

Sgs 331883

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
FACULDADE DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

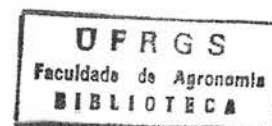
***ESCOAMENTO E EROÇÃO EM SULCOS E EM
ENTRESSULCOS EM DISTINTAS CONDIÇÕES DE SUPERFÍCIE
DO SOLO.***

JOSÉ RAMON BARROS CANTALICE

**Engenheiro Agrônomo (UFPB)
Mestre em Ciência do Solo (UFRPE)**

**Tese apresentada como um dos requisitos para obtenção do grau de
Doutor em Ciência do Solo.**

Porto Alegre, Setembro de 2001



JOSÉ RAMON BARROS CANTALICE
Engenheiro Agrônomo - Universidade Federal da Paraíba
Mestre em Agronomia - Universidade Federal Rural de Pernambuco

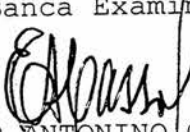
TESE

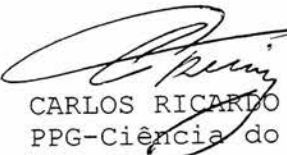
Submetida como parte dos requisitos
para obtenção do Grau de

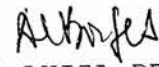
DOCTOR EM CIÊNCIA DO SOLO


Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo
Faculdade de Agronomia
Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Porto Alegre (RS), Brasil

Aprovada em: 03/09/2001
Pela Banca Examinadora



ELEMAR ANTONINO CASSOL
Orientador PPG-Ciência do Solo



CARLOS RICARDO TREIN
PPG-Ciência do Solo


ANA LUIZA DE OLIVEIRA BORGES
IPH/UFRGS


JOSE MIGUEL REICHERT
CCB/UFSM

Homologado em: 10/06/2002
Por


PEDRO ALBERTO SELBACH
Coordenador do Programa
de Pós-Graduação em Ciência
do Solo


GILMAR A. B. MARODIN
Diretor da Faculdade de
Agronomia

Dedico

A meus pais, José Cantalice (in memorian) pelo seu grande coração e Terezinha Barros Cantalice, que por duas vezes me ensinaram a andar.

Às luzes, que atendem por Guilherme e Clara, e a mãe das luzes, Maria Helena que iluminam meus dias e dividem o mérito desta importante tarefa.

Aos meus irmãos, Rosana, Rossini, Rosangela e Rodrigo, que por tanto tempo me apoiaram sempre aguardando pelo meu retorno.

A Deus, Pai e idealizador de todos esses caminhos.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Elemar Antonino Cassol que me abriu as portas e, assim, possibilitou o conhecimento da hidráulica e do transporte de sedimentos na erosão hídrica, pelo conhecimento compartilhado, e exemplo de postura e seriedade profissional.

À Professora Ana Luiza de Oliveira Borges, do IPH-UFRGS, pela permanente contribuição desde as disciplinas de formação básica em Hidráulica até as correções e sugestões na versão final da Tese.

Ao pesquisador Arcângelo Mondardo (gerente do PRONEX-SOLOS) e ao técnico agrícola do mesmo projeto, Agostinho Tarcísio S. de Oliveira, pela imprescindível ajuda na instalação e condução dos experimentos.

Ao governo federal, que através da CAPES, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul e da Universidade Federal Rural de Pernambuco, possibilitou a realização do Curso de Doutorado e deste Trabalho, e ao povo brasileiro, mantenedor das referidas Universidades.

Ao auxílio financeiro da FAPERGS, pelo edital 13/96: Projetos Temáticos (Processo 97/0245-8), e da FINEP-CNPq, através do PRONEX-SOLOS 66.1060/1997-7.

Aos Professores Carlos Ricardo Trein, do Departamento de Solos da UFRGS e José Miguel Reichert, do Departamento de Solos, CCR-UFSM, pelas participações nas Comissões Examinadoras de Qualificação para Doutorado e da Tese, pelas valiosas contribuições apresentadas.

Ao Professor Neroli Pedro Cogo, pela pronta ajuda na utilização dos laboratórios e pela ajuda nos trabalhos experimentais.

Ao Departamento de solos pela utilização dos Laboratório de Erosão e de Física do Solo.

Ao Professor Robin Thomas Clarke pela orientação nas análises estatísticas.

Aos amigos e colegas de curso Marcelo Biassusi, Thomé Lovato, Madalena, Apolino, Jéferson, e Antonio e a todos que de fato se molharam e puseram a mão na massa para realização deste trabalho.

Aos Amigos Amauri Barcelos e Carla Jarczewski companheiros no dia a dia das disciplinas e das duras horas.

À Estação Experimental Agronômica da UFRGS, pela cedência da área experimental e pelas facilidades concedidas e aos funcionários pelo auxílio nos trabalhos de campo.

Aos funcionários da Faculdade de Agronomia, José Ferreira da Silva e Jorge Luiz R. dos Santos, pela ajuda e amizade na condução dos trabalhos de laboratório.

ESCOAMENTO E EROSIÃO EM SULCOS E EM ENTRESSULCOS EM DISTINTAS CONDIÇÕES DE SUPERFÍCIE DO SOLO ⁽¹⁾

Autor: José Ramon Barros Cantalice

Orientador: Elemar Antonino Cassol

SINOPSE

Na erosão em entressulcos o solo é desagregado pela chuva e transportado pelo escoar de uma delgada lâmina de água, que, em seguida, na erosão em sulcos, se concentra em pequenos canais, com maior capacidade de desagregação de solo pela tensão cisalhante que se desenvolve. Este trabalho foi realizado com o objetivo de avaliar, na erosão em entressulcos, as condições hidráulicas, relações de desagregação e transporte do solo em condições de solo descoberto, bem como as condições hidráulicas e as taxas de desagregação com o solo coberto por palha de soja e, na erosão em sulcos, avaliar a erodibilidade do solo e as condições hidráulicas do escoamento em sulcos pré-formados em solo recém trabalhado e em solo com um ano de consolidação natural. Utilizou-se no estudo um Argissolo Vermelho distrófico típico. Em laboratório conduziram-se dois experimentos de erosão em entressulcos sob chuva simulada de uma hora e intensidade planejada de 75 mm h^{-1} , sendo um dos experimentos com o solo descoberto e declives de $0,045$; $0,09$ e $0,18 \text{ m m}^{-1}$, com solo saturado e sob drenagem livre e o outro com o solo sob as doses de 0 ; $0,05$; $0,1$; $0,2$; $0,4$ e $0,8 \text{ kg m}^{-2}$ de palha de soja e declive de $0,10 \text{ m m}^{-1}$. Um terceiro experimento de erosão em entressulcos foi realizado a campo com solo descoberto, declive de $0,0915 \text{ m m}^{-1}$, com uma hora de chuva com intensidade de 75 mm h^{-1} . No estudo da erosão em sulcos, dois experimentos foram conduzidos a campo em declive médio de $0,067 \text{ m m}^{-1}$, pela aplicação de chuvas com intensidade de 70 mm h^{-1} durante 80 minutos. Nos últimos 20 minutos de chuva adicionaram-se fluxos extras de 0 , 10 , 20 , 30 , 40 e 50 L min^{-1} nos sulcos em solo recém preparado e de 0 , 20 , 40 , 60 , 80 e 100 L min^{-1} , nos sulcos em solo consolidado. Determinaram-se valores de erodibilidade em entressulcos de $K_i = 2,55 \times 10^6 \text{ kg s m}^{-4}$, de erodibilidade em sulcos de $K_r = 0,0024 \text{ kg N}^{-1} \text{ s}^{-1}$ e tensão crítica de cisalhamento de $\tau_c = 2,75 \text{ Pa}$. A presença de resíduos vegetais na superfície provocou um aumento da rugosidade hidráulica em entressulcos, com a conseqüente diminuição das taxas de desagregação do solo. O transporte de sedimentos em entressulcos foi melhor descrito por relações que contemplam a tensão cisalhante. O regime de escoamento nos sulcos passou de turbulento subcrítico em solo recém preparado, para turbulento supercrítico em solo consolidado, devido a diminuição da rugosidade superficial. Houve aumento da resistência e redução das taxas de desagregação do solo durante o período de consolidação.

⁽¹⁾ Tese de Doutorado em Ciência do Solo, do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul (141 p.) – Setembro de 2001.

RUNOFF AND RILL AND INTERRILL EROSION UNDER DIFFERENT CONDITONS OF SOIL SURFACE ⁽¹⁾

Author: José Ramon Barros Cantalice

Adviser: Elemar Antonino Cassol

SUMMARY

Soil particles are detached by raindrop impacts in the interrill soil erosion process and transported by a thin layer of flowing water, which afterwards may concentrate in small channels, thus increasing detachment capacity due to the shear stress of the flow acting on the channel walls. This study was conducted with the objective of evaluating hydraulics conditions, detachment and transport rates under bare soil conditions as well as under soil covered by soybean residues in the interrill erosion process and also to study the rill erosion process under conditions of fresh-tilled and consolidated soil. A sandy clay loam Paleudult soil was used. Three experiments were conducted for interrill soil erosion, two in laboratory applying one hour rainfall with intensity of 75 mm h^{-1} and one under field conditions, applying one-hour rainfall with intensity of 75 mm h^{-1} . One laboratory experiment evaluated interrill erosion under saturated soil and with a free drainage after applying a water tension of 60 cm of water column, both with three slope conditions: 0,045; 0,090 and $0,180 \text{ m m}^{-1}$. In a second laboratory study, interrill soil erosion was evaluated with soil covered by soybean residues with levels of 0,00; 0,05; 0,10; 0,20; 0,40 and $0,80 \text{ kg m}^{-2}$, under slope of 0.1 m m^{-1} . A third interrill experiment was conducted in the field with bare soil and slope of 0.0915 m m^{-1} under one hour 75 mm h^{-1} simulated rainfall. In the rill erosion studies, two field experiments were conducted, on a average slope of 0.067 m m^{-1} and using 80 minutes of simulated rainfall of 70 mm h^{-1} . In the last 20 minutes of rainfall extra inflows were added at rates of 0, 10, 20, 30, 40 and 50 L min^{-1} in preformatted rills on fresh tilled soil and 0, 20, 40, 60, 80 and 100 L min^{-1} in rills with one year of soil consolidation. Interrill soil erodibility of $K_i = 2.55 \times 10^6 \text{ kg s m}^{-4}$, rill soil erodibility of $K_r = 0.0024 \text{ kg N}^{-1} \text{ s}^{-1}$ and critical shear stress of $\tau_c = 2,75 \text{ Pa}$ were determined for the used soil. The soybean residues on soil surface increased the hydraulic surface roughness and thus reducing the interrill soil detachment rates. The interrill sediment transport was more closely explained by relations that includes a factor for excess shear stress of the flow. In the rills the soil consolidation process changed flow conditions from subcritical turbulent on fresh tilled soil to supercritical turbulent flow on consolidated soil. The soil consolidation increased the soil strength and reduced the rill erosion detachment rates.

⁽¹⁾ Doctorate Thesis in Soil Science, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil. (141 p.) September, 2001.

SUMÁRIO

1 – INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	6
2.1. Erosão do solo em entressulcos	6
2.1.1. Desagregação do solo em entressulcos por competência da chuva ..	7
2.1.2. A teoria do transporte pelo fluxo induzido pelo impacto das gotas de chuva	8
2.1.3. Desagregação do solo em entressulcos por competência do escoamento laminar.....	9
2.1.4. O escoamento na erosão em entressulcos.....	11
2.1.4.1. Hidráulica e resistência ao escoamento em entressulcos.....	13
2.1.4.2. Resistência ao escoamento promovida por resíduos vegetais ...	16
2.1.5. Transporte de sedimentos no escoamento em entressulcos	18
2.1.6. Resistência do solo à desagregação na erosão em entressulcos	21
2.1.7. Erodibilidade do solo em entressulcos.....	22
2.2. Erosão do solo em sulcos	24
2.2.1. Formação dos sulcos – hidráulica e dinâmica do escoamento nos sulcos de erosão.....	25
2.2.2. Hidráulica e geometria de sulcos pré-formados	27
2.2.3. Desagregação e transporte de sedimentos na erosão em sulcos	28
2.2.4. Erodibilidade do solo em sulcos.....	30
2.2.5. O processo de consolidação dos solos agrícolas e sua relação com a erosão em sulcos.....	31
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	36
3.1 Erosão em entressulcos.....	36
3.1.1. Experimentos de laboratório	36
3.1.1.1. Experimento 1 – Erosão em entressulcos sob diferentes condições de umidade inicial do solo.....	38
3.1.1.2. Experimento 2 – Erosão em entressulcos na presença de resíduos vegetais.....	40
3.1.2. Características da chuva simulada	41
3.1.3. Avaliação das condições hidráulicas do escoamento em entressulcos.....	41
3.1.4. Experimento de campo – Erosão em entressulcos sobre solo descoberto	45
3.1.4.1. Características hidráulicas do escoamento e das chuvas aplicadas no estudo de erosão em entressulcos a campo	46
3.1.5. Quantificação das perdas de solo, das taxas de desagregação e da concentração de sedimentos na erosão em entressulcos	47

3.1.6. Avaliação do transporte de sedimentos	48
3.1.7. Erodibilidade do solo em entressulcos	49
3.2. Erosão em Sulcos	49
3.2.1. Características gerais do local e da área experimental.....	50
3.2.2. Preparo da área, formação dos sulcos, delineamento experimental e tratamentos	51
3.2.2.1. Preparo da área e formação dos sulcos	51
3.2.2.2. Delineamento experimental e tratamentos.....	52
3.2.2.3. Procedimento Experimental	55
3.2.3. Caracterização hidráulica do escoamento nos sulcos pré-formados	56
3.2.4. Quantificação das taxas de desagregação do solo e determinação da erodibilidade em sulcos	60
3.2.5. Caracterização do estado de consolidação do solo nos sulcos	62
4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO	65
4.1. Erosão em entressulcos sob diferentes declividades e condições iniciais de umidade do solo	65
4.1.1. Caracterização hidráulica do escoamento em entressulcos perturbado pela chuva	65
4.1.2. Dinâmica das taxas de desagregação de solo com o escoamento em entressulcos.....	71
4.1.3. Transporte de sedimentos na erosão na erosão em entressulcos....	75
4.1.4. Erodibilidade do solo em entressulcos.....	78
4.1.5. Caracterização hidráulica e taxas de desagregação do escoamento na erosão em entressulcos na presença de resíduos vegetais em condições de laboratório.....	81
4.2. Erosão em sulcos em condições de solo recém preparado.....	86
4.2.1. Caracterização hidráulica do escoamento nos sulcos para o solo descoberto e recém preparado.....	86
4.2.2. Taxas de desagregação e caracterização da erodibilidade do solo em sulcos.....	91
4.2.3. Avaliação do transporte sólido nos sulcos recém preparados	96
4.2.4. Erosão em sulcos em condições de solo consolidado	100
4.2.4.1. Hidráulica do escoamento nos sulcos em solo consolidado	100
4.2.4.2. Caracterização do estado de consolidação e sua relação com a erodibilidade do solo	105
4.2.4.3. Taxas de desagregação do solo nos sulcos consolidados	112
4.3. Síntese comparativa dos resultados da erosão em entressulcos e em sulcos	114
5. CONCLUSÕES.....	117
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	120
7. APÊNDICES	128
8. VITA.....	141

RELAÇÃO DE TABELAS

	Página
2.1. Estágios de formação de sulcos, e respectivas propriedades hidráulicas identificadas por Merritt (1984).....	27
3.1. Características físicas e químicas da camada superficial do solo utilizado	37
4.1. Características hidráulicas do escoamento em entressulcos perturbado pela chuva em solo descoberto: descarga líquida (q), velocidade média (Vm), altura da lâmina (h), Viscosidade cinemática (ν), Número de Reynolds (Re), Número de Froude (Fr), Fator de perda de carga (f), Reynolds da partícula (Re^*), Parâmetro K, diâmetro da partícula (d_{65}) e (d_{50}), e Velocidade de cisalhamento (U^*). Valores médios de 3 repetições.....	67
4.2. Coeficientes de determinação (r^2) das regressões entre as taxas de transporte observadas e os valores estimados pelas equações de capacidade de transporte de sedimentos.....	76
4.3. Valores médios da erodibilidade do solo em entressulcos (K_i) em ($kg.s.m^{-4}$), para todos os testes realizados em condições de solo descoberto.....	79
4.4. Características hidráulicas do escoamento em entressulcos perturbado pela chuva e na presença de resíduos vegetais: descarga líquida (q), velocidade do escoamento (V), altura da lâmina (h), Número de Reynolds (Re), Número de Froude (Fr), coeficiente de rugosidade de Manning (n) e viscosidade cinemática (ν).....	82
4.5. Valores observados e estimados do Sub-fator cobertura do solo em entressulcos do resíduo em contato direto com a superfície do solo.....	85
4.6. Modelos ajustados para estimativa do efeito do resíduo em contato direto com a superfície do solo nas taxas de desagregação (C_{iII}).....	85

4.7.	Características hidráulicas do escoamento em sulcos com solo recém preparado: descarga líquida (Q), velocidade média (Vm), raio hidráulico (R _h), área (m ²), perímetro molhado (P _m), declive (m m ⁻¹), Número de Reynolds (Re), Número de Froude (Fr), Coeficiente de rugosidade de Manning (n), Reynolds da partícula (Re*), diâmetro da partícula (d ₆₅), Velocidade de cisalhamento (U*) e tensão cisalhante (τ). Valores médios de 3 repetições em 4 momentos durante a aplicação das vazões extras.....	90
4.8.	Tensão cisalhante média (τ) e taxas médias de desagregação do solo em sulcos para as vazões aplicadas. Média de três repetições.....	92
4.9.	Capacidade de transporte (Tc), carga de sedimentos (G) e relação (G/Tc) dos sulcos para as vazões aplicadas. Médias de 3 repetições.....	95
4.10.	Avaliação do erro de estimativa da descarga sólida em kg s ⁻¹ através das equações utilizadas para os tratamentos considerados.....	98
4.11.	Características hidráulicas do escoamento em sulcos com solo consolidado: descarga líquida (Q), velocidade média (Vm), raio hidráulico (h), área (m ²), perímetro molhado (P _m), declive (m m ⁻¹), Número de Reynolds (Re), Número de Froude (Fr), Coeficiente de rugosidade de Manning (n), Reynolds da partícula (Re*), diâmetro da partícula (d ₆₅), Velocidade de cisalhamento (U*) e tensão cisalhante (τ). Valores médios de 3 repetições em 4 momentos durante a aplicação das vazões extras.....	101
4.12.	Atributos físicos do solo durante os 17 meses de consolidação dos sulcos pré-formados.....	106
4.13.	Conteúdo de água (kg kg ⁻¹) a cada sucção aplicada nas 4 amostragens realizadas para caracterização do estado consolidação dos sulcos pré-formados.....	106
4.14.	Tensões efetivas σ' do solo em (kPa), desenvolvidas durante os 17 meses do processo de consolidação dos sulcos pré-formados.....	110
4.15.	Parâmetros estatísticos, tensões efetivas e coesão de falha do solo nos sulcos consolidados.....	111
4.16.	Taxas de desagregação em sulcos Dr (kg m ⁻² s ⁻¹) e diferenças (%), observadas nos sulcos para o solo recém preparado (1 ^o ano), e para o solo consolidado (2 ^o ano).....	113

RELAÇÃO DE FIGURAS

	Página
2.1. Relação do Número de Reynolds com o fator de perda de carga (f), para o escoamento laminar em áreas de entressulcos.....	15
2.2. Representação da reação de resistência do solo à ação das forças hidrodinâmicas.....	33
3.1. Vista geral da parcela experimental e do sistema de controle da drenagem.....	39
3.2. Parcelas experimentais para estudo da erosão em entressulcos em condições de campo.....	46
3.3. Disposição dos sulcos dentro de um bloco experimental evidenciando também a disposição em relação ao simulador de chuvas de braços rotativos.....	53
3.4. Vista geral de três sulcos pré-formados em solo recém preparado antes dos testes experimentais de dezembro de 1998.....	54
3.5. Vista geral de três sulcos pré-formados em solo consolidado antes dos testes experimentais de dezembro de 1999.....	55
3.6. Perfilômetro em utilização para determinação da seção transversal dos sulcos.....	57
4.1. Valores da altura da lâmina do escoamento determinado pela relação (3.1) e pela equação (2.16) com $K = 24$, para o solo com drenagem livre cca e 4,5% de declive	66
4.2. Relação do número de Reynolds (Re) com o fator de perda de carga (f), para os todos tratamentos, com o solo saturado e drenagem livre, nos declives de 4,5; 9 e 18%.....	70
4.3. Taxas de desagregação do solo no tempo, para os tratamentos com solo sob drenagem livre e declives de 4,5, 9 e 18%.....	72
4.4. Taxas de desagregação do solo no tempo, para os tratamentos com solo saturado, e os declives de 4,5, 9 e 18%.....	73

4.5.	Comportamento temporal da descarga líquida (q) para o solo pre-tratado com 60 cca a 4,5, 9 e 18% de declive, e para o solo saturado sob 18% de declive.....	74
4.6.	Representação da velocidade média do escoamento para as vazões extras aplicadas acrescida das chuvas simuladas.....	87
4.7.	Variação do raio hidráulico (R_h) e da área (A) dos sulcos para as vazões extras aplicadas.....	89
4.8.	Erodibilidade do solo (K_r) em sulcos e tensão crítica de cisalhamento (τ_c), obtidas a partir da regressão das taxas de desagregação do solo (D_r) com as respectivas tensões de cisalhamento do escoamento (τ).....	93
4.9	Representação da descarga sólida (kg s^{-1}) estimada pela potência do escoamento ($\Omega = \rho_w \cdot g \cdot s \cdot q$ em kg s^{-3}), para os fluxos extras aplicados de 0, 10, 20, 40 e 50 L min^{-1} , acrescidos de chuva simulada com 70 mm h^{-1} de intensidade.....	97
4.10.	Comportamento da descarga sólida (kg s^{-1}) observada e estimada pelas equações 4.15 e a de Nearing et al. (1997), em função das descargas líquidas aplicadas.....	99
4.11.	Aspecto dos sulcos pré-formados em solo recém preparado (parte superior da figura) e dos sulcos em solo consolidado (parte inferior da figura) antes dos testes.....	103
4.12.	Coefficiente de rugosidade de Manning (n) e velocidade média do escoamento, para as vazões aplicadas de 0+5, 20+5 e 40+5 L min^{-1} nos sulcos em solo recém preparado e nos sulcos com solo consolidado durante 1 ano.....	104
4.13.	Curvas de sorção e desorção de umidade do solo nos 10 ^o e 17 ^o meses de consolidação dos sulcos pré-formados.....	107
4.14.	Parâmetro χ em função do valor de saturação do solo para o solo dos sulcos pré-formados e consolidados por 5 meses.....	108
4.15.	Tensões efetivas do solo (σ') durante os dezessete meses de consolidação.....	110
4.16.	Comportamento da altura do escoamento em relação ao número de Reynolds obtido na erosão em em entressulcos e em sulcos sob diferentes condições de superfície do solo.	114
4.17	Taxas de desagregação obtidas na erosão em entressulcos com solo descoberto, e na erosão em sulcos com solo recém preparado e consolidado.....	116

1 – INTRODUÇÃO

O entendimento das relações envolvidas na erosão do solo é, de longe, o objetivo de todos que lidam com problemas causados pela desagregação e o transporte da camada superficial do solo. As principais conseqüências desse processo são a diminuição da produtividade agrícola, como também o assoreamento dos mananciais hídricos desde pequenos canais até os grandes reservatórios, pela deposição dos sedimentos.

A erosão hídrica do solo caracteriza-se pela desagregação, transporte e deposição de partículas do solo causadas pelo impacto das gotas de chuva e pelo escoamento superficial. Dentre as diversas formas de erosão hídrica do solo, a erosão em entressulcos e a erosão em sulcos são as que maiores danos provocam no processo produtivo dos solos utilizados na agricultura.

A erosão em entressulcos é constituída dos processos de desagregação das partículas do solo pelo impacto das gotas de chuva, e do transporte das partículas desagregadas por uma delgada lâmina de escoamento que se forma sobre a superfície do solo, ação também incrementada pela turbulência desse fluxo causado pelo impacto das gotas de chuva. Do ponto de vista agrícola, essa é a forma de erosão mais danosa, pois é na camada mais superficial do solo que se encontram a matéria orgânica, os elementos nutrientes e os insumos agrícolas, que favorecem à produção agrícola, como também, as condições para ocorrência dos processos microbiológicos que se refletem na fertilidade do solo, pela decomposição do material orgânico, tornando

nutrientes imobilizados como o nitrogênio e o fósforo, em forma assimilável pelas plantas, a mineral. É justamente nessa camada mais superficial do solo onde ocorre a erosão em entressulcos, de forma quase imperceptível, transportando as partículas de solo e reduzindo a fertilidade do solo.

A presença de resíduos vegetais na superfície do solo na erosão altera o comportamento hidráulico do escoamento, e a interação do escoamento com a superfície do solo. Os resíduos vegetais protegem o solo contra o impacto das gotas de chuva e reduzem a velocidade do escoamento, determinando reduções nas taxas de desagregação do solo e no transporte de sedimentos. O estudo das alterações das condições hidráulicas são fundamentais para o conhecimento e quantificação das relações da erosão em entressulcos.

A erosão em sulcos constitui-se na segunda fase evolutiva do processo físico da erosão hídrica do solo, marcando a mudança da forma do escoamento. De difuso sobre a superfície do solo, na fase inicial, na erosão em entressulcos, nessa segunda fase o escoamento passa a se concentrar em pequenas depressões da superfície do solo chamadas de sulcos. Quando isso ocorre, a lâmina de escoamento desenvolve uma maior tensão de cisalhamento pelo aumento de sua espessura, aumentando portanto, a capacidade de desagregação de solo. Em condições naturais, esses pequenos canais ocorrem de forma espaçada e aleatória, formando uma rede de canais que podem desagregar e transportar uma grande quantidade de solo. A concentração do escoamento pode acontecer em depressões naturais do solo, marcas deixadas pelo cultivo do solo ou por erosões anteriores.

A consolidação do solo é um fenômeno físico que ocorre quando o solo não é mobilizado. As condições físicas de densidade do solo, porosidade e

coesão, que se desenvolvem durante o processo de consolidação, podem conferir ao solo uma maior resistência à desagregação pela erosão hídrica. Com o advento do plantio direto e dos preparos reduzidos, muitos solos de áreas agrícolas se consolidam, com conseqüente diminuição da erosão hídrica.

O conhecimento da hidráulica do escoamento e das variáveis físicas do solo envolvidas na desagregação e no transporte de sedimentos, pelo escoamento concentrado em sulcos, se faz necessário para uma adequada previsão dos impactos ambientais provocados pelas diversas práticas de cultivo e uso do solo da propriedade agrícola, que podem implicar no transporte de fertilizantes e pesticidas pelo escoamento superficial, e na conseqüente poluição dos recursos hídricos. Da mesma forma, no atual contexto agrícola, de preparos reduzidos e o plantios sem mobilização do solo, o conhecimento do processo físico da consolidação do solo, que determina reduções nas taxas de desagregação do solo, se faz necessário.

O presente trabalho foi realizado com os seguintes objetivos:

- Avaliar variáveis hidráulicas do escoamento em entressulcos sob chuva simulada, tais como, velocidade e altura do escoamento, e a resistência ao escoamento sob solo descoberto, que são determinantes das relações de desagregação de solo nas áreas de entressulcos.
- Caracterizar o regime de escoamento produzido nas condições da erosão em entressulcos, que podem fornecer subsídios importantes as relações de desagregação de solo.

- Avaliar a adequação de funções de transporte baseadas na tensão cisalhante do escoamento e na potência do escoamento, ao transporte de sedimentos que ocorre na erosão em entressulcos.
- Avaliar as taxas de desagregação de solo em entressulcos e em sulcos em diferentes condições de superfície do solo e determinar a erodibilidade do solo em entressulcos e em sulcos.
- Avaliar as condições do escoamento em entressulcos produzido na presença de resíduos vegetais e estudar as relações entre a resistência ao escoamento e as quantidades de resíduos vegetais.
- Avaliar as condições hidráulicas do escoamento em sulcos e caracterizar o regime de escoamento sob condições de sulcos pré-formados sobre solo recém preparado; e em condições de sulcos pré-formados e submetidos a um ano de consolidação.
- Determinar as taxas de desagregação e a erodibilidade do solo, bem como quantificar o transporte sólido em sulcos pré-formados em solo recentemente preparado.
- Caracterizar fisicamente o estado de consolidação do solo.
- Determinar as taxas de desagregação do solo em sulcos, e as alterações da erodibilidade do solo promovidas pelo processo de consolidação dos sulcos.

As hipóteses do trabalho foram as seguintes:

- As equações de transporte baseadas na potência do escoamento são mais adequadas para estimativa do sedimento transportado no processo da erosão em entressulcos, do que as equações baseadas unicamente na

tensão cisalhante do escoamento, porque essas relações, além da tensão cisalhante, também consideram a velocidade do escoamento.

- A presença de resíduos vegetais, numa superfície submetida à erosão em entressulcos, reduz as taxas de desagregação e de transporte de partículas de solo, em relação ao solo descoberto, por diminuírem o impacto direto das gotas de chuva na superfície do solo e por provocarem um aumento da rugosidade hidráulica da superfície do solo.
- Na erosão em entressulcos o escoamento em diferentes condições de umidade do solo, provoca mudanças nas taxas de desagregação por determinarem diferentes potenciais matriciais, que, por sua vez, exercem influências nas ligações entre partículas e agregados do solo.
- As tensões efetivas (σ') desenvolvidas em solos submetidos a consolidação natural durante um ano, determinam uma redução na rugosidade hidráulica superficial do solo, afetando assim, o regime de escoamento que acontece nessas condições, tendo em vista que os processos de umedecimento e secagem aumentam a coesão entre as partículas e provocam a formação de crostas na superfície.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Erosão do solo em entressulcos

Na erosão em entressulcos, quando o solo ainda não apresenta incisões na superfície realizadas pelo escoamento superficial, tem importância a desagregação do solo pelo impacto das gotas de chuva na sua superfície, e a existência de uma lâmina de escoamento pouco espesso que mais parece transportar que desagregar o solo (Govers, 1996). O escoamento superficial que acontece na erosão em entressulcos é com frequência chamado de fluxo laminar raso (Gerits et al., 1990).

Wan & El-Swaify (1998) comentam que a erosão em entressulcos, em nível de processo, pode ser considerada uma combinação dinâmica entre a desagregação e transporte (na forma de salpico) pelo impacto das gotas de chuva, e o transporte pelo escoamento laminar não concentrado. Entretanto, devido à dificuldade de separação dos dois processos no campo, as informações existentes sobre as características de tamanho de sedimento e a seletividade de transporte em entressulcos se baseiam em pesquisas que consideram somente o escoamento laminar, ou falham na divisão dos processos da erosão provocadas pelo impacto das gotas de chuva e pelo escoamento laminar (Ghadiri & Rose, 1991).

Para Everaert (1991), a erosão em entressulcos pode ser vista como a combinação de dois diferentes processos: 1) a desagregação da massa do solo

pelo impacto das gotas de chuva e pelo fluxo em entressulcos; 2) o transporte do solo desagregado pelo escoamento em entressulcos, que parece não ter capacidade de transportar todo sedimento produzido pelo impacto das gotas de chuva, com ou sem influência do impacto das gotas sobre o escoamento em entressulcos.

2.1.1. Desagregação do solo em entressulcos por competência da chuva

Os mecanismos do impacto das gotas de chuva, tais como geometria do impacto, velocidade e distribuição espacial, são conhecidos a partir de alguns estudos que utilizaram técnicas fotográficas (Ghadiri & Payne, 1980; Al-Durrah & Bradford, 1982). A forma do impacto e as trajetórias das gotas ejetadas são afetadas pela profundidade do escoamento, declive, vento, ângulo de inclinação das gotas e velocidade do fluxo. Esses fatores contribuem para a anisotropia da explosão das gotas sobre o solo e resultam em um transporte líquido de material do solo (Gerits et al., 1990).

A anisotropia e a aleatoriedade dos processos acima mencionados, abrem espaço para a utilização de funções determinísticas que relacionam o solo desagregado com parâmetros de erosividade da chuva. Meyer (1981) relacionou a desagregação pelo impacto das gotas com taxas de desagregação do solo através de uma equação do tipo potência:

$$D_s = a.I^b \quad (2.1)$$

onde D_s = taxa de desagregação por impacto ($\text{kg m}^2 \text{s}^{-1}$); I = intensidade da chuva (m s^{-1}); a = uma constante que depois foi assumida como um parâmetro relativo a erodibilidade do solo; e $b = 2$.

O WEPP , “*Water Erosion Prediction Project*” (Flanagan & Nearing, 1995) modelo americano de predição da erosão hídrica, utilizou inicialmente, a seguinte relação para determinação das taxas de desagregação em entressulcos:

$$D_i = K_i i^2 S_f \quad (2.2)$$

onde D_i = taxa de desagregação de solo em entressulcos ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$); K_i = fator de erodibilidade em entressulcos (kg s m^{-4}); I = intensidade da chuva (m s^{-1}) e S_f = um fator devido ao declive (adimensional). Posteriormente, o modelo passou a considerar também os efeitos do excesso de precipitação e da infiltração de água nas taxas de desagregação em entressulcos passando a ser apresentado da seguinte forma:

$$D_i = K_i I R S_f \quad (2.3)$$

Sendo R = excesso da precipitação pluviométrica (m s^{-1}). Ressalta-se que essa mesma relação foi proposta por Kinnell & Cummings (1993).

2.1.2 A teoria do transporte pelo fluxo induzido pelo impacto das gotas de chuva

Kinnell (1991) acrescentou um melhor entendimento aos processos de desagregação e transporte em entressulcos. Para o autor, quando uma partícula de solo, sob uma lâmina de água em movimento, sofre o impacto das gotas de chuva pode entrar em transporte de três maneiras. Se a partícula é

pequena ou de baixa densidade, poderá mover-se em suspensão; se de tamanho maior ou de alta densidade, pode cair junto ao fundo; e, se o escoamento tiver suficiente velocidade, as partículas podem mover-se como carga de fundo. No entanto, essas partículas não entram em movimento até que uma força de ascensão as coloquem em movimento pela ação de uma força adicional. Essa força é fornecida pelas gotas de chuva ao se chocarem com o fluxo raso, que dessa forma, ejetam as partículas de solo no fluxo em frequência de ascensão e queda. O transporte é então induzido pelo embate das gotas de chuva sobre o escoamento, o qual, por sua pouca disponibilidade de energia, seria incapaz de transportar essas partículas. Esse processo tem sido chamado de transporte pelo fluxo induzido pelo impacto das gotas de chuva.

2.1.3. Desagregação do solo em entressulcos por competência do escoamento laminar

As taxas de desagregação produzidas pelo escoamento em entressulcos e pela precipitação da chuva sobre o solo são menores quando produzidas isoladamente, e serão maiores quando se considerar o escoamento e o solo sob o embate das gotas de chuva (Gerits et al., 1990), o que corrobora a teoria Kinnell (1991) sobre o transporte induzido pelo impacto das gotas de chuva. Gilley et al. (1985) desenvolveram uma equação para solo desagregado em escoamento laminar sob impacto da chuva, válida para uma altura de lâmina

do escoamento (h) maior que o diâmetro das gotas de chuva (d), a qual é dada pela expressão:

$$D_s = 0,2K_d\rho \cos^2 \theta \sum_{i=1}^n a_i V_i^2 \left(\frac{d_i}{h} \right)^{1,83} \quad (2.4)$$

onde D_s = taxa de desagregação por impacto das gotas de chuva ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$), K_d = fator de desagregabilidade do solo (s m^{-1}), sendo este um parâmetro relacionado à erodibilidade do solo em entressulcos; ρ = densidade da água (kg m^{-3}), θ = ângulo do declive (em graus), a_i = número de gotas com um diâmetro d_i , V_i = velocidade de impacto das gotas de chuva com diâmetro d_i (m s^{-1}), d_i = diâmetro de gotas de uma determinada classe de tamanho (m) e h = altura da lâmina (m).

Julien (1995), aplicando análise dimensional à erosão em entressulcos induzida pela chuva sobre um solo descoberto, considerou que a taxa de desagregação e/ou transporte de sedimento (q_s) pode ser descrita em função (\mathfrak{F}) da geometria e propriedades do fluxo, e de variáveis do solo, ou seja:

$$q_s = \mathfrak{F} \left(s_o, q, i, x, \rho, \nu, \frac{\tau}{\tau_c} \right) \quad (2.5)$$

onde q_s = massa por unidade de largura no tempo ($\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$), S_o = a inclinação da superfície (m m^{-1}), q = descarga líquida ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$), i = intensidade da chuva (m s^{-1}), X = comprimento da lâmina (m), ρ = densidade do fluido (kg m^{-3}), ν = viscosidade cinemática do fluido ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$), τ e τ_c , respectivamente a tensão cisalhante do fluxo (N m^{-2}) e a tensão crítica de cisalhamento (N m^{-2}) do solo. Estas variáveis, após análise dimensional, constituem a seguinte equação:

$$q_s = \alpha s^\beta q^\gamma i^\delta \left(1 - \frac{\tau_c}{\tau} \right)^\varepsilon \quad (2.6)$$

onde as variáveis S , q , i refletem o potencial erosivo, o fator (τ/τ_c) a resistência do solo a erosão, e α , β , γ , δ , e ε são coeficientes a serem determinados a partir de experimentos de campo e laboratório. A equação 2.6, é bem semelhante à desenvolvida empiricamente por Zhang et al. (1998), para desagregação em entressulcos (D_i), a qual é dada por:

$$D_i = K_i I q^c S^{2/3} \quad (2.7)$$

onde D_i = taxa de desagregação do solo em entressulcos ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$); I = intensidade da chuva (m s^{-1}); q = descarga líquida ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$); S = declividade do solo (m m^{-1}); c = expoente e o fator (τ/τ_c) é substituído por um parâmetro referente à erodibilidade em entressulcos (K_i).

2.1.4. O escoamento na erosão em entressulcos

O escoamento raso sobre uma superfície de solo pode ser definido como sendo o fluxo de água sobre a superfície do solo antes dele tornar-se canalizado; ou, segundo Horton (1945), negligenciando-se a interceptação pela vegetação, o escoamento laminar é a parte da precipitação que não infiltra no solo (Gerits et al., 1990).

Ainda segundo Gerits et al. (1990), a definição hortoniana tem sido a mais usada. No entanto, o escoamento laminar pode ocorrer em quatro principais tipos:

- Fluxo hortoniano é o que ocorre quando a intensidade da chuva excede a taxa de infiltração, sendo comum acontecer quando a superfície do solo está úmida ou é pouco permeável.

- Fluxo hortoniano atrasado ocorre quando a intensidade da chuva só excede a taxa de infiltração com algum atraso, o que é comum em solos com argila expansiva de regiões áridas.
- Escoamento saturado como consequência da superação da capacidade de retenção de água do solo.
- Escoamento por saturação da camada superficial do solo, sobre uma camada menos permeável.

O escoamento em entressulcos pode ser descrito matematicamente com a equação da continuidade em uma resolução unidimensional, conforme a descrição de Ponce (1989), pela equação:

$$\frac{\partial Q}{\partial X} + \frac{\partial A}{\partial t} = q_l \quad (2.8)$$

onde q_l = fluxo lateral por unidade de comprimento ($m^2 s^{-1}$), Q = descarga líquida ($m^3 s^{-1}$), X = comprimento na direção do fluxo (m), A = área do contorno (m^2) e t = tempo (s). A equação 2.8 determina que a mudança de fluxo por unidade de comprimento, na direção do fluxo, num volume de controle é equilibrada pela mudança na área por unidade de tempo. Em uma condição hidrológica de pequena bacia, o escoamento é considerado sobre uma superfície plana de comprimento L , declive S , e teoricamente de largura infinita. Assim, torna-se, apropriada uma análise por unidade de largura. Dessa forma a equação (2.9) é convertida para:

$$\frac{\partial q}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial t} = i \quad (2.9)$$

onde q = descarga por unidade de largura, ($m^2 s^{-1}$), h = altura da lâmina (m), e i = excesso da precipitação pluviométrica em ($m s^{-1}$).

2.1.4.1. Hidráulica e resistência ao escoamento em entressulcos

Para o conhecimento da hidráulica de um fluxo, pelo menos alguns poucos parâmetros devem ser estabelecidos com mais precisão. Quando a unidade de descarga e a profundidade da lâmina são medidos corretamente muitos outros parâmetros podem ser calculados, como a velocidade média do escoamento, a perda de carga, os números de Reynolds e Froude, e ainda, a tensão cisalhante para os estudos de erosão (Savat, 1977). O número de Reynolds relaciona a magnitude das forças de inércia com as forças viscosas, enquanto o número de Froude relaciona as forças de inércia com os efeitos das forças gravitacionais (Simons & Senturk, 1992).

O regime do escoamento em entressulcos pode ser de laminar subcrítico ($9 < R_e < 40$ e $F_r < 1$) para o transporte de sedimentos sob chuva simulada (Guy et al. , 1990); a laminar supercrítico ($139 < R_e < 399$ e $F_r > 1$) ou laminar de transição ($500 < R_e < 760$ e $F_r > 1$) (Farenhorst & Bryan, 1995).

A solução cinemática das equações da quantidade de movimento produz resultados precisos para a maioria das situações hidrológicas (Gerits et al., 1990), e permite expressar a descarga líquida (q) em qualquer ponto em função da altura de lâmina de escoamento (Moore & Foster, 1990):

$$q = v h = \alpha h^m \quad (2.10)$$

onde v = velocidade do escoamento ($m s^{-1}$), h = altura da lâmina (m); m = parâmetro dependente do tipo de regime do fluxo (adimensional), e α = coeficiente hidráulico dependente da rugosidade, inclinação e viscosidade cinemática do fluido.

A resistência ao escoamento em regime laminar pode ser descrita pela equação de Darcy-Weisbach que define a perda de carga do escoamento (Gerits et al., 1990), a qual é dada por:

$$f = \frac{8ghS}{V^2} \quad (2.11)$$

onde f = fator de perda de carga (adimensional); S = inclinação do declive ($m\ m^{-1}$); g = aceleração da gravidade ($m\ s^{-2}$); h = altura da lâmina do escoamento (m); e V = velocidade do escoamento ($m\ s^{-1}$).

Em experimentos de erosão em entressulcos, as forças hidrodinâmicas que se contrapõem às forças de resistência ao escoamento produzem a seguinte relação com o número de Reynolds (Yoon & Wenzel, 1971):

$$f = \frac{K}{R_e} \quad (2.12)$$

onde f = fator de perda de carga, R_e = número de Reynolds e K um parâmetro hidráulico adimensional de resistência que varia com as características de forma e de rugosidade da superfície, impacto das gotas de chuva, declive e descarga líquida cujo valor teórico para escoamento laminar é 24 (Savat, 1980; Yoon & Wenzel, 1971; Katz, et al. 1995). Esta relação é mostrada por Gerits et al. , (1990) na figura 2.1:

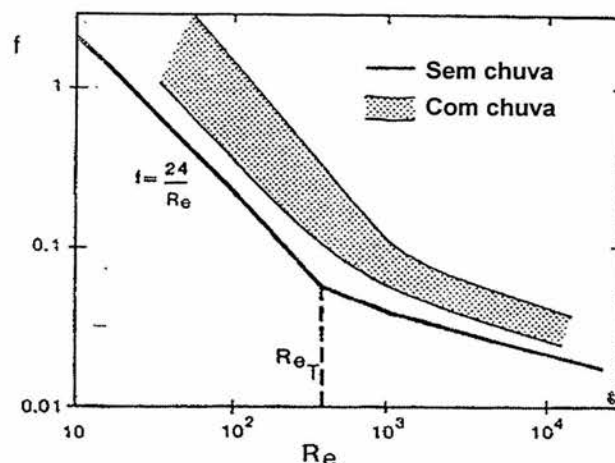


Figura 2.1. – Relação do Número de Reynolds com o fator de perda de carga (f), para o escoamento laminar em áreas de entressulcos. Fonte: Gerits et al., (1990).

Cassol (1988) igualando f a partir das equações (2.11) e (2.12), obteve:

$$\frac{8ghS}{V^2} = \frac{K}{R_e} \quad (2.13)$$

sendo :

$$R_e = \frac{Vh}{\nu} \quad (2.14)$$

Substituindo a equação (2.14) na (2.13) temos:

$$\frac{8ghS}{V^2} = \frac{K\nu}{Vh} \Rightarrow h^2 = \frac{KV\nu}{8gS} \quad (2.15)$$

Por fim substituindo a equação (2.10) na (2.15):

$$h^2 = \frac{Kvq}{8gSh} \Rightarrow h^3 = \frac{Kvq}{8gS} \Rightarrow h = \left(\frac{Kvq}{8gS} \right)^{1/3} \quad (2.16)$$

onde a altura da lâmina (h) é obtida em metros (m).

Originalmente Einstein (1950), dividiu a resistência total (f_t) do escoamento para canais abertos em resistência de grão (partícula) (f_g) e resistência de forma (f_f), ou seja:

$$f_i = f_g + f_f \quad (2.17)$$

A mesma expressão pode ser encontrada em Rauws & Govers (1988). A partir de então, a resistência ao escoamento tem sido dividida em muitas categorias, sendo a resistência de partícula desdobrada em rugosidade de partículas individuais e a rugosidade dos microagregados, e a rugosidade de forma entre os efeitos de restos vegetais, pedras e vegetação (Abrahams & Li, 1988). Moore & Foster (1990), dividem resistência em sulcos de erosão em resistência devido aos entressulcos (f_i) e resistência atribuída aos sulcos (f_s). A resistência ou rugosidade de partícula resulta das forças de tensão cisalhante e pressão exercidas sobre as partículas, agregados e microagregados do solo. A resistência ou rugosidade de forma é causada por pedras, restos vegetais, vegetação e protuberâncias microtopográficas que obstruem o escoamento e aumentam a diferença de pressão ao longo dos obstáculos (Abrahams & Li, 1988).

2.1.4.2. Resistência ao escoamento promovida por resíduos vegetais

Resíduos vegetais sobre a superfície do solo reduzem a velocidade do escoamento em entressulcos, porque a cobertura geralmente aumenta a rugosidade hidráulica do fluxo superficial, que por sua vez aumenta a altura do escoamento (Foster, 1982; Braida & Cassol, 1999).

Quando da estimativa da resistência hidráulica total em áreas agrícolas deve-se considerar o tamanho, número e volume dos elementos de resistência (Gilley & Kottwitz, 1995), o que está em conformidade com Cogo (1981), ao ressaltar que os fatores que determinam as diferenças de cobertura de solo

entre os resíduos culturais são: tipo, forma, quantidade, estágio de decomposição, distribuição sobre a superfície e métodos de preparo de solo.

O efeito de resíduos em contato direto com a superfície do solo na erosão em entressulcos foi avaliado por alguns autores, que propuseram relações capazes de quantificar o efeito dessa rugosidade de forma que se traduz em resistência ao escoamento e, por conseguinte, nas taxas de desagregação de solo. Foster (1982) propôs a seguinte expressão:

$$C_{iIII} = \xi \cdot \exp\left\{-0,21 \cdot \left[\left(y_c/y_d\right) - 1\right]^{1,18}\right\} \quad (2.18)$$

onde C_{iIII} = fator que expressa o efeito da cobertura por resíduos em contato direto com a superfície do solo; ξ = fração da superfície exposta ao impacto da chuva; y_c/y_d = razão entre a altura da lâmina de escoamento com cobertura (y_c) e sem cobertura (y_d).

Laflen et al. (1985) desenvolveram uma expressão mais simples:

$$C_{iIII} = e^{-2,5 \cdot CS} \quad (2.19)$$

onde C_{iIII} = fator que expressa o efeito da cobertura por resíduos em contato direto com a superfície do solo; e = base do logaritmo neperiano, e CS = cobertura do solo ($m^2 m^{-2}$). Braida e Cassol (1999) observaram que essa relação se ajustou muito bem a dados experimentais com resíduos de trigo e de milho na superfície do solo, apenas alterando o valor da constante do expoente para 2,32.

O modelo WEPP, - *Water Erosion Prediction Project*, - (Flanagan & Nearing, 1995), desenvolvido nos Estados Unidos pelo Laboratório Nacional de Pesquisas em Erosão do Solo (NSERL), utiliza a equação de Laflen et al. (1985).

2.1.5. Transporte de sedimentos no escoamento em entressulcos

Para Everaert (1991), o transporte de sedimentos nas áreas de entressulcos raramente tem sido estudado, pois mais atenção tem sido conferida à desagregação pelo impacto das gotas de chuva e, muitas vezes, a capacidade de transporte em entressulcos é considerada como um fator a não limitar a erosão em entressulcos. Entretanto, observações experimentais da erosão em entressulcos têm indicado que a quantidade de sedimento produzido pelo embate das gotas de chuva pode ser mais alta que a capacidade de transporte do escoamento em entressulcos, o que limita o transporte em entressulcos. O mesmo autor ainda comenta que pouco se conhece sobre a capacidade de transporte em entressulcos e que foram sugeridas várias equações de capacidade de transporte a partir de experimentos, entretanto as circunstâncias hidráulicas em que muitos desses experimentos têm sido realizados não são comparáveis às condições do escoamento da erosão em entressulcos.

Dentre os modelos atuais de predição de erosão, o EUROSEM (*European Soil Erosion Model*) (Morgan, et al., 1998) é o primeiro a utilizar uma equação de capacidade de transporte de sedimento desagregado pela chuva e pelo escoamento em entressulcos, baseada numa modificação da potência do escoamento realizada por Everaert (1991):

$$CT = \frac{b}{\rho_s q} \left[(\Omega - \Omega_c)^{0,7/n} - 1 \right]^k \quad (2.20)$$

sendo CT = capacidade de transporte, b é função do tamanho de partícula (em μm), definida como:

$$b = \frac{19 - (d_{50}/30)}{10^4} \quad (2.21)$$

k e n = constantes de valor 5, ρ_s = densidade do sedimento (kg m^{-3}), d_{50} = diâmetro do sedimento, para o qual 50% das partículas é maior e 50% das partículas é menor; q = descarga líquida ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-1} \text{ s}^{-1}$), Ω = potência do escoamento ($\text{g}^{1,5} \text{ cm}^{-2/3} \text{ s}^{-4,5}$) definida como:

$$\Omega = \frac{(U^* u)^{3/2}}{h^{2/3}} \quad (2.22)$$

onde U^* = velocidade de cisalhamento (m s^{-1}), u = velocidade do escoamento (m s^{-1}), h = altura da lâmina (m); Ω_c = potência crítica do escoamento determinada pela expressão:

$$\Omega_c = \frac{(U_c^* u)^{3/2}}{h^{2/3}} \quad (2.23)$$

onde U_c^* = velocidade crítica de cisalhamento definida como:

$$U_c^* = \sqrt{y_c (\rho_s - 1) g d_{50}} \quad (2.24)$$

onde g = aceleração da gravidade (m s^{-2}), d_{50} = diâmetro característico das partículas (m) e y_c = velocidade crítica de cisalhamento de Shields modificada encontrada em Yang (1996).

A equação proposta por Yalin (1972), para o transporte por arraste em canais aluviais abertos, vem sendo indicada (Foster & Meyer, 1972; Foster, 1982) e utilizada (Foster et al. ,1981; Beasley et al. ,1980; Flanagan & Nearing, 1995) para capacidade de transporte nas condições hidráulicas do escoamento raso. A equação é descrita da seguinte forma, segundo Finker et al. (1989):

$$\frac{T_c}{\left(\frac{\gamma_s}{\gamma} - 1\right) d \sqrt{\rho_w} \sqrt{\tau_s}} = 0,635 \cdot \delta \left[1 - \frac{1}{\beta} \ln(1 + \beta) \right] \quad (2.25)$$

$$\text{onde, } \beta = 2,45 \left(\frac{\gamma_s}{\gamma} \right)^{-0,4} (Y_c)^{0,5} \delta; \quad \delta = \frac{Y}{Y_c} - 1; \quad Y = \frac{\tau / \rho_w}{\left(\frac{\gamma_s}{\gamma} - 1 \right) g d} \quad (2.26)$$

sendo Y_c = a tensão cisalhante crítica retirada do diagrama de Shields (adimensional); Y é a tensão cisalhante adimensionalizada; δ e β são parâmetros adimensionais como definido pelas equações acima; T_c = capacidade de transporte ($\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$), ρ_w = densidade da água (kg m^{-3}); d = diâmetro de partícula (m); g = aceleração da gravidade (m s^{-2}); τ = tensão cisalhante do escoamento sobre o solo (N m^{-2}), γ = peso específico da água (N m^{-3}), e γ_s = peso específico do sedimento (N m^{-3}).

Lu et al. (1989) apresentaram uma relação de transporte de sedimentos, baseada em duas variáveis adimensionais, uma tensão cisalhante desenvolvida por Chien (1980) e o parâmetro de transporte de Einstein (1950), que foram ajustadas e utilizadas por Cassol (1988) em um declive côncavo. A tensão cisalhante adimensional é a seguinte:

$$\tau_* = \frac{\tau}{g(\rho_s - \rho_w)d_s} \quad (2.27)$$

onde τ_* = tensão cisalhante adimensional, τ = tensão cisalhante do escoamento (N m^{-2}), g = aceleração da gravidade (m s^{-2}); ρ_s = densidade de partícula (kg m^{-3}); ρ_w = densidade da água (kg m^{-3}), e d_s = diâmetro característico do sedimento (m).

O parâmetro de transporte de Einstein (1950) utilizado tem a seguinte expressão:

$$\phi = \frac{q_s}{\rho_s} \sqrt{\frac{\rho_w}{(\rho_s - \rho_w)} \frac{1}{g d_s^3}} \quad (2.28)$$

onde ϕ = descarga s3lida adimensional, q_s = descarga s3lida ($\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$), ρ_s = densidade de part3cula (kg m^{-3}); ρ_w = densidade da 3gua (kg m^{-3}), e d_s = di3metro caracter3stico do sedimento (m).

Pela rela33o dos par3metros (2.27) e (2.28), Cassol (1988), ajustou para solos arenosos a seguinte express3o:

$$\phi = 21,0 (\tau_* - 0,05)^{1,72} \quad (2.29)$$

onde τ_* e ϕ est3o definidos nas express3es 2.27 e 2.28 respectivamente.

2.1.6. Resist3ncia do solo 3 desagrega3o na eros3o em entressulcos

Quando uma gota de chuva precipita sobre a superf3cie do solo, a desagrega3o das part3culas do solo depender3 de v3rios fatores, como a tens3o intergranular, densidade de part3cula, potencial matricial do solo, liga3es mec3nicas e viscosidade do fluido, entre outros. Mas de todos esses fatores, as propriedades mec3nicas do solo, muito provavelmente, tem um papel fundamental no processo de desagrega3o (Cruse & Larson, 1977).

Para solos n3o saturados, Towner & Childs (1972) mostraram que a tens3o efetiva na forma da equa3o abaixo 3 facilmente determinada e pode expressar a coes3o do solo:

$$\sigma'_n = \sigma_n - \psi \quad (2.30)$$

onde σ'_n = tens3o efetiva; σ_n = tens3o (carga) normal aplicada que numa condi3o agr3cola de solo descoberto 3 igual a zero, e ψ = potencial matricial da 3gua no solo.

AL-Durrah & Bradford (1981) desenvolveram uma equação para expressar a desagregação do solo devida a uma gota de chuva, a qual é proporcional a relação das forças de impacto das gotas de chuva e a resistência do solo, parâmetro esse, altamente correlacionado com as ligações estruturais e interpartículas. A equação tem a seguinte expressão:

$$D = a + b \left(\frac{KE}{\tau_f} \right) \quad (2.31)$$

sendo D = solo desagregado (mg/gota); KE = energia cinética da gota (J), τ_f a resistência ao cisalhamento do solo medida com um cone de queda (kPa), e a e b coeficientes de ajuste.

Em muitos estudos da hidráulica do transporte de sedimentos, a resistência dos solos à desagregação tem sido no máximo modelada como a tensão crítica de cisalhamento (τ_c) retirada do diagrama de Shields. Entretanto, Brunori et al., (1989) mencionam que pesquisas mais recentes em mecânica da erosão têm apontado na direção de que a erosão em um solo é controlada pela resistência ao cisalhamento da sua superfície, que pode ser, então, um indicador da resistência do solo à erosão, recíproca de sua erodibilidade, o que é o caso dos estudos de Rauws & Govers (1988) e Nearing & Bradford (1985).

2.1.7. Erodibilidade do solo em entressulcos

A erodibilidade do solo se refere à vulnerabilidade ou susceptibilidade do solo à erosão, que é a recíproca de sua resistência (Hudson, 1995), dependendo das propriedades que influenciam sua resistência à desagregação pelo fluxo superficial. A forma de incorporação do efeito da erodibilidade do

solo nos modelos de predição da erosão, depende do tipo e da estrutura do modelo. Na equação Universal de Perdas de Solo (USLE) a erodibilidade é expressa como fator K (Wischmeier & Smith, 1978). O modelo WEPP, incorpora o fator K_i para erodibilidade em entressulcos e o fator K_r para representar a erodibilidade do solo nos sulcos (Flanagan & Nearing, 1995).

Elliot et al. (1989) apresentaram uma expressão para determinação da erodibilidade do solo em entressulcos, na qual existe um fator de correção da declividade, que reflete a limitação da capacidade de transporte do fluxo em declives reduzidos, como também a limitação a desagregação de solo ocasionada pelo impacto das gotas de chuva em declives elevados. A expressão é a seguinte:

$$K_i = \frac{D_i}{i^2 S_f} \quad (2.32)$$

Onde K_i = erodibilidade do solo em entressulcos (kg s m^{-4}); D_i = taxa máxima de desagregação do solo em entressulcos ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$); i = intensidade da chuva (m s^{-1}), e S_f = fator de correção para o declive, dado pela equação:

$$S_f = 1,05 - 0,85 \exp^{-4 \text{ sen } (\theta)} \quad (2.33)$$

onde θ é o ângulo do declive. Este fator S_f é 0,2 para declive plano, 1 para declive de 45° , e o valor máximo é 1,05 para declives de 90° .

Albuquerque & Cassol (1998), estudando a erodibilidade do solo em entressulcos em condições de laboratório, observaram que os teores de argila, silte mais areia muito fina, parâmetro textural M, teor de carbono, $\Delta\text{pH}_{\text{kcl}}$ e óxidos de ferro foram os parâmetros que mais se relacionaram com a erodibilidade do solo em entressulcos. Também, apresentaram uma equação

para determinação da erodibilidade em entressulcos baseada em três parâmetros, a qual é dada por:

$$K_i = 7,19 \cdot 10^5 - (2,2 \cdot 10^5 \cdot DMPA_k) - (7,2 \cdot 10^5 \cdot \Delta pH_{kcl}) + 148 \cdot M \quad (2.34)$$

onde K_i = erodibilidade do solo em entressulcos (kg s m^{-4}), $DMPA$ = diâmetro médio ponderado dos agregados em água (m); e ΔpH_{kcl} é fornecido pela equação:

$$\Delta pH_{KCl} = pH_{KCl} - pH_{H_2O} \quad (2.35)$$

onde pH_{KCl} = pH determinado em KCl e pH_{H_2O} = pH determinado em água, e M = parâmetro textural obtido pela expressão:

$$M = (SIL_{NaOH} + AMF_{NaOH}) (100 - ARG_{NaOH}) \quad (2.36)$$

sendo SIL_{NaOH} = fração de silte determinada com NaOH (g kg^{-1}), AMF_{NaOH} = fração de areia muito fina com NaOH (g kg^{-1}), e ARG_{NaOH} = fração de argila com NaOH (g kg^{-1}).

2.2. Erosão do solo em sulcos

Para Bryan (1987), os sulcos de erosão fazem parte da paisagem e por isso tem um significado geomorfológico, por serem condutores da água e do sedimento transportado e constituírem um sistema embrionário de drenagem; não estando, portanto, somente associados ao uso agrícola. Slattery & Bryan (1992), destacam que o escoamento superficial atinge sua capacidade máxima de desagregação e transporte, quando está concentrado nos sulcos de erosão, enquanto Foster et al. (1984) apontam a erosão em sulcos como uma das principais fontes de produção sedimentos em áreas agrícolas.

As operações agrícolas afetam significativamente o desenvolvimento dos sulcos. As marcas deixadas no solo pelas rodas dos tratores e os pequenos sulcos de plantio, freqüentemente atuam como um eixo inicial da erosão em sulcos, os quais se desenvolvem na superfície do solo durante os episódios erosivos. O número de passadas do trator, a orientação das rodas em relação ao declive e as condições de umidade do solo são fatores importantes na extensão e no grau de severidade dos sulcos de erosão ao longo das linhas de cultivo (Fullen & Reed, 1987). Esses autores observaram aumento da densidade do solo e diminuição das taxas de infiltração em marcas deixadas por tratores de 4,5 toneladas, como também, que a passagem dos pneus dos tratores com ranhuras em forma de V no sentido do declive, favorece o aparecimento de sistemas sulcos profundos.

Fica claro, seja qual for a abordagem ou área de interesse, a necessidade do entendimento do processo de formação dos sulcos de erosão, para predição e controle efetivo das perdas de solo deles originadas.

2.2.1. Formação dos sulcos – hidráulica e dinâmica do escoamento nos sulcos de erosão

As incisões no solo que dão origem aos sulcos têm início quando a tensão de cisalhamento supera as condições de resistência ao início de movimento, característica da camada superficial do solo. O balanço entre a força erosiva do fluxo e a resistência à erosão das partículas do fundo determina as taxas de desagregação (Rauws & Govers, 1988).

Merritt (1984), a partir de observações em lâminas de escoamento ensaiadas em laboratório, com descargas líquidas constantes de $4,183 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ ou $6,97 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, sobre parcelas com um solo de textura franco arenosa, identificou quatro estágios no desenvolvimento de sulcos incipientes, chamados pela autora de micro sulcos (*"micro-rill"*). As quatro fases identificadas de formação dos sulcos incipientes e as propriedades do escoamento sobre os mesmos, estão na tabela 2.1. O primeiro estágio, de escoamento difuso foi classificado de escoamento laminar com o número de Reynolds (R_e) < 500 . O escoamento preferencial também apresentou regime laminar, embora o fluxo tenha se concentrado em diminutos canais de ocorrência casual e tenha ocorrido um aumento da rugosidade. Na terceira e quarta fases, o escoamento já se concentrou em canais bem definidos, embora muito pequenos, com os números de Reynolds, respectivamente, de 460 e 840, caracterizando o regime de transição. Na quarta fase os sulcos incipientes apresentaram incisões na superfície do solo, na forma de *"headcuts"*. O escoamento em todas as fases foi supercrítico, ou seja, com o número de Froude (F_r) > 1 .

O número de Froude (F_r) tem sido proposto como um parâmetro relacionado à formação de sulcos. Quando o escoamento exceder o valor de 1,2 tem início a formação dos sulcos para solos arenosos (menos coesivos), e de 2,8 para solos de textura mais argilosa (Slattery & Bryan, 1992).

Tabela 2.1. Estágios de formação de sulcos, e respectivas propriedades hidráulicas identificadas por Merritt (1984).

Estágio	Número de Reynolds (R_e)	Reynolds de partícula (R_e^*)	Número de Froude (F_r)	Fator de perda de carga (f)	Concentração de sedimentos (mg kg^{-1})
Escoamento difuso	100	3,8	10,4	0,002	6050
Escoamento preferencial	180	6,4	6,0	0,006	19690
Sulcos sem incisões	460	8,4	4,9	0,007	21460
Sulcos com incisões	840	9,2	6,7	0,004	21590

Outro parâmetro que tem sido relacionado ao início da formação dos sulcos é a velocidade de cisalhamento (U_*), que estaria relacionada com a ocorrência de eventos turbulentos em regime supercrítico e conseqüentes variações da velocidade (Rauws, 1987). O mesmo autor verificou o desenvolvimento de sulcos com fundo constituído por partículas de sílica com um diâmetro mediano de $90 \mu\text{m}$, a partir de $0,032 \text{ m s}^{-1}$ de velocidade de cisalhamento.

2.2.2. Hidráulica e geometria de sulcos pré-formados

A erosão em sulcos é um importante componente e contribui de forma significativa nas perdas totais de solo, produzidas no processo erosivo das áreas agrícolas (Foster et al., 1984). Sulcos de erosão apresentam variação morfológica no tempo e espaço. O fundo e as paredes dos sulcos variam sua forma quando o solo é erodido, que, dessa forma, altera o mecanismo responsável pela dinâmica de formação dos sulcos, a hidráulica do

escoamento (Lei et al., 1998). A necessidade do conhecimento das relações hidráulicas e da morfologia dos sulcos, para determinação da capacidade de desagregação e transporte neste escoamento, levou a utilização da prática da pré-formação de sulcos, que, dessa forma, são expostos à ação cisalhante do escoamento, como preconizam Laflen & Thomas (1987) e Elliot et al. (1989). Essa prática implica em alguma perda de informação, mas reproduz as condições hidráulicas de um sulco bem desenvolvido. Dessa forma, têm sido determinadas relações entre o raio hidráulico R_h (m), a área A (m^2), e o perímetro molhado dos sulcos P_m (m), que são informações importantes para determinação da tensão cisalhante do escoamento nos sulcos de erosão (Gilley et al., 1990; Elliot et al., 1989; Giasson & Cassol, 1996).

2.2.3. Desagregação e transporte de sedimentos na erosão em sulcos

Ao longo dos anos, pesquisadores têm observado muitos processos relacionados com a erosão em sulcos, tais como desagregação do solo em canais de terra, "headcuts" (processo que Merten (2000) denominou de erosão regressiva), dispersão e desbarrancamento. Nenhum desses processos é considerado na predição da desagregação em sulcos, e os algoritmos utilizados nos modelos fisicamente baseados de predição da erosão, como o WEPP (*Water Erosion Prediction Project*) e o CREAMS (*Chemical, Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems*), negligenciam muitos desses processos, pressupondo que toda desagregação de solo nos sulcos é ocasionada pela ação cisalhante do escoamento nas paredes dos sulcos

(perímetro molhado), a qual é representada pelo parâmetro hidráulico da tensão de cisalhamento - τ (Elliot & Laflen, 1993). No entanto, pela complexidade e diversidade de fenômenos envolvidos na erosão de um sulco, os mesmos autores apresentaram uma expressão de predição da erosão em sulcos, baseada unicamente em parâmetros hidráulicos, qual seja:

$$D_c = K_p \left[\left(\frac{\gamma_w QS}{W_r} \right) - P_c \right] \quad (2.37)$$

onde D_c = desagregação em sulcos, K_p = coeficiente de erodibilidade do solo, γ_w = peso específico da água, Q = taxa de fluxo no sulco, S = declive dos sulcos, W_r = largura dos sulcos, e P_c = potência crítica do escoamento, abaixo da qual não ocorre erosão.

Diante desse contexto e considerando a proposta de Foster & Meyer (1975) de aplicação dos princípios da mecânica fluvial para o escoamento em lâminas rasas, Nearing et al. (1989) consideraram que a taxa de desagregação em sulcos (D_r) é proporcional à diferença entre a carga de sedimento e a capacidade de transporte do escoamento, conforme as expressões:

$$\frac{D_r}{D_c} + \frac{G}{T_c} = 1 \rightarrow D_r = D_c \left(1 - \frac{G}{T_c} \right) \rightarrow D_r = (T_c - G) \frac{D_c}{T_c} \quad (2.38)$$

onde: D_r = taxa de desagregação em sulcos ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$), D_c = capacidade de desagregação do fluxo do sulco ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$), T_c = capacidade de transporte do fluxo do sulco ($\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$), G = carga de sedimentos ($\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$).

A capacidade de desagregação do escoamento D_c , de acordo com Elliot et al. (1989), é definida pela equação de Du Boys desenvolvida em 1876 para quantificar a capacidade de transporte de sedimentos por arraste, baseada no conceito da força tratora, ou seja, no excesso de tensão cisalhante do

escoamento, e modificada por Foster & Meyer (1975), para estimar a capacidade de desagregação do escoamento, a qual é dada por:

$$D_c = K_r (\tau - \tau_c) \quad (2.39)$$

onde: D_c = capacidade de desagregação de solo pelo fluxo dos sulcos, ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$), K_r = erodibilidade do solo em sulcos ($\text{kg N}^{-1} \text{s}^{-1}$), τ_c = tensão crítica de cisalhamento do solo (Pa), abaixo da qual não existe desagregação, τ = tensão cisalhante média do escoamento (Pa), sendo:

$$\tau = \gamma R_h S \quad (2.40)$$

onde γ = peso específico da água (N m^{-3}), R_h = raio hidráulico do sulco (m), e S = gradiente hidráulico ou declive do sulco (m m^{-1}).

2.2.4. Erodibilidade do solo em sulcos

A erodibilidade do solo, definida por Wischmeier & Smith (1978), como a susceptibilidade do solo à erosão, representa a recíproca da resistência do solo à erosão.

Alguns autores têm relacionado as taxas de desagregação do solo com a resistência ao cisalhamento de sua superfície (Brunori, et al., 1989; Al-Durrah & Bradford, 1981; Rauws & Govers, 1988; Nearing & Bradford, 1985).

No modelo WEPP – *Water Erosion Prediction Project*, Flanagan & Nearing (1995) consideram que a erodibilidade do solo em sulcos é determinada a partir da relação entre taxas de desagregação em sulcos e tensão cisalhante do fluxo, dada pela seguinte expressão:

$$D_r = K_r (\tau - \tau_c) \quad (2.41)$$

onde D_r = taxa de desagregação em sulcos ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$); K_r = erodibilidade do solo em sulcos ($\text{kg N}^{-1} \text{s}^{-1}$ ou s m^{-1}); τ = tensão cisalhante do fluxo (N m^{-2} ou Pa) e τ_c = tensão crítica de cisalhamento do solo (N m^{-2} ou Pa). A erodibilidade em sulcos (K_r) consiste no coeficiente angular b da reta obtida que relaciona as taxas de desagregação (D_r) com a tensão cisalhante do fluxo. A tensão crítica de cisalhamento do solo (τ_c) corresponde ao valor do intercepto de τ , quando $D_r = 0$, ou a partir da relação dos coeficientes da reta: $\tau_c = -a/b$ (Laflen & Thomas, 1987). A expressão 2.41 é admitida para a condição na qual a capacidade de transporte do escoamento seja muito superior à carga de sedimentos. Nesse caso, a taxa de desagregação do escoamento em sulcos (D_r) é muito semelhante à capacidade de desagregação em sulcos, e as expressões 2.41 e 2.39 passam a se igualar.

2.2.5. O processo de consolidação dos solos agrícolas e sua relação com a erosão em sulcos

Na prática agrícola, a consolidação advém do uso de técnicas que pregam uma menor mobilização do solo, como cultivos mínimos e plantio direto, significando fisicamente, um aumento na estabilidade estrutural do solo que ocorre por conta de uma compressão, originada fisicamente de uma tensão efetiva induzida pelo potencial matricial que ocorre durante a distribuição da umidade após a chuva (Nearing et al., 1988). Tal elevação da estabilidade

estrutural do solo implica em uma maior resistência à erosão, ou seja, uma menor erodibilidade do solo.

A consolidação tem seu estudo definido dentro da mecânica de solo não saturado, onde o comportamento mecânico do solo, isso é, as mudanças de volume e a resistência ao cisalhamento podem ser descritas em termos do estado de tensões do solo. Esse estado de tensões consiste da combinação de variáveis de tensões, que são assim chamadas de “variáveis do estado de tensões” (Fredlund & Rahargjo, 1993).

A tensão efetiva é na verdade, uma variável de estado que pode ser usada para descrever o comportamento de um solo não saturado podendo ser determinada pela equação de Terzaghi (Tower & Childs, 1972), para expressar a coesão do solo em kPa, dada por:

$$\sigma' = \sigma_n - \psi \quad (2.42)$$

onde σ' = tensão efetiva; σ_n = tensão (carga) normal aplicada, e ψ = potencial matricial do solo. No entanto, na consolidação agrícola não há nenhuma tensão normal aplicada, e a expressão de tensão efetiva se reduz a (Tower, 1983):

$$\sigma' = [-x\psi] \quad (2.43)$$

onde o potencial matricial do solo (ψ) tem um valor negativo de sucção e, x é um parâmetro relacionado ao grau de saturação do solo, com magnitude de 1 para solo saturado, e 0 para solo seco, sendo determinado experimentalmente.

Pesquisas sobre os mecanismos que determinam a resistência de solos argilosos (coesivos) têm apontado que a coesão na condição de solo saturado, dentre muitas outras propriedades físicas e químicas, como a mais importante

para resistência do solo à ação cisalhante da água em escoamento, estando nessa propriedade expresso o efeito da composição mineralógica e do arranjo estrutural dos minerais de argila (Mirtskhoulava, 1966; Mirtskhoulava, 1981).

Mirtskhoulava (1966) apresenta um sistema teórico sobre a resistência dos solos argilosos à erosão hídrica descrito abaixo. Sob ação das forças hidrodinâmicas os agregados do solo estão envolvidos na seguinte composição de forças, representada na figura 2.2, e na equação abaixo:

$$n \left(\frac{P_y}{m_t F} + \frac{P_x \delta_1 d}{m_b W} \right) = C_t + \frac{G_w}{F} + P_H \quad (2.44)$$

onde n = coeficiente das variação das velocidades turbulentas; P_y = força de sustentação; P_x = força de arraste; $\delta_1 d$ = momento da força de arraste; W = momento de resistência; F = área desagregada; m_t e m_b = coeficientes de condição dos agregados as forças de arraste e elevação; G_w = peso submerso; P_H = pressão hidrostática; e C_t = valor de coesão da mínima resistência do agregado argiloso.

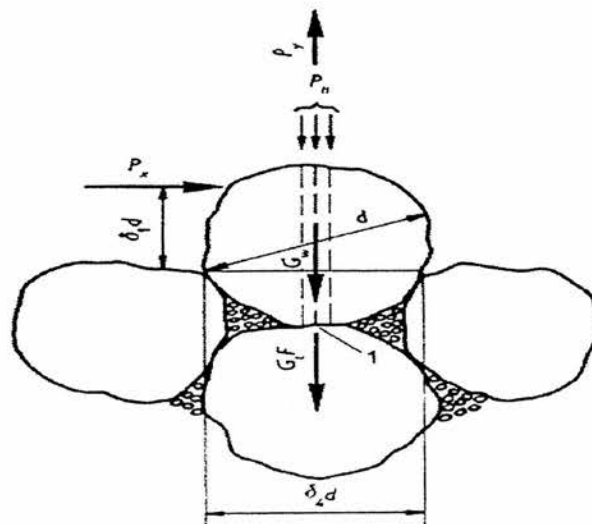


Figura 2.2. Representação da reação de resistência do solo à ação das forças hidrodinâmicas. Fonte: Mirtskhoulava (1966).

Solos argilosos são peculiares por conta de sua heterogeneidade, oriunda dos processos pedogenéticos, composição mineralógica e processos biológicos. O conhecimento das características de heterogeneidade desses solos, que apontam para as mudanças do valor de coesão do solo é, portanto, necessário para determinação da resistência dos solos argilosos à erosão. A heterogeneidade é definida, por Mirskhoulava (1966), como sendo os desvios dos valores de coesão do seu valor médio, que é caracterizada pelo chamado coeficiente de homogeneidade (K), que, por sua vez, pode ser determinado como a taxa mínima do valor de coesão pela expressão:

$$K = 1 - \frac{\alpha\sigma}{C} \quad (2.45)$$

sendo α = coeficiente que caracteriza a probabilidade da mínima resistência dos solos à erosão hídrica, normalmente tomada como sendo igual a 3; σ = desvio padrão para distribuição normal, e C = ao valor médio de coesão do solo. Um agregado argiloso sob a ação das forças hidrodinâmicas do escoamento tem um valor de resistência (C_t), determinado pelo produto do valor médio de coesão pelo fator de homogeneidade (K), ou seja:

$$C_t = C.K = C.(1 - \frac{\alpha\sigma}{C}) \quad (2.46)$$

Sob efeito dos eventos turbulentos, esses agregados apresentam um limite de resistência ou tensão de falha, à ação das cargas dinâmicas do escoamento. A partir de dados experimentais, Mirskhoulava (1966) estabeleceu que essa tensão de falha (C_f), para solos argilosos, pode ser determinada pela relação:

$$C_f = 0,035.C_t \quad (2.47)$$

Substituindo (2.46) em (2.47), temos:

$$C_f = 0,035.C\left(1 - \frac{\alpha\sigma}{C}\right) \quad (2.48)$$

sendo C_f = tensão de falha do agregado, C = valor médio de coesão, α = coeficiente de resistência mínima a erosão hídrica, e σ = desvio padrão da amostra. Esse valor de tensão de falha do agregado representa a tensão crítica de cisalhamento do escoamento (τ_c), abaixo do qual o solo não é desagregado e não existe erosão.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Erosão em entressulcos

Os estudos sobre erosão em entressulcos foram realizados em condições de campo e de laboratório. Em laboratório foram efetuados dois experimentos, nos quais as relações de erosão em entressulcos foram determinadas em duas condições: com solo descoberto e com o solo sob diferentes doses de resíduo de palha de soja. No campo, o experimento foi conduzido sob condições de solo descoberto. A seguir serão descritos esses experimentos.

3.1.1 Experimentos de laboratório

No Laboratório de Erosão do Solo do Departamento de Solos da Faculdade de Agronomia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, foram realizados os dois experimentos de erosão em entressulcos sob chuva simulada.

O primeiro experimento foi realizado com solo descoberto para caracterização hidráulica e estudo das relações de desagregação e transporte, como também, para determinação da erodibilidade do solo em entressulcos. Esse experimento foi realizado com diferentes condições iniciais de umidade,

inicialmente com o solo pré tratado com teor de água equivalente à tensão de 60 cm de coluna d'água (60 cca) e com solo previamente saturado (equivalente à tensão de 0 cca). Em cada uma das duas condições de umidade inicial, foram testadas três condições de declive: 0,045; 0,090 e 0,180 m m⁻¹.

O segundo experimento constituiu-se de solo coberto com diferentes doses de palha de soja, para investigação das condições hidráulicas do escoamento e das relações de erosão em entressulcos na presença de resíduos vegetais. Este experimento foi conduzido em uma declividade de 0,10 m m⁻¹ e com umidade inicial do solo equivalente à tensão de 60 cm de coluna d'água (60 cca).

Nos dois experimentos, o solo utilizado foi um Argissolo Vermelho distrófico típico (EMBRAPA, 1999), coletado da camada superficial de 10 cm da Estação Experimental Agrônômica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul e passado em peneira com malha de 10 mm de diâmetro. As características físicas deste solo encontram-se na tabela 3.1, sendo determinadas de acordo com EMBRAPA (1979).

Tabela 3.1. Características físicas e químicas da camada superficial do solo utilizado.

Argila (< 0,002 mm)	0,2065 kg kg ⁻¹
Silte (0,002-0,05 mm)	0,1980 kg kg ⁻¹
Areia (0,05 – 2,00 mm)	0,5955 kg kg ⁻¹
Densidade do solo	1.250 kg m ⁻³
Densidade de partícula	2,600 kg m ⁻³
Porosidade total	0,5177 m ³ m ⁻³
Teor de matéria orgânica	0,0144 kg kg ⁻¹

Os experimentos realizados em laboratório utilizaram parcelas experimentais com área útil de $0,348 \text{ m}^2$, com dimensões de $0,59 \text{ m}$ por $0,59 \text{ m}$ e profundidade de 10 cm , havendo uma bordadura lateral de 20 cm de largura. As parcelas foram construídas com material de acrílico e montadas sobre uma estrutura metálica. O volume da parcela experimental foi preenchido com uma camada de 3 cm de espessura de brita, sobre a qual foi colocada uma camada de 1 cm de areia e, sobre essas duas, uma tela plástica com malha de 1 mm . Sobre essa tela colocou-se uma camada de solo com 6 cm de espessura, para uma densidade de empacotamento (D_{ep}) de $1,0 \text{ g cm}^{-3}$.

3.1.1.1 Experimento 1 – Erosão em entressulcos sob diferentes condições de umidade inicial do solo

As parcelas utilizadas neste experimento apresentavam condições de superfície de solo descoberto. O fundo das parcelas foi conectado a um reservatório de água, através de um conjunto de seis mangueiras com 1 cm de diâmetro, para criação de diferentes condições de potencial matricial (ψ) do solo (figura 3.1). Quando o reservatório foi colocado a diferentes alturas com a parcela em posição horizontal, criaram-se as seguintes condições de umidade do solo com antecedência de 24 horas antes da realização dos testes, que constituíram os pré tratamentos aplicados as parcelas:

- reservatório de água no mesmo nível da parcela experimental para condição de solo saturado, ou seja, tensão matricial (ψ) igual zero.

- reservatório de água a 60 centímetros abaixo da parcela experimental para o solo sob tensão matricial (ψ) de 60 centímetros de coluna de água (60 cca).

Quando da realização dos testes em condições de solo saturado, sob diferentes condições de declive, a inclinação das parcelas mantinha a saturação apenas nas extremidade inferior das mesmas, ocorrendo alguma tensão de água nas partes mais elevadas. Assim, em termos médios formaram-se tensões equivalentes à 1,33; 2,65 e 5,31 cca, respectivamente nos declives de 0,045; 0,09 e 0,18 $m\ m^{-1}$. Essas foram, então, as tensões aplicadas às parcelas durante a realização dos testes, embora no texto, sejam referidas como saturadas.



Figura 3.1. Vista geral da parcela experimental e do sistema de controle da drenagem.

As parcelas que foram pré tratadas com tensão equivalente à 60 centímetros de coluna de água por 24 horas, foram deixadas com drenagem livre por ocasião dos testes. Portanto, o tratamento aplicado à essas parcelas, foi de drenagem livre.

Este procedimento foi semelhante ao descrito por Huang (1998). As diferentes condições de tensão (ψ), combinadas com os declives de 0,045, 0,09 e 0,18 m m^{-1} em três repetições, constituíram os tratamentos experimentais aplicados. O delineamento experimental adotado foi o inteiramente casualizado. As análises de variância e de regressão dos experimentos foram realizadas através dos programas estatísticos Sigmastat e Genstat e os ajustes de curvas com o TableCurve.

3.1.1.2. Experimento 2 – Erosão em entressulcos na presença de resíduos vegetais

Neste experimento, as parcelas foram saturadas com antecedência de 24 horas, através de um conjunto de seis mangueiras conectadas a um reservatório de água. Por ocasião dos testes, foi aplicado ao longo do experimento uma tensão de água equivalente a 60 centímetros de coluna d'água (60 cca). A declividade das parcelas experimentais foi mantida constante em 0,10 m m^{-1} .

Resíduos de soja secos em estufa a 65 °C foram picotados em pedaços de 1 cm de comprimento e distribuídos sobre a camada de solo das parcelas, sendo aplicadas seis doses, quais sejam: 0,0; 0,05; 0,10; 0,20; 0,40, e 0,80 kg m^{-2} . Todas as parcelas foram fotografadas, para determinação das percentagens de cobertura do solo, conforme o método de Mannering descrito por Lopes (1984). As doses acima referidas, em três repetições, constituíram-se nos tratamentos aplicados, no total de 18 testes, num delineamento experimental inteiramente casualizado. Todas análises estatísticas, foram

realizadas através dos programas estatísticos, Genstat, Sigmastat, e TableCurve.

3.1.2. Características da chuva simulada

As chuvas simuladas foram aplicadas em laboratório utilizando-se simulador de chuvas de um bico, semelhante ao descrito por Meyer & Harmon (1979). O simulador de chuvas utilizado foi construído no Departamento de Solos da Faculdade de Agronomia da UFRGS e descrito por Souza (1985). As chuvas foram produzidas por um simulador com um bico aspersor tipo *Veejet* 80-150 com diâmetro interno de 12,7 mm, fabricado pela *Spraying System Company*, de Chicago, USA. O bico ficou a 3,1 m acima da superfície do solo, operando com uma pressão constante de 41 kPa na saída da água no bico. As chuvas foram aplicadas durante uma hora com intensidade de chuva planejada idealizada de 75 mm h⁻¹. As intensidades médias das chuvas simuladas observadas foram determinadas através de um conjunto de 10 pluviômetros, colocados ao acaso ao lado da área útil das parcelas experimentais e as intensidades observadas encontram-se nos Apêndices 1 e 2.

3.1.3 Avaliação das condições hidráulicas do escoamento em entressulcos

A velocidade superficial do escoamento foi determinada através da cronometragem do tempo gasto para um corante (azul de metileno) percorrer a distância entre dois pontos fixos na parcela. Os valores de velocidade superficial foram expressos em m s⁻¹. Este procedimento foi realizado em

intervalos de 5 minutos, a partir da formação e deslocamento da lâmina de escoamento. Os valores da velocidade superficial do escoamento, assim obtidos, foram então multiplicados por um fator de correção ($\alpha=2/3$), para obtenção da velocidade média do escoamento, em $m\ s^{-1}$, conforme Farenhorst & Bryan (1995) e Katz, et al. (1995). No experimento com a presença de resíduos vegetais na superfície do solo, a obtenção dos valores de velocidade superficial do escoamento, para as doses de $0,4\ kg\ m^{-2}$ e $0,8\ kg\ m^{-2}$, foram baseadas em 2 e 1 repetições, respectivamente, pela grande dificuldade encontrada nesta determinação, sendo necessário a aplicação de uma maior quantidade de corante.

A altura da lâmina do escoamento (h) foi determinada pela seguinte equação:

$$h = \frac{q}{V} \quad (3.1)$$

onde q = descarga líquida total por unidade de largura em ($m^2\ s^{-1}$), V = velocidade média do escoamento ($m\ s^{-1}$) e h = altura da lâmina de escoamento (m). A descarga líquida (q) foi expressa em ($m^2\ s^{-1}$), sendo determinada a partir das coletas de enxurrada em potes plásticos, colocados na extremidade inferior da calha coletora. As coletas nos potes foram efetuadas a cada 2 minutos, tendo cada amostragem a duração de 15 segundos.

Para definição das condições hidráulicas do escoamento, e de sua interação com a superfície do solo, foram determinadas algumas características hidráulicas conforme descrito em Chow (1959) apresentadas a seguir.

O número de Reynolds foi determinado pela relação:

$$R_e = \frac{Vh}{\nu} \quad (3.2)$$

onde R_e = número de Reynolds, adimensional; V = velocidade média do escoamento (m s^{-1}); h = altura da lâmina de escoamento (m), e ν = viscosidade cinemática da água ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$). A viscosidade cinemática varia conforme a temperatura. A temperatura da água foi determinada em $^{\circ}\text{C}$ e aferida por meio de termômetro em cada ensaio. A viscosidade cinemática (ν , em $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$) foi determinada em função da temperatura (T , em $^{\circ}\text{C}$) conforme a expressão dada por Julien (1995):

$$\nu = [1,14 - 0,031(T - 15) + 0,00068(T - 15)^2] \times 10^{-6} \quad (3.3)$$

onde ν = viscosidade cinemática da água ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$) e T = temperatura da água, ($^{\circ}\text{C}$).

O número de Froude (Fr) foi obtido pela expressão:

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gh}} \quad (3.4)$$

onde V = velocidade média do escoamento (m s^{-1}); g = aceleração da gravidade (m s^{-2}); h = altura da lâmina de escoamento (m).

A velocidade de cisalhamento (U_*), determinada pela expressão:

$$u_* = \sqrt{ghs} \quad (3.5)$$

onde g = aceleração da gravidade (m s^{-2}); h = altura da lâmina de escoamento (m); s = declive da parcela (m m^{-1}). Nesse caso está se admitindo que a declividade do fluxo é igual a declividade da parcela.

O número de Reynolds de partícula foi calculado pela expressão:

$$R_{e^*} = \frac{u_* d}{\nu} \quad (3.6)$$

onde d = diâmetro representativo do material que constitui o solo, correspondente ao d_{65} , de acordo com Einstein (1950).

A resistência ao escoamento foi determinada pelo fator de perda de carga de Darcy-Weisbach (f):

$$f = \frac{8ghs}{V^2} \quad (3.7)$$

onde f = fator de perda de carga (adimensional); S = inclinação do declive ($m\ m^{-1}$); g = aceleração da gravidade ($m\ s^{-2}$); h = altura da lâmina do escoamento (m); e V = velocidade do escoamento ($m\ s^{-1}$).

A distribuição acumulada de diâmetro das partículas do sedimento erodido foi realizada a partir de uma amostra coletada aos 30 minutos de cada teste. Separaram-se os agregados e as partículas primárias de solo, em oito classes de diâmetro por meio de um peneiramento úmido em agitação mecânica, num período de 5 minutos. Foram usadas peneiras com malha de aberturas de 2,0; 1,0; 0,50; 0,25; 0,105; 0,053 e 0,037 mm. O material passante da peneira de 0,037 mm foi colocado em baldes plásticos na presença de alúmen de potássio a 5%, para aceleração da sedimentação de partículas. Foi, então, obtida a porcentagem de cada classe de diâmetro, pela divisão da massa seca da respectiva classe pela massa seca de todas classes somadas. Relacionou-se graficamente o logaritmo de cada classe de diâmetro, na abscissa, com as respectivas percentagens acumuladas, na ordenada, e, assim, obtiveram-se os índices d_{50} que representa o tamanho em milímetros para o qual 50% das partículas são menores e 50% maiores, e o d_{65} , que

representa o tamanho em milímetros para o qual 65% das partículas são menores e 35% são maiores.

3.1.4 Experimento de campo – Erosão em entressulcos sobre solo descoberto

Este experimento foi conduzido na Estação Experimental Agronômica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, localizada no município de Eldorado do Sul -RS, entre as latitudes de 30°S e longitude de 51° 30', a oeste de Greenwich. O solo da área experimental é o Argissolo Vermelho distrófico típico (EMBRAPA, 1999), caracterizado na tabela 3.1, com textura franco argilo arenosa no horizonte superficial, um A moderado e B textural, profundo e moderadamente drenado (Castro, 1998). As parcelas em entressulcos foram instaladas em uma parte da pendente, com 12% de declividade. Toda área experimental foi previamente preparada com uma aração e duas gradagens, operações mecanizadas efetuadas, respectivamente com arados e grades de discos. Este experimento foi conduzido simultaneamente a um experimento de erosão em sulcos.

As parcelas experimentais em entressulcos tiveram uma dimensão de 0,5 m de largura e 0,75 m de comprimento, com a maior dimensão no sentido do declive, sendo delimitadas por uma chapa metálica nas laterais e na parte superior, enquanto a extremidade inferior foi delimitada por uma calha coletora, conforme pode ser visto na figura (3.2).



Figura 3.2 – Parcelas experimentais para estudo da erosão em entressulcos em condições de campo.

3.1.4.1. Características hidráulicas do escoamento e das chuvas aplicadas no estudo de erosão em entressulcos a campo

Os testes consistiram da aplicação de chuvas simuladas com duração de 60 minutos, utilizando um simulador de chuvas de braços rotativos, tipo Swanson, conforme descrito e calibrado por Cassol & Guerra (1978). A intensidade média das chuvas aplicadas foi de 75 mm h^{-1} , aferida através de 20 pluviômetros espalhados pela área experimental.

A altura da lâmina do escoamento (h) em metros, foi obtida pela equação 2.16 ($h = \{[K \nu q]/[\delta g S]\}^{1/3}$). A velocidade média do escoamento superficial foi estimada a partir da relação 3.1 ($V = q/h$), onde q = descarga líquida total ($\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$), V = velocidade média do escoamento (m s^{-1}) e h = altura da lâmina de escoamento (m). A descarga líquida (q), bem como todas as

características hidráulicas do escoamento a campo, foram obtidas conforme descrito no item 3.1.3.

No experimento à campo, a descarga líquida (q) foi determinada da mesma forma que nos experimentos de laboratório, com a diferença que cada amostragem nos potes de coleta teve a duração de 2 minutos.

3.1.5 Quantificação das perdas de solo, das taxas de desagregação e da concentração de sedimentos na erosão em entressulcos

As taxas de perdas de solo e a concentração de sedimentos foram obtidas pela pesagem do material coletado nos potes plásticos com capacidade de 920 ml, colocados na extremidade inferior da calha coletora. Aos potes plásticos, após pesagem, adicionou-se 5 ml de alúmen de potássio a 5%, para deposição das partículas. Após 24 horas, o sobrenadante foi succionado e os potes levados para secar em estufa a 65°C , para depois serem pesados com e sem o solo seco. A relação entre a massa de solo seco e a massa de mistura água-sedimento expressa a concentração de sedimentos em peso (g g^{-1}).

As taxas de desagregação do solo em entressulcos (D_i) foram determinadas para cada intervalo de amostragem através da divisão da massa de solo desagregado na unidade de tempo, pela área da parcela ($0,348\text{ m}^2$ nos experimentos de laboratório e $0,375\text{ m}^2$ no experimento de campo), sendo, portanto, expressa em $\text{kg m}^{-2}\text{ s}^{-1}$. Pelo fato das intensidades de chuvas observadas (apêndices 1 e 2) terem variado em torno do valor idealizado de 75 mm h^{-1} , em condições de laboratório, aplicou-se um fator de correção às taxas de desagregação do solo para normalização desses valores em relação à

intensidade idealizada, mesmo que as intensidades de chuva observadas não tenham sido estatisticamente diferentes (apêndice 3). O fator de correção consistiu na seguinte expressão de acordo com Cassol et al. (1999):

$$D_{in} = D_i \left(\frac{I_p}{I_o} \right)^2 \quad (3.8)$$

onde D_{in} = taxas de desagregação do solo normalizadas ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$), D_i = taxas de desagregação do solo observadas ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$), I_p = intensidade de chuva planejada (mm h^{-1}), e I_o = intensidade de chuva observada (mm h^{-1}).

As perdas totais de solo em entressulcos foram obtidas pela expressão:

$$PS_i = \frac{\sum Q C t}{A} \quad (3.9)$$

onde PS_i = perda de solo em entressulcos (kg m^{-2}), Q = descarga total (kg s^{-1}), C = concentração de sedimentos na enxurrada (kg kg^{-1}), t = intervalo de tempo representado por um ponto de amostragem (s), A = área da parcela (m^2)

3.1.6 Avaliação do transporte de sedimentos

O transporte sólido foi efetuado baseado em dois parâmetros hidráulicos: a tensão cisalhante do escoamento e a potência do escoamento.

Com base na tensão cisalhante utilizou-se a equações (2.25) de Yalin, e a (2.29) ajustada por Cassol (1988) para solos arenosos dada por:

$$\phi = 21,0 (\tau_* - 0,05)^{1,72}$$

onde ϕ = descarga de sedimentos adimensional e τ_* = tensão cisalhante do escoamento, adimensional.

Para potência do escoamento, utilizou-se a equação (2.20) proposta por Everaert (1991). Realizaram-se, também, regressões entre a descarga sólida (q_s) e a potência do escoamento, expressa através do produto da tensão cisalhante do escoamento (τ) pela velocidade média do mesmo (V), ou seja:

$$\omega = \tau.V \quad (3.10)$$

onde $\tau = (\gamma \cdot h \cdot s)$ em $N\ m^{-2}$, h = altura da lâmina em m, γ = peso específico da água em $N\ m^{-3}$, e V = velocidade do escoamento, em $m\ s^{-1}$.

3.1.7 Erodibilidade do solo em entressulcos

A erodibilidade do solo em entressulcos (K_i) foi obtida pela aplicação das relações (2.32) e (2.33) desenvolvidas por Elliot et al. (1989). Foram determinados valores para o fator K_i nos experimentos de laboratório, em todas as condições de umidade inicial do solo e nas três declividades testadas e no experimento de campo. Comparações foram estabelecidas entre todos os valores determinados e, um valor médio do fator erodibilidade do solo em entressulcos (K_i) foi calculado.

3.2. Erosão em Sulcos

Dois experimentos foram realizados na Estação Experimental Agronômica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul para avaliação das condições hidráulicas, taxas de desagregação, erodibilidade do solo em sulcos e as relações de erosão em sulcos pré-formados. No primeiro experimento,

realizado no mês de janeiro do ano de 1999, foram determinadas as condições hidráulicas do escoamento e relações de erosão em sulcos pré-formados em condições de solo recém preparado. No segundo, realizado em dezembro do ano de 1999, repetiram-se as mesmas avaliações, só que em condições de sulcos pré-formados e consolidados durante um ano.

3.2.1. Características gerais do local e da área experimental

A Estação Experimental Agronômica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (EEA-UFRGS) localiza-se no município de Eldorado do Sul, Estado do Rio Grande do Sul, na latitudes de 30° sul e longitude de 51° 30', a oeste de Greenwich. A EEA-UFRGS situa-se na região fisiográfica da Depressão Central e na microrregião climática homogênea de Porto Alegre, caracterizando-se por um relevo com amplas planícies e pendentes onduladas com dezenas de metros. O clima da região é do tipo "Cfa" subtropical úmido, conforme classificação de Koeppen, sem estiagem e precipitação média anual de 1400 milímetros. A exploração agrícola regional caracteriza-se pela pecuária extensiva e culturas anuais de verão (Giasson, 1992).

A área experimental localizou-se no terço médio de uma pendente com aproximadamente 50 metros de comprimento e declive médio de 7 %. Esta área foi anteriormente utilizada para experimentos nos anos de 1996 e 1997, na forma de parcelas experimentais cultivadas na ausência e na presença de cobertura por resíduos de aveia (Castro, 1998), sendo mantida em pousio sem qualquer cultivo no ano de 1998.

O solo da área é um Argissolo Vermelho distrófico típico (EMBRAPA, 1999), com um horizonte A moderado de textura franco argilo arenosa e um horizonte B textural profundo e moderadamente drenado, segundo Castro (1998). Algumas características físicas do horizonte superficial do solo do local constam da tabela 3.1.

3.2.2. Preparo da área, formação dos sulcos, delineamento experimental e tratamentos

3.2.2.1. Preparo da área e formação dos sulcos

Em meados de novembro de 1998, toda área experimental foi preparada no sentido do declive com uma aração efetuada com 30 cm de profundidade com arado de três discos e duas gradagens com grades de discos. Em seguida foram demarcados os blocos experimentais. No decorrer de dezembro de 1998, com o solo recentemente preparado, foram instaladas as parcelas experimentais com dimensões de 7 m de comprimento e 0,7 m de largura (com a maior dimensão orientada no sentido do declive do terreno) delimitadas superior e lateralmente pela colocação de chapas metálicas de zinco com 30 cm de altura, dos quais 15 foram enterrados. Os sulcos foram pré-formados com a utilização de um implemento provido de cabo e uma extremidade cortante de formato triangular, deixando-se 10 cm de folga entre os sulcos e as chapas laterais, de maneira que a seção transversal dos sulcos recém formados media aproximadamente $0,0125 \text{ m}^2$ (dimensões de 0,05 m de altura por 0,50 m de base triangular invertida).

Em dezembro de 1998, foram pré-formados 36 sulcos, divididos em 6 blocos de 6 seis sulcos cada. Do total, 18 sulcos (3 blocos de 6 sulcos cada) foram imediatamente submetidos aos testes de erosão em sulcos com chuva simulada e adição de fluxos extras. Os restantes 18 sulcos pré-formados (3 blocos de 6 sulcos cada) foram deixados em processo natural de consolidação durante um ano. Os sulcos que ficaram um ano em consolidação, foram durante esse período, mantidos sem vegetação, pela aplicação sistemática do herbicida (Roundap), por meio de um pulverizador costal para eliminação de toda e qualquer vegetação espontânea que aparecesse, já no seu estado mais inicial de desenvolvimento. Esses sulcos pré-formados estiveram durante um ano sujeitos às chuvas naturais, à insolação e outras variáveis meteorológicas ocorrentes no local, expostos, portanto, aos processos naturais de umedecimento e secagem.

3.2.2.2 Delineamento experimental e tratamentos

O delineamento experimental adotado foi de blocos ao acaso com três repetições. A ilustração de um bloco do esquema experimental encontra-se na Figura 3.3.

Os trabalhos experimentais foram realizados em duas épocas. A primeira época foi em dezembro de 1998 e janeiro de 1999, com o solo recém preparado, e a segunda época, em dezembro de 1999, com um ano de consolidação natural do solo. Nas duas épocas, os testes experimentais tiveram a duração de 80 minutos. Inicialmente, durante 60 minutos, foi aplicada uma chuva simulada, com intensidade planejada de 70 mm h^{-1} , utilizando-se o

simulador de chuvas tipo rotativo, desenvolvido por Swanson (1965), semelhante ao descrito e calibrado por Cassol e Guerra (1978). Nos 20 minutos que se seguiram a essa primeira hora, ainda sob a chuva simulada, foram aplicados os tratamentos de fluxo extra, com diferentes vazões em cada sulco. Durante o período dos 20 minutos finais dos testes, cada sulco recebia uma definida dose de fluxo extra mais a vazão originada da chuva simulada (aproximadamente 5 L min^{-1}).

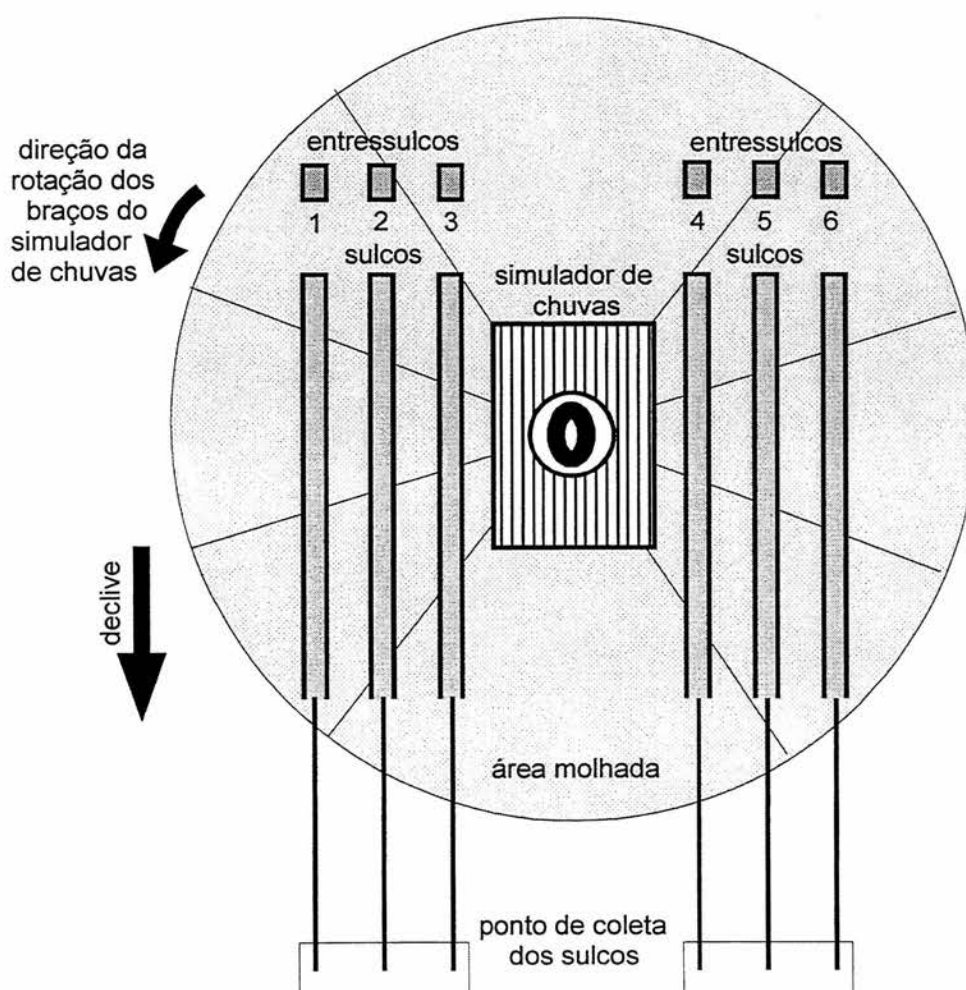


Figura 3.3 Disposição dos sulcos e entressulcos dentro de um bloco experimental, evidenciando também a disposição em relação ao simulador de chuvas de braços rotativos.

Os tratamentos ou fatores experimentais consistiram na aplicação de fluxos extras simultaneamente a chuva simulada, de forma aleatória e nos

seguintes níveis de fatores, conforme as diferentes condições da superfície do solo:

- aplicação de 0+5, 10+5, 20+5, 30+5, 40+5 e 50+5 L min⁻¹ nos sulcos pré-formados com solo recém preparado;
- aplicação de 0+5, 20+5, 40+5, 60+5, 80+5 e 100+5 L min⁻¹ nos sulcos pré-formados e deixados em consolidação por um ano.

A chuva simulada aplicada, acrescentava aproximadamente uma taxa de 5 L min⁻¹ aos fluxos extras aplicados.

Na figura 3.4 se observa um aspecto de sulcos formados em solo recém preparado, antes da aplicação da chuva e dos fluxos extras. Na figura 3.5. se observa um aspecto de sulcos consolidados, antes da aplicação da chuva e dos fluxos extras.

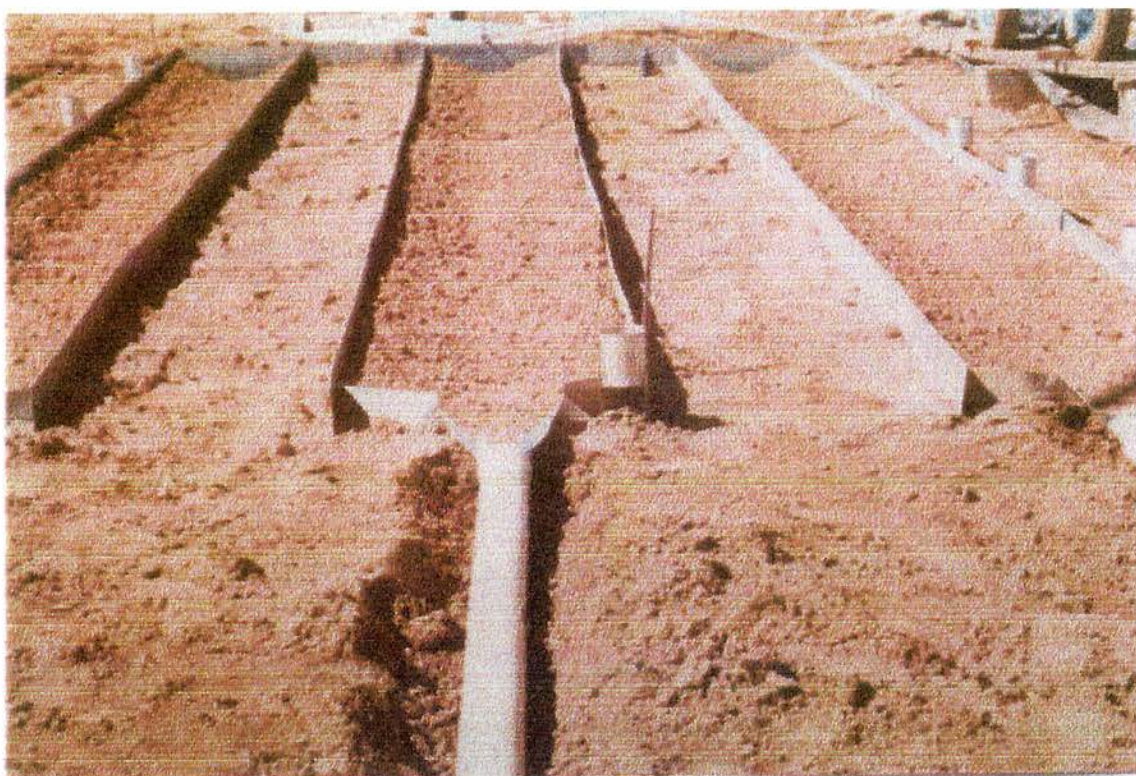


Figura 3.4. – Vista geral de 3 sulcos pré-formados em solo recém preparado antes dos testes experimentais de dezembro de 1998.

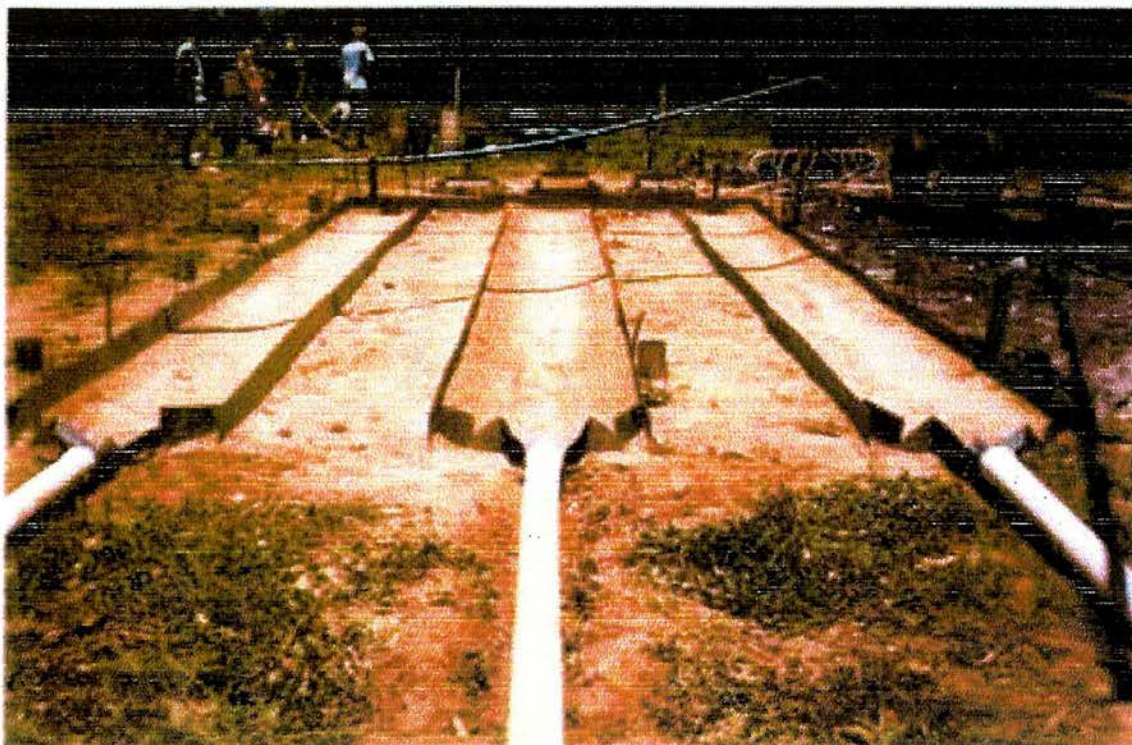


Figura 3.5. – Vista geral de 3 sulcos em solo consolidado, antes dos testes experimentais de dezembro de 1999.

As análises de variância dos experimentos e de regressão foram realizadas por meio dos programas estatísticos Genstat e Sigmastat, e os ajustes de curvas através do TableCurve.

3.2.2.3. Procedimento Experimental

O procedimento experimental foi caracterizado por duas fases distintas. Na fase 1, os sulcos foram submetidos à chuva simulada média de 74 mm h^{-1} no 1º ano (solo recém preparado) e 68 mm h^{-1} no 2º ano (solo consolidado) durante 60 minutos. Na fase 2, desenvolvida nos 20 minutos seguintes, à chuva simulada acrescentaram-se os fluxos extras, a partir dos 60 minutos de teste. A água foi conduzida aos sulcos, por gravidade e através de mangueira

calibrada, proveniente de um reservatório com capacidade de 500 litros, mantido sob carga constante, e abastecido com a água de um açude próximo da área experimental. Na extremidade superior dos sulcos foram enterrados dissipadores de energia na forma de recipientes metálicos retangulares (0,15 x 0,10 m e 0,05 m de altura), de tal forma que a borda superior do recipiente ficasse ao nível da superfície do solo. Nesses recipientes foram introduzidas as mangueiras condutoras de água, que chegava aos sulcos pelo transbordamento desses recipientes. As extremidades inferiores dos sulcos foram providas de calhas condutoras de sedimentos acopladas a canos de PVC com 100 mm de diâmetro, que conduziram a descarga líquida e todo solo desagregado ao ponto de coleta, nas suas extremidades inferiores.

3.2.3 Caracterização hidráulica do escoamento nos sulcos pré-formados

As dimensões das seções transversais do fluxo nos sulcos foram aferidas por intermédio de um perfilômetro objetivando-se a determinação da área, perímetro molhado, raio hidráulico e altura da lâmina de escoamento. O perfilômetro constitui-se de 40 hastes plásticas espaçadas de 2 cm e acopladas a uma estrutura retangular de acrílico com 0,8 m de comprimento e 0,4 m de altura (Figura 3.6).

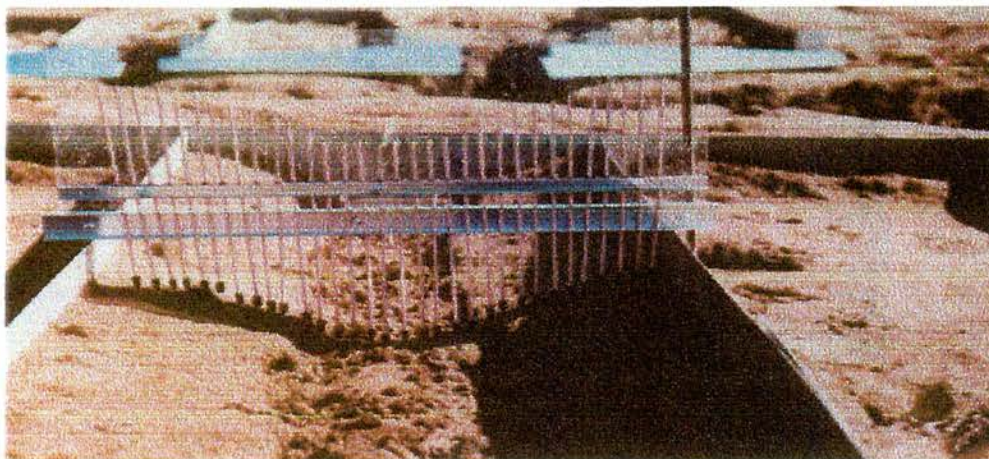


Figura 3.6. Perfilômetro em utilização para determinação da seção transversal dos sulcos.

As medições foram realizadas antes, imediatamente após o início do escoamento provocado pela chuva, aos 58 minutos (2 minutos antes da aplicação dos fluxos extras), entre os 70 e 78 minutos (10 a 18 minutos após a aplicação dos fluxos extras), e após a finalização dos testes. As medidas foram tomadas a 1,0 e 4,0 metros da extremidade superior dos sulcos conforme descrição a seguir. Com o perfilômetro nivelado e na posição vertical sobre as chapas metálicas, soltaram-se suavemente as hastes plásticas até a superfície do solo, para em seguida serem fixadas a estrutura. Neste momento o perfilômetro era removido para fora da área de testes. As formas da seção transversal dos sulcos eram, então, retratadas em cartolinas colocadas entre as hastes plásticas e as estruturas de acrílico, nas quais eram gravados as dimensões dos sulcos com pincel atômico em escala real. Também foram colocadas pequenas ligas de borrachas (“atílios”), para determinação da distância entre as hastes que marcavam a largura da lâmina, que quando grafadas e combinadas com a seção transversal dos sulcos, forneceram a altura de lâmina. A partir da conformação dos sulcos nas cartolinas obteve-se

suas respectivas áreas com o auxílio de um planímetro, e os perímetros molhados através do uso de um curvímetro. Com essas dimensões foi determinado o raio hidráulico dos sulcos pela seguinte relação:

$$R_h = \frac{A}{P_m} \quad (3.11)$$

sendo R_h = raio hidráulico da seção transversal (m), A = área da seção transversal (m^2), e P_m = perímetro molhado da seção transversal (m).

A velocidade superficial do escoamento foi determinada através da cronometragem do tempo gasto para que um corante (azul de metileno) percorresse a distância dos 5 metros centrais dos sulcos. Os valores de velocidade superficial assim obtidos foram expressos em $m\ s^{-1}$. As velocidades superficiais foram tomadas de 10 em 10 minutos, a partir da formação da lâmina de escoamento.

As taxas de descarga foram determinadas pela medição do volume de enxurrada medido em provetas e coletado durante um tempo cronometrado (normalmente alguns segundos), sendo expressas em $m^3\ s^{-1}$. Imediatamente após a medição das taxas de descarga, coletava-se uma pequena amostra da enxurrada em potes plásticos, colocados na extremidade inferior da calha coletora para se determinar em laboratório a concentração de solo e de água na enxurrada. As medições de volume da enxurrada e a amostragem para concentração de sedimentos eram efetuadas de 3 em 3 minutos até os 60 minutos de teste e de 2 em 2 minutos dos 60 aos 80 minutos de teste.

Para definição das condições hidráulicas do escoamento nos sulcos pré-formados e de sua interação com a superfície do solo foram determinadas algumas características hidráulicas, conforme as descrições apresentadas no

item 3.1.3., que trata da erosão em entressulcos. Assim, foram avaliados o número de Reynolds (R_e) conforme expressão 3.2, número de Froude (F_r) de acordo com a expressão 3.4, velocidade de cisalhamento (u_*) conforme expressão 3.5, Reynolds de partícula (R_e^*) conforme expressão 3.6. A rugosidade dos sulcos foi determinada através do coeficiente de rugosidade de Manning, obtido a partir da expressão:

$$n = \frac{R_h^{2/3} S^{1/2}}{V} \quad (3.12)$$

onde n = coeficiente de rugosidade de Manning ($s \text{ m}^{-1/3}$), R_h = raio hidráulico (m), S = declive do sulco (m m^{-1}) e V = velocidade média do escoamento (m s^{-1}).

A temperatura da água nos testes de campo foi de 33°C para os dois anos, e, por conseguinte, a viscosidade cinemática (ν) foi tomada como uma constante de $8 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ (conforme a expressão 3.3). Ainda de acordo com o item 3.1.3, determinaram-se os índices d_{50} e d_{65} a partir da distribuição acumulada do diâmetro do sedimento erodido nos sulcos.

A intensidade média das chuvas simuladas aplicadas foi aferida pela colocação de 20 pluviômetros na área experimental ao lado dos sulcos.

Antes do início das chuvas foram coletadas amostras de solo em 2 pontos dos sulcos, nas profundidades de 0 a 10 e de 10 a 20 cm, para determinação da umidade gravimétrica. Estas amostras foram acondicionadas em latas de alumínio, levadas ao laboratório, pesadas e postas a secar em estufa a 105°C por 24 horas para expressão da umidade gravimétrica (Apêndice 4) em kg kg^{-1} de solo seco.

A declividade dos sulcos foi tomada pela variação de altura entre 2 pontos de distância determinada nos sulcos e expressa em $m\ m^{-1}$ (Apêndices 5 e 6). Nos experimentos de erosão em sulcos a declividade da linha de água foi tomada como sendo a mesma declividade do fundo dos sulcos. Isso foi feito em virtude de que nesses experimentos a profundidade do fluxo normalmente não passa de pouco centímetros.

3.2.4. Quantificação das taxas de desagregação do solo e determinação da erodibilidade em sulcos

As taxas de desagregação do solo nos sulcos foram obtidas a partir da coleta da enxurrada em potes de 920 ml em intervalos de 3 em 3 minutos até os 60 minutos de teste e de 2 em 2 minutos dos 60 aos 80 minutos de teste. A duração das coletas foi de 3 e 5 segundos, variando de acordo com as vazões aplicadas. Aos potes plásticos, após pesagem, adicionou-se 5 ml de alúmen de potássio a 5%, para deposição das partículas. Após 24 horas, o sobrenadante foi succionado e os potes levados para secar em estufa a $65^{\circ}C$, até peso constante. Então, os potes eram pesados com e sem o solo seco, para determinação da massa de água e de solo seco. A partir da massa de solo seco e da duração das coletas, determinaram-se as taxas de descarga sólida, em $kg\ s^{-1}$. Por fim, as taxas de desagregação de solo nos sulcos foram obtidas pela seguinte relação:

$$D_r = \frac{Q.C}{L.P_m} \quad (3.13)$$

sendo D_r = taxa de desagregação do solo nos sulcos ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$), Q = descarga líquida em massa (kg s^{-1}), C = concentração (kg kg^{-1}), P_m = perímetro molhado (m), e L = comprimento do sulco, (m).

Admitindo-se que na erosão em sulcos com a adição de água limpa no fluxo, que a carga de sedimentos é muito menor que a capacidade de transporte, pode-se utilizar a equação 2.39 para determinação das taxas momentâneas de desagregação, aceitando-se que a mesma se aproxima da capacidade de desagregação do fluxo. Desta forma, a erodibilidade do solo em sulcos foi determinada através da análise de regressão para o modelo linear entre os valores médios de tensão cisalhante (τ) e de desagregação do solo (D_r) obtidos para cada vazão aplicada, conforme o modelo de predição de erosão WEPP (Flanagan & Nearing, 1995), cuja relação é a seguinte:

$$D_r = K_r (\tau - \tau_c) \quad (3.14)$$

Sendo D_r = desagregação de solo pelo escoamento nos sulcos ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$), K_r = erodibilidade do solo em sulcos ($\text{kg N}^{-1} \text{s}^{-1}$), τ_c = tensão crítica de cisalhamento do solo, abaixo da qual não existe desagregação (Pa), τ = tensão cisalhante média do escoamento (Pa), sendo:

$$\tau = \gamma R_h S, \quad (3.15)$$

onde γ = peso específico da água (N m^{-3}), R_h = raio hidráulico do sulco (m), e S = declive do sulco (m m^{-1}). A erodibilidade em sulcos (K_r) consistiu-se no coeficiente b da reta obtida que relaciona as taxas de desagregação (D_r) com a tensão cisalhante do fluxo (τ). A tensão crítica de cisalhamento do solo (τ_c) corresponde ao valor do intercepto de τ , quando $D_r = 0$, ou a partir da relação dos coeficientes da reta: $\tau_c = -a/b$ (Laflen & Thomas, 1987).

3.2.5. Caracterização do estado de consolidação do solo nos sulcos

Dos dezoito sulcos consolidados foram escolhidos aleatoriamente seis para amostragem e caracterização do estado de consolidação do solo, através da retirada de amostras indeformadas do talude dos mesmos. Na amostragem indeformada utilizou-se um amostrador de Uhland com cilindros de 3 cm de altura e 5,3 cm de diâmetro, pela retirada de 3 amostras da superfície consolidada, sendo duas nas extremidades dos sulcos e uma na sua região central. Foram realizadas amostragens no 5^o, 10^o, 13^o e 17^o meses de consolidação. Essas amostras foram utilizadas para determinação de curvas de retenção de água no solo, por umedecimento (sorção) e secagem (desorção), segundo Cauduro & Dorfman (1988), com a aplicação das tensões de 4, 10 e 24 kPa em funil de placa porosa, e 64 kPa na câmara de Richards.

A partir das amostras indeformadas foi determinada a densidade do solo (D_s) de acordo com a metodologia descrita em Klute (1996), pelo emprego da expressão:

$$D_s = \frac{M_s - T}{V} \quad (3.16)$$

sendo D_s = densidade do solo (kg m^{-3}), M_s = somatória da massa do anel e da amostra seca em estufa a 105^o C, (kg), T = massa do anel (kg) e V = volume do cilindro (m^3). A densidade de partículas (D_p) foi obtida conforme Embrapa (1979), pela colocação de 20 g de solo seco em um balão volumétrico de 50 ml, completado com álcool etílico e agitado para expulsão das bolhas de ar, sendo a densidade de partícula (D_p) obtida pela relação:

$$D_p = \frac{m_{ss}}{V_b - V_a} \quad (3.17)$$

onde D_p = Densidade de partículas (kg m^{-3}), m_{ss} = massa do solo seco (kg), V_b = volume do balão do balão ($5 \times 10^{-5} \text{ m}^3$) e V_a = volume gasto de álcool etílico (m^3).

A porosidade total do solo (P) foi estimada a partir da densidade do solo (D_s) e da densidade de partícula (D_p), pela expressão:

$$P = \left(1 - \frac{D_s}{D_p} \right) \quad (3.18)$$

O índice de vazios do solo foi determinado pela expressão (Fredlund & Rahargjo, 1993):

$$e = \frac{P}{1 - P} \quad (3.19)$$

sendo e = índice de vazios (adimensional) e P = porosidade total (adimensional). A partir da seguinte expressão, encontrada em Lambe & Whitman (1979), foram obtidos os valores de saturação das amostras indeformadas para determinação das curvas de retenção de umidade através da seguinte relação:

$$S = \frac{D_e \cdot U}{e} \quad (3.20)$$

sendo S = saturação do solo (adimensional), D_e = relação entre a densidade de partículas do sedimento (kg m^{-3}) e a densidade da água (kg m^{-3}), e = índice de vazios, e U = a umidade gravimétrica, a qual foi determinada pela seguinte relação:

$$U_g = \frac{m_a}{m_{ss}} = \frac{m_{su} - m_{ss}}{m_{ss}} \quad (3.21)$$

sendo U_g = umidade gravimétrica (kg kg^{-1}), m_a = massa de água (kg), m_{su} = massa de solo úmido (kg) e m_{ss} = massa do solo seco (kg) na estufa a 105° C .

As tensões efetivas que caracterizam o estado de consolidação do solo foram obtidas pela expressão 2.43 ($\sigma' = |\chi\psi|$) onde ψ = potencial matricial do solo, e, χ = um parâmetro relacionado ao grau de saturação do solo, com magnitude máxima de 1 para solo saturado, e mínima de zero para solo seco.

4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Erosão em entressulcos sob diferentes declividades e condições iniciais de umidade do solo

4.1.1. Caracterização hidráulica do escoamento em entressulcos perturbado pela chuva

Nos experimentos em laboratório, os valores da velocidade média do escoamento foram determinados pelo produto da velocidade superficial do fluxo medido pelo método do corante com o fator de correção $\alpha = 2/3$. O mesmo procedimento foi realizado por Guy et al. (1990), a partir de chuvas simuladas, que produziram descargas líquidas de 9×10^{-6} a $4,04 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ e respectivas alturas de $3,65 \times 10^{-4}$ e $4,04 \times 10^{-5} \text{ m}$. O mesmo fator foi usado por Farenhorst & Bryan (1995) em lâminas de $1 \times 10^{-3} \text{ m}$ de altura e descargas líquidas de $1 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. Na tabela 4.1 estão apresentados os resultados da velocidade média do fluxo nos entressulcos.

Os valores de altura do escoamento (h) constantes da tabela 4.1, e determinados nos experimentos em laboratório, foram obtidos a partir da relação 3.1 ($h = q / v$, onde v = velocidade média do escoamento, em m s^{-1} e q = descarga líquida por unidade de largura, em $\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$). Para avaliação dos valores de altura do escoamento (h) obtidos em laboratório e constantes da

tabela 4.1, a mesma altura também foi estimada através da equação 2.16 ($h = (Kqv/8gs)^{1/3}$), admitindo-se fluxo superficial laminar e utilizando-se um valor de $K = 24$, que é o valor teórico desse parâmetro hidráulico de acordo com Savat (1980); Yoon & Wenzel (1971) e Katz et. al.,(1995). A comparação dos valores de altura do escoamento (h) obtidos pelas equações 3.1 e 2.16, para o escoamento ensaiado no solo pré tratado com 60 cm de coluna de água, 4,5% de declive e deixado com drenagem livre durante o teste, encontra-se na figura 4.1. Observa-se que o valor de h estimado pela equação 2.16, após os 25 minutos de teste com a estabilização da lâmina, foi bem próximo do valor determinado pela equação 3.1, indicando que o fluxo foi laminar, como também, validando as determinações de velocidade média do escoamento determinadas pelo método do corante.

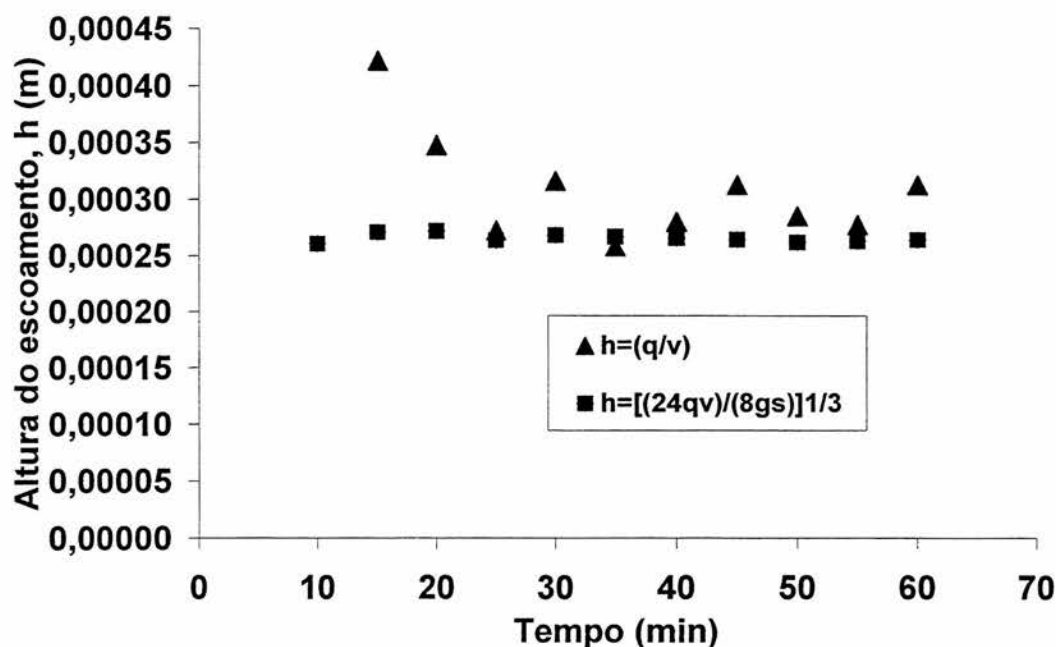


Figura 4.1. Valores da altura da lâmina do escoamento determinados pela relação 3.1 ($h = q/v$) e pela equação 2.16 [$h = (Kqv/8gs)^{1/3}$] com $K = 24$, para o declive de $0,045 \text{ m m}^{-1}$ e solo pré tratado com tensão de água equivalente a 60 cca e deixado com drenagem livre durante o teste.

Tabela 4.1. Características hidráulicas do escoamento em entressulcos perturbado pela chuva em solo descoberto: descarga líquida (q), velocidade média (Vm), altura da lâmina (h), viscosidade cinemática (v), Número de Reynolds (Re), Número de Froude (Fr), Fator de perda de carga (f), Reynolds da partícula (Re*), Parâmetro K, diâmetro da partícula (d₆₅) e (d₅₀), e Velocidade de cisalhamento (U*). Valores médios de 3 repetições.

Variável	Experimentos em laboratório						Experi- mento a Campo ⁽²⁾
	Pré-tratamento com 60 cca e drenagem livre durante o teste			Tensão de água no solo equivalente ao solo saturado			
	Declive de 4,5 %	Declive de 9 %	Declive de 18 %	Declive de 4,5%	Declive de 9%	Declive de 18% ⁽²⁾	
Hidráulica ⁽¹⁾							
q (m ² s ⁻¹)	1,41x10 ⁻⁵	1,36x10 ⁻⁵	1,178x10 ⁻⁵	1,29x10 ⁻⁵	1,570x10 ⁻⁵	1,4x10 ⁻⁵	1,01x10 ⁻⁶
V _m ⁽³⁾ (m s ⁻¹)	0,048	0,0574	0,0501	0,0288	0,0496	0,0720	0,0451
h (m) ⁽⁴⁾	2,94x10 ⁻⁴	2,37 x10 ⁻⁴	2,35 x10 ⁻⁴	4,88 x10 ⁻⁴	3,18 x10 ⁻⁴	1,95 x10 ⁻⁴	2,26 x10 ⁻⁴
v (m ² s ⁻¹)	1,01x10 ⁻⁶	1,01x10 ⁻⁶	1,01x10 ⁻⁶	1,11x10 ⁻⁶	1,11x10 ⁻⁶	1,11x10 ⁻⁶	8,0 x10 ⁻⁷
Re ⁽⁵⁾	13,96	13,46	11,66	11,62	14,18	12,63	12,31
Fr ⁽⁶⁾	0,89	1,19	1,05	0,43	0,89	1,65	0,96
f ⁽⁷⁾	0,45	0,51	1,32	1,91	0,91	0,53	0,76
Re* ⁽⁸⁾	6,50	6,36	8,96	8,96	10,13	8,23	4,89
K	6,27	6,83	15,36	22,36	13,05	6,76	--
d ₆₅ (m)	4,57x10 ⁻⁴	3,52x10 ⁻⁴	3,52x10 ⁻⁴	5,1x10 ⁻⁴	4,84x10 ⁻⁴	3,54x10 ⁻⁴	2,92 x10 ⁻⁴
d ₅₀ (m)	2,89 x10 ⁻⁴	2,33 x10 ⁻⁴	2,09 x10 ⁻⁴	3,36 x10 ⁻⁴	2,62 x10 ⁻⁴	1,75 x10 ⁻⁴	1,77 x10 ⁻⁴
U* (m s ⁻¹) ⁽⁹⁾	0,0114	0,0145	0,0204	0,014	0,0167	0,0223	0,0185

(1) Em laboratório foram aplicadas chuvas com intensidades médias de 80 mm h⁻¹ nos declives de 0,045 m m⁻¹, 0,090 m m⁻¹ e 0,180 m m⁻¹, e a campo foram aplicadas chuvas com 75 mm h⁻¹, todas com duração de uma hora; (2) Média de duas determinações; (3) V_m=(2/3) V_s; (4) h=q/V_m; (5) Re=Vh/v; (6) Fr=V/(gh)^{1/2}; (7) f=K/Re; (8) Re*=(u·d₆₅)/v; (9) u*=(ghs)^{1/2}

Com os valores medidos da descarga líquida por unidade de largura, da viscosidade cinemática do fluido e da velocidade média do fluxo superficial constantes da tabela 4.1, mais o declive das parcelas, a aceleração da gravidade, determinou-se o valor de K para todas as condições experimentais através expressão 2.16 rearranjada:

$$K = \frac{h^3 8gs}{q\nu} \quad (4.1)$$

Os valores de K, assim determinados, variaram com o declive (tabela 4.1). Para o solo com drenagem livre, os valores de K cresceram de 6,27 para 15,36 com o incremento do declive de 4,5 para 18%, enquanto que para o solo saturado decresceram de 22,26 para 6,76 com os mesmos aumentos no declive. A diminuição dos valores de K no solo parcialmente saturado, com o incremento do declive, reflete que a resistência da superfície hidráulica foi diminuída pela saturação do solo, fazendo o volume precipitado escoar-se mais facilmente e com um acentuado aumento na velocidade, com o incremento no declive. Para a condição do solo não saturado e drenagem livre, nas mesmas condições de declive, houve infiltração de um maior volume de água, possibilitando maior expressão dos efeitos viscosos no escoamento, indicados na elevação dos valores do fator de perda de carga.

Através das determinações das taxas de descarga líquida (q), velocidade média do escoamento (V), altura do escoamento (h), viscosidade cinemática (ν) e do d_{65} das partículas, foram determinadas as demais características hidráulicas Número de Reynolds (Re), Número de Froude (Fr), fator de perda de carga (f), Reynolds da partícula (Re_*), e a velocidade de cisalhamento (U_*), constantes da Tabela 4.1.

Observa-se na tabela 4.1, que a altura da lâmina do escoamento sempre superou o diâmetro característico da mistura de sedimentos (d_{50}), embora o diâmetro que caracteriza a rugosidade (d_{65}) tenha superado a lâmina. O regime de escoamento para os tratamentos sob drenagem livre foi laminar subcrítico para o do declive de 4,5%, indicado pelo baixo Reynolds e Froude <1 e laminar

supercrítico para os declives de 9 e 18%, com números de Reynolds entre 11,7 e 13,5 e Froude >1 . Para o solo saturado, sob os declive de 4,5 e 9%, os regimes de escoamento foram laminar subcrítico com Reynolds baixo (entre 12 e 14, respectivamente) e Froude <1 . Para o tratamento com 18% de declive, repetiu-se o regime laminar de transição supercrítico ($R_e < 500$; $F_r > 1$).

De forma conjunta para todos os tratamentos de laboratório, a relação da resistência ao escoamento em entressulcos, representada pelo fator de perda de carga f , com o número de Reynolds, apresentada na figura 4.2, demonstra tendência de diminuição da resistência ao escoamento com a elevação do número de Reynolds, o que se deve principalmente à diminuição dos efeitos viscosos para o solo saturado com a conseqüente diminuição da perda de carga, pela pouca infiltração ocorrida. Os valores da figura 4.2, estão em concordância com a ordem de grandeza da mesma relação obtida por Gerits et al. (1990) e Savat (1977), para escoamentos laminares na presença e na ausência de chuva simulada.

As condições hidráulicas para o fluxo gerado a partir da chuva simulada sobre as parcelas de erosão em entressulcos no campo, também estão na tabela 4.1. Tendo em vista que nas condições de campo não foi determinada a velocidade do escoamento superficial pelo método do corante, a altura da lâmina de escoamento foi estimada, realizada pela equação (2.16), utilizando-se o valor de 9,48 para o parâmetro K , que foi o valor médio de K obtido no laboratório com o solo inicialmente submetido à 60 cca e depois deixado com drenagem livre para os três declives, pois o solo no campo também não estava saturado no início do teste.

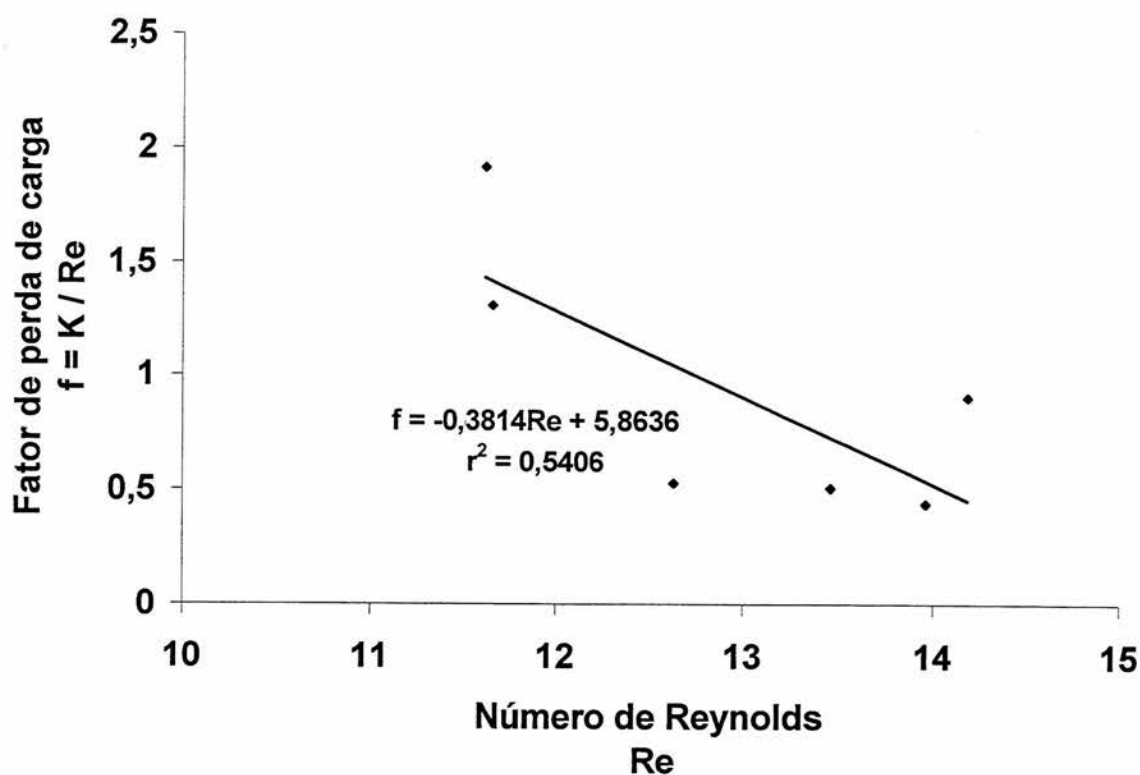


Figura 4.2 – Relação do número de Reynolds (Re) com o fator de perda de carga (f), para os todos tratamentos, com o solo saturado e drenagem livre, nos declives de 4,5; 9 e 18%.

Nas condições de campo, a vazão média em entressulcos foi de $1,01 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, produzindo um escoamento com Reynolds (Re) de 12 e um número de Froude (F_r) < 1 , em regime laminar subcrítico, muito semelhante aos regimes de entressulcos em laboratório. O fator de perda de carga de 0,76, também foi semelhante aos determinados nas condições de laboratório (tabela 4.1).

4.1.2 Dinâmica das taxas de desagregação de solo com o escoamento em entressulcos

Observa-se na figura 4.3 para os tratamentos com solos pré tratados com 60 centímetros de coluna de água, e depois deixados com drenagem livre para os declive de 9 e 18%, bem como na figura 4.4, para os tratamentos com solo saturado e os mesmos declives, que as taxas de desagregação em entressulcos foram crescentes e atingiram um máximo em torno dos 20 minutos para os tratamentos sob drenagem livre e, em torno do trigésimo minuto para os tratamentos com solo saturado. Neste período inicial foram transportadas as partículas mais susceptíveis ao movimento, por terem sido desagregadas anteriormente, pelo impacto das gotas de chuva na ausência da lâmina de escoamento. Braida e Cassol (1999), em condições de solo descoberto, atribuíram taxas de desagregação crescentes até os 30 minutos de teste, relacionadas ao aumento da descarga líquida e, conseqüentemente, ao aumento da capacidade de transporte da lâmina pela sua maior espessura; após esse período, as taxas de desagregação decresceram, o que foi atribuído pelos autores a uma redução da erodibilidade da camada superficial do solo, pela remoção seletiva das partículas mais erodíveis, e conseqüente formação de uma camada superficial compactada, fato esse, relatado também por Moore & Singer (1990).

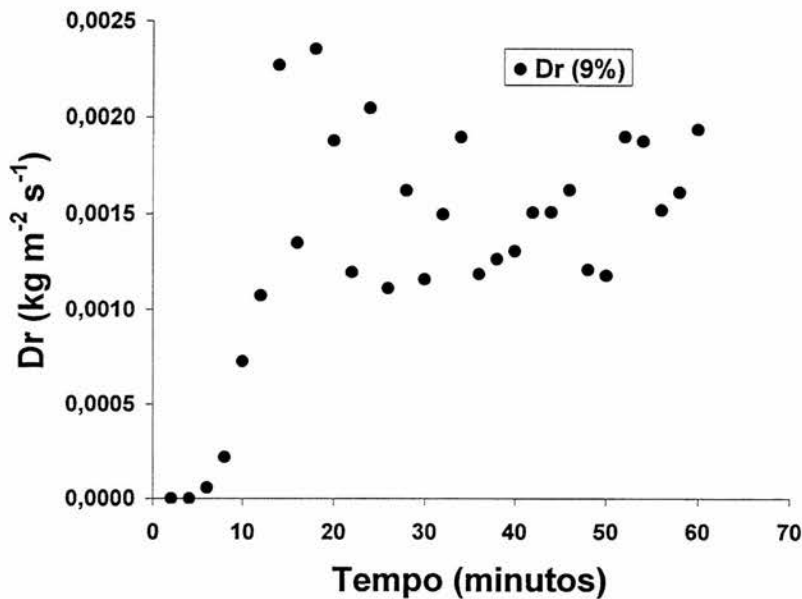
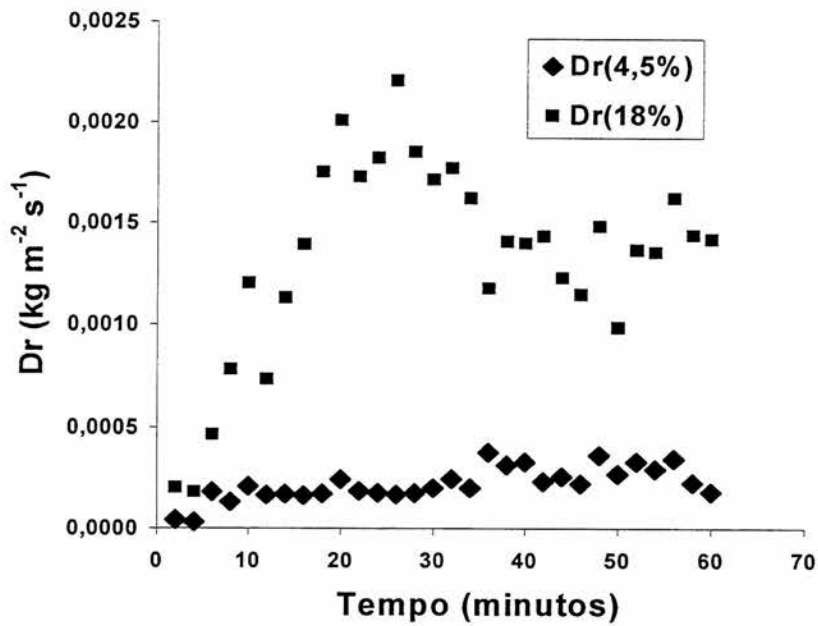


Figura 4.3 – Taxas de desagregação do solo no tempo para os tratamentos com solo sob drenagem livre, e declives de 4,5, 9 e 18%.

As taxas de desagregação dos tratamentos com 4,5 % de declive apresentaram um comportamento diverso dos demais, sendo menores que nos declives de 9 e 18%, com pequenos picos de desagregação, e estabilizaram-se

numa mesma faixa de variação, praticamente desde o início até o fim da chuva simulada. Este comportamento, demonstra uma menor capacidade de desagregação e transporte, limitadas nesta condição, pela pouca inclinação combinada a lâminas muito delgadas, como se observa na tabela 4.1., o que, conseqüentemente, disponibilizou pouca energia à desagregação e ao transporte.

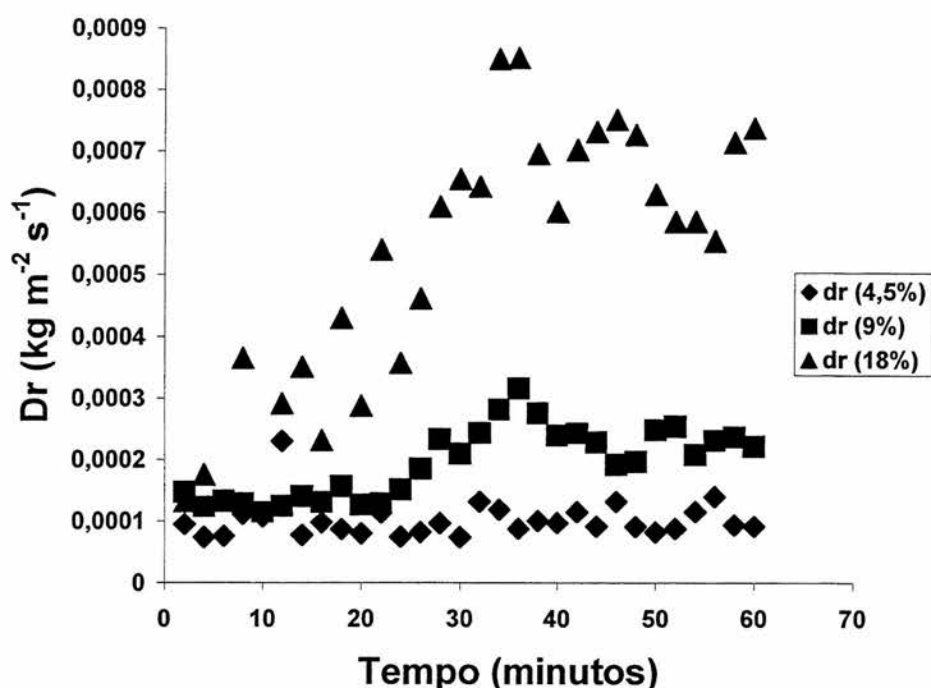


Figura 4.4 – Taxas de desagregação do solo no tempo para os tratamentos com solo saturado, e sob os declives de 4,5%, 9% e 18%.

Percebe-se pela análise das figuras 4.5, a estabilização da descarga líquida e, portanto, da altura da lâmina de escoamento, por volta dos 25 minutos tanto para o solo submetido à 60 centímetros de coluna de água, quanto para o solo saturado, reforçando a hipótese do aumento das taxas de desagregação, relacionado ao aumento da descarga líquida até o trigésimo minuto de teste.

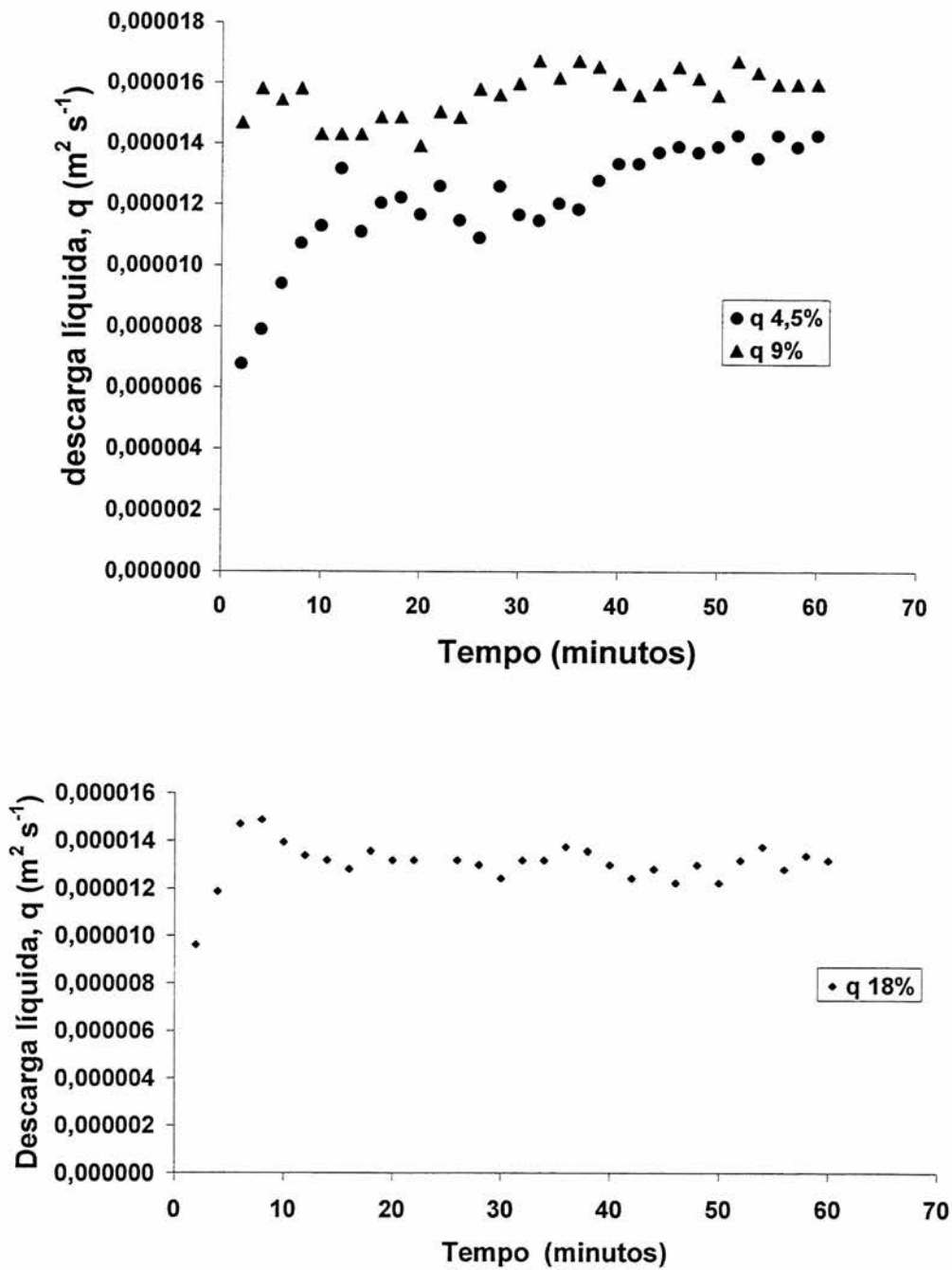


Figura 4.5 – Comportamento temporal da descarga líquida (q) para o solo pré tratado com 60 cca a 4,5 e 9% de declive, e para o solo saturado sob 18% de declive.

4.1.3. Transporte de sedimentos na erosão na erosão em entressulcos

Na tabela 4.2 encontram-se os valores de determinação (r^2), que foram utilizados para averiguação da eficiência de estimativa das equações da capacidade de transporte de sedimentos utilizadas. Nos experimentos de laboratório percebe-se no declive de 4,5%, tanto para o tratamento com solo em drenagem livre, quanto para o solo saturado, que nenhuma das equações de capacidade de transporte utilizadas foi eficiente na estimativa das taxas de sedimento transportado. Nesta condição, de combinação de pouco declive com uma lâmina pouco espessa em regime laminar lento, o escoamento ensaiado teve pouca energia disponível para transporte, sendo essa certamente, uma condição de lâmina distinta das condições em que essas equações de capacidade de transporte foram desenvolvidas, e dessa forma, uma condição não prevista pelas mesmas. Portanto, para condições deste trabalho, essa condição de lâmina foi o limite para o emprego das equações de transporte.

Ainda na tabela 4.2 pode-se observar que, para as condições de lâmina ensaiadas em laboratório com declives de 9 e 18%, as equações de transporte baseadas na tensão de cisalhamento do escoamento, apresentaram os maiores coeficientes de determinação dentre as equações de capacidade de transporte sólido utilizadas, enquanto as estimativas realizadas com base na variável hidráulica da potência do escoamento, apresentaram baixos coeficientes de determinações, sendo, portanto, insatisfatórias.

Tabela 4.2 – Coeficientes de determinação (r^2) das regressões entre as taxas de desagregação observadas, e os valores estimados pelas equações de capacidade de transporte de sedimentos.

Modelo	Declive ($m\ m^{-1}$)	Drenagem livre n	r^2	saturado n	r^2
	0,045				
Pot. Do Escoamento (τ, v)		20	0,019 ^{ns}	20	0,009 ^{ns}
Eurosem		20	0,019 ^{ns}	20	0,143 ^{ns}
Cassol (1988)		27	0,36 ^{ns}	30	0,073 ^{ns}
Yalin		26	0,149 ^{ns}	30	0,015 ^{ns}
	0,09				
Pot. Do Escoamento (τ, v)		20	0,421 ^{ns}	21	0,220 ^{ns}
Eurosem		20	0,006 ^{ns}	21	0,085 ^{ns}
Cassol (1988)		28	0,683 [*]	30	0,687 [*]
Yalin		28	0,506 [*]	29	0,653 [*]
	0,18				
Pot. Do Escoamento (τ, v)		20	0,528 [*]	20	0,0007 ^{ns}
Eurosem		20	0,259 ^{ns}	20	0,005 ^{ns}
Cassol (1988)		30	0,834 [*]	30	0,683 [*]
Yalin		29	0,605 [*]	30	0,620 [*]
	Campo 0,915				
Pot. Do Escoamento (τ, v)		23	0,07 ^{ns}		
Eurosem		23	0,001 ^{ns}		
Cassol (1988)		38	0,51 [*]		
Yalin		38	0,115 ^{ns}		

n = número de pares de observações, cada par sendo média de 3 repetições;
 r^{2*} = significativo pelo teste F.

Dentre as equações de transporte testadas baseadas na tensão cisalhante do escoamento, a função desenvolvida por Cassol (1988), baseada no parâmetro de transporte (ϕ) desenvolvido por Einstein (1950) e na tensão

cisalhante adimensionalizada (τ^*), apresentou os maiores coeficientes de determinação, constituindo-se na melhor estimativa de capacidade de transporte de sedimentos para as duas condições de tensão do solo estudadas sob os declives de 9 e 18%. O desempenho apresentado por esse modelo contrasta com os resultados de Govers (1992), ao avaliar a capacidade de transporte de algumas equações de forma conjunta, para o escoamento em sulcos e em entressulcos, para os quais, a fórmula de Cassol (1988), não apresentou uma boa performance de estimativa. Os resultados de Govers (1992) podem estar relacionados ao emprego da fórmula, também para o transporte em sulcos, enquanto neste trabalho, a referida equação foi utilizada unicamente para o escoamento ocorrido na erosão em entressulcos. A equação de Yalin foi a segunda na ordem de grandeza dos coeficientes de determinação apresentados, embora não tenham sido altos. Esta equação assume importância por ser utilizada em alguns modelos de predição de erosão em sulcos e em entressulcos. Pelo desempenho com os resultados do presente estudo, a equação de Yalin não se mostrou muito adequada para avaliar o transporte de sedimentos em entressulcos.

A aplicação do princípio da potência do escoamento baseia-se na quantidade de energia gerada pela inclinação da linha de água, aproximada, no caso, presente, pela inclinação da superfície do solo e, portanto, implica numa altura de lâmina estável. Como o escoamento em entressulcos caracteriza-se por uma lâmina incipiente, principalmente no início de sua formação, não é possível uma lâmina estável em todo o ensaio, o que pode ter prejudicado a eficiência de estimativa das equações baseadas na potência do escoamento, e

venha a se constituir num impedimento ao seu emprego nas condições de escoamento da erosão em entressulcos.

No experimento de campo, o coeficiente de determinação foi bem mais baixo para todas as equações utilizadas, sendo significativos apenas para o modelo de Cassol (1988).

De forma geral, nenhuma das variáveis hidráulicas testadas apresentou excelentes coeficientes de determinação, o que deve estar relacionado a lâmina de escoamento muito rasa e por sua instabilidade no início da formação da mesma.

4.1.4. Erodibilidade do solo em entressulcos

A erodibilidade do solo em entressulcos (K_i) foi determinada de acordo com a equação (2.32): ($[D_i = K_i / (I^2 S_f)]$) Optou-se por utilizar as taxas médias de desagregação observadas nos últimos 12 minutos de teste, em detrimento das taxas máximas de desagregação determinadas a partir da regressão dos dados de desagregação do solo no tempo, por apresentarem baixos coeficientes de determinação (r^2). Na tabela 4.3 são apresentados os valores de erodibilidade do solo (K_i) em entressulcos para cada um dos ensaios realizados.

Tabela 4.3. Valores médios da erodibilidade do solo em entressulcos (K_i , em kg s m^{-4}), para todos os testes realizados em condições de solo descoberto e chuva de intensidade média de 75 mm h^{-1} .

Tratamento	D_i ($\text{kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	S_f	K_i (kg s m^{-4})	Média
Drenagem livre				
0,045 (m m^{-1})	$3,24 \times 10^{-4}$	0,33989	$2,20 \times 10^6$	
0,090 (m m^{-1})	$6,23 \times 10^{-4}$	0,45612	$3,15 \times 10^6$	
0,180 (m m^{-1})	$1,06 \times 10^{-3}$	0,63152	$3,87 \times 10^6$	$3,07 \times 10^6$
Saturação				
0,045 (m m^{-1})	$3,85 \times 10^{-4}$	0,33989	$2,61 \times 10^6$	
0,090 (m m^{-1})	$3,86 \times 10^{-4}$	0,45612	$1,95 \times 10^6$	
0,180 (m m^{-1})	$7,87 \times 10^{-4}$	0,63152	$2,87 \times 10^6$	$2,48 \times 10^6$
Média lab.			$2,78 \times 10^6$	
Campo				
0,0915 (m m^{-1})	$4,17 \times 10^{-4}$	0,45962	$2,09 \times 10^6$	$2,09 \times 10^6$
Média geral				$2,55 \times 10^6$

Os valores médios de erodibilidade em entressulcos (K_i), determinados em laboratório, variaram entre $1,95 \times 10^6$ a $3,87 \times 10^6 \text{ kg s m}^{-4}$. Em média, o solo pré tratado com as tensões equivalentes a 60 centímetros de coluna de água e mantido com drenagem livre durante os testes, apresentou maior valor médio de erodibilidade em entressulcos ($K_i = 3,07 \times 10^6 \text{ kg s m}^{-4}$) do que o solo saturado (que na verdade desenvolveu baixas tensões equivalentes a 1,327; 2,65 e 5,31 cca) com K_i médio de $2,48 \times 10^6 \text{ kg s m}^{-4}$. Esse fato pode ser explicado pelo efeito produzido pelas baixas tensões matriciais desenvolvidas, muito provavelmente tensões efetivas, com a inclinação das parcelas pré saturadas, que mantiveram os agregados e as partículas de solo

interconectados. O mesmo foi observado por Gabbard et al. (1998), que obteve menores taxas de desagregação sob chuva simulada para um solo sob tensão de 10 cca, em relação a um escoamento produzido por chuva simulada sobre um solo com drenagem livre. O valor de erodibilidade do solo para as parcelas que desenvolveram baixas tensões matriciais, ($2,48 \times 10^6 \text{ kg s m}^{-4}$) foi ligeiramente superior ao valor obtido no campo ($2,09 \times 10^6 \text{ kg s m}^{-4}$).

Considerando-se, que se teve sempre a condição de solo descoberto, e um fator de correção do declive (S_f) na equação (2.33), admitiu-se, então, que existiram várias repetições para determinação da erodibilidade em entressulcos. Dessa forma, foi considerado o valor de erodibilidade em entressulcos (K_i) deste Argissolo a média geral de todos os testes realizados em laboratório e à campo, que foi de $K_i = 2,55 \times 10^6 \text{ kg s m}^{-4}$.

Rockenbach (1992), trabalhando com o mesmo solo nas condições de campo determinou um valor de erodibilidade em entressulcos (K_i) de $3,35 \times 10^6 \text{ kg s m}^{-4}$, pouco acima do valor ora determinado no campo. Braida e Cassol (1996), determinaram, em condições de campo, para um Argissolo Vermelho distrófico arênico, o valor de erodibilidade em entressulcos de $5,10 \times 10^6 \text{ kg s m}^{-4}$, ainda mais elevado que o valor obtido neste trabalho. O solo utilizado por Braida e Cassol (1996), teve $0,145 \text{ kg kg}^{-1}$ de argila, $0,101 \text{ kg kg}^{-1}$ de silte e $0,755 \text{ kg kg}^{-1}$ de areia, enquanto que o solo usado do presente trabalho teve $0,2065 \text{ kg kg}^{-1}$ de argila, $0,198 \text{ kg kg}^{-1}$ de silte e $0,5955 \text{ kg kg}^{-1}$ de areia. No solo do presente estudo, as percentagens de argila e silte foram maiores, conferindo a esse Argissolo, uma erodibilidade em entressulcos pouco menor daquele no Argissolo utilizado por Braida e Cassol (1996).

Albuquerque & Cassol (1998), obtiveram em laboratório, para diversos solos valores de erodibilidade em entressulcos na ordem de grandeza de 10^5 , enquanto que no presente trabalho, os valores de erodibilidade em entressulcos, obtidos nos experimentos em laboratório, estiveram na ordem de grandeza de 10^6 . Isso pode estar relacionado ao fato de que as parcelas utilizadas por aqueles autores não terem tido bordaduras, o que eliminou o salpico da área de bordadura para parcela e, certamente, diminuiu as taxas de desagregação determinadas.

4.1.5. Caracterização hidráulica e taxas de desagregação do escoamento na erosão em entressulcos na presença de resíduos vegetais em condições de laboratório

Constam da tabela 4.4, as condições hidráulicas médias para os 40 minutos finais do escoamento em entressulcos produzido através das chuvas simuladas, na presença de diferentes doses de palha de soja obtidas em laboratório. Os regimes de escoamento obtidos para todas as doses de resíduo aplicadas foram laminar subcrítico, como indicam os valores de $R_e < 500$ e $F_r < 1$. O aumento nas quantidades de palha aplicadas tiveram pouco efeito no número de Reynolds, mas diminuíram os valores dos números de Froude, demonstrando o aumento das forças viscosas, pela ação de resistência ao escoamento promovida pela rugosidade de forma originada pela presença dos resíduos vegetais, que também elevaram a altura da lâmina de escoamento e, conseqüentemente, as forças gravitacionais, diminuindo o número de Froude.

Também observa-se redução da velocidade do escoamento com a aumento das doses de palha. Essa redução da velocidade do escoamento, e a elevação da altura de lâmina que ocorreram na presença dos resíduos vegetais estão em concordância com Foster (1982) e Braida & Cassol (1999), que investigaram as condições hidráulicas do escoamento nessas condições.

Tabela 4.4. Características hidráulicas do escoamento em entressulcos perturbado pela chuva e na presença de resíduos vegetais com declives de $0,1 \text{ m m}^{-1}$: descarga líquida (q), velocidade do escoamento (V), altura da lâmina (h), Número de Reynolds (Re), Número de Froude (Fr), coeficiente de rugosidade de Manning (n), e viscosidade cinemática (ν). Valores médios de 3 repetições⁽¹⁾.

Dose de palha (kg m^{-2})	Descarga Líquida q ($\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$)	Velocidade Média $V^{(2)}$ (m s^{-1})	Altura da lâmina $h^{(3)}$ (m)	Número Reynolds $Re^{(4)}$	Número Froude $Fr^{(5)}$	Viscosidade Cinemática ν ($\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$)	Rugosidade de Manning $n^{(6)}$ ($\text{s m}^{-1/3}$)
0,0	$5,84 \times 10^{-6}$	0,0265	0,00022	5,11	0,57	$1,14 \times 10^{-6}$	0,043
0,1	$4,95 \times 10^{-6}$	0,0161	0,00031	4,66	0,29	$1,07 \times 10^{-6}$	0,089
0,2	$5,78 \times 10^{-6}$	0,0105	0,00055	5,35	0,14	$1,08 \times 10^{-6}$	0,203
0,4	$5,75 \times 10^{-6}$	0,0086	0,00067	4,97	0,11	$1,16 \times 10^{-6}$	0,281
0,8	$5,98 \times 10^{-6}$	0,0060	0,00100	5,50	0,06	$1,09 \times 10^{-6}$	0,522

(1) A Intensidade da chuva foi de 73 mm h^{-1} com duração de uma hora.

(2) $V_m = 2/3 V_s$ (velocidade superficial); (3) $h = q/V_m$; (4) $Re = Vh/\nu$; (5) $Fr = V/(gh)^{1/2}$; (6) $n = h^{5/3} S^{1/2}/q$.

Os valores de velocidade média do escoamento na presença dos resíduos vegetais, constantes da tabela 4.4, constituem-se no produto da velocidade superficial por um fator de correção $\alpha = 2/3$. A velocidade superficial foi obtida pelo método do corante, na tomada do tempo para o escoamento percorrer o espaço entre o ponto de aplicação do corante e o vertedor da parcela, quando do reaparecimento do corante, que percorreu a parcela encoberto pela palha.

Para as condições de escoamento em entressulcos na presença de altas doses de resíduos vegetais, a rugosidade foi determinada pelo coeficiente de Manning (n) na forma da expressão apresentada por Braida & Cassol (1999), dada por:

$$n = \frac{h^{5/3} S^{1/2}}{q} \quad (4.2)$$

onde n = coeficiente de rugosidade de Manning ($s \text{ m}^{-1/3}$), h = altura da lâmina de escoamento (m), q = descarga líquida ($\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$) e S = declive da parcela (m m^{-1}).

Para as doses de palha de 0,0 a 0,8 kg m^{-2} , os valores de rugosidade hidráulica (n), elevaram-se respectivamente de 0,043 a 0,522. Esses valores de rugosidade produzidos pelas altas doses de resíduo, correspondem a rugosidade determinada ao escoamento em planícies de florestas inundadas com densa vegetação (Simons & Senturk, 1992). Como a altura do escoamento nas áreas de entressulcos são da ordem de grandeza de 10^{-4} m, as doses mais altas de resíduos produzem uma rugosidade semelhante à produzida pela densa vegetação de florestas em planícies inundadas.

Foster (1982) propôs uma relação para determinação das taxas de desagregação na presença de resíduos vegetais em contato direto com a superfície do solo na erosão em entressulcos, qual seja:

$$D_i = K_i \cdot I^2 \cdot S_f \cdot C_i \quad (4.3)$$

onde D_i = taxa de desagregação do solo ($\text{kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), I = intensidade da chuva (m s^{-1}), S_f = fator de declive, e C_i = coeficiente de cobertura do solo, sendo C_i dado pela expressão:

$$C_i = C_{iI} \cdot C_{iII} \cdot C_{iIII} \quad (4.4)$$

onde C_{iI} = fator que expressa o efeito da cobertura da copa ou do dossel, C_{iII} = fator que expressa o efeito da cobertura por resíduo em contato direto com a superfície do solo, e C_{iIII} = fator que expressa o efeito do resíduo incorporado ao solo. Considerando-se que não haviam resíduos incorporados e tão pouca cobertura de dossel, tem-se que $C_{iI} = 1$ e $C_{iIII} = 1$, de modo que a expressão 4.4 se reduz a $C_i = C_{iII}$. Desta forma o fator C_{iII} pode ser estimado pela seguinte expressão:

$$C_{iIII} = \frac{D_i}{K_i \cdot I^2 \cdot S_f} \quad (4.5)$$

Na tabela 4.5 estão os valores observados das taxas de desagregação de solo em entressulcos, D_i , em $\text{Kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$ e os valores observados de C_{iII} para o resíduo de soja determinado pela expressão 4.5. O valor de erodibilidade em entressulcos (K_i) considerado foi de $2,55 \times 10^6 \text{ kg s m}^{-4}$ (Tabela 4.3) e o fator de declive (S_f) de 0,4792. Também constam da tabela 4.5 os valores de C_{iII} estimados pelo modelo de Laflen et al. (1985) e por um modelo de potência. Esses modelos encontram-se apresentados na tabela 4.6. Pode-se observar que os dois modelos tiveram o mesmo o coeficiente de determinação (r^2), pelo qual 99,2% da variação no valor do fator C_{iII} é explicado pela variação na fração de solo coberto (CS). Pela simplicidade e facilidade de aplicação sugere-se a utilização do modelo de Laflen et al. (1985), para estimativa do C_{iII} . Braida e Cassol (1999), ajustando o modelo de Laflen et al. (1985) para estimativa do efeito do resíduo de trigo e milho em contato direto com a superfície do solo, obtiveram, respectivamente, os valores de 0,94 e 0,97 para

o coeficiente de determinação, portanto, bem próximo do valor ora determinado de 0,992.

Tabela 4.5. Taxas de desagregação, D_i ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$) ajustadas para chuva de intensidade média de 75 mm h^{-1} e declive de $0,10 \text{ m m}^{-1}$, cobertura do solo por diferentes doses de resíduos, CS ($\text{m}^2 \text{ m}^{-2}$), e valores observados e estimados do Sub-fator cobertura do solo em entressulcos por resíduos em contato direto com a superfície do solo (C_{iII}).

Dose de Resíduo	Cobertura	D_i	C_{iII} Obs.	Laflen ⁽¹⁾	Potência ⁽²⁾
Kg m^{-2}	$\text{m}^2 \text{ m}^{-2}$	$\text{Kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$			
0,00	0,00	$5,35 \times 10^{-4}$	1,00	1,00	1,00
0,05	0,27	$3,21 \times 10^{-4}$	0,61	0,51	0,52
0,10	0,46	$2,58 \times 10^{-4}$	0,49	0,32	0,32
0,20	0,70	$1,06 \times 10^{-4}$	0,20	0,18	0,18
0,40	0,92	$5,10 \times 10^{-5}$	0,10	0,10	0,10
0,80	1,00	$1,50 \times 10^{-5}$	0,03	0,08	0,08

(1) $C_{iII} = e^{-2,47 \text{ CS}}$; (2) $C_{iII} = 1,014 \times 0,08203^{\text{CS}}$

Tabela 4.6. Modelos ajustados para estimativa do efeito da cobertura do solo por resíduos em contato direto com a superfície nas taxas de desagregação (C_{iII}).

Modelo	a	B	r	r^2
Laflen: $C_{iII} = e^{(-a \cdot CS)}$	2,471	--	0,996	0,992
Potência: $C_{iII} = a b^{\text{CS}}$	1,014	0,08203	0,996	0,992

e = base do logaritmo natural; CS= fração de solo coberto

4.2. Erosão em sulcos em condições de solo recém preparado

4.2.1. Caracterização hidráulica do escoamento nos sulcos para o solo descoberto e recém preparado

Durante a aplicação dos fluxos extras nos sulcos, em alguns momentos mediu-se a velocidade superficial do escoamento, utilizando-se o método do corante. Os valores medidos foram multiplicados por um fator de correção $\alpha = 0,6$ para se obter a velocidade média do escoamento, tendo em vista a distribuição do perfil de velocidade nos sulcos. O valor de 0,6 tem sido utilizado e recomendado por diversos autores (Slattery & Bryan, 1992; Braida & Cassol, 1996; Abrahams et al. 1996). Schafer et al. (2001), em condições de sulcos pré-formados no campo empregaram um valor de 0,74. King & Norton (1992) propuseram uma relação para determinação do fator α baseado unicamente na relação com o declive expresso em percentagem, independentemente das condições hidráulicas, qual seja: $\alpha = 0,628 + 0,011(S) - 0,00139(S)^2$. A aplicação dessa expressão aos dados do presente estudo indicou valores entre 0,63 e 0,64 para α , próximo ao valor de 0,6 utilizado.

Em todos os tempos de determinação da velocidade média também foi medida a descarga líquida dos sulcos, para todos os fluxos extras aplicados. Com base nessas determinações foi, então, estabelecida uma relação entre a descarga líquida e a velocidade média do fluxo, cujo resultados estão apresentados na figura 4.6.

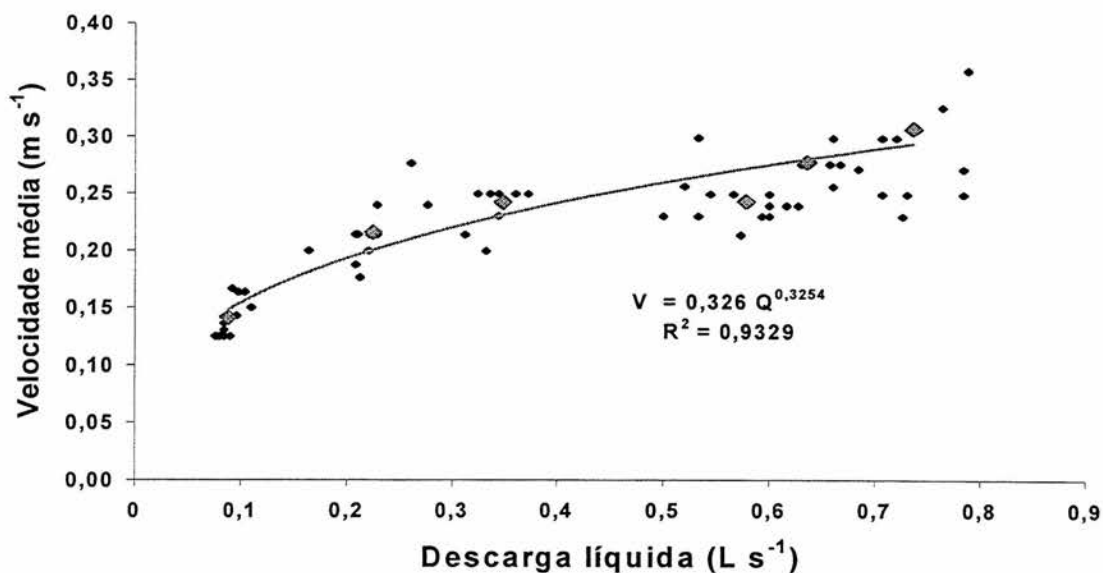


Figura 4.6. Relação da velocidade média do escoamento com as descargas líquidas nos sulcos.

Os pontos menores na figura 4.6 representam todos os pares de valores de velocidade média e descarga líquida determinados, enquanto a média aritmética das velocidades do escoamento com as correspondentes descargas líquidas médias obtidas com as vazões extras aplicadas (pontos maiores), produziram um ajuste para o modelo de potência, qual seja:

$$V_m = 0,326 Q^{0,3254} \quad r^2 = 0,933 \quad (4.6)$$

Onde V_m = velocidade média do escoamento ($m s^{-1}$) e Q = descarga líquida dos sulcos ($L s^{-1}$). Essa mesma relação entre a velocidade média do escoamento e a descarga líquida foi estabelecida por Giasson & Cassol (1996) que encontraram um expoente de 0,27, e um coeficiente a de 0,11 para descarga líquida expressa em $L min^{-1}$.

Durante a aplicação dos fluxos extras nos sulcos foi medida a área da seção transversal e o perímetro molhado do fluxo. Com base nessas

avaliações efetuadas, estabeleceu-se uma relação entre a área e o perímetro molhado através da seguinte expressão:

$$P_m = 3,7218 A^{0,5024} \quad r^2 = 0,991 \quad (4.7)$$

O raio hidráulico foi determinado pela relação $R_h = A/P_m$. Assim, como foi obtida uma relação entre o perímetro molhado e a área, também pode-se estabelecer uma relação entre o raio hidráulico (R_h) e a área (A), a qual é dada por:

$$R_h = 0,4075A^{0,5778} \quad r^2 = 0,964 \quad (4.8)$$

Na figura 4.7, pode-se perceber claramente a evolução do raio hidráulico durante os períodos de adição dos fluxos extras, o que, em última análise, determina a grandeza das tensões cisalhantes do escoamento sobre os sulcos.

Braida & Cassol (1996) determinaram um valor de 0,531 para o expoente para relação (4.8) e comentam uma variação na literatura de 0,51 a 0,57, para esse expoente. Já para expressão (4.7), esses autores obtiveram um expoente de 0,454, pouco abaixo do ora determinado.

Também através de análise de regressão, obteve-se ajustes entre a variação das descargas líquidas ($L s^{-1}$), com o perímetro molhado (P_m) e o raio hidráulico (R_h), respectivamente. A equação ajustada para o perímetro molhado é dada por:

$$P_m = 0,3362 Q^{0,384} \quad r^2 = 0,968 \quad (4.9)$$

Para o raio hidráulico a expressão determinada foi a seguinte:

$$R_h = 0,026 Q^{0,458} \quad r^2 = 0,982 \quad (4.10)$$

onde P_m = perímetro molhado (m); R_h = raio hidráulico da seção transversal do escoamento nos sulcos (m) e Q = descarga líquida ($L s^{-1}$).

As equações (4.9) e (4.10) constituem-se em uma alternativa para estimativa das dimensões da seção transversal dos sulcos.

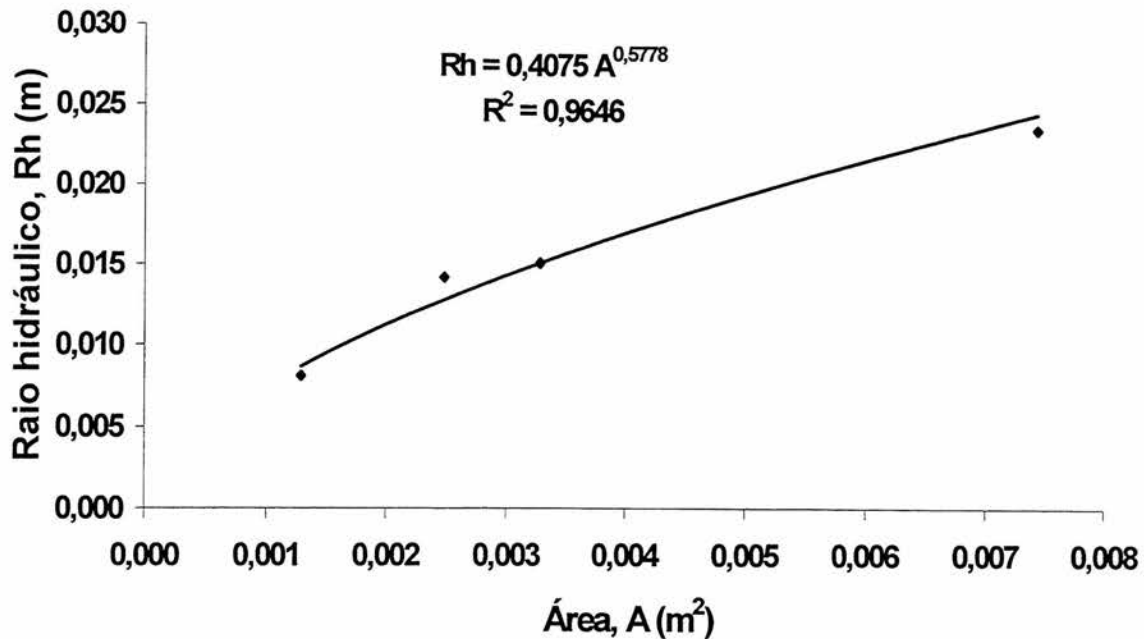


Figura 4.7 – Variação do raio hidráulico (R_h) e da área (A) dos sulcos para os fluxos extras e a chuva aplicados.

A partir da determinação das variáveis hidráulicas descarga líquida (Q), velocidade média do escoamento (V), diâmetro que caracteriza a rugosidade da mistura de sedimentos (d_{65}) e da seção transversal do fluxo nos sulcos no período de adição dos fluxos extras, foram determinadas todas as demais variáveis hidráulicas, constantes da tabela 4.7, que caracterizam o escoamento nos sulcos em solo recém preparado.

Para os sulcos sem adição de fluxo extra, apenas com a vazão da água da chuva ($0+5 \text{ L m}^{-1}$), o regime de escoamento foi de transição subcrítico, com o número de Reynolds (R_e) de 1710 e o de Froude < 1 . Para os tratamentos de $20+5$ a $50+5 \text{ L m}^{-1}$, os regimes de escoamento foram turbulentos subcríticos, com Reynolds entre 4000 e 9000 e números de Froude < 1 . Schafer et al.

(2001), encontraram regimes de escoamento semelhantes para sulcos pré-formados em diferentes sistemas de preparo de solo, como também, para distintos estados de consolidação do solo.

Tabela - 4.7. Características hidráulicas do escoamento em sulcos com solo recém preparado: descarga líquida (Q), velocidade média (V_m), raio hidráulico (R_h), área (m^2), perímetro molhado (P_m), declive ($m m^{-1}$), Número de Reynolds (Re), Número de Froude (Fr), coeficiente de rugosidade de Manning (n), Reynolds da partícula (Re^*), diâmetro da partícula (d_{65}), Velocidade de cisalhamento (U^*), concentração média de sedimentos na enxurrada (C) e tensão cisalhante (τ). Valores médios de 3 repetições em 4 momentos durante a aplicação das vazões extras.

Variável Hidráulica	Fluxos extras aplicados ($L min^{-1}$) ⁽¹⁾					
	0+5	10+5	20+5	30+5	40+5	50+5
Q ($L s^{-1}$)	0,086	0,217	0,488	0,499	0,618	0,738
V_m ($m s^{-1}$)	0,141	0,219	0,244	0,245	0,277	0,315
A (m^2)	0,00129	0,00248	0,00328	-	-	0,00743
P_m (m)	0,1321	0,1715	0,2183	0,2507 ⁽²⁾	0,2790 ⁽²⁾	0,3158
R_h (m)	0,0097	0,0144	0,0150	0,0188 ⁽³⁾	0,0208 ⁽³⁾	0,0235
Declive ($m m^{-1}$)	0,066	0,067	0,061	0,067	0,068	0,068
Re	1710	3888	4538	5711	7228	8901
Fr	0,46	0,57	0,63	0,57	0,62	0,63
n	0,084	0,067	0,061	0,075	0,070	0,070
Re^*	27,35	39,83	21,23	47,04	48,85	52,19
d_{50} (m)	$2,38 \times 10^{-4}$	$2,50 \times 10^{-4}$	$1,28 \times 10^{-4}$	$2,79 \times 10^{-4}$	$2,67 \times 10^{-4}$	$2,70 \times 10^{-4}$
d_{65} (m)	$2,70 \times 10^{-4}$	$3,39 \times 10^{-4}$	$1,53 \times 10^{-4}$	$3,39 \times 10^{-4}$	$3,34 \times 10^{-4}$	$3,34 \times 10^{-4}$
U^* ($m s^{-1}$)	0,081	0,094	0,111	0,111	0,117	0,125
C ($kg L^{-1}$)	0,0685	0,0753	0,05166	0,0872	0,0824	0,0886
τ (Pa)	6,53	8,71	8,92	12,29	13,80	15,59

(1) A chuva simulada média de $74 mm h^{-1}$, concomitantemente aplicada ao fluxo extra nos sulcos, acrescia aproximadamente a vazão $5 L min^{-1}$; (2) Determinado pela equação (4.9); (3) Determinado pela equação (4.10).

Os valores Reynolds de partícula entre 20 e 52 apontaram uma superfície hidráulica de transição para todos os tratamentos, conforme Simons & Senturk (1992).

A rugosidade hidráulica dos sulcos determinada através do coeficiente de Manning (n) encontra-se na tabela 4.7. Os valores de n representam conjuntamente a rugosidade das partículas e agregados do solo (n') e a rugosidade de forma (n'') dos sulcos, para os fluxos extras de 10+5, 20+5, 30+5, 40+5 e 50+5 L min⁻¹, aplicados nos sulcos sob solo recém preparado. Esses valores na ordem de 0,067 a 0,084, de acordo com Simons & Senturk (1992), correspondem ao escoamento em canais sem vegetação e declivosos, com cascalho no fundo. Essa descrição para os sulcos recém preparados, se refere ao declive em torno de 0,07 m m⁻¹, solo descoberto e com a rugosidade conferida pelos grandes agregados, como pode-se ver na figura 3.4, e pela própria forma e deformação ocorrida nos sulcos durante os testes.

4.2.2 Taxas de desagregação e caracterização da erodibilidade do solo em sulcos

Com base na avaliação das dimensões da seção transversal dos sulcos constantes da tabela 4.7, foram determinadas as taxas médias de desagregação de solo nos sulcos pré-formados para o período de aplicação das vazões extras, utilizando-se a equação 3.12 [$Dr=(C.Q)/(L.P_m)$], em que Dr = taxa de desagregação, kg m⁻² s⁻¹; Q = descarga líquida, (L s⁻¹), C = concentração de sedimentos (kg L⁻¹), P_m = perímetro molhado, (m); e L = comprimento do sulco de 7 m.

Na Tabela 4.8 constam os valores médios de tensão cisalhante e de desagregação do solo. Esses valores podem ser relacionados através de análise de regressão, para determinação da erodibilidade do solo em sulcos de forma direta, pela expressão linear ($D_r = a + b\tau$) onde D_r = taxa de desagregação do solo em sulcos, $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$; τ = tensão de cisalhamento do escoamento concentrado em sulcos, Pa; a e b são coeficientes ajustados), conforme o modelo WEPP (Flanagan & Nearing, 1995).

Tabela 4.8 – Tensão cisalhante média (τ) e taxas médias de desagregação do solo em sulcos para as vazões aplicadas. Média de três repetições.

Fluxos extras ⁽¹⁾ Q (L min ⁻¹)	Tensão cisalhante média τ (Pa) ⁽²⁾	Taxa de desagregação média D_r (kg m ⁻² s ⁻¹) ⁽²⁾
0+5	6,56 a	0,0067 a
10+5	8,71 a	0,0137 b
20+5	8,97 b	0,0171 b
30+5	12,29 b	0,0248 c
40+5	13,80 b	0,0261 c
50+5	15,59 b	0,0295 c

(1) A chuva simulada média de 70 mm h^{-1} , concomitantemente aplicada ao fluxo extra nos sulcos, acrescia aproximadamente 5 L min^{-1} à vazão nos sulcos;

(2) Médias seguidas de mesma letra na mesma coluna não diferem pelo teste de Duncan a 5%.

Dessa forma, a regressão dos valores das taxas de desagregação do solo (D_r) com as respectivas tensões de cisalhamento (τ) do escoamento obtidas em todas os fluxos extras aplicados, forneceram uma erodibilidade em sulcos (K_r), por meio do coeficiente b ou declividade da reta (Lafren & Thomas, 1987), que foi de $0,0024 \text{ kg N}^{-1} \text{ s}^{-1}$ e a tensão crítica de cisalhamento ($\tau_c = -a/b$ ou o intercepto em x para $y = 0$), de $2,75 \text{ Pa}$, ambos representados na figura 4.8 para um ajuste de $r^2 = 0,896$.

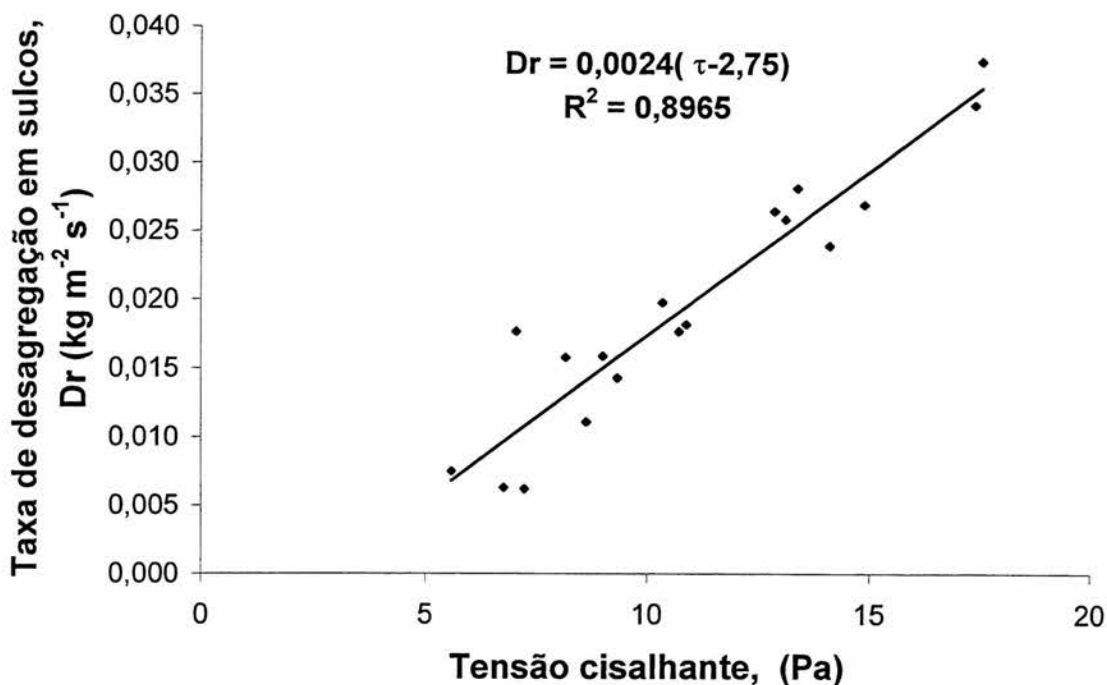


Figura 4.8 Erodibilidade do solo (K_r) em sulcos e tensão crítica de cisalhamento (τ_c), obtidas a partir da regressão das taxas de desagregação do solo (D_r) com as respectivas tensões de cisalhamento do escoamento (τ).

Giasson & Cassol (1996) encontraram para este mesmo Argissolo, um valor de 1,13 Pa para tensão crítica de cisalhamento, abaixo do valor ora determinado de 2,75 Pa, e uma erodibilidade do solo em sulcos de 0,0077 kg N⁻¹ s⁻¹, acima de três vezes maior do valor ora determinado. Os mesmos autores, utilizando a equação de estimativa da erodibilidade de maneira indireta através dos atributos do solo empregada no WEPP, encontraram um valor de 0,0056 kg N⁻¹ s⁻¹ para erodibilidade do solo em sulcos. Essa diferença de valores da erodibilidade (K_r), entre a presente determinação e as de Giasson & Cassol (1996), pode estar relacionada ao coeficiente de determinação (r^2) obtido de pelos autores, que explicou 46% da variância experimental, enquanto o ajuste da figura 4.8, explica 89,6% da variância dos valores experimentais.

Braida & Cassol (1996), determinaram para um Argissolo Vermelho distrófico arênico valores de K_r de $0,0104 \text{ kg N}^{-1} \text{ s}^{-1}$ e τ_c de $4,81 \text{ Pa}$. Nesse mesmo Argissolo, Schafer et al. (2001) determinaram valores de erodibilidade em sulcos (K_r) de $0,012 \text{ kg N}^{-1} \text{ s}^{-1}$ e tensão crítica de cisalhamento (τ_c) de $2,65 \text{ Pa}$ que são mais próximos dos valores determinados no presente estudo, embora o teor de argila do solo estudado por aqueles autores tenha sido menor. Como percebe-se, os valores de erodibilidade em sulcos e de tensão crítica de cisalhamento para solos do Brasil são unicamente da região Sul e, segundo Schafer et al. (2001), ainda insuficientes para conclusões sobre a relação destes dois parâmetros de erosão em sulcos com propriedades do solo.

Para a determinação da erodibilidade do solo em sulcos através da equação 2.41 ($(Dr = Kr (\tau - \tau_c))$), admite-se que a capacidade de transporte (T_c) na equação 2.38 ($([Dr = Dc(1 - (G/Tc))])$) seja muito maior que a carga de sedimentos (G). Para confirmação dessa condição a capacidade de transporte de sedimentos foi calculada pela equação 2.25 desenvolvida por Yalin e a carga média de sedimentos (G) foi calculada pela expressão:

$$G = \frac{PS}{P_m D} \quad (4.11)$$

onde P_m = perímetro molhado médio (m), D = duração do teste (s) e PS = perda de solo (kg) dada pela expressão:

$$PS = \sum Q_{in} C_{in} t \quad (4.12)$$

onde Q_{in} = descarga líquida instantânea (L s^{-1}), C_{in} = concentração instantânea de sedimentos (kg L^{-1}) e t = tempo entre amostragens (s).

No cálculo da capacidade de transporte (T_c), utilizando-se as expressões (2.25) e (2.26), utilizou-se para a tensão cisalhante crítica, o valor de $Y_c = 0,04$ (valor adimensional obtido com auxílio do Diagrama de Shields), o d_{50} como diâmetro característico da partícula (Tabela 4.7), peso específico da água, $\gamma_w = 9807 \text{ N m}^{-3}$, peso específico do sedimento, $\gamma_s = 25.498,2 \text{ N m}^{-3}$, densidade da água, $\rho_w = 1000 \text{ kg m}^{-3}$ e a tensão cisalhante do fluxo da Tabela 4.7.

Na tabela 4.9 encontram-se a capacidade de transporte de sedimentos (T_c), a carga de sedimentos (G) e a relação (G/T_c) dos sulcos para todas os fluxos extras aplicados. A relação (G/T_c) indica quanto da capacidade de transporte é preenchida pela carga de sedimentos. Observa-se para todos os, fluxos extras aplicados que a capacidade de transporte superou a carga de sedimentos, verificando-se que a carga média de sedimentos ocupou de 1,4 a 7,4 % da capacidade de transporte, validando dessa maneira, a utilização da expressão (2.41) na determinação de erodibilidade do solo em sulcos.

Tabela 4.9. Capacidade de transporte (T_c), carga média de sedimentos (G) e relação G/T_c dos sulcos para as vazões aplicadas. Média de 3 repetições.

Vazão (L min^{-1})	T_c ($\text{kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	G ($\text{kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	G/T_c
0+5	0,69	0,011	0,016
10+5	1,08	0,080	0,074
20+5	2,97	0,071	0,024
30+5	7,25	0,112	0,015
40+5	9,28	0,132	0,014
50+5	10,78	0,242	0,022

4.2.3 Avaliação do transporte sólido nos sulcos recém preparados

A avaliação do transporte sólido foi realizada através de duas expressões matemáticas baseadas na variável hidráulica conhecida como potência do escoamento (Ω), expressa de forma semelhante a Govers (1990) e Nearing et al. (1997), para determinação de uma expressão de transporte sólido:

$$\Omega = \rho_w g S q \quad (4.13)$$

sendo Ω = potência do escoamento expressa em kg s^{-3} , ρ_w = densidade da água em kg m^{-3} , g = aceleração da gravidade em m s^{-2} , S = declive em m m^{-1} e q = descarga líquida em $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$.

A primeira equação utilizada para estimar o transporte sólido em sulcos, foi a desenvolvida por Nearing et al. (1997), que obtiveram uma função logística para sulcos pré-formados em laboratório e a campo. A relação foi desenvolvida em dois solos de textura bastante distintas das condições do presente estudo, sendo um com 8,4 % de areia, 76 % de silte e 15,6 % de argila, e o outro solo com 65,5 % de areia, 19,6 % de silte e 14,8% de argila. A equação tem a seguinte forma:

$$\log q_s = -34,47 + 38,61 e^{\left\{ \frac{[0,845 + 0,412 \log(\Omega)]}{1 + e^{[0,845 + 0,412 \log(\Omega)]}} \right\}} \quad (4.14)$$

sendo q_s = descarga sólida em $\text{g s}^{-1} \text{cm}^{-1}$, Ω = potência do escoamento expressa em g s^{-3} , ρ_w = densidade da água em g cm^{-3} , g = aceleração da gravidade em cm s^{-2} , e = base do logaritmo natural, S = declive em m m^{-1} e q = descarga líquida em $\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$.

A segunda equação utilizada para quantificação do transporte sólido foi ajustada com os resultados do presente trabalho e tem forma semelhante à equação de Nearing et al. (1997). Todos os dados de descarga sólida (q_s), em kg s^{-1} , determinados para as vazões aplicadas de 0+5, 10+5, 20+5, 40+5 e 50+5 L min^{-1} , foram relacionados à potência do escoamento na forma da equação 4.13, através de análise de regressão. Os dados ajustaram-se em uma função logística, representadas na equação dada por:

$$\log(q_s) = -2,9678 + \frac{1,15227}{\left(1 + \left(\frac{\Omega}{1,0401}\right)^{-2,4294}\right)} \quad r^2=0,948 \quad (4.15)$$

Na figura 4.9 está apresentada a relação obtida entre o logaritmo da descarga sólida e a potência do escoamento. Cada ponto na curva da figura 4.9 representa 3 repetições para cada vazão aplicada, num total de $n = 360$ pontos.

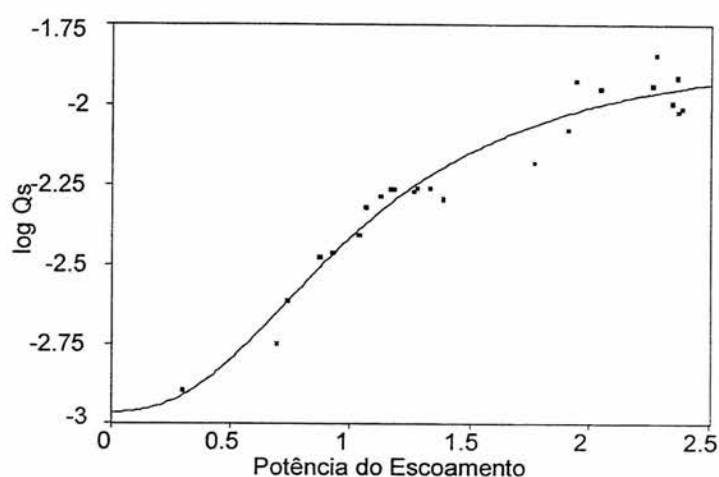


Figura 4.9 – Representação da descarga sólida (kg s^{-1}) estimada pela potência do escoamento ($\Omega = \rho_w g S q$ em kg s^{-3}), para os fluxos extras aplicadas de 0, 10, 20, 40 e 50 L min^{-1} , acrescidos de chuva simulada com 70 mm h^{-1} de intensidade.

Na tabela 4.10 e na figura 4.10, encontra-se quantificado o transporte sólido observado para as correspondentes descargas líquidas, em comparação com o sedimento estimado pelas equações utilizadas, a desenvolvida por Nearing et al. (1997), e a equação 4.15, presentemente ajustada. Ainda, na tabela 4.10, tem-se o erro de estimativa destas duas equações.

Tabela 4.10 – Avaliação do erro de estimativa da descarga sólida em (kg s^{-1}), através das equações utilizadas para os tratamentos considerados, sendo o erro de estimativa = $\left(\left(\frac{obs-calc}{obs}\right) \times 100\right)$.

Q (L s^{-1})	Qs Nearing et al (1997) (Kg s^{-1})	Qs Eq.(4.15) (Kg s^{-1})	Qs Observada (Kg s^{-1})	Erro Nearing et al.(1997) (%)	Erro Eq.(4.15) (%)
0,086	0,000114	0,001819	0,00721	98,41	74,77
0,217	0,000300	0,004533	0,00996	96,98	54,51
0,488	0,000223	0,004581	0,01110	97,99	58,73
0,618	0,000515	0,009892	0,01603	96,78	38,30
0,738	0,000526	0,010395	0,00914	94,24	-13,71

Em se considerando a média e os desvios dos erros de estimativa do transporte sólido, para todas as descargas líquidas observadas, a equação de Nearing et al. (1997) apresentou um erro médio de estimativa de 96,88% (Tabela 4.10). Merten (2000), em um canal de vidro com declive de $0,03 \text{ m m}^{-1}$ sob vazões entre 1 e $2,5 \text{ L s}^{-1}$, e adição de sedimentos na forma de carvão mineral com diâmetro de 1,09 mm, encontrou um erro de estimativa de 48,63%, para o transporte estimado pela equação de Nearing et al. (1997). O maior erro de estimativa da presente determinação para esta equação, pode estar relacionado à maior condição de variação experimental de sulcos pré-formados

em um solo agrícola em condições de campo, como também, às menores lâminas aplicadas nos sulcos.

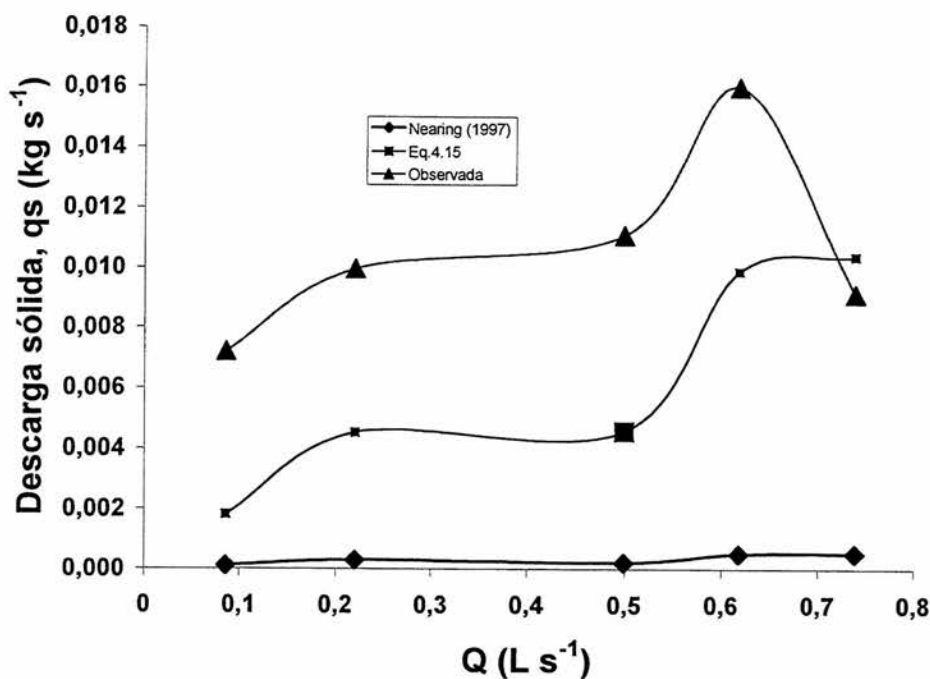


Figura 4.10. - Comportamento da descarga sólida (kg s^{-1}) observada, e estimadas pelas equações (4.15) e a de Nearing et al. (1997), em função das descargas líquidas observadas.

A equação 4.15 ajustada no presente estudo, apresentou um erro médio de estimativa do transporte sólido de 42,52%, o que deve estar ligado ao ajuste da potência do escoamento pelo logaritmo da descarga sólida ($\log q_s$), um tipo de ajuste que diminui a variância experimental dos dados. Quando se extraiu o logaritmo da descarga sólida dos valores obtidos com a expressão 4.15, a variância experimental retornou, dando origem ao erro de estimativa de 42,52%. Este fato foi comprovado pela análise de regressão da potência do escoamento diretamente com a descarga sólida (q_s), também para uma equação logística, produzindo um r^2 de 0,57 que, portanto, não explica 42,97 %

da variação experimental e praticamente se iguala ao erro de estimativa da equação 4.15. O ajuste foi o seguinte:

$$q_s = \frac{0,0103 + 0,07974 n}{(1+n)^2} \quad r^2 = 0,5703 \quad (4.16)$$

onde q_s = descarga sólida em kg s^{-1} , e $n = e^{\left(-(\Omega - 2,068)/0,05808\right)}$ sendo e = base do logaritmo natural e Ω = potência do escoamento na forma da equação 4.13.

Verifica-se na figura 4.10, que a equação 4.15 apresentou uma melhor estimativa de descarga sólida entre as descargas líquidas de 0,618 e 0,738 L s^{-1} , decorrentes da aplicação de fluxos extras de 40 e 50 L min^{-1} , acrescidas da chuva simulada. Tal fato, denota a dificuldade de ajuste de modelos de estimativa do transporte sólido às lâminas de escoamento menos espessas, características das áreas agrícolas.

4.2.4. Erosão em sulcos em condições de solo consolidado

4.2.4.1. Hidráulica do escoamento nos sulcos em solo consolidado

A partir da medição direta variáveis hidráulicas descarga líquida (Q), velocidade média do escoamento (V), da seção transversal dos sulcos consolidados no período de adição do fluxo extra e, ainda, do diâmetro que caracteriza a rugosidade da mistura de sedimentos (d_{65}), foram determinadas as demais variáveis hidráulicas, constantes da tabela 4.11, que caracterizam o escoamento para os sulcos consolidados durante 1 ano.

Tabela - 4.11 Características hidráulicas do escoamento em sulcos com solo consolidado: descarga líquida (Q), velocidade média (V_m), área (A), perímetro molhado (P_m), raio hidráulico (Rh), declive, Número de Reynolds (Re), Número de Froude (Fr), coeficiente de rugosidade de Manning (n), Reynolds da partícula (Re^*), diâmetro da partícula (d_{65}), Velocidade de cisalhamento (U^*) e tensão cisalhante (τ). Valores médios de 3 repetições em 4 momentos durante a aplicação das vazões extras.

Variável Hidráulica	Fluxos extras aplicados ($L \text{ min}^{-1}$) ⁽¹⁾					
	0+5	20+5	40+5	60+5	80+5	100+5
Q ($L \text{ s}^{-1}$)	0,085	0,379	0,721	1,100	1,462	1,660
V_m ($m \text{ s}^{-1}$)	0,153	0,328	0,347	0,447	0,456	0,480
A (m^2)	0,002818	0,002709	0,002541	0,005009	0,006131	0,00675
P_m (m)	0,225	0,27518	0,2574	0,2977	0,3333	0,3536
Rh (m)	0,0125	0,0098	0,0099	0,0168	0,0184	0,0191
Declive ($m \text{ m}^{-1}$)	0,072	0,067	0,068	0,074	0,071	0,075
Re	2389	4014	4281	9409	10.482	11.575
Fr	0,44	1,06	1,12	1,10	1,07	1,11
n	0,094	0,036	0,034	0,039	0,041	0,041
Re^*	53,84	51,40	53,75	64,02	58,44	67,83
d_{50} (m)	$3,44 \times 10^{-4}$	$3,02 \times 10^{-4}$	$3,53 \times 10^{-4}$	$3,27 \times 10^{-4}$	$2,84 \times 10^{-4}$	$3,15 \times 10^{-4}$
d_{65} (m)	$4,58 \times 10^{-4}$	$5,16 \times 10^{-4}$	$5,3 \times 10^{-4}$	$4,63 \times 10^{-4}$	$4,12 \times 10^{-4}$	$4,58 \times 10^{-4}$
U^* ($m \text{ s}^{-1}$)	0,094	0,080	0,081	0,111	0,113	0,119
τ (Pa)	8,79	6,39	6,55	12,17	12,80	13,96

(1) A chuva simulada média de (68 mm/h), concomitantemente aplicada ao fluxo extra nos sulcos, acrescia aproximadamente $5 L \text{ min}^{-1}$ à vazão nos sulcos.

No sulco consolidado sem adição de fluxo extra o escoamento produzido somente pela chuva simulada teve um regime turbulento subcrítico para um Reynolds (Re) de 2394 e número de Froude (Fr) < 1 , diferentemente do sulco pré-formado no solo recém preparado (Tabela 4.7), para a mesma vazão, onde o regime de escoamento foi de transição subcrítico. No solo consolidado, para os fluxos extras de 20+5, 40+5, 60+5, 80+5 e 100+5 $L \text{ min}^{-1}$, os regimes foram turbulentos supercríticos, com Reynolds (Re) variando de 4000 a 11500, e números de Froude (Fr) > 1 , enquanto para o solo recém preparado foram turbulentos subcríticos. Portanto, o processo de consolidação do solo afetou o

regime de escoamento. Esse fato pode ser percebido, principalmente nas vazões de 0+5, 20+5 e 40+5 L min⁻¹, que se repetiram no segundo ano para o solo consolidado, pela diminuição da rugosidade total dos sulcos (n_t), como se pode ver com a comparação dos valores do coeficiente de rugosidade de Manning n da tabela 4.11, com os valores de n da tabela 4.7, para o solo recém preparado. A redução da rugosidade total dos sulcos (n_t) deve estar relacionada com a redução da rugosidade de forma (n''), pois, na figura 4.11, percebe-se nos sulcos recém preparados a presença de grandes agregados secos ao longo dos sulcos. Por outro lado, também pode-se perceber na Figura 4.11 que, nos sulcos pré-formados e consolidados por 12 meses, a superfície dos sulcos tornou-se mais uniforme e menos rugosa, pela ação dos ciclos de umedecimento e secagem, que conferiram uma maior coesão ao solo. Além disso, houve remoção das partículas soltas e mais disponíveis ao movimento da superfície dos sulcos, promovida pela ação das lâminas de escoamento originadas pelas sucessivas chuvas naturais no decorrer do período de consolidação. Nesse período também observou-se visualmente a formação de uma crosta superficial lisa. A diminuição da rugosidade nos sulcos consolidados, pode ser observada na figura 4.12, que relaciona a velocidade do escoamento e o coeficiente de rugosidade de Manning, para os fluxos extras que foram aplicados tanto nos sulcos com solo recém preparado, quanto nos sulcos com solo consolidado. Observa-se a redução da rugosidade e o aumento da velocidade do escoamento para os mesmos fluxos extras aplicados. Essa redução da rugosidade foi, portanto, decorrente do processo de consolidação do solo, que lhe conferiu maior coesão, como também da deformação progressiva do contorno sólido, ocasionada pela ação do

escoamento das sucessivas chuvas naturais durante os 12 meses de consolidação.

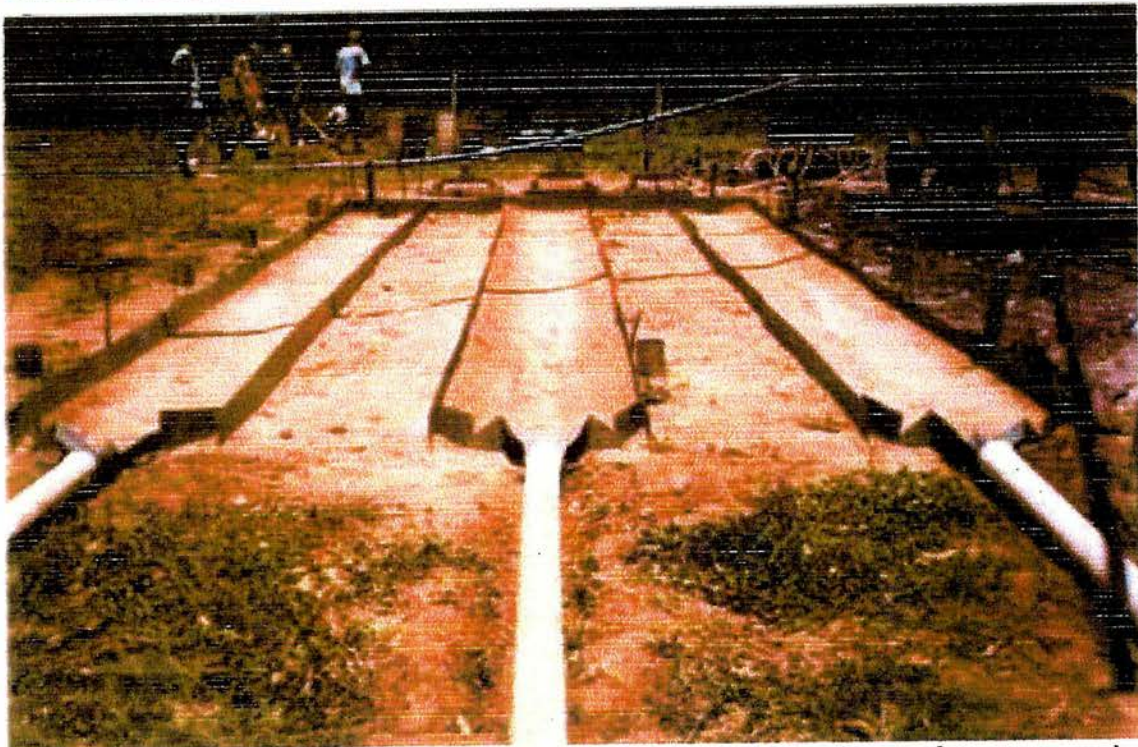
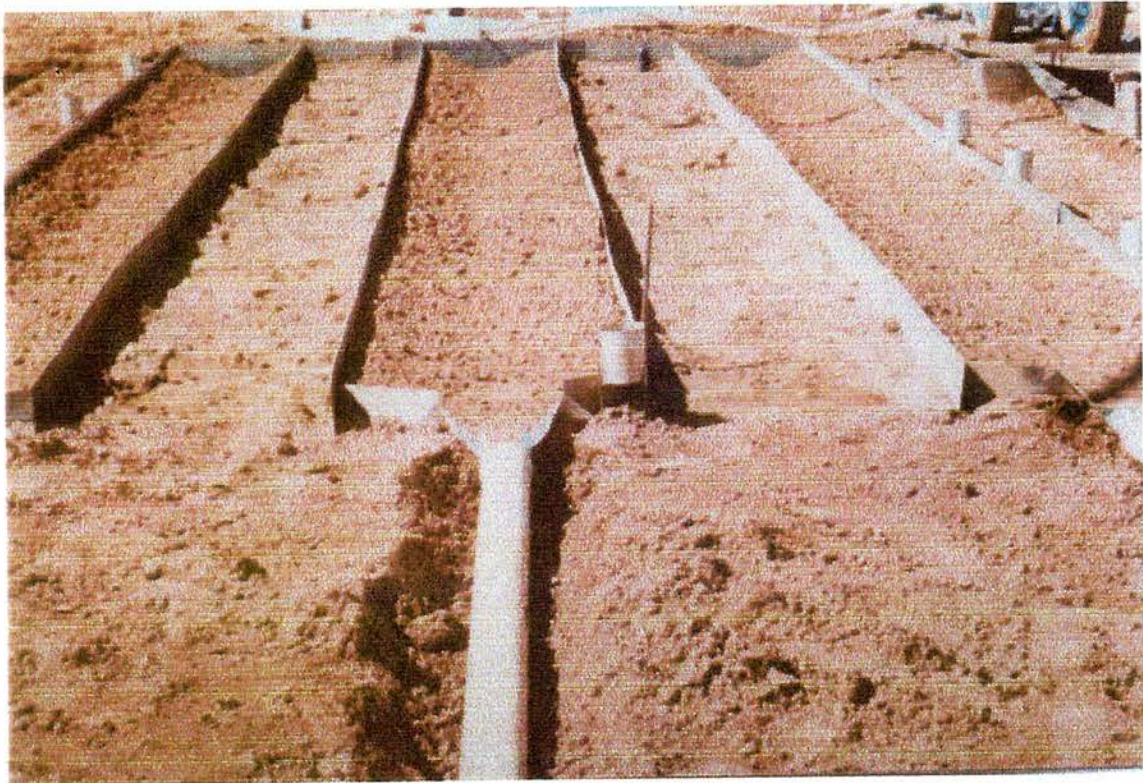


Figura 4.11 – Aspecto dos sulcos pré-formados em solo recém preparado (parte superior da figura) e dos sulcos em solo consolidado (parte inferior da figura), antes dos testes.

Ainda, a partir da tabela 4.11, percebe-se para todos os escoamentos produzidos pelos fluxos extras aplicados, que os Reynolds de partícula determinados foram $5 < Re^* < 70$, o que, conforme Simons & Senturk (1992), caracteriza como sendo de transição a rugosidade hidráulica da superfície dos sulcos em solo consolidado.

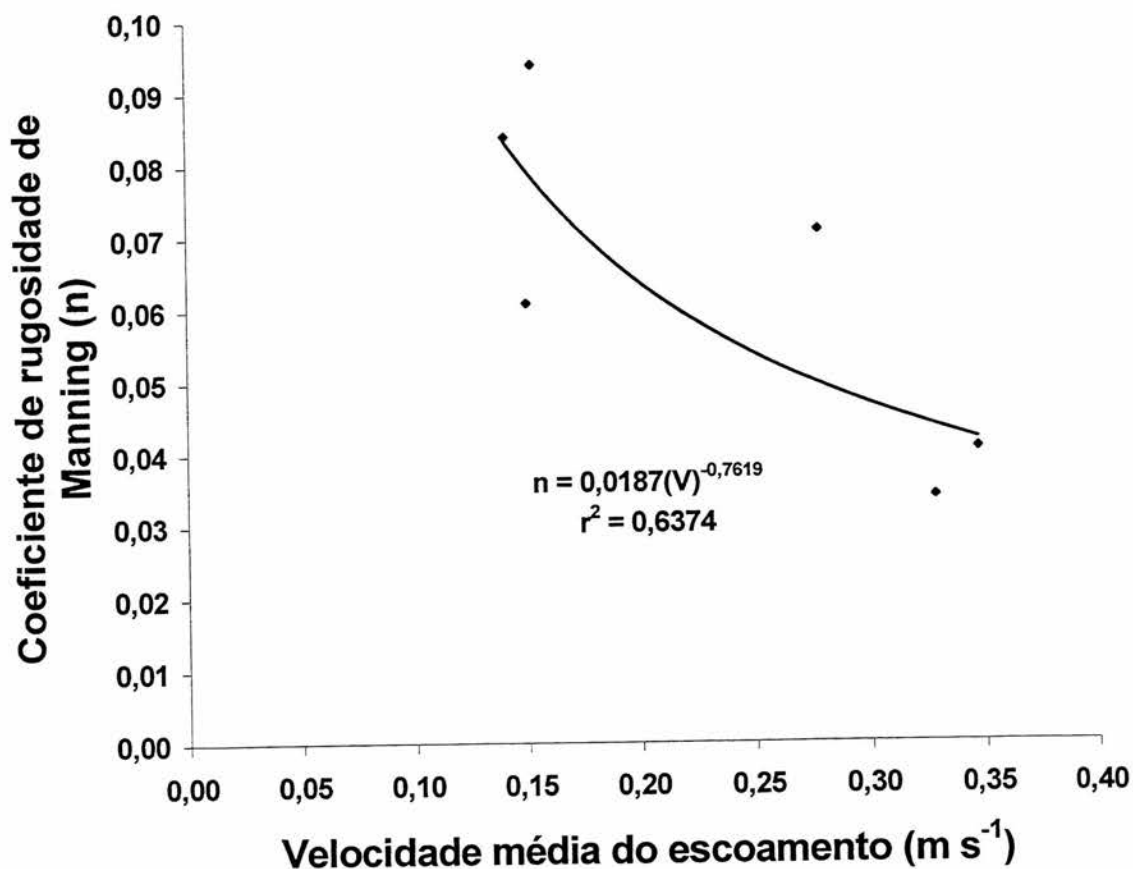


Figura 4.12. Coeficiente de rugosidade de Manning (n) e velocidade média do escoamento, para as vazões aplicadas de 0+5, 20+5 e 40+5 $L min^{-1}$ nos sulcos com solo recém preparado e nos sulcos com solo consolidado durante 1 ano.

4.2.4.2. Caracterização do estado de consolidação e sua relação com a erodibilidade do solo

Encontram-se caracterizadas, na tabela 4.12, as alterações dos atributos físicos do solo acompanhados durante os 17 meses de avaliação do estado de consolidação do solo. A área foi inicialmente preparada e os sulcos pré-formados em dezembro de 1998 sendo mantidos em processo de consolidação natural até maio de 2000, período no qual a evolução de alguns atributos físicos foi acompanhado por meio da realização de quatro amostragens de solo. Só foi possível coletar amostras indeformadas para caracterização da consolidação a partir do quinto mês, por consequência da textura do solo bastante arenosa. A partir dos dados constantes das tabela 4.12 e 4.13, que contêm os atributos físicos do solo e o conteúdo de umidade das amostras, foram determinados e relacionados os graus de saturação do solo com as respectivas tensões aplicadas (ψ), dando origem às curvas de desorção e sorção de umidade do solo, representadas na figura 4.13. Na primeira e terceira amostragens, não foi possível estabelecer-se as curvas de sorção de umidade do solo, por não se ter conseguido a completa saturação das amostras correspondentes no laboratório.

Tabela 4.12. Atributos físicos do solo durante os 17 meses de consolidação dos sulcos pré-formados.

Atributo Físico	Amostragem			
	1 ^a (5 ^o mês)	2 ^a (10 ^o mês)	3 ^a (13 ^o mês)	4 ^a (17 ^o mês)
Densidade de partícula (kg m^{-3})	2.600	2.600	2.600	2.600
Densidade do solo (kg m^{-3})	1,25	1,42	1,34	1,43
Porosidade total ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$)	0,52	0,45	0,48	0,44
Índice de vazios	1,07	0,82	0,93	0,81

Tabela 4.13. Conteúdo de água (kg kg^{-1}) a cada sucção aplicada nas 4 amostragens realizadas para caracterização do estado consolidação dos sulcos pré-formados.

Amostragem	Sucções aplicadas (kPa)				
	0	4	10	24	64
	----- kg kg^{-1} -----				
1 ^a	0,407	0,256	0,117	0,077	0,027
2 ^a	0,271	0,182	0,143	0,123	0,082
3 ^a	0,357	0,208	0,167	0,134	0,144
4 ^a	0,304	0,203	0,159	0,133	0,106

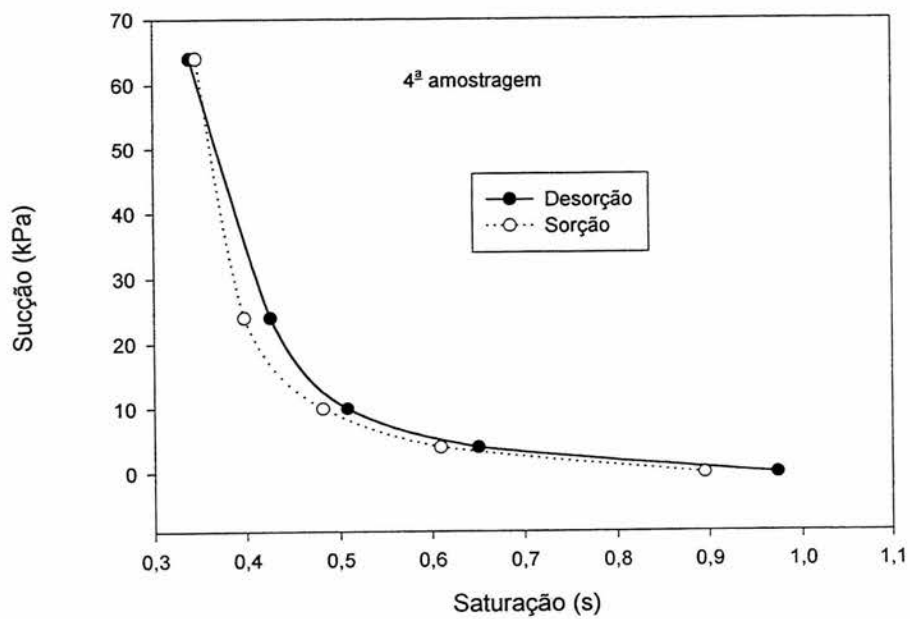
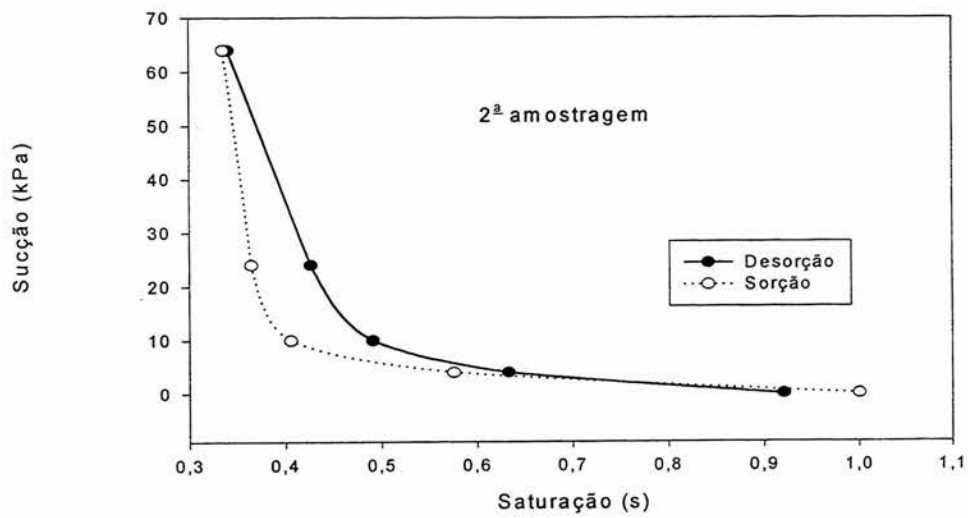


Figura 4.13. Curvas de sorção e desorção de umidade do solo nos 10^o e 17^o meses de consolidação dos sulcos pré-formados.

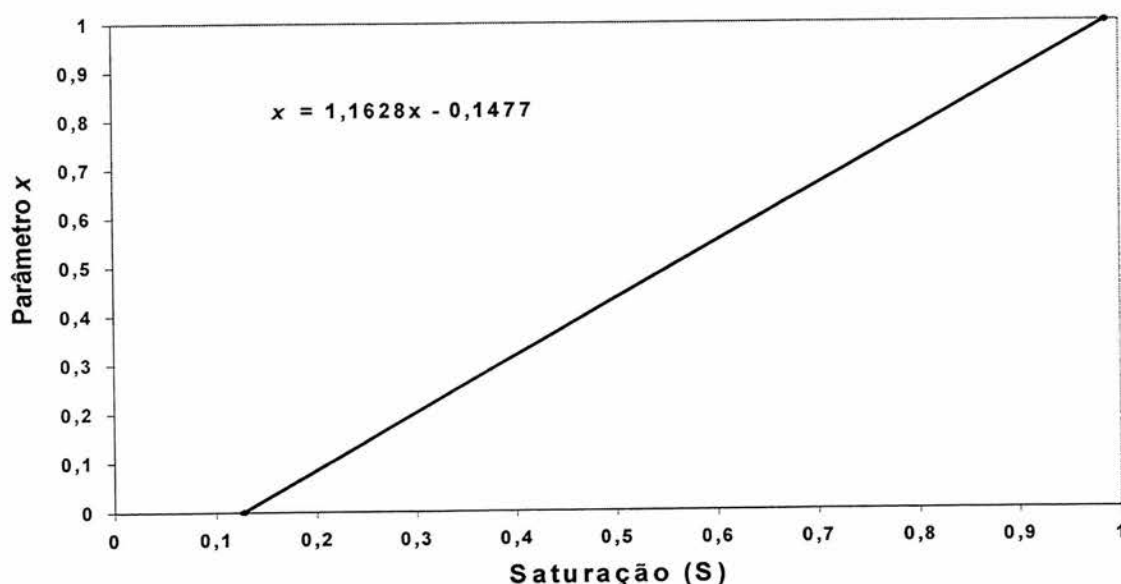


Figura 4.14 – Parâmetro χ em função do valor de saturação do solo para os sulcos pré-formados e consolidados por 5 meses.

A caracterização física da consolidação do solo foi acompanhada pelas tensões efetivas (σ') que se desenvolveram, e obtidas pela equação (2.43):

$\sigma' = [-\chi\psi]$. O parâmetro χ foi determinado para cada uma das curvas de desorção de umidade do solo obtidas, através de uma reta com valor máximo próximo de 1 para o solo saturado, e valor mínimo determinado para o teor de saturação com solo seco em estufa a 105 °C por 24 horas.

Os valores de saturação do solo foram obtidos pela equação 3.20 ($S = D_e \cdot U/e$) e os conteúdos de umidade pela equação 3.21 ($U_g = m_a/m_{ss}$). A determinação do parâmetro χ para a segunda amostragem encontra-se representada na figura 4.14. Pode-se observar que quando a saturação diminui pela aplicação das maiores sucções, ocorre diminuição dos valores de χ , o que também foi observado por Nearing et al. (1988) e Fredlund & Rahargjo (1993).

Os valores das tensões efetivas (σ') assim obtidos nas quatro ocasiões, expressos em função da saturação na figura 4.15, demonstram sua maior

expressão na condição de solo não saturado, mas não seco, comprovando sua dependência dos potenciais matriciais que ocorrem nas condições intermediárias de umidade do solo, entre dois períodos consecutivos de chuva. Observa-se, ainda, que do quinto ao décimo mês houve uma elevação dos valores de tensão efetiva, indicando um aumento no estado de consolidação do solo. Em seguida, houve uma redução do décimo ao décimo terceiro mês, e de novo sua elevação até o décimo sétimo mês aos níveis do 10^o, demonstrando a estabilização do processo de consolidação. O estado de consolidação do solo, também pode ser percebido através do aumento da densidade do solo (D_s) e da diminuição da porosidade total e do índice de vazios do solo, indicados na tabela 4.12. A análise de variância não encontrou diferenças significativas dos valores determinados de tensão efetiva (σ'), o que confirma a estabilização do processo de consolidação. Também se infere, a partir das determinações das tensões efetivas do solo, que a mesma pode auxiliar na indicação da qualidade do solo, pela possibilidade de avaliação das alterações físicas de um solo agrícola ao longo do tempo.

Aos valores de tensão efetiva do solo consolidado, que deram origem à figura 4.15 e encontrados na tabela 4.14, que, portanto, representam a resistência do solo, foi aplicada a teoria desenvolvida por Mirtskhoulava (1966), sobre a resistência de solos à erosão hídrica, para caracterização da evolução da erodibilidade do solo durante o processo de consolidação. Dessa forma, para determinação dos valores de resistência do solo, correspondente à tensão de falha pela ação dos eventos turbulentos do escoamento, na ordem de grandeza de Pascais (Pa), foi aplicada a equação (2.48) ($C_f = 0,035.C(1 - \frac{\alpha\sigma}{C})$).

Esses valores, para cada uma das ocasiões em que foi avaliado o estado de consolidação do solo, constam da tabela 4.15.

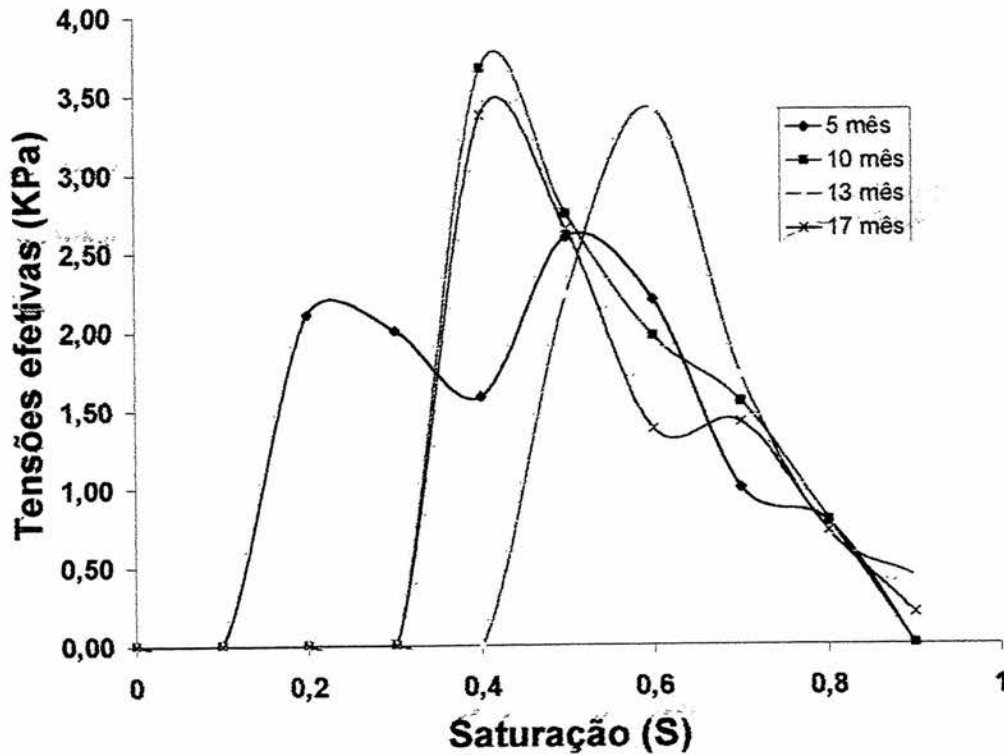


Figura 4.15 – Tensões efetivas do solo (σ') durante os dezessete meses de consolidação.

Tabela 4.14. Tensões efetivas (σ') do solo em (kPa), desenvolvidas durante os 17 meses do processo de consolidação dos sulcos pré-formados.

Sucções aplicadas	Mês de amostragem			
	5 ^o	10 ^o	13 ^o	17 ^o
----- (kPa) -----				
0	0,000	0,000	0,000	0,000
4	2,238	1,966	1,504	1,953
10	1,783	2,539	2,152	2,607
24	1,701	3,565	1,995	3,292
64	0,000	0,000	0,000	0,000

Tabela 4.15. Tensões efetivas, parâmetros estatísticos e coesão de falha do solo nos sulcos consolidados.

(5° mês)	(10° mês)	(13° mês)	(17° mês)	
----- kPa -----				
2,238	1,966	1,504	1,953	
1,783	2,539	2,152	2,607	
1,701	3,565	1,995	3,292	
0,080	0,656	0,114	0,448	Variância
0,289	0,810	0,338	0,669	Desvio Padrão
1,907	2,690	1,883	2,617	Média
15,1	30,1	17,9	25,5	Coeficiente de variação (%)
36,38	9,08	30,43	21,30	Coesão de falha (Pa)

A seguir é exemplificado como se determinou a coesão de falha (C_f) através da equação 2.48 para terceira amostragem. Os valores de tensão efetiva da tabela 4.15 (1,504, 2,152 e 1,995 kPa) resultaram em uma coesão média (C) de 1,883 kPa e um desvio padrão (σ) de 0,338. O coeficiente (α), que caracteriza a probabilidade de mínima resistência do solo à erosão hídrica, segundo Mirskhoulava (1966), é igual a 3. Substituindo-se esses valores na equação 2.48, tem-se, então que: $C_f = 0,035 \times 1,883 (1 - (3 \cdot 0,338 / 1,883)) = 0,03043 \text{ kPa} = 30,43 \text{ Pa}$.

Os valores de coesão apresentados pelo solo consolidado, portanto, são tomados como expressão da resistência do solo à erosão, variando entre 9,08 Pa obtido na segunda amostragem e 36,38 Pa obtido na primeira amostragem. Esses valores parecem elevados e em desacordo com os mais baixos valores de tensões efetivas encontrados no quinto mês. Entretanto, como indicou a

análise da variância, os valores de tensão efetiva não diferiram entre o quinto e o décimo sétimo mês. Os valores de tensão de falha do solo representam a resistência do solo consolidado a ação cisalhante do escoamento, abaixo da qual o solo não sofreria os efeitos cisalhantes do escoamento. A coesão de falha entre 9 e 36 Pa (Tabela 4.15), representa, então, a faixa de tensão cisalhante do escoamento que este solo suportaria sem sofrer erosão em sulcos. A variação da faixa de valores da tensão de falha, pode estar conjuntamente relacionada à dois fatores: o reduzido número de amostragens e a variabilidade intrínseca dos fenômenos naturais. Esses resultados, obtidos no presente trabalho, necessitam ser investigados em um número maior de experimentos, para confirmação, ou não, das tendências observadas.

4.2.4.3 Taxas de desagregação do solo nos sulcos consolidados

As taxas médias de desagregação do solo nos sulcos consolidados, constantes da tabela 4.16, e os valores médios da tensão cisalhante do escoamento nestes sulcos (tabela 4.11) se correlacionam com um baixo r^2 , de 0,38. Isso ocorreu pelo fato de que as tensões efetivas desenvolvidas durante o período de consolidação aumentaram a coesão do solo, que, mesmo sob consideráveis tensões de cisalhamento, não se desagregou de forma significativa com as tensões aplicadas. Resultados semelhantes em solo consolidado foram obtidos por Brown & Norton (1994), até mesmo com valores de erodibilidade do solo e tensão crítica de cisalhamento negativos. Schafer et. al. (2001), reportam que também obtiveram baixos valores de r^2 entre as tensões cisalhantes e as taxas de desagregação em sulcos consolidados, que

produzem valores inconsistentes de tensões críticas de cisalhamento (τ_c) e de erodibilidade do solo (K_r).

Tabela 4.16. Taxas de desagregação em sulcos D_r ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$) e diferenças (%), observadas nos sulcos para o solo recém preparado (1º ano), e para o solo consolidado (2º ano).

Fluxos extras aplicados (L min^{-1})	Taxas de desagregação D_r ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$) ⁽¹⁾		Diferença (%)
	(1º ano)	(2º ano)	$\left(\left(\frac{\text{obs2ano} - \text{obs1ano}}{\text{obs2ano}} \right) \times 100 \right)$
0+5	0,0066 a	0,0008 b	-725
20+5	0,0165 a	0,0009 b	-1733
40+5	0,0261 a	0,0013 b	-1907

(1) Médias seguidas de letra diferentes na mesma linha, diferem pelo teste de Duncan a 5%.

Na tabela 4.16 tem-se uma comparação dos valores observados das taxas médias de desagregação do solo observadas nos sulcos sob solo consolidado, com as mesmas obtidas nos sulcos sob solo recém preparado, para os valores de fluxos extras que se repetiram nos dois experimentos. Observa-se que o processo de consolidação promoveu uma redução dos valores de desagregação de solo de 725% para o escoamento originado da chuva simulada, e de quase 2000% para as vazões extras aplicadas de 20+5 e 40+5 (L min^{-1}).

4.3. Síntese comparativa dos resultados da erosão em entressulcos e em sulcos

Na figura 4.16, observa-se o comportamento da altura do escoamento registrada nos experimentos de erosão em entressulcos e em sulcos sob solo recém preparado e sob solo consolidado.

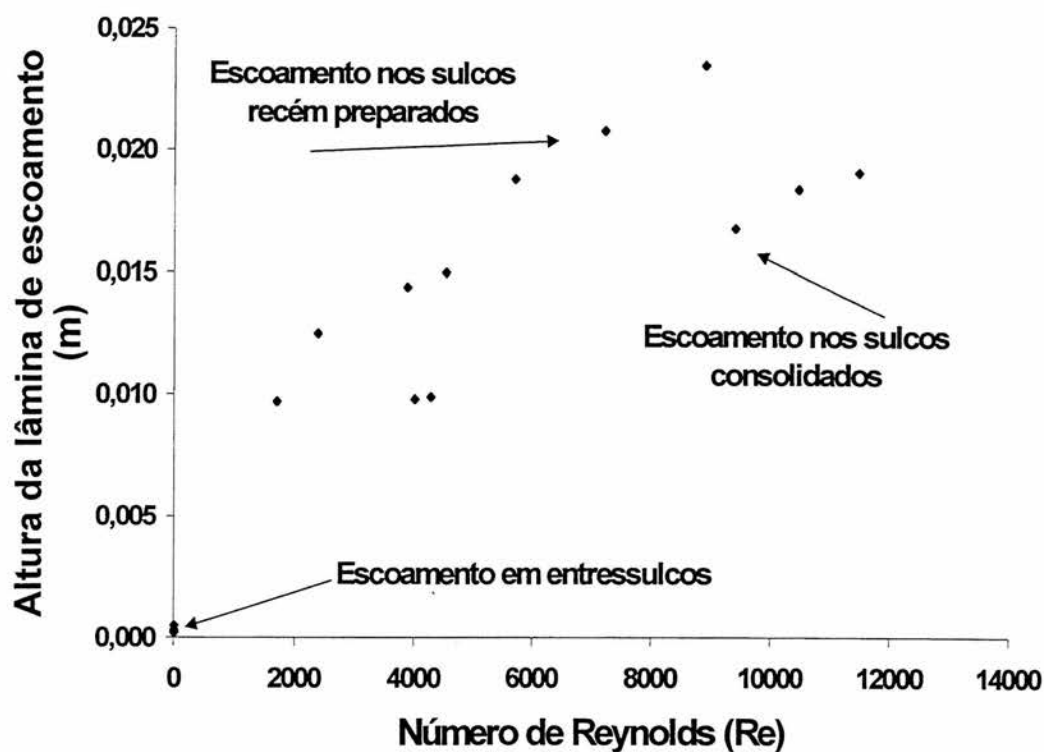


Figura 4.16. Comportamento da altura do escoamento em relação ao número de Reynolds obtido na erosão em entressulcos e em sulcos sob diferentes condições de superfície do solo.

Pode-se observar, na Figura 4.16, três regiões distintas. A primeira define o escoamento em entressulcos, que se caracterizou por lâminas de

escoamento muito rasas, da ordem de 10^{-4} m e baixíssimos número de Reynolds, entre 10 e 15, portanto em regime laminar. Essas lâminas tiveram uma baixa capacidade de desagregação de solo, com taxas na ordem de 10^{-4} kg m⁻² s⁻¹, quando comparadas com as taxas de desagregação obtidas na erosão em sulcos da ordem de 10^{-2} e de 10^{-3} kg m⁻² s⁻¹, respectivamente, em solo recém preparado e em solo consolidado (Figura 4.17). As outras duas regiões se referem ao escoamento concentrado nos sulcos pré-formados em solo recém preparado e em solo consolidado. Os sulcos em solo recém preparado apresentaram números de Reynolds entre 1700 e 9000, portanto com regimes de escoamento de transição a turbulentos, enquanto que, nos sulcos sob solo consolidado, sempre foi turbulento, com Reynolds entre 2300 e 11000.

A figura 4.17, que relaciona as taxas de desagregação do solo obtidas com o escoamento na erosão em entressulcos e na erosão em sulcos, também apresenta três regiões distintas. O solo revolvido apresentou uma menor resistência às tensões de cisalhamento (τ) do escoamento, que, dessa forma, permitiu ao escoamento atingir maiores alturas e, conseqüentemente, desagregar mais solo. O escoamento nos sulcos consolidados atingiu menores alturas, porque as superfícies consolidadas pouco se deformaram em função de sua maior resistência observada, o que, conseqüentemente, diminuiu as taxas de desagregação de solo nessas condições.

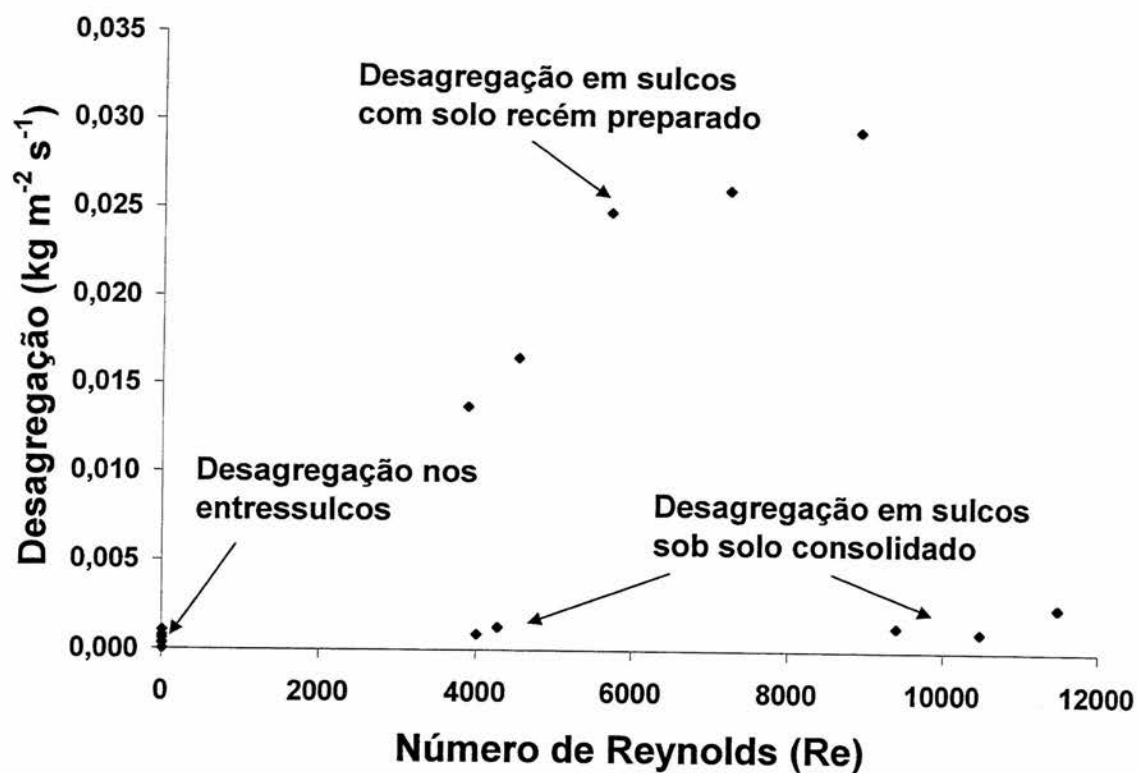


Figura 4.17. Taxas de desagregação do solo obtidas na erosão em entressulcos com solo descoberto, e na erosão em sulcos com solo recém preparado e consolidado.

5. CONCLUSÕES

A partir dos resultados dos experimentos de erosão em entressulcos e em sulcos, pode-se concluir que:

- Na condição da lâmina de escoamento em entressulcos, gerada a partir da chuva simulada, sobre um solo descoberto com 4,5% de declive, nenhuma das equações de capacidade de transporte de sedimentos testadas, estimou o transporte sólido de maneira adequada.
- As equações de transporte de sedimentos, baseadas na tensão cisalhante do escoamento, melhor se adequaram à estimativa do transporte sólido ocorrido na erosão em entressulcos para os declives de 9 e 18%, do que as equações baseadas na potência do escoamento, refutando a hipótese apresentada.
- A adição em doses crescentes de resíduos vegetais na superfície do solo, provocou um aumento na rugosidade hidráulica, com conseqüente diminuição das taxas de desagregação do solo, validando a hipótese apresentada.
- Em condições de solo sob baixas tensões matriciais, o escoamento em entressulcos produziu menores taxas de desagregação de solo, do que em

condições de drenagem livre. As baixas tensões, muito possivelmente, desenvolveram tensões efetivas que mantiveram os agregados e partículas de solo mais firmemente interligadas.

- Na média dos resultados dos experimentos de laboratório e a campo, determinou-se um valor básico do fator de erodibilidade em entressulcos (K_i) de $2,55 \times 10^6 \text{ kg s m}^{-4}$ e, com base nos resultados do experimento de campo com sulcos em solo recém preparado, determinou-se um valor básico de erodibilidade em sulcos (K_r) de $0,0024 \text{ kg N}^{-1} \text{ s}^{-1}$ e uma tensão crítica de cisalhamento (τ_c) de $2,75 \text{ Pa}$ para o Argissolo Vermelho distrófico típico estudado.
- Os regimes de escoamento do fluxo em sulcos, que com solo recém preparado foram turbulentos subcríticos, passaram a turbulentos supercríticos no solo consolidado, para os fluxos extras aplicados que se repetiram, pela redução da rugosidade do solo ocorrida durante o processo de consolidação.
- O valor de coesão de falha (C_f) determinado para o solo consolidado ficou entre 9 e 36 Pa , valor este que pode ser considerado como sendo o da tensão crítica de cisalhamento que este solo consolidado suportaria sem sofrer erosão.
- A redução da rugosidade do solo promovida durante o processo de consolidação do solo, retratada na diminuição dos valores do coeficiente de rugosidade de Manning, foi promovida pela remoção superficial das partículas de solo mais disponíveis ao movimento, pela ação do escoamento das sucessivas chuvas naturais, fatores que contribuíram para a formação de uma crosta superficial menos rugosa.

- O processo de consolidação do solo num período de 12 meses promoveu reduções entre 700 e 1900% das taxas de desagregação em sulcos (D_r) que ocorreram em sulcos com solo recém preparado.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABRAHMS, A. D. ; LI, G. Effect of saltating sediment on flow resistance and bed roughness in overland flow. **Earth Surface and Landforms**, New York, v. 23, p. 953-960, 1998.
- ABRAHMS, A. D. ; PARSONS, A. J. ; LUK, S. H. Resistance to overland flow on desert hillslopes. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 88, n3/4, p. 343-363, 1986.
- ALBUQUERQUE, J. A. ; CASSOL, E. A. Estimativa da erodibilidade em entressulcos de solos do Rio Grande do Sul. IN: REUNIÃO SUL-BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO, 2., 1998, Santa Maria, RS. **Anais e Resumos Expandidos**. Santa Maria : SBCS-NRS, 1998. p.271.
- AL-DURRAH, M. M. ; BRADFORD, J. M. New methods of studying soil detachment due to waterdrop impact. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 45, p. 949-953, 1981.
- AL-DURRAH, M. M. ; BRADFORD, J. M. The mechanism of raindrop splash on soil surfaces. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 45, p. 1086-1090, 1982.
- BEASLEY, L. ; HUGGINS, L. F.; MONKE, E. J. ANSWERS. A model for Watershed planning. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, p. 938-944, 1980.
- BRAIDA, J. A. ; CASSOL, E. A. Erodibilidade em sulcos e em entressulcos de um Podzólico Vermelho-Escuro franco arenoso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 20, n 1, p. 127-134, 1996.
- BRAIDA, J. A. ; CASSOL, E. A. Relações de erosão em entressulcos com o tipo e a quantidade de resíduo vegetal na superfície do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, p. 711-721, 1999.
- BROW, L. C.; NORTON, L. D. surface residue effects on soil erosion from ridges of different soils and formation. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, n. 33, p. 1515-1524. 1994.

- BRYAN, R. B. Processes and significance of rill development. **Catena Verlag**, Cremlingen-Destedt, supp. n. 8, p. 1-15, 1987.
- BRUNORI, F. ; PENZO, M. C. ; TORRI, D. F. Soil shear strength: its measurement and soil detachability. **Catena Verlag**, Cremlingen-Destedt, v. 16, p. 59-71, 1989.
- CASSOL, E. A . **Sediment transport and deposition of various textured soils in shallow flow**. West Lafayette : Purdue University, 1988. Tese (Ph.D.) - Purdue University, West Lafayette, 1988. 298 p.
- CASSOL, E. A.; GUERRA, M. Calibração do primeiro aparelho simulador de chuvas de braços rotativos do Estado do Rio Grande do Sul. IN: ENCONTRO NACIONAL SOBRE PESQUISA DE CONSERVAÇÃO DO SOLO, 2., 1978, Passo Fundo. **Anais...** Passo Fundo : EMBRAPA-CNPT : EMBRAPA-SNLCS, 1978. p. 29-39.
- CASSOL, E. A. ; LEVIEN, R. ; LIER, Q. J. V. ; BADELUCCI, M. P. Infiltração de água e perdas de água e solo por erosão influenciadas por diferentes métodos de melhoramento da pastagem nativa gaúcha. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, n. 4, 1999.
- CASTRO, L. G. **Erosão hídrica relacionada à rugosidade superficial do solo na ausência e na presença de cobertura por resíduos de aveia**. Porto Alegre, 1998. 120 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Programa de Pós Graduação em Agronomia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto alegre, 1998.
- CAUDURO, F. A. ; DORFMANN, R. **Manual de ensaios de laboratório e campo para irrigação e drenagem**. Brasília: PRONI/MA, 1988. 216 p. Cap. 11: Retenção de água pelo solo.
- COGO, N. P. **Effect of residue cover, tillage induced roughness, and slope length on erosion and related parameters**. West Lafayette : Purdue University, 1981. 346 f. Tese (Doutorado) – Purdue University, West Lafayette, 1981.
- CHIEN, N. A comparison of the bed load formulas. **Shuli Xuebao (Journal of Hydraulics Engineering)**, [Taiwan], n. 11, 1980.
- CHOW, V. T. **Open-channel hydraulics**. New York, McGraw-Hill. 1959. 680p.
- CRUSE, R. M. ; LARSON, W. E. Effect of soil shear strength on soil detachment due to raindrop impact. **Soil Science Society America Journal**, Madison, v. 41, p. 777-781, 1977.
- EINSTEIN, H. A. **The bed-load function for sediment transportation in open channel flows**. Washington : USDA, 1950. 65p. (Technical Bulletin, 1026).

- ELLIOT, W. J.; LIEBOW, A. M.; LAFLEN, J. M. ; KOHL, K. D. **A compendium of soil erodibility data from WEPP cropland soil field erodibility experiments 1987 & 88.** West Lafayette : The Ohio State University : USDA-ARS , 1989. (NSERL – National Soil Erosion Research Laboratory Report, 3)
- ELLIOT, W. J. ; LAFLEN, J. M. A process-based rill erosion model. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 36, p. 65-72, 1993.
- EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solos.** Rio de Janeiro : Ministério da Agricultura, 1979. n. p.
- EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos.** Brasília: EMBRAPA, 1999. 412 p.
- EVERAERT, W. Empirical relations for the sediment transport capacity of interrill flow. **Earth Surface and Landforms**, New York, v. 16, p. 513-532, 1991.
- FARENHORST, A. ; BRYAN, R. B. Particle size distribution of sediment transported by shallow flow. **Catena Verlag**, Cremlingen-Destedt, v. 25, p. 47-62, 1995.
- FINKER, S. C. ; NEARING, M. A. ; FOSTER, G. R. ; GILLEY, J. E. A simplified equation for modeling sediment transport capacity. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 32, p. 1545-1550, 1989.
- FLANAGAN, D. C. ; NEARING, M. A. **United States Department of Agriculture-USDA: Water Erosion Prediction Project.** West Lafayette : National Soil Erosion Research Laboratory – NSERL, 1995. (Technical documentation, 10)
- FOSTER, G. R. Modeling the erosion process. In: HAAN, C. T. ; JOHNSON, H. P. ; BRAKENSIEK, D. L. **Hydrologic modeling of small watersheds.** St. Joseph : ASAE, 1982. p. 297-380. (ASAE Monograph, 5).
- FOSTER, G. R. ; MEYER, L. D. A closed-form soil erosion equation for upland areas. In: SHEN, H. W. (Ed.). **Sedimentation: Symposium to honor Professor H. A. Einstein.** Fort Collins, Colorado : [s.n.], 1972. [p. 12.1 – 12.9]
- FOSTER, G. R.; MEYER, L. D. Mathematical simulation of upland erosion by fundamental erosion mechanics. In: PRESENT and prospective technology for predicting sediment yields sources. [S.I.] : USDA-ARS, 1975. p.190-196. (ARS -S-40)
- FOSTER, G. R. ; LANE, L. J.; NOWLIN, J. D. ; LAFLEN, J. M. ; YOUNG, R. A. Estimating erosion and sediment yield on field-sized areas. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, 1981, p. 1253-1262.

- FOSTER, G. R.; HUGGINS, L. F.; MEYER, L. D. A laboratory study of rill hydraulics: II. Shear stress relations. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 27(3), p. 797-804, 1984.
- FREDLUND, D. G.; RAHARGJO, H. **Soil Mechanics for Unsaturated Soils**. [New York] : John Wiley & Sons, 1993. 517 p.
- FULLEN, M. A. ; REED, A. H. Rill erosion on arable loamy sands in the West Midlands of England. **Catena Verlag**, Cremlingen-Destedt, suppl. n. 8, p. 85-96, 1987.
- GABBARD, D. S. ; HUANG, C. ; NORTON, L. D. ; STEINHARDT, G. C. Landscape position, surface hydraulic gradients and erosion processes. **Earth Surface Processes and Landforms**, New York, v. 23, p. 83 – 93, 1998.
- GERITS, J. J. P.; LIMA, J. L. P. D; BROEK, T. M. W. V. D. Overland flow and erosion. In: ANDERSON, M. G.; BURT, T. P. **Process studies in hillslope hydrology**. Chichester : John Wiley & Sons, 1990. p. 173-214.
- GHADIRI, H. ; PAYNE, D. A study of soil splash using cine-photography. In: DE BOODT, L. M. ; GRABRIELS, D. **Assessment of erosion**. Chichester : John Wiley and Sons, 1980. p. 185-192
- GHADIRI, H. ; ROSE, C. W. Sorbed chemical transport in overland flow: II. Enrichment ratio variation with erosion processes. **Journal of Environment Quality**, Madison, v. 20, p. 634-641, 1991.
- GIASSON, E. **Relações da erosão em sulcos com vazões e doses de resíduos vegetais incorporados no solo**. Porto Alegre, 1992. 108f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1992.
- GIASSON, E. ; CASSOL, E. A. Relações de erosão em sulcos com vazões aplicadas e doses de resíduos de trigo incorporados a um Plintossolo franco-argilo arenoso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.20, p.117-125, 1996.
- GILLEY, J. E. ; KOTTWITZ, E. R. ; SIMANTON, J. R. Hydraulics characteristics of rills. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 33, p. 1900-1906, 1990.
- GILLEY, J. E. ; KOTTWITZ, E. R. Darcy – Weisbach roughness coefficients for surfaces with residue and gravel cover. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 38, p. 539-544, 1995.
- GILLEY, J. E. ; WOOLHISER, D. A.; McWHORTER, D. B. Interrill soil erosion – Part I: development of model equations. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 28, p. 147-153; 159, 1985.

- GOVERS, G. Empirical relationships for the transport capacity of overland flow. In: JERUSALEM WORKSHOP, 1987, Jerusalem. **Proceedings...** [Jerusalem : IAHS], 1990. p.45-63. (IAHS publ. 189)
- GOVERS, G. Evaluation of the transporting capacity formulae for overland flow. In: PARSONS, A. J.; ABRAHAMS, A. D. (Ed.) **Overland flow: hydraulics and erosion mechanics**. London : UCL, 1992. p. 243-273.
- GOVERS, G. **Soil erosion process research: a state of the art**. Brussel : Paleis der Academien, 1996. 53 p. (Klasse der Wetenschappen, Jaargang 58, n.1)
- GUY, B. T. ; DICKINSON, W. T. ; RUDRA, R. P. ; WALL, G. J. Hydraulics of sediment-laden sheetflow and the influence of simulated rainfall. **Earth Surface and Landforms**, New York, v. 15, p.101 – 118, 1990.
- HORTON, R. E. Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology. **Bulletin of the Geological Society of America**, Lawrence, KS, v. 56, p. 275-370, 1945.
- HUDSON, N. **Soil conservation**. 3.ed. Ames : Iowa State University Press, 1995. 391 p.
- HUANG, C. Sediment regimes under different slope and surface hydrologic conditions. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.62, p. 423-430, 1998.
- JULIEN, P. Y. **Erosion and Sedimentation**. Melbourne : Cambridge Univ. Press, 1995. 280 p.
- KATZ, D. M. ; WATTS, F. J. ; BURROUGHS, E. R. Effects of surface roughness and rainfall impact on overland flow. **Journal of the Hydraulics Division, ASCE**, New York, v. 121, p. 547-553, 1995.
- KING, K. W. ; NORTON, L. D. Methods of rill flow velocity dynamics. In: INTERNATIONAL WINTER MEETING OF THE AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS, 1992, Nashville. **[Papers]**. St. Joseph : American Society of Agricultural Engineers, 1992. 17p. Paper n. 92-2542.
- KINNELL, P. I. A. The effects of flow on sediment transport induced by raindrops impacting shallow flows. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 34, p. 161-168, 1991.
- KINNELL, P. I. A. ; CUMMINGS, D. Soil/slope gradient interactions in erosion by rain-impacted flow. Trans. of the ASAE, St. Joseph, V. 36, p. 381-387, 1993.
- KLUTE, A. (ED.). **Methods of soil analysis**. 2. ed. Madison : American Soil Association : Soil Conservation Society of America, 1996. Part 1

- LAFLEN, J. M. ; THOMAS, A. W. Cropland experiments for the WEPP project. In: INTERNATIONAL WINTER MEETING OF THE AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS, 1987, Illinois. **[Papers]**. St. Joseph : American Society of Agricultural Engineers, 1987. 14p. Paper n. 87-2544.
- LAFLEN, J. M. ; FOSTER, G. R. ; ONSTAD, C. Simulation of individual storms soil losses for modeling the impact of soil erosion on cropland productivity. In: EL-SWAFY, S. A. ; MOLDENHAUER, W. C. ; LO. **Soil Erosion and Conservation**. Ankeny : SCSA, 1985. p.285-295.
- LAMBE, T. W. ; WHITMAN, R. V. **Soil Mechanics**. New York : John Wiley & sons, 1979. 553p. SI Version
- LEI, T.; NEARING, M. A. ; HAGHIGHI, K.; BRALTS, V. F. Rill erosion and morphological evolution: a simulation model. **Water Resources Research**, Washington, v. 34, n. 11, p. 3157-3168, 1998.
- LOPES, P. R. C. **Relações de erosão com tipos e quantidades de resíduos culturais espalhados uniformemente sobre o solo**. Porto alegre, 1994. 119 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do solo) – Programa de Pós Graduação em Agronomia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1984.
- LU, J. Y. ; CASSOL, E. A ; MOLDENHAUER, W. C. Sediment transport relations for sand and silt loam soils. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 32, p. 1923-1931, 1989.
- MERRITT, E. The identification of four stages during micro-rill development. . **Earth Surface Processes and Landforms**, New York, v. 9, p. 493 – 496, 1984.
- MERTEN, G. E. **Dinâmica da erosão em sulcos alterada pelo incremento da descarga sólida**. Porto Alegre, 2000. 116 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.
- MEYER, L. D. How rain intensity affects interrill erosion. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.. 23, p.1472-1475, 1981.
- MEYER, L.D.; HARMON, W.C. Multiple intensity rainfall simulator for erosion research on row sideslopes. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.22, p.100-103, 1979.
- MIRTSKHOULAVA, T. E. Erosional stability of cohesive soils. **Journal of Hydraulic Research**, Netherlands, v. 4, n. 1, p. 37-50, 1966.
- MIRTSKHOULAVA, T. E. Estimation of channel stability to scour in cohesive soils. In: MANTHEY, T. (Ed.) **Advances in sediment transport.**, Jablonna, Poland : Polish Academy of Sciences, 1981. p. 283-308.

- MOORE, I. D. ; FOSTER, G. R. Hydraulics and overland flow. In: ANDERSON, M. G.; BURT, T. P. **Process studies in hillslope hydrology**. Chichester, John Wiley & Sons, 1990. p. 215-254.
- MORGAN, R. P. C. ; QUINTON, J. N. ; SMITH, R. E. ; GOVERS, G. ; POESEN, J. W. A. ; AUERSWALD, K. ; CHISCI, G. ; TORRI, D. F. ; STYCZEN, M. E. ; FOLLY, A. J. V. **The European soil erosion model (EUROSEM): documentation and user guide, versão 3.6.** [S.l.] : Silsoe College : Cranfield University, 1998. 124 p.
- NEARING, M. A. ; BRADFORD, J. M. Single waterdrop splash detachment and mechanical properties of soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 49, p. 547-552, 1985.
- NEARING, M. A ; NORTON, L. D. ; BULGAROV, D. A ; LARIANOV, G. A ; WEST, L. T. ; DONTSOVA, K. M. Hydraulics and erosion in eroding rills. **Water Resources Research**, Washington, v. 33, n. 4, p. 865-876, p. 1997.
- NEARING, M. A ; WEST, L. T. ; BROW, L. C. A consolidation model for estimating changes in rill erodibility. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.31, n.3, p. 696-700, 1988.
- NEARING, M. A. ; PAGE, D. I. ; SIMANTON, J. R. ; LANE, L. J. Determining erodibility parameters from rangeland field data for a process-based erosion model. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 32, p. 919-924, 1989.
- PARSONS, A. J. P. ; STROMBERG, S. G. L. ; GREENER, M. Sediment-transport competence of rain-impacted interrill overland flow. **Earth Surface and Landforms**, New York, v. 23, p. 365-375, 1998.
- PONCE, V. M. **Engineering hydrology: principles and practices.** Englewood cliffs : PrenticeHall, 1989. 640 p.
- RAUWS, G. The initiation of rills on plane beds of non-cohesive sediments. **Catena Verlag**, Cremlingen-Destedt, suppl. n. 8, p. 1-15, 1987.
- RAUWS, G. ; GOVERS, G. Hydraulics and soil mechanical aspects of rill generation on agricultural soils. **Journal of Soil Science**, Baltimore, v. 39, p. 111-124, 1988.
- ROCKENBACH, C. A **Erosão em entressulcos sob diferentes coberturas por resíduos de trigo em um solo Podzólico Vermelho amarelo sob chuva simulada.** Porto Alegre, 1992. 108f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1992.
- SAVAT, J. The hydraulics of sheet flow on a smooth surface and the effect of simulated rainfall. **Earth Surface and Landforms**, New York, v. 2, p. 125 – 140, 1977.
- SAVAT, J. Resistance to flow in rough supercritical sheet flow. **Earth Surface processes and Landforms**, New York, v. 5, p. 103 – 122, 1980.

- SCHAFER, M. J. ; REICHERT, J. M. ; CASSOL, E. A. ; ELTZ, F. L. F. ; REINERT, D. J. Erosão em sulcos em diferentes preparos e estados de consolidação do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25 , n 2, p. 419-430, 2001.
- SIMONS, D. B. ; SENTURK, F. Sediment Transport Technology: water and sediment dynamics. In: WATER Resources Publications. [Colorado] : [s.n.], 1992. 897p.
- SOUZA, M.D. DE. **Infiltração de água em latossolo roxo distrófico submetido a diferentes manejos**. Porto Alegre, 1985. 131f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Programa de Pós Graduação em Agronomia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1985.
- SLATTERY, M. C. ; BRYAN, R. B. Hydraulic conditions for rill incision under simulated rainfall: a laboratory experiment. **Earth Surface Processes and Landforms**, New York, v. 17, p. 127 – 146, 1992.
- SWANSON, N. P. Rotating-boom rainfall simulator . **Transactions of the ASAE**, St, Joseph, v. 8, n. 1, p. 71-72, 1965.
- TOWER, G. D. Effective stresses in unsaturated soil and their applicability in the theory of critical state soil mechanics. **Journal of Soil Science**, Baltimore, v. 34, p. 429-435, 1983.
- TOWER, G. D. ; CHILDS, E. C. The mechanical strength of unsaturated porous granular material. **Journal of Soil Science**, Baltimore, v. 23, n 2, p. 481-498, 1972.
- WAN, Y. ; EL-SWAIF, S. A. Characterizing interrill sediment size by partitioning splash and wash processes. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 62, p. 430-437, 1998.
- YALIN, M. S. **Mechanics of sediment transport**. Oxford : Pergamon Press, 1972. 287 p.
- YANG, C. T. **Sediment transport: theory and practice**. [S.l.] : McGraw-Hill , 1996. 396 p.
- YOON, Y. N. ; WENZEL, H. G. Mechanics of sheet flow under simulated rainfall. **Journal of the Hydraulics Division - ASCE**, New York, v. 97, p. 1367-1386, 1971. HY 9
- WISCHMEIER, W. H. ; SMITH, D. D. **Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning**. Washington : USDA - Agricultural research, [1978] (Agricultural handbook, 537).
- ZHANG, X. C. ; NEARING, M. A. ; MILLER, W. P. ; NORTON, L. D. ; WEST, L. T. Modeling interrill delivery. . **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 62, p. 438-444, 1988.

7. APÊNDICES

APENDICE 1. Intensidades das chuvas simuladas (mm h^{-1}) dos experimentos da erosão em entressulcos no laboratório.

Tratamento	Declives		
	4,5%	9%	18%
Drenagem livre			
Repetição 1	74,43	65,17	66,30
Repetição 2	99,17	76,99	65,74
Repetição 3	97,90	76,60	--
Solo saturado			
Repetição 1	77,59	85,63	74,77
Repetição 2	92,54	84,92	86,05
Repetição 3	82,39	95,93	80,13

Apêndice 2. Intensidades das chuvas simuladas (mm h^{-1}) dos experimentos da erosão em entressulcos com resíduos de palha de soja no laboratório.

Repetição	Doses de Resíduos de soja na superfície (kg m^{-2})					
	0,0	0,05	0,1	0,2	0,4	0,8
1	69,62	73,75	64,87	71,42	75,12	75,83
2	81,12	79,62	77,59	73,00	73,36	75,12
3	74,77	75,47	64,37	70,36	58,45	72,30

Apêndice 3. Resumo das análises estatísticas do experimento da erosão em entressulcos em laboratório.

Variável	Fator	GL fator	GL resíduo	F calc.
Intensidade da chuva (60 cca e saturado)	declive	2	14	2,191
Intensidade da chuva (Resíduo)	dose	5	12	3,491
Vazão	60 cca	2	6	0,0148
Vazão	saturado	2	5	4,63
Concentração (60cca)	declive	2	6	17,27
D50 (60 cca)	declive	2	6	1,75
Froude (60 cca)	declive	2	6	49,49
Tensão cisalhante	declive	2	6	746,53
Desagregação (60cca)	declive	2	6	7,729
Vazão (saturado)	declive	2	5	4,63

Apêndice 4. Umidade gravimétrica do solo (kg kg^{-1}) nos blocos experimentais antes dos testes onde foram pré-formados os sulcos de erosão. Média de 4 repetições.

Profundidade (cm)	Bloco I	Bloco II	Bloco III
	1º ano		
0-10	0,093	0,094	0,090
10-20	0,136	0,137	0,129
	2º ano		
0-10	0,032	0,025	0,034
10-20	0,045	0,048	0,067

Apêndice 5. Declividade ($m m^{-1}$) dos sulcos e correspondentes fluxos extras aplicados no experimento com solo recém preparado (1 ano).

Bloco	-----Sulcos-----					
	1	2	3	4	5	6
1	0,0483	0,0533	0,0641	0,0583	0,0591	0,0616
2	0,6167	0,0666	0,0666	0,0666	0,0766	0,0808
3	0,0766	0,0733	0,0650	0,0691	0,0691	0,0716

Bloco	Vazões aplicadas nos Sulcos ($L min^{-1}$)					
	1	2	3	4	5	6
1	20	40	30	10	0	50
2	20	0	30	10	50	40
3	10	20	50	40	30	0

Apêndice 6. Declividade ($m\ m^{-1}$) dos sulcos e correspondentes vazões aplicadas no experimento com solo consolidado (2 ano).

Bloco	Sulcos					
	1	2	3	4	5	6
1	0,0733	0,07416	0,07167	0,0725	0,0816	0,07166
2	0,0657	0,06583	0,0658	0,0725	0,0716	0,0750
3	0,0633	0,0775	0,07750	0,0816	0,0683	0,0666

Bloco	Vazões aplicadas nos Sulcos ($L\ min^{-1}$)					
	1	2	3	4	5	6
1	80	0	40	100	60	20
2	20	40	0	80	60	100
3	20	100	0	60	80	40

Apêndice 7. Taxas de desagregação do solo em entressulcos (D_i) em ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$) para todos os testes realizados em condições de solo descoberto. Valores ajustados para intensidade de chuva de 75 mm h^{-1} .

Tratamento	-----(D_i) ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$)-----			média
Drenagem livre	Repetição 1	Repetição 2	Repetição 3	Média
0,045 (m m^{-1})	0,000360	0,000228	0,000384	0,000324
0,090 (m m^{-1})	0,000279	0,000777	0,000812	0,000623
0,180 (m m^{-1})	0,000738	0,001750	0,00692	0,001060
Saturado				
0,045 (m m^{-1})	0,000225	0,000105	0,000825	0,000385
0,090 (m m^{-1})	0,000434	0,000179	0,000547	0,000386
0,180 (m m^{-1})	0,000987	0,000897	0,000485	0,000787
Campo				
0,0915 (m m^{-1})	0,000421	0,000412	--	0,000417

Apêndice 8. Taxas observadas de desagregação do solo em entressulcos (D_i) em ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$) para todos os testes realizados com solo coberto por resíduos vegetais.

Dose de resíduo (kg m^{-2})	Taxa de Desagregação -----(D_i) ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$)-----			média
	Repetição 1	Repetição 2	Repetição 3	
0,00	0,000443	0,000443	0,000708	0,000531
0,05				0,000332
0,10	0,000268	0,0002027	0,000166	0,000212
0,20	0,000099	0,000105	0,000086	0,000097
0,40	0,000046	0,000062	0,000027	0,000054
0,80	0,000015	0,000012	0,000017	0,000015

Apêndice 9. Taxas de desagregação do solo em entressulcos (D_i , $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$) para todos os testes realizados com solo coberto por resíduos vegetais. Valores ajustados para intensidade média de chuva de 75 mm h^{-1} .

Dose de resíduo (kg m^{-2})	Taxa de Desagregação ⁽¹⁾			média
	-----(D_i) ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$)-----			
	Repetição 1	Repetição 2	Repetição 3	
0,00	0,000514	0,000379	0,000712	0,000535
0,05				0,000321
0,10	0,000358	0,000189	0,000225	0,000258
0,20	0,000109	0,000111	0,000097	0,000106
0,40	0,000046	0,000065	0,000044	0,000051
0,80	0,000015	0,000012	0,000018	0,000015

(1) $D_{in} = D_o \times (I_p / I_o)^2$, onde D_{in} = taxa de desagregação normalizada ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$); D_o = taxa de desagregação observada ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$); I_p = intensidade de chuva planejada (mm h^{-1}); I_o = intensidade de chuva observada (mm h^{-1});

Apêndice 10. Valores médios de características hidráulicas do escoamento nos sulcos pré-formados em solo recém preparado, determinados durante os primeiros 10 minutos de aplicação concomitante de chuva simulada e de fluxos extras.

Fluxo Extra	Descarga Líquida Q (L s ⁻¹)	Velocidade Média Vm (m s ⁻¹)	Raio Hidráulico Rh (m)		Número de Reynolds Re	Número de Froude Fr	Reynolds de partícula Re*	Declive (m m ⁻¹)	Diâmetro das u* (mm)	Velocidade cisalhante u* (m s ⁻¹)	Tensão cisalhante Pa	Taxa de Desagregação (kg m ⁻² s ⁻¹)
0 L min ⁻¹												
Rep. 1	0,091	0,159	0,0097	0,0097	1,930	0,52	22,88	0,059	0,244	0,07503	5,60	0,0075
Rep. 2	0,087	0,135	0,0097	0,0097	1,639	0,44	33,42	0,077	0,313	0,08542	7,25	0,0062
Rep. 3	0,079	0,129	0,0097	0,0097	1,566	0,42	26,12	0,072	0,253	0,08258	6,78	0,0063
Média	0,086	0,141	0,0097	0,0097	1,711	0,46	27,47	0,069	0,270	0,081	6,54	0,0067
10 L min ⁻¹												
Rep. 1	0,250	0,253	0,0144	0,0144	4,554	0,67	38,46	0,058	0,339	0,09075	8,19	0,0158
Rep. 2	0,201	0,201	0,0144	0,0144	3,618	0,53	41,10	0,067	0,339	0,09700	9,35	0,0143
Rep. 3	0,199	0,204	0,0144	0,0144	3,672	0,54	39,53	0,062	0,339	0,09328	8,65	0,0111
Média	0,217	0,219	0,0144	0,0144	3,948	0,58	39,70	0,062	0,339	0,094	8,73	0,0137
20 L min ⁻¹												
Rep. 1	0,646	0,258	0,0150	0,0150	4,838	0,67	18,57	0,048	0,1762	0,08431	7,07	0,0177
Rep. 2	0,488	0,250	0,0150	0,0150	4,688	0,65	17,28	0,062	0,1451	0,09526	9,02	0,0159
Rep. 3	0,331	0,223	0,0150	0,0150	4,181	0,58	18,05	0,073	0,139	0,10386	10,72	0,0177
Média	0,488	0,244	0,0150	0,0150	4,569	0,64	17,96	0,061	0,153	0,111	8,94	0,0171

Apêndice 10. Continuação

	V_{10}	V_{1m}	R_{10}								
30 L min ⁻¹											
Rep. 1	0,600	0,258	0,0206	6,636	0,57	48,20	0,064	0,339	0,11375	12,86	0,0265
Rep. 2	0,343	0,231	0,0159	4,599	0,58	43,23	0,067	0,339	0,10201	10,35	0,0198
Rep. 3	0,555	0,245	0,0199	6,080	0,56	49,16	0,069	0,339	0,11601	13,38	0,0282
Média	0,499	0,245	0,0188	5,772	0,57	46,86	0,067	0,339	0,111	12,20	0,0248
40 L min ⁻¹											
Rep. 1	0,623	0,253	0,0209	6,620	0,56	46,30	0,053	0,354	0,10462	10,88	0,0182
Rep. 2	0,700	0,320	0,0221	8,819	0,69	55,57	0,081	0,336	0,13230	17,40	0,0343
Rep. 3	0,531	0,257	0,0195	6,250	0,59	44,93	0,069	0,313	0,11484	13,11	0,0259
Média	0,618	0,277	0,0208	7,230	0,61	48,93	0,068	0,334	0,117	13,80	0,0261
50 L min ⁻¹											
Rep. 1	0,764	0,364	0,0235	10,693	0,76	52,7	0,062	0,354	0,11917	14,12	0,0240
Rep. 2	0,739	0,311	0,0235	9,136	0,65	55,8	0,077	0,336	0,13289	17,56	0,0375
Rep. 3	0,711	0,269	0,0235	7,902	0,56	47,8	0,065	0,313	0,12241	14,90	0,0270
Média	0,738	0,315	0,0235	9,243	0,66	52,1	0,068	0,334	0,125	15,53	0,0295

Apêndice 11. Valores médios de características hidráulicas do escoamento nos sulcos pré-formados em solo consolidado determinados durante os primeiros 10 minutos de aplicação concomitante de chuva simulada e de fluxos extras.

Fluxo Extra	Descarga Líquida Q (L s ⁻¹)	Velocidade Média Vm (m s ⁻¹)	Raio Hidráulico Rh (m)	Número de Reynolds Re	Número de Froude Fr	Reynolds de partícula Re*	Declive (m m ⁻¹)	Diâmetro das d ₆₅ (mm)	Velocidade cisalhante u* (m s ⁻¹)	Tensão Cisalhante (Pa)	Taxa de Desagregação (kg m ⁻² s ⁻¹)
5 L min ⁻¹											
Rep. 1	0,082	0,161	0,0125	2.520	0,46	54,64	0,074	0,458	0,09544	9,06	0,0015
Rep. 2	0,089	0,147	0,0125	2.301	0,42	51,47	0,066	0,458	0,08990	8,04	0,0004
Rep. 3	0,083	0,150	0,0125	2.348	0,43	55,86	0,078	0,458	0,09756	9,46	0,0005
Média	0,085	0,153	0,0125	2.389	0,44	53,99	0,072	0,458	0,094	8,85	0,0008
20 L min ⁻¹											
Rep. 1	0,439	0,322	0,0098	3.945	1,04	53,54	0,072	0,516	0,08300	6,85	0,0015
Rep. 2	0,349	0,361	0,0098	4.422	1,16	51,26	0,066	0,516	0,07947	6,28	0,0007
Rep. 3	0,348	0,300	0,0098	3.675	0,97	50,32	0,063	0,516	0,07801	6,05	0,0005
Média	0,379	0,328	0,0098	4.014	1,06	51,70	0,067	0,516	0,080	6,39	0,0009
40 L min ⁻¹											
Rep. 1	0,425	0,245	0,0099	3.023	0,79	55,19	0,072	0,53	0,08330	6,90	0,0012
Rep. 2	0,892	0,421	0,0099	5.194	1,35	52,84	0,066	0,53	0,07976	6,32	0,0015
Rep. 3	0,847	0,375	0,0099	4.627	1,21	53,20	0,067	0,53	0,08030	6,41	0,0013
Média	0,721	0,347	0,0099	4.281	1,12	53,74	0,068	0,530	0,081	6,55	0,0013

Apêndice 13. Temperatura (T) e viscosidade cinemática (ν) da água nos experimentos em entressulcos em solo descoberto sob a tensão de água no solo equivalente a 60 cca, e sob solo saturado.

Declive	T (°C)			ν (m ² s ⁻¹)		
	Rep.1	Rep.2	Rep.3	Rep.1	Rep.2	Rep.3
60 cca						
4,5	20,5	19	19	$9,90 \times 10^{-7}$	$1,03 \times 10^{-6}$	$1,03 \times 10^{-6}$
9	15	19	23	$1,14 \times 10^{-6}$	$1,03 \times 10^{-6}$	$9,36 \times 10^{-7}$
18	15	19	23	$1,14 \times 10^{-6}$	$1,03 \times 10^{-6}$	$9,36 \times 10^{-7}$
Saturado						
Declive	Rep.1	Rep.2	Rep.3	Rep.1	Rep.2	Rep.3
4,5	13	19	19	$1,20 \times 10^{-6}$	$1,03 \times 10^{-6}$	$1,03 \times 10^{-6}$
9	16	16	16	$1,11 \times 10^{-6}$	$1,11 \times 10^{-6}$	$1,11 \times 10^{-6}$
18	15	15	18	$1,14 \times 10^{-6}$	$1,14 \times 10^{-6}$	$1,05 \times 10^{-6}$

Apêndice 14. Temperatura (T) e viscosidade cinemática (ν) da água nos experimentos em entressulcos com resíduos de palha de soja.

Repetição	Tratamento – Doses de resíduos de soja (kg m ⁻²)					
	0,00	0,05	0,10	0,20	0,40	0,80
	----- Temperatura (°C) -----					
1	18	18	20	19	13	13
2	16	15	14	14	15	19
3	14	14	18	19	15	19
	Viscosidade cinemática (m ² s ⁻¹)					
1	$1,05 \times 10^{-6}$	$1,05 \times 10^{-6}$	$1,00 \times 10^{-6}$	$1,03 \times 10^{-6}$	$1,20 \times 10^{-6}$	$1,20 \times 10^{-6}$
2	$1,19 \times 10^{-6}$	$1,14 \times 10^{-6}$	$1,17 \times 10^{-6}$	$1,17 \times 10^{-6}$	$1,14 \times 10^{-6}$	$1,03 \times 10^{-6}$
3	$1,17 \times 10^{-6}$	$1,17 \times 10^{-6}$	$1,05 \times 10^{-6}$	$1,03 \times 10^{-6}$	$1,14 \times 10^{-6}$	$1,03 \times 10^{-6}$

8. VITA

José Ramon Barros Cantalice, filho de José Cantalice de Barros e Terezinha Barros Cantalice, nascido no vigésimo primeiro dia do mês de junho de 1962, é natural da cidade de Campina Grande do Estado da Paraíba. Residente na cidade de Recife-PE desde os 4 anos de idade, voltou a Paraíba para cursar Agronomia na Universidade Federal da Paraíba no ano de 1983, tendo concluído o referido curso, em 1987. Iniciou o Curso de Mestrado em Ciência do Solo na Universidade Federal Rural de Pernambuco em 1989, que foi concluído no Ano de 1991. Prestou concurso público para disciplina de Conservação do Solo da Universidade Federal Rural de Pernambuco em 1992, tendo assumido a referida disciplina em agosto de 1994. Casou-se com Maria Helena Santiago Mendes Cantalice no ano de 1995, tendo dois filhos, Guilherme Santiago Mendes Cantalice e Clara Barros Mendes Cantalice.

Deu início ao Curso de Doutorado em Ciência do Solo da Universidade Federal do Rio Grande do Sul em março de 1997, sob orientação do Dr. Elemar Antonino Cassol, o qual foi concluído em setembro de 2001. Faz parte da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, e da Associação Brasileira de Recursos Hídricos.