal do trecho classificado como 3C corresponde a 12%. Desta forma, obteve-se o dimensionamento do espaçamento entre as bacias de acumulação, sendo este igual a 26 m. Já o dimensionamento das mesmas, proposto pelo modelo ESTRADAS, equivale a 2,55 m de largura e 1 m de profundidade (Figura 69 e Figura 70).

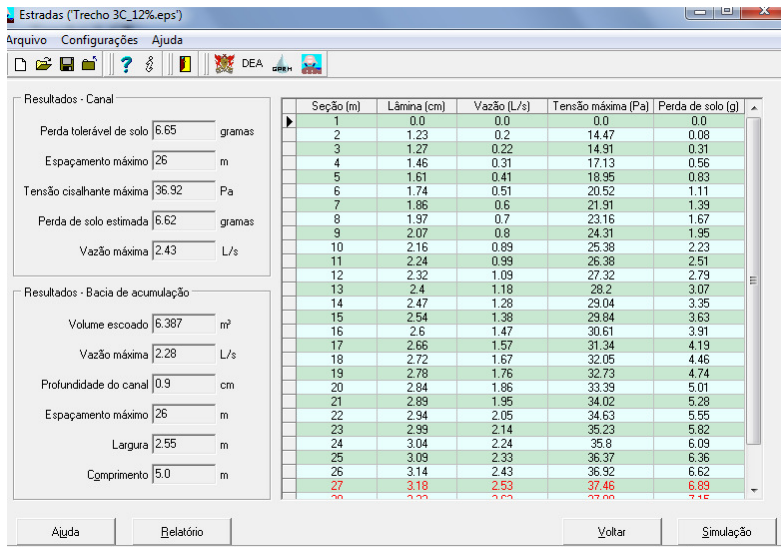


Figura 69 – Resultados do modelo ESTRADAS no trecho 3C

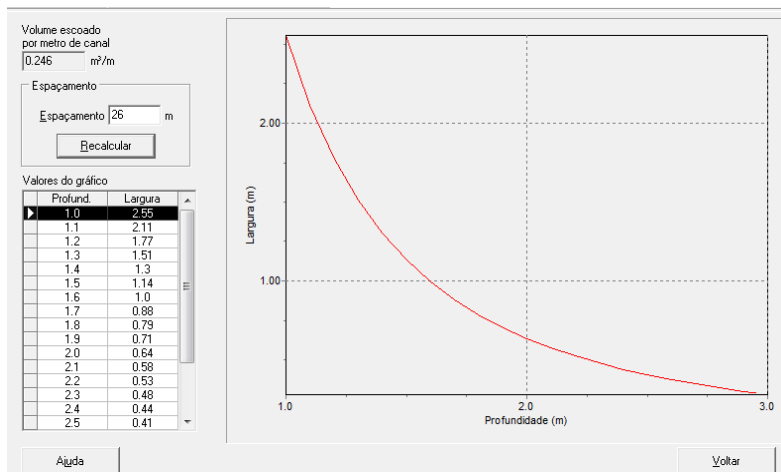


Figura 70 – Simulação do espaçamento das bacias de acumulação no trecho 3C

5.3.4. *Análise do Trecho 4*

A cobertura vegetal característica deste trecho corresponde a reflorestamento com pinus em idade adulta (Tabela 18). Esta condição é caracterizada pelo modelo com um valor de rugosidade igual a $0,200 \text{ s.m}^{-3}$. Já a taxa de infiltração estável foi definida com base nos resultados obtidos por Grando et al. (2009) como 136 mm.h^{-1} .

Tabela 18 – Dados de entrada utilizados nos Trechos de Estrada 4

Dados de Entrada	Descrição
Estrada	
Taxa de infiltração	1 mm h^{-1}
Declividade transversal	2%
Semi-largura	3 m
Rugosidade hidráulica	$0,022 \text{ s m}^{-1/3}$ (canais de terra limpos, porém já tendo sofrido intemperismo)
Área de Contribuição	
Externa	
Taxa de infiltração	136 mm.h^{-1}
Declividade	20%
Comprimento	20 m
Rugosidade hidráulica	$0,200 \text{ s m}^{-1/3}$ (reflorestamento com árvores grandes)
Cobertura vegetal	Reflorestamento
Bacia de acumulação	
Formato	Retangular
Profundidade	1 m
Canal	
Tipo	Triangular
Declividade	2% (Trecho 4A), 6% (Trecho 4B), 12% (Trecho 4C)
Rugosidade hidráulica	$0,025$ (sem vegetação)
Aprofundamento máximo	5 cm
Seção Transversal	$m1 = 5 \quad m2 = 1$
Solo	
Massa específica	$1,33 \text{ g.cm}^{-3}$
Erodibilidade	$0,0036 \text{ g.cm}^{-2}.\text{min}^{-1}.\text{Pa}^{-1}$
Tensão crítica	9,04 Pa

a) Trecho 4-A

Aplicando os dados de entrada descritos na Tabela 18 no modelo ESTRADAS, obteve-se o espaçamento máximo entre as bacias de acumulação, que corresponde a 1180 m, e largura das bacias de acumulação de 118,53 m (Figura 71).

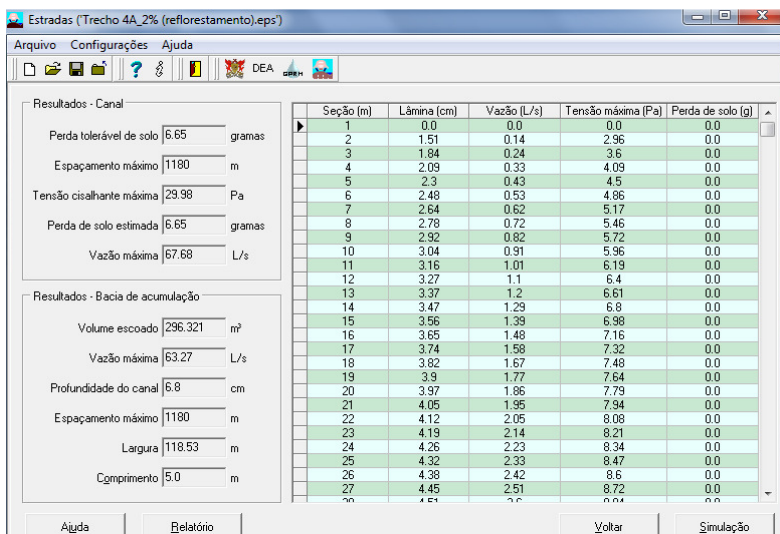


Figura 71 – Resultados do modelo ESTRADAS no trecho 4A

Após a simulação de vários espaçamentos, adotou-se o valor de 40 m de espaçamento entre as bacias de acumulação, obtendo desta forma o dimensionamento das bacias de acumulação com 4,02 m de largura e 1 m de profundidade (Figura 72).

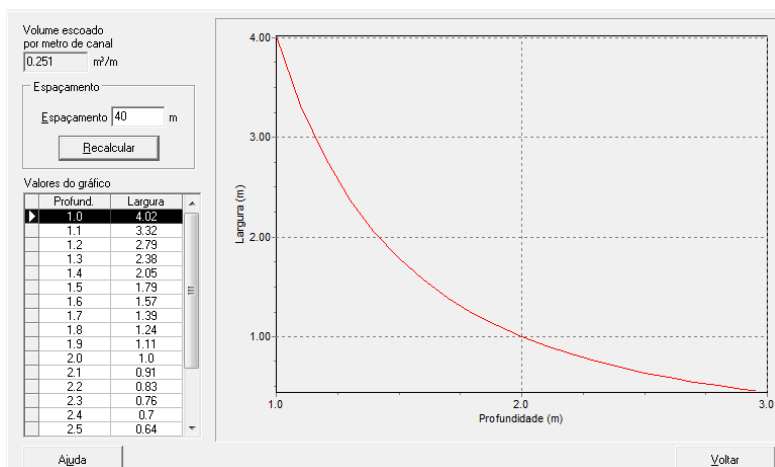


Figura 72 – Simulação do espaçamento das bacias de acumulação no trecho 4A

Para comparar o dimensionamento das bacias de acumulação em todos os trechos, simulou-se novamente o espaçamento com 30 m entre as bacias de acumulação. Obteve-se como resposta do modelo ESTRADAS o dimensionamento de bacias de acumulação com 3,00 m de largura (Figura 73).

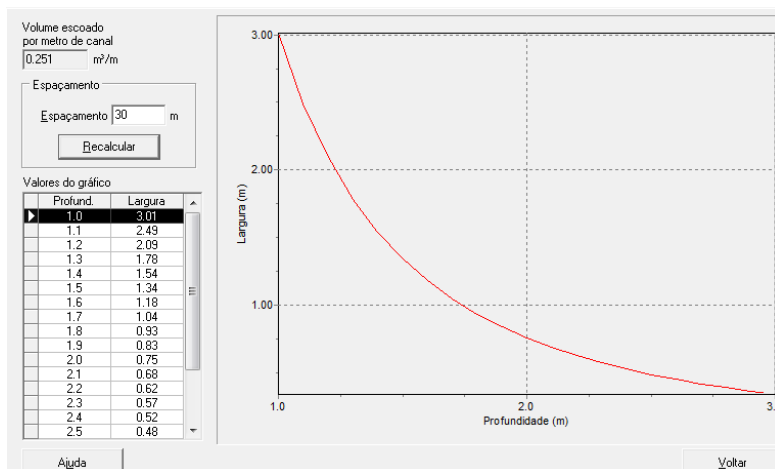


Figura 73 – Simulação do espaçamento das bacias de acumulação no trecho 4A (30 m)

b) Trecho 4-B

Adotando os dados de entrada da Tabela 18 foi possível o determinar o espaçamento máximo tolerável entre as bacias de acumulação e, conseqüentemente, o dimensionamento das bacias de acumulação.

Como resultado, obteve-se o espaçamento máximo entre as bacias de acumulação proposto pelo modelo ESTRADAS como 114 m e o dimensionamento das bacias de acumulação estabelecido para este espaçamento foi de 11,41 m (Figura 74).

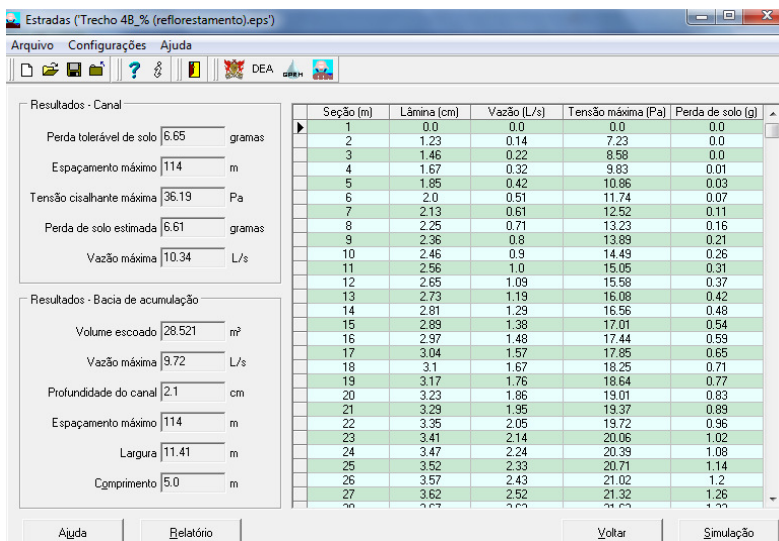


Figura 74 – Resultados do modelo ESTRADAS no trecho 4B

Para melhor adequação destes resultados às condições de campo, simulou-se um novo espaçamento entre as bacias de acumulação, correspondendo a 40 m. Com isto, o dimensionamento das bacias passa a ser 4,0 m de largura (Figura 75).

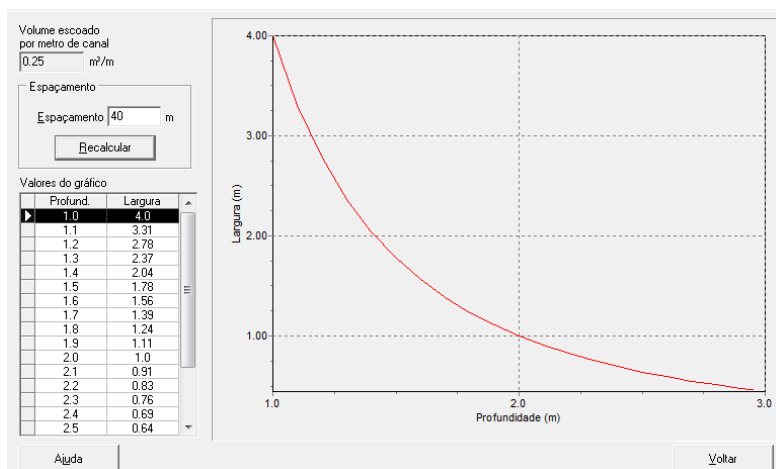


Figura 75 – Simulação do espaçamento das bacias de acumulação no trecho 4B

Como mencionado anteriormente, um novo espaçamento dos dispositivos de drenagem foi simulado, obtendo como resultado o dimensionamento de bacias de acumulação com 3,00m de largura (Figura 76).

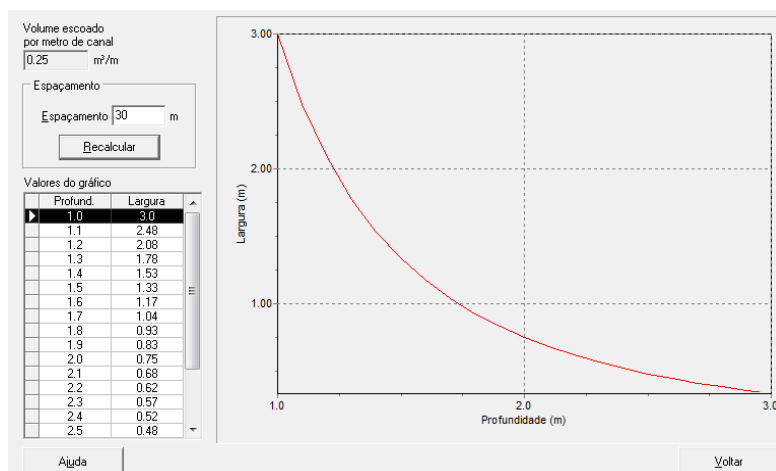


Figura 76 – Simulação do espaçamento das bacias de acumulação no trecho 4B (30 m)

c) Trecho 4-C

Após a entrada dos dados da Tabela 18 no modelo ESTRADAS obteve-se o espaçamento máximo entre as bacias de acumulação. Este espaçamento foi definido como 26 m (Figura 77).

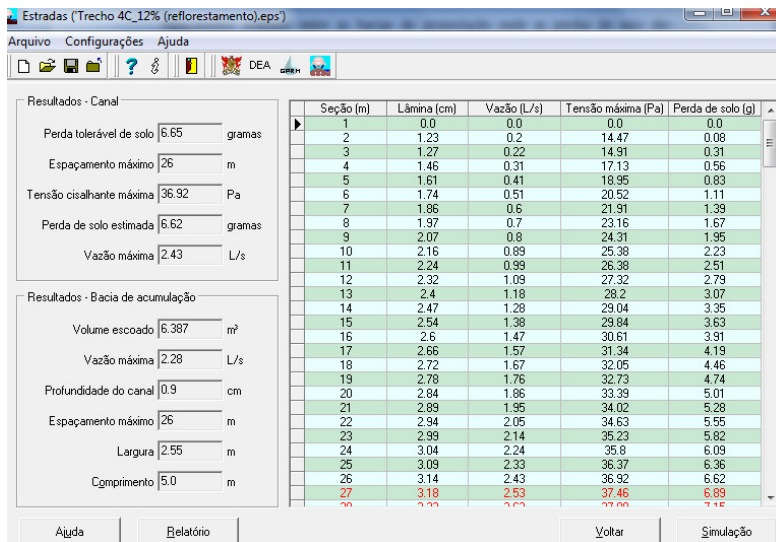


Figura 77 – Resultados do modelo ESTRADAS no trecho 4C

Com base neste valor de espaçamento, o dimensionamento das bacias de acumulação sugerido pelo modelo foi 2,55 m com uma profundidade de 1 m (Figura 78).

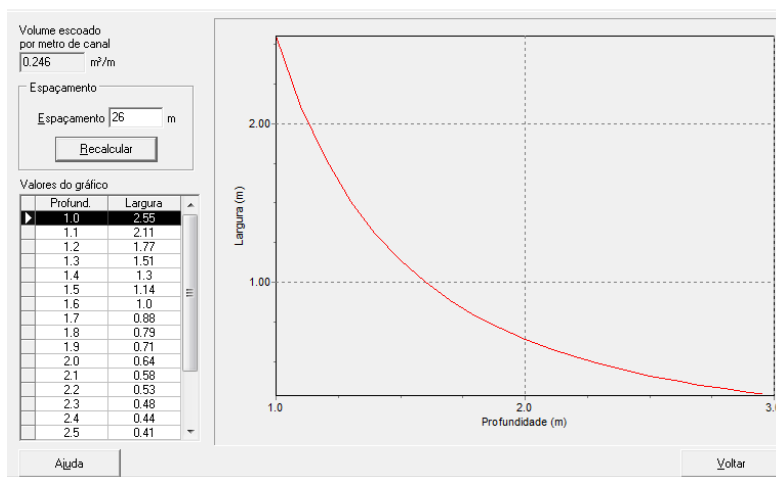


Figura 78 – Simulação do espaçamento das bacias de acumulação no trecho 4C

5.3.5. Comparação entre os Trechos de Estrada 1 a 4

Tanto o comprimento quanto a profundidade de todas as bacias de acumulação foram determinadas com os dados de entrada do modelo, correspondendo a 5 m e 1 m, respectivamente, variando somente a largura das bacias de acumulação. O espaçamento entre as bacias de acumulação proposto pelo modelo leva em conta o limite tolerável para a perda de solo devido ao escoamento superficial no canal da estrada. Desta forma, o dimensionamento das bacias de acumulação torna-se, em alguns casos, impraticável em função das grandes dimensões das bacias, determinadas com base no volume de água escoado, como no caso do Trecho 2 – A (solo exposto). Neste caso, para o espaçamento inicialmente sugerido pelo ESTRADAS, ou seja, 879 m, a largura das bacias de acumulação seria de 139,61 m (Tabela 19).

No caso dos trechos de estrada com 12% de declividade estes espaçamentos, estabelecidos como limites, passam a ser bem menores. No Trecho 4 – C (reflorestamento), por exemplo, como o espaçamento máximo é de 26 m, haverá uma redução da largura das bacias de acumulação, que passam a ter 2,55 m.

Tabela 19 – Dimensionamento obtido por meio do modelo ESTRADAS

Trechos Analisados		Espaçamento máximo recomendado entre as Bacias de Acumulação (m)	Largura das Bacias de Acumulação (m)
Trecho 1	A (2%)	979,00	136,53
	B (6%)	97,00	13,44
	C (12%)	22,00	2,98
Trecho 2	A (2%)	879,00	139,61
	B (6%)	86,00	13,58
	C (12%)	19,00	2,91
Trecho 3	A (2%)	1.181,00	118,49
	B (6%)	114,00	11,4
	C (12%)	26,00	2,55
Trecho 4	A (2%)	1.180,00	118,53
	B (6%)	114,00	11,41
	C (12%)	26,00	2,55

Pode-se verificar que nos trechos com declividade de 2% o espaçamento máximo entre as bacias de acumulação é muito maior quando comparado com as outras declividades analisadas. Isto confirma o aumento das perdas de solo em função do aumento da declividade (Figura 79).

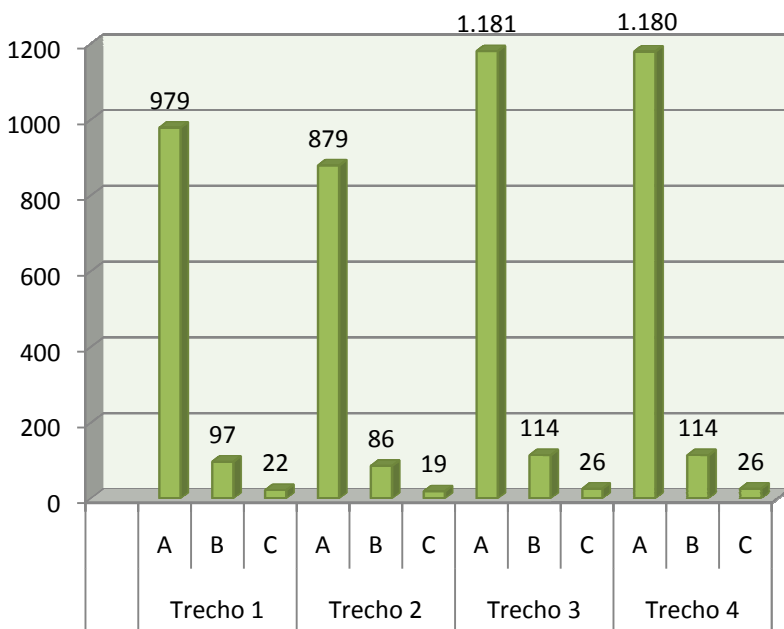


Figura 79 – Espaçamento entre as bacias de acumulação recomendado pelo modelo ESTRADAS

Foram analisados os quatro trechos de estradas na declividade de 2% e espaçamento entre as bacias de acumulação de 30 m, no qual o dimensionamento das bacias de acumulação é mais próximo à realidade encontrada em campo. Nota-se que o Trecho 2, ou seja, o trecho em que a área de contribuição caracteriza-se por ter solo exposto, foi o trecho em que o modelo ESTRADAS sugeriu o maior dimensionamento das bacias de acumulação (Tabela 20). Neste trecho, as bacias de acumulação passam a ter 4,76 m de largura.

Entretanto, no Trecho 3, caracterizado pela ausência de área de contribuição externa, e no Trecho 4, com área de contribuição externa com reflorestamento de pinus com idade adulta, as bacias de acumulação devem ter 3,01 m de largura. O modelo ESTRADAS fornece o mesmo dimensionamento das bacias de acumulação nestes dois trechos em função da alta taxa de infiltração estável em áreas de reflorestamento com idades superiores, o que minimiza o escoamento superficial.

Tabela 20 – Dimensionamento das bacias de acumulação nos quatro trechos de estrada na declividade de 2%

Trechos Analisados	Espaçamento entre as Bacias de Acumulação (m)	Largura das Bacias de Acumulação (m)
Trecho 1	30,00	4,18
Trecho 2	30,00	4,76
Trecho 3	30,00	3,01
	40,00	4,01
Trecho 4	30,00	3,01
	40,00	4,02

Em relação aos trechos de estrada com 6% de declividade, o modelo ESTRADAS fornece o mesmo dimensionamento das bacias de acumulação quando simulado o espaçamento entre elas de 30 m. Isto se deve ao fato do volume escoado por unidade de comprimento do canal ($m^3 \cdot m^{-1}$) ser o mesmo em cada trecho analisado (Tabela 21).

Tabela 21 – Dimensionamento das bacias de acumulação nos quatro trechos de estrada na declividade de 6%

Trechos Analisados	Espaçamento entre as Bacias de Acumulação (m)	Largura das Bacias de Acumulação (m)
Trecho 1	30,00	4,16
Trecho 2	30,00	4,74
Trecho 3	30,00	3,00
	40,00	4,00
Trecho 4	30,00	3,00
	40,00	4,00

Nos trechos de estrada com declividades de 12% o espaçamento máximo entre as bacias de acumulação proposto pela modelo ESTRADAS foi próximo ao espaçamento verificado em campo. Apesar disso, o dimensionamento das bacias de acumulação em campo é bem inferior ao recomendado pelo modelo ESTRADAS (Tabela 22).

Tabela 22 – Dimensionamento das bacias de acumulação nos quatro trechos de estrada na declividade de 12%

Trechos Analisados	Espaçamento entre as Bacias de Acumulação (m)	Largura das Bacias de Acumulação (m)
Trecho 1	22,00	2,98
Trecho 2	19,00	2,91
Trecho 3	26,00	2,55
Trecho 4	26,00	2,55

Foram comparados os resultados dos espaçamentos entre as bacias de acumulação, obtidos por meio do modelo ESTRADAS, com os valores citados na literatura. Os espaçamentos simulados nos quatro trechos da estrada, em função da adequação ao dimensionamento das bacias de acumulação, estão mais próximos aos sugeridos por Bublitz e Campos (1992). Estes autores citam que em estradas com declividades entre 0 e 5% o espaçamento entre as bacias de acumulação deve ser de 35 m, entre 5 e 10% deve ser de 30 m e entre 10 a 15% com 25 m.

Porém, este dimensionamento citado baseia-se somente nas declividades da estrada. Como se pode observar nos resultados obtidos, além da declividade, o fator determinante do espaçamento entre as bacias de acumulação foram as características das áreas de contribuição externas à estrada. O trecho de estrada 2, com solo exposto na área de contribuição externa à estrada, foi o trecho com o menor espaçamento entre as bacias de acumulação. Desta forma, o Trecho 2 é o trecho de estrada onde a perda de solo foi maior. Na sequência, com menor espaçamento entre as bacias de acumulação vêm o Trecho 1, caracterizado por vegetação rasteira na área de contribuição externa e os Trechos 3 e 4, sem área de contribuição externa e com área de reflorestamento de pinus em idade adulta, respectivamente. Analisando estes últimos trechos de estrada, nota-se que o modelo ESTRADAS fornece o mesmo espaçamento e dimensionamento das bacias de acumulação. Isto ocorre em função da alta taxa de infiltração estável em áreas de reflorestamento com idades superiores, o que minimiza o escoamento superficial e, conseqüentemente, as perdas de solo nessas áreas.

5.4. Comparação entre o espaçamento e dimensionamento das bacias de acumulação recomendado pelo modelo ESTRADA e o dimensionamento verificado em campo

Observou-se que para trechos de estradas semelhantes, ou seja, estradas com mesmas características, tais como mesma declividade e mesmas características na área de contribuição externa à estrada, não há nenhum padrão no espaçamento entre estes dispositivos de drenagem (Figura 80). Para um trecho com inclinação de 2%, puderam-se verificar espaçamentos entre as bacias de acumulação variando entre 40 m a 180 m.



Figura 80 – Levantamento das bacias de acumulação em campo

Em campo, não foi verificado nenhum padrão de dimensionamento das bacias de acumulação. Foram verificadas bacias de acumulação com 1 m de comprimento com 0,8 de largura até bacias de acumulação com 5 m de comprimento com 1m de largura.

Por meio do modelo ESTRADAS, verificou-se que para uma mesma declividade, 2% por exemplo, o espaçamento máximo entre as bacias de acumulação, onde as perdas de solo são consideradas limites, variaram de acordo com as características da área de contribuição externa à estrada. Em trechos de estrada com área externa caracterizada

como reflorestamento em idade adulta, o espaçamento simulado no modelo, com o intuito de adequar o dimensionamento à realidade, foi de 40 m, porém com 4,02 m de largura, 5 m de comprimento e 1 m de profundidade. Com isto, verificou-se que o dimensionamento levantado em campo mostrou-se inferior ao recomendado pelo modelo ESTRADAS. Isto implica a ineficiência de tais dispositivos em campo após um evento de chuva, onde se consta frequentemente o transbordamento de bacias de acumulação, interferindo diretamente no leito da estrada (Figura 81).



Figura 81 – Ineficiência de uma bacia de acumulação em campo

Esta ineficiência também é notada com o transbordamento e/ou assoreamento das bacias de acumulação em função da falta de manutenção das bacias de acumulação (Figura 82). Quando as águas pluviais, inadequadamente conduzidas, permanecem na superfície de rolamento da estrada, juntamente com a ação do tráfego, surgirão problemas relacionados à capacidade de suporte da estrada e também às condições de rolamento e aderência, como o surgimento de defeitos na pista, tais como buracos, atoleiros, trilhas de roda (BAESSO E GONÇALVES, 2003) e também o surgimento de erosão no leito da estrada.



Figura 82 – Falta de manutenção de uma bacia de acumulação em campo

6. CONCLUSÕES

Visando a caracterização do solo utilizado na construção e adequação das estradas não pavimentadas de uma fazenda de reflorestamento, localizada no Planalto Norte Catarinense, o presente trabalho analisou amostras de solo do local e também o comportamento deste solo após a adição de cal hidratada (CH-1) como agente estabilizante. Os resultados obtidos nesta etapa do trabalho, por meio de ensaios de laboratório permitem concluir que:

- O solo da jazida Cerro Azul, composto por 57,5% de silte, Limite de Liquidez (LL) igual a 35,2% e Índice de Plasticidade (IP) igual a 16,1%, é um solo siltoso/arenoso Não Laterítico (NS`-NA`) pela classificação MCT, do tipo A-7-6 pela classificação HBR e caracterizado como solo argiloso pouco plástico (CL) pela classificação SUCS;
- A dosagem da cal obtida por meio do método do pH mostrou-se válida, sendo uma metodologia adequada para dosagem de cal para melhoria dos solos tropicais, sendo verificada pelo Método Expedito para Classificação MCT;
- A adição de cal no solo utilizado na construção e adequação de estradas não pavimentadas modificou a estrutura do solo compactado, passando de material siltoso/argiloso para um material arenoso, confirmando que o aditivo reage com o solo através das reações pozolânicas, tornando o mesmo, viável para uma camada compactada;
- O ensaio CBR permitiu a verificação da melhoria da resistência mecânica do solo após a adição de cal hidratada, sendo satisfatório com 6% de cal, 1 % a menos que o recomendado pelo método do pH.

Em relação ao dimensionamento das bacias de acumulação das estradas da área de estudo, por meio do modelo ESTRADAS, pode-se concluir que:

- Entre trechos de estradas de um mesmo local, com mesmas características de solo e precipitação, os fatores determinantes no espaçamento máximo entre as bacias de acumulação são a declividade da estrada e a área de contribuição externa à estrada;

- O Trecho de estrada 2, com área de contribuição externa caracterizada por ter apresentar solo exposto, é o trecho com maior perda de solo dentre os trechos analisados;
- O Trecho 3, sem área de contribuição externa, teve o dimensionamento das bacias de acumulação semelhante ao Trecho 4, com área de contribuição externa com área de plantio de pinus em idade adulta, devido à elevada taxa de infiltração estável nessas áreas, o que diminui o escoamento superficial;
- O dimensionamento das bacias de acumulação adotados em campo mostrou-se, em alguns pontos, inferior ao dimensionamento proposto pelo modelo ESTRADAS, podendo ser confirmado pela ineficiência dos dispositivos de drenagem mesmo após pequeno evento de chuva.

7. RECOMENDAÇÕES

Com o intuito de dar continuidade ao presente trabalho, e buscar melhorias nos estudos de estradas não pavimentadas, sugere-se:

- Verificação da eficiência das bacias de acumulação, dimensionadas por meio do modelo ESTRADAS, com um monitoramento de campo;
- Comparação da erodibilidade do solo da área de estudo por meio de ensaios em campo e ensaios de laboratório;
- Avaliação da erodibilidade do solo estabilizado com cal por meio do Ensaio de Inderbitzen;
- Determinação da tensão crítica de cisalhamento por meio de ensaios em campo;
- Avaliação das perdas de solo nas estradas não pavimentadas em função dos serviços de adequação e manutenção realizados nas estradas não pavimentadas, por meio do monitoramento das bacias de acumulação em campo.

8. REFERÊNCIAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457**: Amostras de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 1986. 9p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459**: Solo - Determinação do Limite de Liquidez. Rio de Janeiro, 1984. 6p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6508**: Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 1984. 8p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180**: Solo - Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 1984. 3p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181**: Solo - Análise Granulométrica. Rio de Janeiro, 1984. 13p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182**: Solo - Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 1986. 10p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7185**: Solo - Determinação da massa específica aparente, "*in situ*", com emprego do frasco de areia. Rio de Janeiro, 1986. 7p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9895**: Solo – Índice de Suporte California. Rio de Janeiro, 1987. 14p.

ANTONANGELO, A.; FERNNER, P.T. **Identificação dos riscos de erosão em estradas de uso florestal através do critério do fator topográfico LS**. Energia na Agricultura, Botucatu, v. 20, n. 3, p. 1-20, 2005.

ARAÚJO, A.F.; Barroso, S.H.A. **Avaliação das propriedades mecânicas de misturas de solo-cal, em pó e em pasta, para aplicação em camadas nobres de rodovias**. Universidade Federal do Ceará/Departamento de Engenharia de Transportes, 2008. 12 p.

BACK, A.J. **Relações Intensidade-Duração-Frequência de chuvas intensas de Florianópolis, SC.** Revista Engenharia Sanitária e Ambiental – ABES, vol. 5, p. 126-132, 2000.

BACK, A.J. **Chuvas intensas e chuva de projeto de drenagem superficial no Estado de Santa Catarina.** Florianópolis: Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina - EPAGRI, 2002. (Boletim Técnico, 123).

BAESSO, D.P.; GONÇALVES, F.L.R. **Estradas Rurais – Técnicas Adequadas de Manutenção.** Florianópolis, Departamento de Estradas de Rodagem - DER, 2003. 204p.

BASTOS, C.A.B. **Estudos geotécnicos sobre a erodibilidade de solos residuais não saturados.** Tese de doutorado – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Porto Alegre, 1999.

BERNUCCI, L.B., MOTTA, L.M.G., CERATTI, J.A.P., SOARES, J.B. **Pavimentação asfáltica – Formação básica para engenheiros.** Rio de Janeiro, Petrobrás e ABEDA – Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Asfalto, 2006. 501p.

BERTOL, I.; SCHICK, J.; BATISTELA, O.; LEITE, D.; VISENTIN, D.; COGO, N. P. **Erosividade das chuvas e sua distribuição entre 1989 e 1998 no município de Lages (SC).** Revista Brasileira Ciência do Solo, 2002. 26: 455-464.

BERTOLINI, D. **Controle de erosão em estradas rurais.** Campinas: Coordenadoria de Assistência Técnica Integral – CATI, 1993. 37p. (Boletim Técnico, 207).

BERTONI, J., LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo.** São Paulo, Ícone, 1993. 355p.

BIGARELLA, J.J. **Estruturas e origem das paisagens tropicais e subtropicais.** Florianópolis: EdUFSC, 2003.

BORTOLOZZI, C.A; SILVA, L.C. **Texto explicativo para o mapa geológico de Santa Catarina.** Florianópolis: 11º Distrito do Departamento Nacional de Produtos Minerais, Coordenadoria de

Recursos Minerais da Secretaria de Ciências e Tecnologia, Minas e Energia, 1987.

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

CAPUTO, H.P. **Mecânica dos solos e suas aplicações, volume 2**. 6 ed. revisada e ampliada. Rio de Janeiro: LCT, 2008.

CASARIN, R.D.; OLIVEIRA, E.L. **Controle de erosão em estradas rurais não pavimentadas, utilizando sistema de terraceamento com gradiente associado a bacias de captação**. Irriga, Botucatu, v. 14, n. 4, p. 548-563, 2009.

CHAVES, H.M.L.; BRAGA, B.; DOMINGUES, A.F.; SANTOS, D. **Quantificação dos benefícios ambientais e compensações financeiras do Programa do Produtor de Água (ANA): I. Teoria**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v.9, n.3, p.5-14, 2004.

CHOW, V.T. **Open channel hydraulics**. USA: McGraw-Hill book company inc. 1959. 680p.

CORRÊA, J.F. **Avaliação das melhorias das propriedades físicas e mecânicas de solos originados de rochas sedimentares pela adição de cal para fins de pavimentação**. Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil - UFSC. Florianópolis, 2008. 131p.

DADALTO, G.G.; CARMO FILHO, O.G.; CASTRO, L.L.F. **Captação de águas pluviais das estradas vicinais**. Vitória – ES: EMCAPA, 1990. 22p.

DNIT - **Manual de pavimentação**, Departamento Nacional de Infra-Estrutura dos Transportes – Ministério dos Transportes. Publicação IPR-719. 3ª. Ed. Rio de Janeiro, 2005.

DNIT - **Relatório de Extensões do Sistema Rodoviário Nacional, versão 2009**. Disponível em: http://www.dnit.gov.br/menu/rodovias/planejamento/PNV2009_JULHO_TOTAIS_GERAIS.pdf. Acesso em 10/09/09.

ELLIOT, W.J., FOLTZ, R.B., LUCE, C.H. Modeling low-volume road erosion. **Seventh international conference on low-volume roads**, Washington, 1999, p. 244-249.

EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Rio de Janeiro, CNPS/EMBRAPA, 2006, 2 ed., 306p.

EMBRAPA. **Solos do Estado de Santa Catarina**. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, n.46. Rio de Janeiro, 2004. 726p.

EPAGRI/CIRAM. Zoneamento agroecológico e socioeconômico. Disponível em: http://www.ciram.com.br/ciram_arquivos/arquivos/portal/agricultura/zoneAgroecologico/ZonAgroeco.pdf . Acesso em 13/10/09. 1010p.

FENDRICH, R.; OBLADEN, N.L.; GARCIAS, C.M. **Drenagem e Controle da Erosão Urbana**. 4ª edição, Champagnat, Curitiba, 1997.

FERNANDES, D.C.M.; MACHADO, C.C.; LIMA, D.C.; JUCKSCH, I.; PEREIRA, R.S. **Emprego de misturas solo-alcatrão de Madeira de eucalipto em estradas florestais**. CERNE, ano/vol: 8, número 001. Universidade federal de Lavras. Lavras, p. 44-48, 2002.

GRACE, J.M., III. RUMMER, B., STOKES, B. J.; WILHOIT, J. **Evaluation of erosion control techniques on forest roads**. Transactions of the ASAE, v. 41, n.2, p.383-391, 1998.

GRACE, J.M., III. Erosion control techniques on forest road cutslopes and fillslopes in North Alabama. In: **Seventh International Conference on Low-Volume Roads: V. 2**. Transportation Research Record 1652. Washington, D.C.: National Research Council, Transportation Research Board. pp. 227-234, 1999.

GRACE, J.M., III. **Forest road sideslopes and soil conservation techniques**. Journal of Soil and Water Conservation, v. 55, p.1-9, 2000.

GRANDO, A.; MACIEL, C.B.; Corseuil, C.W.; MACCARINI, M.; Kobiyama, M.; HIGASHI, R.R. **Erodibilidade do solo de uma microbacia experimental**. In: XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Campo Grande, 2009.

GRIEBELER, N.P. **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 - UFV, Viçosa, 2002.

GUIMARÃES, J.E.P. **A Cal: fundamentos e aplicação na Engenharia Civil**, Associação Brasileira dos Produtores de Cal - 2ª Ed. São Paulo, 2002.

HEC - 15, HYDRAULICS ENGINEERING CIRCULAR, 15. **Design of road side channels with flexible linings**. Federal Highway Administration. www.fhwa.com. 1998,150p.

HIGASHI, R.R. **Metodologia de uso e ocupação dos solos de cidades costeiras brasileiras através de SIG com base no comportamento geotécnico e ambiental**. Tese apresentada à Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Florianópolis, 2006.

IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. **Estradas Vicinais de Terra – Manual Técnico para Conservação e Recuperação**. São Paulo, 1985.

JULIEN, P.Y.; SAGHAFIAN, B.; OGDEN, F.L. Raster-based hydrologic modeling of spatially-varied surface runoff. **Water Resources Bulletin**, Minneapolis, v.31, n.3, p.523-36, 1995.

KOBIYAMA, M.; FRUET, D.; LIMA, R.T.; CHAFFE, P.L.B. **Estudo hidrológico comparativo entre três pequenas bacias experimentais no município de Rio Negrinho – SC: (1) Descrição**. In: V Simpósio Nacional de Geomorfologia. Santa Maria: Anais 2004.

LUCE, C. . **Proposal for a study on sediment production from forest roads under natural rainfall conditions**. Moscow: United States Department of Agriculture - USDA. Forest Service Intermountain Research Station, 1993. 7p.

MACHADO, C.C.; SOUZA, A.P. **Impacto ambiental das estradas florestais: causas e controle**. Viçosa, SIF, 1990. p. 1-12 (Boletim Técnico, 1).

MACIEL, C.B.; GRANDO, A.; MACCARINI, M.; KOBAYAMA, M.; HIGASHI, R. **Caracterização de Solos Utilizados em Estradas Não Pavimentadas: Avaliação de solos melhorados com vista na redução de processos erosivos.** In: XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Campo Grande: Anais 2009a.

MACIEL, C.B.; GRANDO, A.; MACCARINI, M.; KOBAYAMA, M.; HIGASHI, R.; SENNA, L.M. **Caracterização geotécnica de solos utilizados na construção e adequação de estradas florestais.** In: V COBRAE – Conferência Brasileira de Estabilidade de Encostas. São Paulo: Anais 2009b.

MOORE, R.K.; MEYER, A.H.; ANDAY, M.C.; EMERY, J.J.; GUMM, J.H.; GRUTSCHICH, K.A.; HECKATHORN, C.W.; KENNEDY, T.W.; LANDRUM, H.W.; LITTLE, D.N.; MCDONALD, E.B.; ORMSBY, W.C.; PETRY, T.M.; THOMPSON, M.R.; USMEN, M.A.; WRIGHT, P.J. **Lime Stabilization, Reactions, Properties, Design and Construction.** Transportation Research Board. Washington, 1987.

NOGAMI, J.S.; VILLIBOR, D.F. **Identificação expedita dos grupos de classificação MCT para solos tropicais.** Anais do 10º COBRAMSEF – ABMS, Vol. 4, p. 1293-1300. Foz do Iguaçu, 1994.

NOGAMI, J.S.; VILLIBOR, D.F. **Pavimentação de baixo custo com solos lateríticos.** São Paulo, 1995.

PARANÁ. Secretaria de Estado dos Transportes. Secretaria de Estado da Agricultura e do Abastecimento. **Adequação de estradas rurais integradas aos sistemas conservacionistas.** Curitiba, PR. 2004. 74p.

PEREIRA, R.S.; MACHADO, C.C.; CARVALHO, C.A.B. **Aplicações de misturas solo-grit em estradas florestais: resistência mecânica via CBR.** Revista Árvore, Viçosa-MG, v.30, n.4, p.619-627, 2006.

PRUSKI, F.F.; SILVA, D.D.; TEIXEIRA, A.F.; CECÍLIO, R.A.; SILVA, J.M.A.; GRIEBELER, N.P. **HIDROS: dimensionamento de sistemas hidroagrícolas.** 1. ed. Viçosa: Editora UFV, 2006. v. 1. 259p.

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

RODRIGUEZ, A.R.; CASTILLO, H.D. **La Ingeniera de Suelos en las Vias Terrestres**. México: Limusa, 1984 v. 2, 643p.

SANT'ANNA, G.L. **Estradas florestais: Caracterização e comportamento mecânico de solos e misturas solo-grits, cargas de tráfego e seus efeitos**. Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa - UFV, Viçosa, 2006.

SANT'ANNA, C.L; MELLO, J.M.de; MELLO, O.M.T de. **Estradas Florestais**. 1. ed. Lavras: Editora UFLA, 2000. 37p.

SILVA, A.M.; SCHULZ, H.E.; CAMARGO, P.B. (2003) **Erosão e hidrossedimentologia em bacias hidrográficas**. São Carlos: RiMa, 2003. 140p.

SILVA, L.C.; BORTOLUZZI, C.A. (Org). **Texto explicativo para o mapa geológico do Estado de Santa Catarina**. Florianópolis: 11º Distrito do Departamento Nacional de Produtos Minerais, Coordenadoria de Recursos Minerais da Secretaria da Ciência Tecnológica, Minas e Energia, 1987.

SOUZA, M.L. **Método de Projeto de Pavimentos Flexíveis**. 3ª Edição. Rio de Janeiro, IPR. 1981.

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).

TRINDADE, T.P. da; CARVALHO, C.A.B. de; LIMA, D.C. de; BARBOSA, P.S.A.; SILVA, C.H.C.; MACHADO, C.C. **Compactação dos solos: fundamentos teóricos e práticos**. Viçosa: Ed. UFV, 2008.

TÜCHY, E. Forestry and Ecology in Mountainous Areas. In: **Loggin of Mountain Forests**. Rome: FAO, 1982, p.9-14.

WARD, A.D.; TRIMBLE, S.W. **Environmental Hydrology**. 2.ed. Boca Raton: CRC/Lewis, 2004. 475 p.

ZIEGLER, A.D., SUTHERLAND, R.A.; 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.

ZOCCAL, J.C. Soluções cadernos de estudos em conservação do solo e água. CODASP, Presidente Prudente: v. 1, n.1, maio, 2007.